

Е.М. Булыжев, Л.В. Худобин

Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке



МАШИНОСТРОЕНИЕ

Е.М. Булыжев, Л.В. Худобин

Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке



МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2004

Рецензенты:

д-р техн. наук **М.Г. Косов** (МГТУ «СТАНКИН»),

д-р техн. наук **Н.В. Носов** (Самарский ГТУ)

Булыжев Е. М., Худобин Л. В.

Б 90 Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке. М.: Машиностроение, 2004. — 352 с., ил.

ISBN 5-217-03266-9

Монография посвящена решению проблемы ресурсосберегающего экологизированного обеспечения машиностроительных и металлургических производств смазочно-охлаждающими жидкостями (СОЖ). Представлены: концепция ресурсосберегающего и экологизированного применения СОЖ при металлообработке, математические модели дисперсного состояния СОЖ, очистки их от механических примесей и систем применения СОЖ; новые ресурсосберегающие технологии обеспечения машиностроительных и других производств СОЖ; оригинальные установки серии «Вита-С» для приготовления, аккумуляции, очистки СОЖ и снабжения ими технологического оборудования в замкнутом безотходном цикле, а также другие установки «Вита» для восстановления и разложения отработанных жидкостей, регенерации масла и переработки шламов, извлеченных из СОЖ.

Технологические и технические разработки, представленные в книге, удостоены премии Правительства Российской Федерации 2003 года в области науки и техники.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников, студентов, аспирантов и преподавателей.

УДК 621.892:621.7/9-192
ББК 34.63

ISBN 5-217-03266-9

© Е. М. Булыжев, Л. В. Худобин
© ОАО «Издательство «Машиностроение», 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ПРИМЕНЕНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ	10
1.1. Функциональные действия СОЖ при обработке резанием	10
1.2. Изменение свойств и технологической эффективности СОЖ при ее функционировании	21
1.3. Вероятностное моделирование профиля поверхности детали, шлифованной с применением СОЖ	37
1.4. Предотвращение деградации СОЖ	53
1.5. Концепция ресурсосбережения и экологизации в системах применения СОЖ в машиностроительных производствах	60
1.5.1. Принципиальные положения	60
1.5.2. Технологии и системы применения СОЖ на машиностроительных и металлургических предприятиях	66
1.5.3. Критерии оценки эффективности и перспективные направления развития технологии и техники применения СОЖ	76
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ	81
2.1. Моделирование и параметрический анализ систем применения СОЖ	81
2.2. Критериальная модель дисперсного состояния СОЖ	103
2.3. Стабильность процесса очистки СОЖ, применяемой на операциях механической обработки	120
2.4. Моделирование и анализ системы применения СОЖ при холодной листовой прокатке	131
2.5. Расчет параметров чистоты СОЖ и характеристик очистителей как результатов взаимодействия двух распределенных систем	142
2.6. Вероятностное моделирование развития сложных технологических систем	158
Глава 3. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ	176
3.1. Ресурсосберегающий экологизированный технологический процесс применения СОЖ при металлообработке	176
3.2. Технология очистки СОЖ от механических примесей	186
3.3. Технология защиты СОЖ от микробиологического поражения	204
3.4. Технология восстановления СОЖ	209
3.5. Технология переработки шламов	215
3.6. Технологии извлечения масла из шламов и отработанной СОЖ и последующей их регенерации	222
Глава 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ СОЖ	227
4.1. Гравитационные очистители	227
4.2. Ресурсосберегающие фильтры	240
4.3. Электромагнитные сепараторы	257
4.4. Патронные магнитные сепараторы	267
Глава 5. НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ	297
5.1. Общая характеристика нового оборудования	297
5.2. Установка «Вита-С»	298
5.3. Установка «Вита-В» для восстановления СОЖ	317
5.4. Установка «Вита-Р» для разложения СОЖ	321
5.5. Установка «Вита-М» для регенерации масла	325
5.6. Установка «Вита-Ш» для переработки шлама	327
5.7. Ресурсосберегающая экологизированная система применения СОЖ на основе установок «Вита»	333
5.8. Использование в промышленности нового оборудования для применения СОЖ	335
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	347

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая вниманию читателей монография написана по результатам многолетних исследований и опытно-конструкторских работ, выполненных под руководством авторов в Ульяновском государственном техническом университете, и на основе обобщения опыта машиностроительной и металлургической промышленности. Весь комплекс выполнен с целью минимизации потерь производственных ресурсов, затрачиваемых при реализации технологических процессов металлообработки с использованием СОЖ, и исключения сбросов отработанной СОЖ и продуктов ее переработки в окружающую среду путем обеспечения замкнутых технологических циклов применения СОЖ.

В книге рассмотрены общие вопросы применения СОЖ при механической обработке, дано научное обоснование разработки технологий и технических средств ресурсосберегающего экологически чистого обеспечения машиностроительных и других предприятий СОЖ.

Налажено серийное производство оригинальных установок «Вита-С» любой производительности для приготовления, очистки и циркуляции СОЖ по замкнутому циклу, «Вита-В» – для восстановления отработанных СОЖ, «Вита-Р» – для разложения не подлежащих восстановлению отработанных СОЖ, «Вита-М» – для регенерации минеральных масел, в том числе извлеченных из отработанных СОЖ, «Вита-Ш» – для переработки металлодержащих шламов в брикеты. Установки «Вита» выполнены в виде отдельных модулей, что обеспечивает, во-первых, возможность наиболее эффективной модернизации существующих на предприятии систем применения СОЖ, а во-вторых, доступность для предприятий ресурсосберегающего экологизированного технологического процесса применения СОЖ. Однако полностью реализовать этот технологический процесс можно только при использовании всего комплекса установок «Вита». Если предприятие не может приобрести весь этот комплекс, рекомендуется на начальном этапе ограничиться многофункциональной установкой «Вита-С», реализовав тем самым необходимую в любом случае часть технологического процесса применения СОЖ и обеспечив поддержание в течение длительного времени нормированных функциональных и эксплуатационных свойств СОЖ путем качественной очистки ее от механических примесей и «инородных» масел.

Авторы будут признательны читателям за отзывы, замечания и предложения, которые можно направлять по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, Ульяновский государственный технический университет, кафедра «Технология машиностроения»; телефон (8422) 418247, E – mail: kafedra_tm@mf.ulstu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленный подъем в России невозможен без переориентации промышленности на экологически чистые ресурсосберегающие технологии на основе тесной интеграции науки и производства во всех отраслях промышленности.

Большинство современных технологических процессов обработки металлов в машиностроительных и металлургических производствах невозможно без применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), способствующих существенному увеличению стойкости инструмента, повышению производительности и качества обработки. Однако при этом отработанные СОЖ и продукты их переработки остаются одним из главных источников загрязнения окружающей среды. Так, по данным государственного доклада «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1999 году» годовой сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водоемы машиностроительными и металлургическими предприятиями России составил в 1999 г. более 1600 млн. м³, а совокупная доля машиностроительной и металлургической отраслей в сбросе загрязненных сточных вод предприятиями отечественной промышленности составляет 25,7%. СОЖ по существу остаются расходными материалами, их коэффициент полезного использования невелик, а затраты на применение СОЖ достигают 16 % стоимости изготовления изделия, что втрое превышает затраты на инструмент [2].

Современное состояние машиностроительного комплекса России делает проблему ресурсосберегающего экологизированного применения СОЖ все более актуальной. Это обусловлено рядом причин: необходимостью существенного повышения производительности механической обработки и стабилизации качества выпускаемой продукции (деталей); неуклонным ростом стоимости нефтепродуктов, являющихся основой многих СОЖ; ухудшением экологической ситуации и ужесточением требований к охране окружающей среды и, в частности, к экологической чистоте и безопасности производственных технологий; все более увеличивающейся долей в себестоимости готовой продукции затрат на СОЖ.

Чтобы обеспечить дальнейшее развитие технологии и техники применения СОЖ, необходимо разработать основы создания малоотходных предельно замкнутых технологий и оборудования для систем применения (СП) СОЖ с минимальным потреблением исходных продуктов, учитывающие как общетехнические принципы построения сложных систем, так и законы социоприродного развития.

В процессе функционирования СОЖ неизбежно загрязняется механическими примесями и инородными маслами, подвергается негативному воздействию микрофлоры. Эти процессы приводят к ухудшению выходных показателей операций металлообработки, сокращению срока функционирования самих СОЖ и увеличению затрат на них. Поэтому задачи качественной очистки СОЖ от посторонних примесей, борьбы с микробиологическим поражением и стабилизации свойств СОЖ в процессе функционирования являются первостепенными при разработке ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ. Основными факторами, сдерживающими использование этих систем в машиностроительных и металлургических производствах, остаются их высокие капиталоёмкость и эксплуатационные затраты и, как следствие, недоступность этих систем для большинства предприятий.

В книге представлены научно обоснованные технологические и технические решения, внедрение которых внесло значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса путем ресурсосберегающего экологизированного технологического обеспечения машиностроительных и других производств смазочно-охлаждающими жидкостями, позволяющего повысить и стабилизировать на длительный срок производительность механической обработки резанием и давлением и качество продукции (деталей), снизить потребление ресурсов и повысить экологическую безопасность производств:

системные положения по созданию технологического обеспечения качества, производительности, экономической эффективности и экологической безопасности металлообрабатывающих производств, заключающиеся в научно обоснованных технологических и технических разработках, проектировании и реализации технологии и оборудования систем применения СОЖ;

математические модели, описывающие взаимосвязи параметров качества поверхностей деталей, обработанных с применением СОЖ, с параметрами качества последней, например, загрязненной механическими примесями;

комплекс математических моделей СП СОЖ, описывающих динамику изменения состояния СОЖ (дисперсного состава, концентрации механических примесей и «инородных» масел) в процессе ее функционирования, а также процессы очистки СОЖ в электромагнитных и магнитных сепараторах, гравитационных очистителях, фильтровальных установках, и позволяющих рассчитать основные конструктивные и режимные параметры этих очистителей, и математическая модель шероховатости поверхности, шлифованной с применением СОЖ, загрязненной механическими примесями;

комплекс принципов создания и функционирования и критерии оценки эффективности систем применения СОЖ, а также общая структурная модель таких систем;

балансовый метод исследования и прогнозирования изменения состава и состояния СОЖ в процессе ее функционирования, позволяющий оценивать эффективность и экологичность СП СОЖ как качественно, так и количественно;

результаты моделирования и исследования динамики изменения концентрации механических примесей в СОЖ, на основе которых предложен эффективный метод ее очистки – двухконтурная неполнопоточная очистка, при которой функция очистки разделяется на две: первая – удаление основной массы механических примесей (первый контур), поступающих с технологического оборудования, вторая – предотвращение накопления мелкодисперсных частиц механических примесей в СОЖ (второй контур);

метод расчета подсистем очистки СОЖ путем решения прямых и обратных задач взаимодействия двух распределенных систем последовательно для каждой ступени системы очистки;

результаты теоретико-экспериментальных исследований очистки СОЖ в электромагнитных и магнитных полях, ленточных фильтрах, гравитационных и флотационных очистителях, микробиологического поражения СОЖ, а также поиска эффективных методов борьбы с ним;

новые технологии восстановления и разложения отработанных СОЖ, регенерации минеральных масел (в том числе извлеченных из отработанных СОЖ); переработки металлосодержащих шламов в брикеты; схемотехнические и конструктивные решения новой техники, реализующей эти технологии;

результаты промышленных испытаний и внедрения новых технологий и техники применения СОЖ.

В первой главе показано большое значение СОЖ для обеспечения и стабилизации высокой производительности механической обработки и качества изделий, повышения работоспособности режущих инструментов. Установлено, что в процессе функционирования СОЖ постепенно теряет исходный технологический потенциал, первопричиной чего является загрязнение СОЖ механическими и другими примесями. Разработана математическая модель для оценки микропрофиля шлифованной поверхности, учитывающая загрязнение СОЖ механическими примесями. Выявлено, что используемые в машиностроении технологии и техника применения СОЖ не отвечают современным техническим и экологическим требованиям.)

Разработаны мероприятия по предотвращению деградации СОЖ, применяемой при механической обработке.

Предложена концепция создания ресурсосберегающих экологизированных систем применения СОЖ в машиностроительных производствах, включающая комплекс соответствующих принципов и критериев, а также рациональный структурный состав таких систем.

Во второй главе сформулирован общий подход к построению математических моделей СП СОЖ, позволяющий учитывать как детерминированные, так и стохастические ее особенности. Разработана математическая модель СП СОЖ, открытая для включения моделей подсистем приготовления СОЖ, их контроля и диагностики, а также моделей влияния СП СОЖ на показатели основного производства и позволяющая решать задачи параметрического анализа СП СОЖ. Разработаны модели изменения дисперсного состояния СОЖ на этапах ее приготовления и функционирования, уточняющие базовую модель. Предложены: балансовый метод исследования и оценки изменения состава и состояния СОЖ в процессе функционирования, позволяющий оценивать эффективность и экологичность СП СОЖ как качественно, так и количественно; метод расчета подсистем очистки СОЖ путем решения прямых и обратных задач взаимодействия двух распределенных систем последовательно для каждой ступени системы очистки. Приведены результаты экспериментальной проверки адекватности всех теоретических разработок.

На основе моделирования и исследования динамики изменения концентрации механических примесей в СОЖ предложен и реализован эффективный метод ее очистки – двухконтурная неполнопоточная очистка, при которой функция очистки разделяется на две: первая – удаление основной массы механических примесей, поступающих в СОЖ с технологического оборудования, вторая – предотвращение накопления мелкодисперсных частиц механических примесей в СОЖ. Эти функции выполняют разные контуры подсистемы очистки: в первом контуре СОЖ очищается высокопроизводительным относительно «грубым» очистителем; во втором контуре осуществляется периодическая или непрерывная неполнопоточная тонкая очистка.

В третьей главе на основе разработанной системы принципов и критериев предложен ресурсосберегающий экологизированный технологический процесс применения СОЖ и разработана структура СП СОЖ, реализующая этот процесс. Показана принципиальная возможность бессточной эксплуатации СОЖ путем управления интенсивностью накопления в СП СОЖ механических примесей, «инородных» масел, микрофлоры и солей.

На основе выполненной классификации и анализа подсистем очистки СОЖ и их элементов разработаны высокоэффективные технологии очистки СОЖ. Предложены схмотехнические решения подсистемы очистки СОЖ многоступенчатой и многоконтурной компоновок.

В этой же главе приведены результаты исследований развития микрофлоры в СОЖ при различных условиях ее функционирования, позволяющие разработать технологию защиты СОЖ от микробиологического поражения путем использования антагонизма анаэробных и аэробных бактерий на основе периодической аэрации СОЖ и непрерывного удаления из нее механических примесей и «инородных» масел. Разработанная технология позволяет исключить использование в процессе приготовления СОЖ биоцидов.

Предложена эффективная технология восстановления отработанных эмульсионных СОЖ без их разложения на масляную и водную фазу. Экспериментально подтверждено, что наиболее эффективным методом подавления микрофлоры в восстановленных СОЖ является пастеризация.

Представлены новые технологии утилизации отходов СП СОЖ путем рекуперации металла из шламов и последующей его переработки в брикеты для плавильного производства, а также рекуперации масла из шламов и отработанной СОЖ и последующей их регенерации.

Четвертая глава содержит результаты теоретико-экспериментальных исследований очистки СОЖ в электромагнитных и магнитных полях, ленточных фильтрах, гравитационных и флотационных очистителях. На основе результатов моделирования разработаны методики расчета и даны рекомендации по проектированию соответствующих устройств.

Пятая глава посвящена описанию установок серии «Вита», реализующих ресурсосберегающий технологический процесс применения СОЖ при металлообработке и позволяющих системно решать вопросы очистки СОЖ от механических примесей и «инородных» масел, их восстановления, утилизации шламов и отработанных СОЖ.

В установках серии «Вита» реализованы новые технологические, конструктивные и схмотехнические решения, защищенные двадцатью двумя авторскими свидетельствами, патентами на изобретения и свидетельствами на полезные модели.

Научные, технологические и технические разработки, представленные в настоящей книге, удостоены премии Правительства Российской Федерации 2003 года в области науки и техники за работу «Разработка научно-технических основ и создание промышленных комплексов безотходного применения технологических жидкостей при обработке металлов», а также медалей и дипломов международных выставок.

Глава 1

ПРИМЕНЕНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

1.1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ДЕЙСТВИЯ СОЖ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Смазочно-охлаждающие технологические средства, более 95 % которых составляют СОЖ, стали неотъемлемым элементом технологических процессов современных машиностроительных и металлургических производств. Рациональное применение СОЖ позволяет существенно улучшить экономические показатели производства за счет увеличения производительности обработки, улучшения качества продукции, повышения стойкости инструментов, уменьшения энергозатрат на механическую обработку [1, 36, 48, 51, 59, 73, 78, 81, 83 – 85, 94 – 97, 103, 105 и др.]. Более того, многие технологические процессы металлообрабатывающих производств вообще невозможны без применения СОЖ.

Выпускаемые в промышленном масштабе СОЖ принято подразделять на два основных класса – водные (эмульсии, синтетические и полусинтетические СОЖ) и масляные. Масляные СОЖ преимущественно применяют в состоянии поставки, тогда как водные СОЖ готовят на машиностроительных и других предприятиях, вводя тем или иным способом в основную фазу (воду) так называемые исходные продукты (концентраты).

Мировой объем потребления СОЖ постоянно увеличивается и на сегодняшний день составляет 2,0 – 2,5 млн. тонн концентратов в год. Наряду с ростом потребления СОЖ наблюдается все большая их специализация, заключающаяся в ориентировании на конкретные технологические операции и обрабатываемые материалы и сопровождающаяся ужесточением требований к качеству СОЖ. В результате, с одной стороны, расширяется номенклатура выпускаемых СОЖ, усложняется химический состав и увеличивается стоимость как самих СОЖ, так и их обслуживания, а с другой стороны, – усложняются и обособляются технологии применения СОЖ. Между тем, известно, что именно высокоэффективные (содержащие, как правило, наиболее химически активные присадки) СОЖ создают большую опасность для окружающей среды и здоровья работающих. Для

эффективного использования СОЖ, как и любого другого «инструмента» металлообработки, необходимы не только исчерпывающие знания о его назначении и возможностях, но и навыки его рационального применения и обслуживания. Только при этих условиях СОЖ становится экономически выгодным и технологически эффективным «инструментом».

К настоящему времени на базе результатов теоретико-экспериментальных исследований физико-механических, физико-химических и других процессов, протекающих при механической обработке заготовок с применением СОЖ, разработаны научные основы создания и ассортимента высокоэффективных жидкостей с функциональными свойствами, оптимизированными для конкретных технологических операций. Сложилась определенная система научных представлений о роли и механизмах действия СОЖ в процессах обработки материалов резанием. Однако сложность и многогранность физико-химических процессов, протекающих при резании с применением СОЖ, широчайшие диапазоны варьирования множества факторов, определяющих эффективность их действия, исключают пока возможность дать однозначные рекомендации по вопросам выбора и применения СОЖ, возникающим при разработке технологии изготовления деталей [7].

Масляные СОЖ поступают на металлообрабатывающие предприятия в готовом для применения виде и представляют собой обычно высокоочищенные нефтяные масла с присадками того или иного назначения. Иногда используют значительно более дорогие, но зато отличающиеся высокой термостабильностью, химической инертностью, хорошими антифрикционными и противоизносными свойствами, синтетические масла или их смеси с нефтяными маслами. Масляные многоцелевые СОЖ могут служить одновременно и в качестве смазки в парах трения механизмов станков, и рабочей жидкостью в гидроприводах.

Водные СОЖ готовят на машиностроительных и металлургических предприятиях, вводя тем или иным способом в основную фазу (воду) так называемые исходные продукты (концентраты). В зависимости от размеров частиц дисперсной фазы, образующейся в воде, получают эмульсии (грубодисперсные смеси с размерами частиц 10^{-5} см и более), полусинтетические (полупрозрачные растворы коллоидной дисперсности ($10^{-6} \dots 10^{-5}$ см) и синтетические СОЖ (прозрачные растворы молекулярной дисперсности ($10^{-7} \dots 10^{-6}$ см), растворы электролитов (ионная дисперсность до 10^{-7} см).

Технологическая эффективность СОЖ определяется комплексом ее функциональных действий в процессе обработки резанием – смазочным, диспергирующим, охлаждающим и моющим.

Смазочное действие СОЖ заключается в экранирующем и антифрикционном эффектах вследствие образования на контактирующих поверхностях режущего инструмента и обрабатываемой заготовки вторичных структур (пленок), предотвращающих непосредственный контакт обрабатываемого и инструментального материалов.

Согласно концепции смазочного действия М.И. Клушина [51], СОЖ (внешняя среда) может произвести химическое, диффузионно-химическое, контактно-гидродинамическое смазочные действия, диспергирующее физико-химическое или смазочно-диспергирующее действие. Однако эти действия (кроме диспергирующего) возможны лишь при условии, что СОЖ проникнет непосредственно в зоны взаимодействия вновь образующихся на стружке, заготовке и инструменте поверхностей.

Внешняя среда может поступать в эти зоны через сеть капилляров между поверхностями стружки и инструмента, за счет образования полостей (пор) при периодическом срыве нароста и нарушении плотности контакта между инструментом и заготовкой, вследствие колебаний в технологической системе, в результате диффузии атомов молекул или ионов СОЖ через насыщенный дефектами материал стружки [59]. Движущими силами проникновения среды через поры и капилляры стружки могут быть: вакуум, образующийся при срыве нароста; гидростатическое давление; силы химического взаимодействия, в том числе поверхностная миграция (диффузия) поверхностно-активных молекул; адсорбционные явления; внешние электрические и магнитные поля; колебания, особенно ультразвуковой частоты, и др. СОЖ может поступить в ту или иную зону взаимодействия, не изменив своего исходного агрегатного состояния и химического состава, частично или полностью изменив агрегатное состояние и изменив химический состав, и, наконец, поступающая извне СОЖ может подвергнуться пиролизу с образованием новых химических продуктов, которые вступают в реакцию с кислородом, а затем с контактирующими при резании металлическими поверхностями. Первый вариант возможен при резании на низких скоростях, при очень малых силах и температурах и встречается в практике очень редко. Второй и третий варианты реализуются при применении масляных СОЖ, а четвертый вариант наиболее распространен, ибо практический уровень режимов резания, как правило, достаточно высок для того, чтобы контактная температура превышала не только температуру термического разложения, но и температуру кипения всех известных компонентов СОЖ.

В результате пиролиза вновь образующиеся продукты попадают в СОЖ и способствуют изменению ее компонентного состава.

Смазочное химическое и диффузионно-химическое действия СОЖ (см. выше) заключаются в образовании на поверхностях заготовки, инструмента и стружки окислов и других пленок (в зависимости от состава СОЖ, физико-химических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, режима резания). На этих поверхностях хемосорбируют атомы веществ, радикалы (осколки молекул), обладающие весьма высокой реакционной способностью.

По описанному механизму смазочное действие минеральных масел (без присадок) объясняется тем, что они «подают» кислород на площадки трения. Смазочная эффективность масел увеличивается по мере их окисления, а для обеспечения минимального износа режущего инструмента нужно обеспечить оптимальный расход кислорода, поступающего в контактную зону, чтобы предотвратить схватывание металлических поверхностей. Жировые присадки эффективны лишь при малых скоростях резания, а для усиления смазочного действия растительных масел и высших жирных кислот необходимо наличие в их составе связанной воды, выполняющей роль катализатора реакций, обуславливающих образование хемосорбционных пленок. Присадки серы и сероорганических соединений образуют на контактирующих поверхностях сульфиды металлов, хлороорганические присадки – хлориды, фосфорорганические присадки – фосфиды, а присадки йода и йодоорганических соединений – йодиды. Сочетание в масляной основе присадок серы и хлора или сочетание присадок этих двух групп с жирами и сильными поверхностно-активными веществами (ПАВ) дает синергический эффект, существенно повышая химическую активность СОЖ. Наиболее высокой термостойкостью обладают фосфиды и сульфиды, самой низкой – жировые пленки.

Ряд СОЖ, особенно содержащих жировые присадки, в определенных условиях резания оказывают контактно-гидродинамическое действие. Гипотетический механизм этого действия сводится к следующему [51]: контакт между стружкой и передней гранью инструмента, между заготовкой и передней гранью инструмента, между заготовкой и задней гранью имеет дискретный характер, и соприкосновение взаимодействующих поверхностей происходит по участкам истинного контакта, число и суммарная площадь которых невелики; образующиеся при резании полости и капилляры заполняются жидкой внешней средой или (значительно чаще) газообразной смесью, состоящей из молекул продуктов пиролиза этой среды, радикалов и отдельных атомов; при захлопывании пор и капилляров (а процесс их образования и захлопывания непрерывен)

пар может снова превратиться в жидкость, радикалы же и атомы вступят в активное взаимодействие с металлом, способствуя образованию химических пленок.

Таким образом, СОЖ могут образовывать на взаимодействующих при резании металлических поверхностях пленки четырех видов: 1) тонкие пленки первоокислов и химических соединений, обладающие высокой термостабильностью, эффективные при всех видах обработки резанием заготовок из любых материалов; 2) пленки ПАВ, имеющие относительно высокую термостабильность и наиболее эффективные в условиях, когда инструмент и обрабатываемый материал особенно склонны к адгезии и схватыванию; 3) толстые пленки, локализованные в макро- или микроплоскостях и обеспечивающие эффект контактно-гидродинамической смазки в режиме тяжелого граничного трения; 4) дискретные механические пленки, образованные инертными или активными по отношению к металлу твердыми, как правило, тонко диспергированными веществами, введенными в СОЖ.

Н.В. Талантов несколько иначе оценивал возможность проникновения СОЖ в контактные зоны при резании лезвийными инструментами [87, 88]: по передней поверхности инструмента, по мере возрастания скорости резания v возможны следующие виды контактного взаимодействия: наросты различных видов; пульсирующая контактная зона (П); упругий и пластический контакты с образованием в пределах последнего зоны относительного застоя (НЛ); пластический и упругий контакты (Н). При достижении характеристической скорости v_n контакт вида П переходит в контакт вида НЛ или Н (при резании твердыми сплавами, имеющими высокую теплопроводность, контакт вида НЛ не образуется). При резании со скоростями $v > v_n$ на участках пластического контакта между стружкой и инструментом устанавливается устойчивая адгезионная связь на атомном уровне, внешнее трение заменяется контактным пластическим течением, при котором попадание СОЖ в контакт невозможно. Не попадает СОЖ и на участки упругого контакта, так как при $v > v_n$ в контакте образуется слой металла толщиной 1...3 мкм, находящийся в условиях вязкого течения и заполняющий все субмикронеровности контактирующих поверхностей с установлением связей на атомном уровне. Таким образом, при резании на скоростях $v > v_n$ проникновение СОЖ в контакт невозможно и, следовательно, смазочное ее действие исключено. Напротив, при $v < v_n$ проникновение СОЖ в контакт между стружкой и инструментом возможно, и СОЖ, обладающая соответствующими свойствами, может проявить смазочное действие. В принципе аналогично пред-

ставляется и влияние СОЖ на взаимодействие между материалом заготовки и задней гранью инструмента, однако характеристическая скорость $v_{пз}$ при этом больше v_n . Отсюда, по мнению Н.В. Талантова, следует вывод, что при резании на скоростях $v < v_{пз}$ наиболее эффективны должны быть СОЖ, обладающие хорошими смазочными свойствами, а при $v > v_{пз}$ доминирующее значение приобретают охлаждающие свойства СОЖ.

Диспергирующее действие СОЖ проявляется как на обрабатываемой заготовке, так и в зоне контакта между заготовкой и инструментом и определяется его высокой поверхностной активностью – способностью непосредственно в зоне разрушения (резания) эффективно снижать поверхностную энергию (работу образования новой поверхности) обрабатываемого твердого тела (заготовки). Диспергирующее действие СОЖ включает эффекты пластификации и охрупчивания металла. Относительно слабо поверхностно-активная среда обеспечивает пластифицирующее действие, вследствие которого пластическая деформация локализуется в тонком поверхностном слое материала, выполняющем при резании роль смазки и препятствующем налипанию обрабатываемого металла на инструмент. Сильно поверхностно-активная среда производит режущее действие, охрупчивая металл заготовки. Диспергирующее действие СОЖ проявляется, разумеется, одновременно со смазочным.

Эффект П.А. Ребиндера, заключающийся в пластификации поверхностных слоев металла внешней средой (растворами поверхностно-активных веществ и расплавами некоторых легкоплавких металлов) вследствие адсорбционных эффектов, весьма чувствителен к скорости деформации. С возрастанием скорости резания он ослабляется и даже исчезает.

Моющее действие СОЖ проявляется в физико-химических, механических и гидродинамических процессах (отделение дисперсных продуктов от поверхностей заготовки и инструмента, стабилизация продуктов диспергирования и предотвращение их последующей десорбции заготовкой, инструментом или элементами системы применения СОЖ). В процессах абразивной обработки моющее действие СОЖ в ряде случаев становится доминирующим как средство предотвращения засаливания инструмента. Механизм моющего действия СОЖ, в силу своей сложности, до сих пор недостаточно исследован, а большинство современных СОЖ обладают невысокими моющими свойствами.

С помощью охлаждающего действия СОЖ, определяемого его теплофизическими свойствами и гидродинамическими условиями в зоне обработки, обеспечивается дополнительный отвод теплоты из этой зоны

и, как следствие, снижение контактных температур и особенно температур режущего инструмента и заготовки. В противоположность моющему действию, механизм охлаждающего действия СОЖ достаточно ясен, ибо в основе его лежат законы теплофизики. Известны [80, 95] и пути интенсификации охлаждающего действия СОЖ: использование в качестве СОЖ среды, обладающей наиболее высокой теплоемкостью и плотностью; использование СОЖ, обладающих наибольшей кинематической вязкостью; увеличение скорости относительного перемещения потока СОЖ и охлаждаемого объекта (заготовки или инструмента); уменьшение гидравлического эквивалентного диаметра этого объекта (путем увеличения смоченного периметра).

Эффективность действия СОЖ при лезвийной обработке заготовок из жаропрочных, тугоплавких, высокомарганцовистых сталей и сплавов с учетом влияния охлаждающего и смазочного действия СОЖ на механизмы пластической деформации в зоне резания, изнашивания инструмента и образования микронеровностей исследована в работах ЦНИИТМАШ [49, 50]. Показано, что в зоне низких скоростей резания, меньших «минимальной целесообразной скорости резания» v_0 , температура резания мало влияет на интенсивность износа инструмента, и основную роль играет смазочное действие СОЖ.

В зоне высоких скоростей резания, когда $v > v_0$ и температура резания оказывает решающее влияние на интенсивность износа, наибольшее значение имеет охлаждающее действие жидкостей. При непрерывном резании в этом диапазоне скоростей для снижения интенсивности износа целесообразно применение СОЖ с высокими охлаждающими свойствами как для быстрорежущего, так и для твердосплавного инструмента вследствие увеличения циклических термических напряжений. В связи с этим при прерывистом резании твердосплавным инструментом в случае необходимости следует применять пластичные или твердые смазки.

Функциональные действия СОЖ при абразивной обработке, особенно при шлифовании, рассмотрены в работах Л. В. Худобина [93 – 96 и др.], Ю. В. Полянского [73, 77], В. В. Ефимова [36] и других исследователей [10, 81, 111 и др.].

Длительное время считали, что смазочное действие СОЖ при шлифовании ограничивается уменьшением работы трения связки и частиц металла (отходов обработки), налипших на рабочую поверхность шлифовального круга, и созданием препятствий их налипанию, приводящему к засаливанию круга. Принимали, что в экстремальных условиях действия мощного температурно-скоростного фактора, свойственного процессу

шлифования, СОЖ не проникает в сплошной контакт абразив – металл и поэтому не оказывает никакого влияния на взаимодействие металла заготовки с режущими и давящими абразивными зернами, выполняющими работу диспергирования, пластического и упругого оттеснения металла, т.е. основные функции шлифования как вида обработки резанием.

В работах [93 – 96] Л. В. Худобин предложил иную концепцию проявления смазочного действия СОЖ при шлифовании: температура в контакте абразивное зерно – металл изменяется во времени по определенному закону, возрастая от исходной минимальной, равной при работе с использованием СОЖ температуре окружающей среды, до максимальной в зоне резания (диспергирования); при этом температура (и давление) в зоне упругого, а затем и пластического оттеснения металла в начальный период контактирования может быть еще далека от максимальной. На поверхности абразивного зерна, как показали электронно-микроскопические исследования, в результате правки формируется специфический субмикропрофиль, определяемый особенностями кристаллического строения абразивного зерна и условиями правки. Среднее расстояние между выступами субмикропрофиля на поверхности абразивного зерна составляет примерно 0,5 мкм, а высота выступов $h_a \approx (0,1 \dots 0,2)$ мкм (для сравнения: среднее расстояние между двумя соседними зернами для кругов зернистости 40 равно примерно 0,75 мм, высота выступающей части зерна – 0,23 мм, а диаметр поверхностной поры – 0,3 мм). В этих условиях контакт абразивного зерна с металлом будет не сплошным, а прерывистым, точечным. Отсюда вполне возможно проявление смазочного действия СОЖ, если, конечно, абразивное зерно и металл заготовки до начала контактирования были экранированы смазочными пленками достаточно высокой прочности и термостойкости, что в условиях прерывистого по своей сути процесса шлифования вполне осуществимо и чему способствует упомянутый рельеф рабочей поверхности абразивного зерна. Таким образом, смазочное действие внешних сред при шлифовании проявляется не только в уменьшении работы трения связки, частиц металла и отходов шлифования, налипших на рабочую поверхность шлифовального круга, но и, что особенно важно, в уменьшении работы трения режущих и давящих абразивных зерен путем эффективной защиты поверхности рабочей части абразивного зерна от адгезии металла и схватывания между металлом и абразивом. Изложенная концепция не только была подтверждена экспериментально, но и послужила основанием для разработки ряда высокоэффективных способов подачи СОЖ в зону обработки и, прежде всего, струйно-напорного внезонного способа.

Несколько позже было доказано аналитически и экспериментально, что СОЖ, попадающая в контакт шлифовальный круг – заготовка, способна заметно изменить динамическое состояние технологической системы, и на этой основе выдвинуто положение о демпфирующем действии СОЖ при шлифовании (смазочном действии на макроуровне). Показано, что уменьшение амплитуды колебаний сил резания и шлифуемой заготовки вследствие демпфирующего действия СОЖ сопровождается уменьшением высотных параметров шероховатости шлифованной поверхности. Очевидно, когда при лезвийной обработке СОЖ оказывает контактно-гидродинамическое действие (см. выше), возможно проявление в той или иной степени и демпфирующего действия СОЖ. Однако убедительных прямых доказательств этой гипотезы пока нет.

Исследования влияния СОЖ и ее функциональных действий на физические показатели процессов механической обработки резанием и на технологическую эффективность соответствующих операций широко представлены в литературе и в диссертационных работах [5, 9, 11, 27, 28, 31, 34, 35, 46, 57, 59, 68, 70, 82, 84 – 86, 92, 94, 97 и др.]. Исследователи едины в том, что рациональное применение СОЖ обеспечивает существенное уменьшение контактных температур, сил и мощности резания. Все это, в свою очередь, благоприятно сказывается на качестве обработанных поверхностей, приводит к увеличению периода стойкости режущего инструмента и открывает возможности увеличения производительности путем форсирования режима обработки.

В качестве иллюстрации приведем некоторые результаты исследований, выполненных в разные годы на кафедре «Технология машиностроения» УлГТУ в области обработки заготовок из различных материалов шлифованием. Это последнее, как известно, отличается особенно высокой энергоемкостью и теплосиловой напряженностью и практически невозможно без применения СОЖ. Так, И. Л. Худобин и Ю. В. Полянсков [77, 92] получили интересные результаты по влиянию состава и вязкости СОЖ на амплитуду A колебаний в технологической системе, силы шлифования P_y и P_z и период стойкости (наработку) шлифовального круга. Исследования были выполнены с широкой номенклатурой водных и масляных СОЖ, насчитывавшей 37 жидкостей и подобранной таким образом, чтобы по желанию исследователя можно было или исключить влияние химической активности СОЖ на показатели шлифования, или, наоборот, оценить эту активность с физической и технологической позиций. Эта номенклатура выборочно, в применении к рис. 1.1 – 1.3, показана в табл. 1.1.

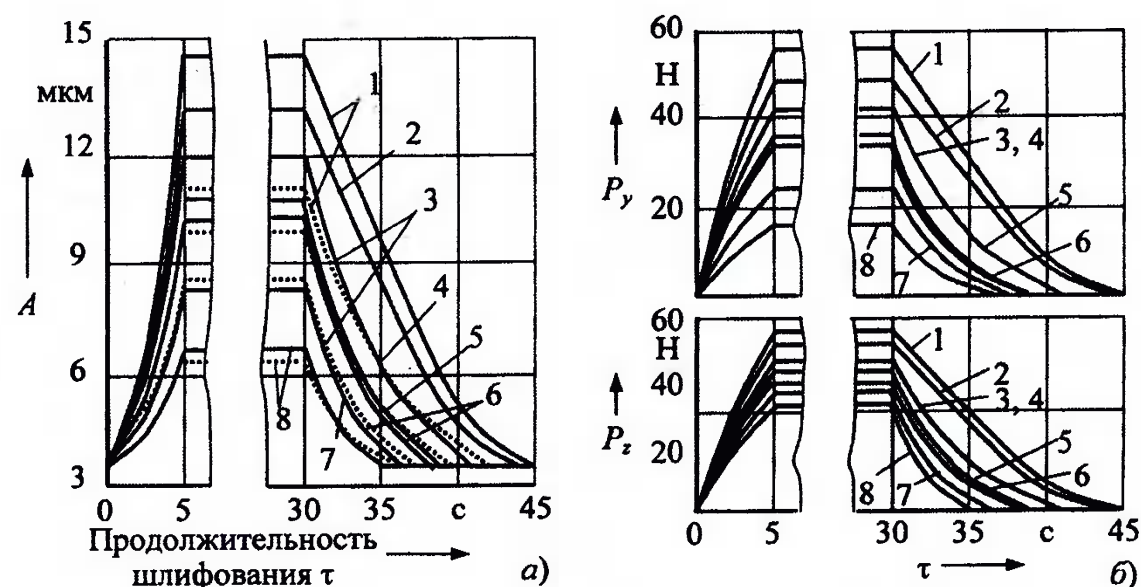


Рис. 1.1. Влияние состава (вязкости) СОЖ, подаваемой поливом в зону шлифования, на амплитуду A колебаний заготовки (а) и силы шлифования P_y и P_z (б) [92]:

сплошные линии – сталь ШХ15, HRC 61...64, круг 1–250×20×76 24A16HC1K, $v_s = 0,6$ мм/мин; штриховые линии – заготовки из стали 20X13, HB 190...200, круг 1–250×20×76 33A16HCM1K, $v_s = 0,2$ мм/мин; 1 – 8 – номера СОЖ по табл. 1.1

1.1. Номенклатура использованных СОЖ [92]

№ п/п	Исходный продукт или марка	Масс. доля, %	Вязкость, сСт
1	Сода кальцинированная	1,5	0,8...1,2
	Нитрит натрия	0,6	
	Вода	97,9	
2	Укринол-1	3,0	1,0...1,2
	Вода	97,0	
3	Масло И-5А	100	4...5
4	Масло И-8А	100	6...8
5	Масло И-12А	100	10...14
6	Масло И-20А	100	17...23
7	Масло И-30А	100	28...33
8	Масло И-40А	100	35...43
9	Масло ОСМ1	100	До 5,8

На большом экспериментальном материале было, в частности, показано, что, увеличив вязкость СОЖ, можно существенно уменьшить амплитуду колебаний в технологической системе (рис. 1.1, а). Это наглядно свидетельствует о проявлении СОЖ демпфирующего действия. От состава СОЖ зависит и ее смазочное действие, обеспечивающее снижение сил P_y и P_z (рис. 1.1, б). При этом в условиях рис. 1.1 амплитуда A в зависимости от состава СОЖ изменялась в 2 раза, силы P_y и P_z – в 1,5 раза. Изменение физических показателей A , P_y и P_z , естественно, повлекло за собой соответствующие изменения технологических показателей – параметров шероховатости шлифованной поверхности (рис. 1.2) и наработки шлифовального круга H_k (рис. 1.3). И, опять-таки, обращают на себя внимание широкие диапазоны изменения обоих этих важнейших показателей в зависимости от состава СОЖ, что, понятно, дает в руки технологов мощный ресурс управления процессом шлифования.

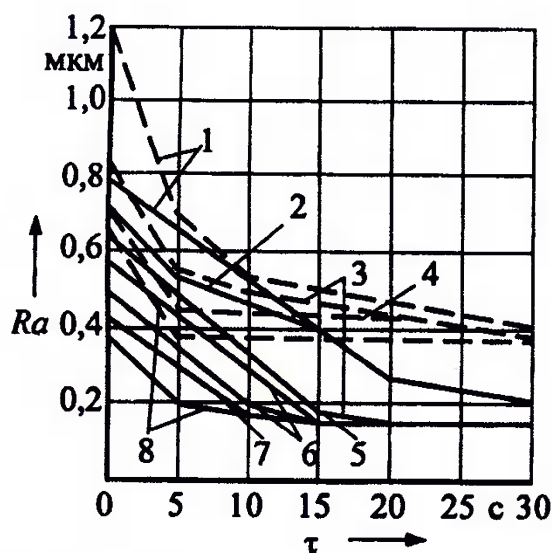


Рис. 1.2. Влияние состава (вязкости) СОЖ, подаваемой поливом в зону шлифования, на шероховатость шлифованной поверхности (Ra) [77, 92]: сплошные линии – заготовки из стали ШХ15, HRC 61 ... 64, круг 1–250×20×76 24A16HС1К, $v_s = 0,6$ мм/мин; штриховые линии – заготовки из стали 20Х13, НВ 190...200, круг 1–250×20×76 33A16HСM1К, $v_s = 0,2$ мм/мин; 1 – 8 – номера СОЖ по табл. 1.1

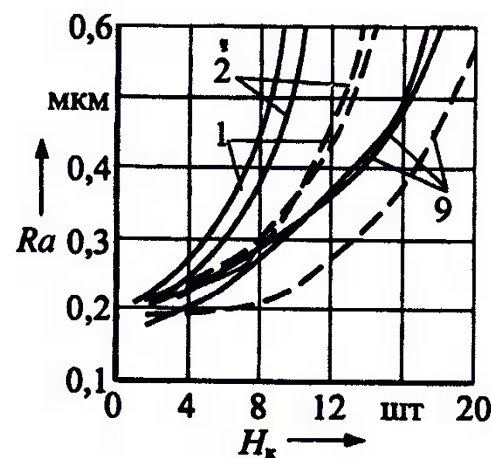


Рис. 1.3. Влияние состава СОЖ на наработку круга H_k при шлифовании заготовок из стали ШХ15, HRC 61 ... 64 [77, 92]: сплошные линии – круг 1–250×20×76 24A16HСM1К, $v_s = 0,7$ мм/мин; штриховые линии – круг 1–250×20×76 24A16HС1К, $v_s = 0,6$ мм/мин; $v_k = 35$ м/с; $v_s = 35$ м/мин; 1, 2, 9 – номера СОЖ по табл. 1.1

Однако не следует забывать, что охлаждающее действие высоковязких масляных СОЖ невелико, поэтому их целесообразно применять при шлифовании со съемом малых припусков и на этапе выхода из заготовки. Кроме того, применение масляных СОЖ взамен водных может оказать неблагоприятное влияние как на экологическую чистоту производства, так и на образование макропрофиля заготовок (например, типа валов, особенно нежестких, при шлифовании их на круглошлифовальных станках в центрах) в продольном сечении: при увеличении вязкости увеличиваются гидродинамическая составляющая сил P_y , упругие отжатия в технологической системе и соответствующая погрешность формы (рис. 1.4) [5].

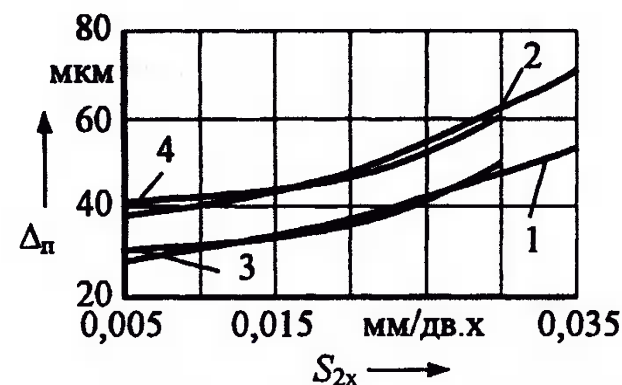


Рис. 1.4. Влияние состава СОЖ и врезной подачи круга S_{2x} на погрешность формы Δ_p при шлифовании валов ($j_s = 100$ Н/мм) из стали 20Х13 [5]: круг 1–250×32×76 24A25HС16К5; скорость продольной подачи стола $v_t = 1,5$ м/мин; 1 и 2 – расчетные; 3 и 4 – экспериментальные кривые; 1 и 3 – 3 %-ный водный раствор Аквол-10М; 2 и 4 – масло Укринол-14

1.2. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЖ ПРИ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ

В процессе функционирования СОЖ происходят физико-химические изменения ее структуры, разрушающие и истощающие жидкость, что ухудшает технологические показатели операций механической обработки. Динамику изменения физико-химических параметров СОЖ, а также ее технологической эффективности исследовали на операциях шлифования заготовок на круглошлифовальном 3М132 и плоскошлифовальном 3В110 станках, оснащенных соответствующей измерительной аппаратурой [41].

Выполнили три серии экспериментов, в ходе которых контролировали весь комплекс основных физико-химических параметров СОЖ (2 %-ной эмульсии Укринол-1М), включающий концентрацию c , эмульсии, водородный показатель pH, содержание кислорода, концентрацию микроорганизмов, склонность к пенообразованию, коррозионную актив-

ность и др. В первой, так называемой «статической» серии, пробы СОЖ брали из емкостей индивидуальных СП СОЖ неработающих станков. Во второй серии измеряли показатели СОЖ, циркулирующей в системе ее применения, при работе станков «вхолостую», при этом шлифовальный круг вращался с рабочей частотой, но обработку заготовок не проводили. Пробы СОЖ в первой и второй сериях брали ежедневно на протяжении двенадцати суток. Третью серию экспериментов проводили в реальных условиях функционирования шлифовальных станков, обрабатывая заготовки из стали 45, HRC 35...40. По результатам третьей серии оценивали технологическую эффективность СОЖ. Некоторые результаты экспериментов показаны на рис. 1.5 – 1.9.

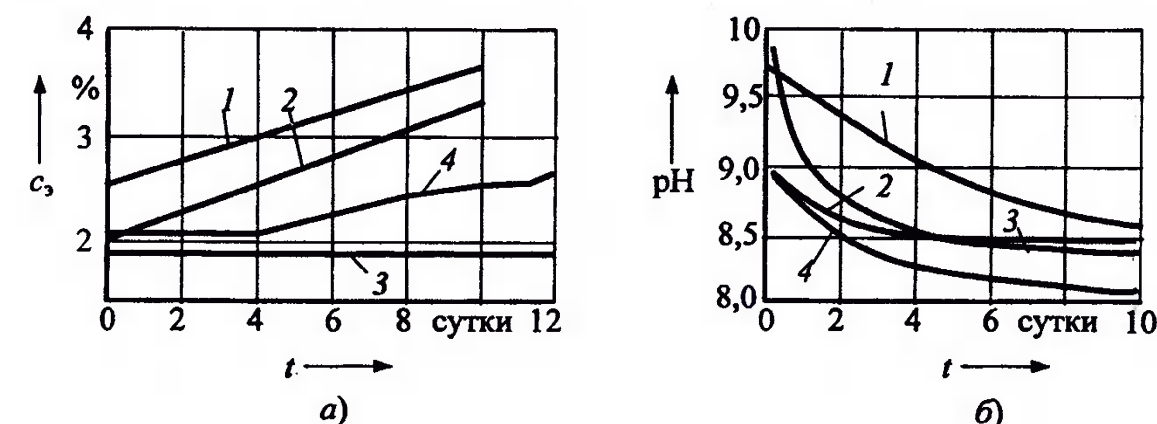


Рис. 1.5. Изменение концентрации c_3 эмульсии Укринол-1М (а) и ее водородного показателя pH (б) [41]:

1 – работающий станок 3М132, объем бака для СОЖ 100 дм³; 2 – работающий станок 3В110, объем бака 30 дм³; 3 – «статический» эксперимент – неработающий станок; 4 – работающий станок 3М132 «вхолостую»

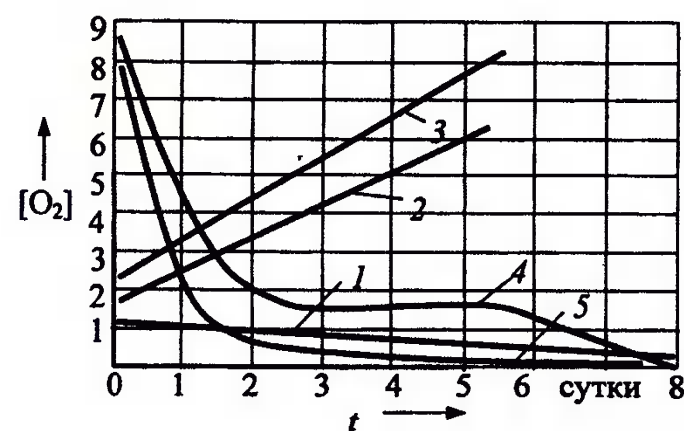


Рис. 1.6. Изменение содержания кислорода в эмульсии Укринол-1М $[O_2]$ [41]:

1 – «статический» эксперимент – неработающий станок; 2 – станок, работающий «вхолостую», проба взята из бака; 3 – то же, проба взята из потока жидкости в рабочей зоне станка; 4, 5 – пробы из баков работающих станков соответственно 3М132 и 3В110

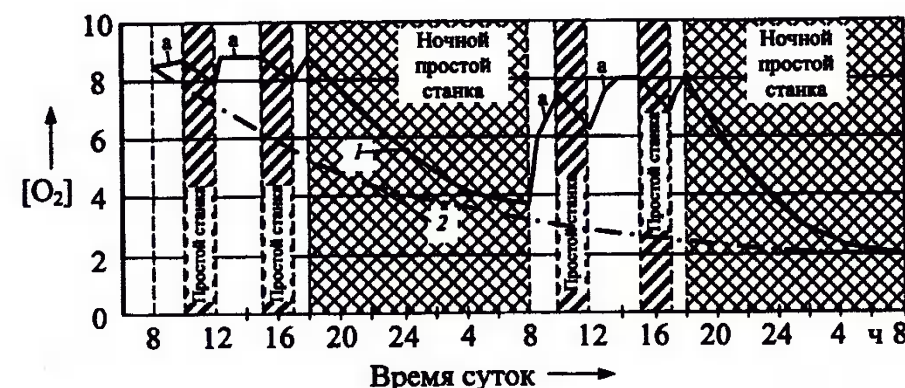


Рис. 1.7. Почасовое изменение содержания кислорода $[O_2]$ в СОЖ (пробы взяты из бака работающего станка 3М132) [41]: 1 – реальная кривая; 2 – кривая утренних наблюдений

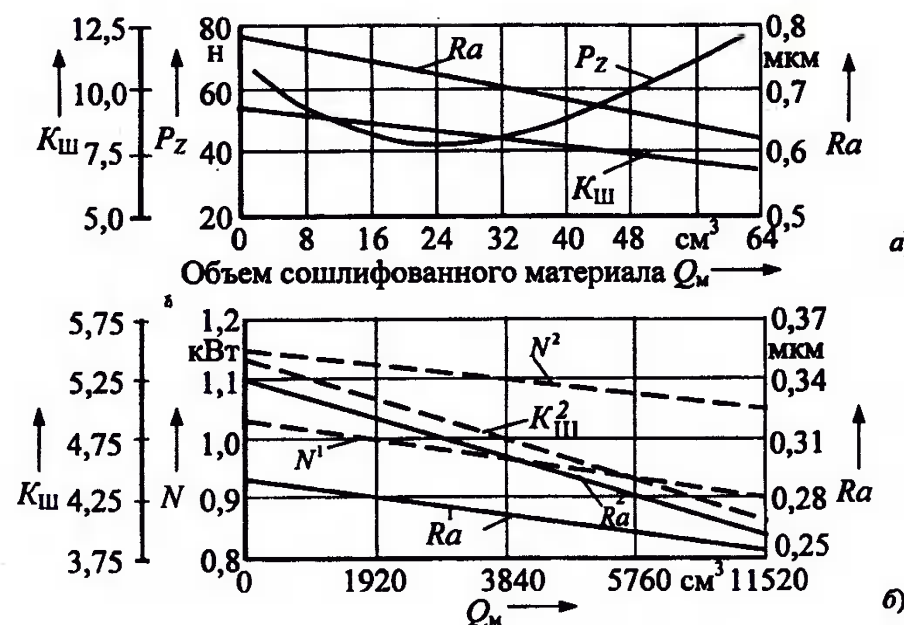


Рис. 1.8. Изменение силы P_z , мощности круглого наружного шлифования N , коэффициента шлифования по объему $K_{ш}$ и среднего арифметического отклонения профиля Ra заготовок из стали 45 [41]:

а – станок 3М132, круг 1–600×40×305 24A25HC1K; $v_k = 50$ м/с; $v_s = 0,4$ мм/мин; б – станок 3В110, круг 1–250×20×76 24A25HC1K $v_k = 35$ м/с; $v_s = 0,1$ мм/мин; верхние индексы 1 и 2 – значения показателей соответственно в начале и конце периода стойкости шлифовального круга

Исследования показали, что на всем протяжении «статического» эксперимента концентрация СОЖ практически не изменилась (рис. 1.5, а, кривая 3), водородный показатель pH СОЖ уменьшился в течение 8 дней с 8,9 до 8,4 единицы (рис. 1.5, б, кривая 3); слабо падало содержание ки-

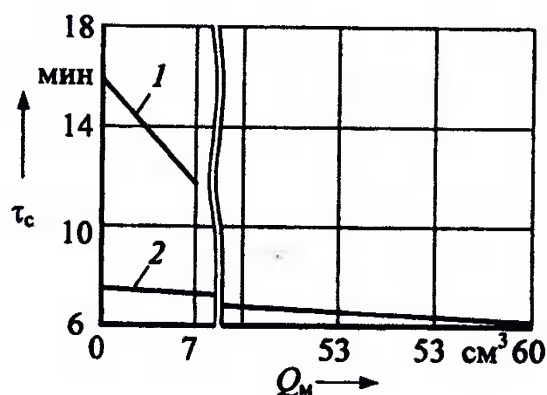


Рис. 1.9. Изменение периода стойкости шлифовального круга τ_c в связи с изменением состояния СОЖ [41]:

1 – станок 3М132, круг – 1–600×40×305 24А25НС1К; круглое наружное шлифование; $v_k = 50$ м/с; $v_s = 0,4$ мм/мин; 2 – станок 3В110, круг 1–250×20×76 24А25НС1К; $v_k = 35$ м/с; $v_s = 0,1$ мм/мин

кислорода в СОЖ (рис. 1.6, кривая 1); число клеток бактерий находилось на уровне $(1...5) \cdot 10^6$ кл./см³; отсутствовало пенообразование и не изменялась коррозионная активность СОЖ.

Эксперимент на станке, работающем «вхолостую», показал, что в этом случае в связи с интенсификацией процесса испарения водной фазы наблюдалось некоторое увеличение концентрации СОЖ, начиная с четвертых и кончая восьмью сутками эксперимента (см. рис. 1.5, а, кривая 4). На протяжении эксперимента показатель рН падал более интенсивно, чем в «статическом» эксперименте – с 8,9 до 8,1 (см. рис. 1.5, б, кривая 4).

Интересные результаты получены при измерении на «вхолостую» работающем станке содержания кислорода в СОЖ. Установлено, что циркуляция СОЖ в СП сопровождается ее интенсивной аэрацией (см. рис. 1.6, кривые 2 и 3). Существенную роль в насыщении СОЖ кислородом воздуха играет турбулизация потока жидкости, вызываемая вращающимся шлифовальным кругом. Интенсивное перемешивание истекающей из сопла СОЖ вблизи вращающегося круга привело к тому, что содержание кислорода в СОЖ, пробы которой были взяты непосредственно из потока на выходе из сопла, больше на протяжении всего эксперимента, чем в СОЖ, пробы которой взяты из бака.

Насыщение СОЖ кислородом приводит к подавлению жизнедеятельности бактерий; начиная с третьих суток эксперимента, появляется и увеличивается склонность СОЖ к пенообразованию.

Эксперименты на обоих станках показали, что в связи с интенсивным испарением водной фазы концентрация эмульсии увеличилась с 2,6 до 3,7 % в течение 10 суток на первом станке; с 2,0 до 3,3 % за то же время на втором станке. При этом, естественно, темп испарения водной фазы СОЖ в технологических экспериментах оказался выше, чем при работе станка «вхолостую», что связано с влиянием тепловыделения в зоне шлифования, через которую проходит СОЖ.

Из всех параметров состояния СОЖ наиболее существенно на протяжении эксперимента изменялись водородный показатель рН и содержание кислорода в СОЖ (см. рис. 1.5 – 1.8). При этом оказалось, что в ходе многодневного эксперимента содержание кислорода в СОЖ изменяется как на протяжении всего эксперимента, так и в течение суток.

Ежедневное изменение содержания кислорода в СОЖ носит монотонно убывающий характер; соответствующие графики, построенные по данным ежедневных утренних проб СОЖ, показаны на рис. 1.6 (кривые 4, 5) и рис. 1.7 (кривая 2). Как видно, характер изменения содержания кислорода в СОЖ идентичен характеру изменения показателя рН во времени (сравните рис. 1.5, б и рис. 1.6).

Изменение содержания кислорода в СОЖ в течение суток подчиняется более сложной зависимости (см. рис. 1.7). Циркуляция СОЖ в работающем (и производящем обработку заготовок) станке способствует увеличению содержания растворенного в СОЖ кислорода и поддержанию его на максимально возможном при данной температуре окружающей среды (20 °С) уровне (см. участки «а» на кривой 1 рис. 1.7). Это объясняется, как отмечалось выше, аэрацией жидкости при циркуляции СОЖ в системе. При дневных и ночных простоях станка содержание кислорода в СОЖ падает, причем с увеличением длительности эксперимента наблюдается все более стремительное его падение до все более низкого уровня, что связано, по-видимому, с интенсификацией биопоражения СОЖ. Здесь же отметим, что на первых стадиях (в течение первых суток) экспериментов на обоих станках уровень биопоражения СОЖ был на 1,0 – 1,5 порядка ниже, чем при «статических» испытаниях. Это связано, по-видимому, с тем, что аэрация СОЖ подавляет жизнедеятельность бактерий.

С точки зрения влияния состояния СОЖ на показатели шлифовальных операций доминирующее положение занимает содержание (концентрация) в СОЖ механических примесей (масса сошлифованного с заготовки металла и материала шлифовального круга, потерянного в результате его износа и правки), в зависимости от которого показатели технологической эффективности шлифования, контролируемые в третьей серии экспериментов, изменялись существенно (см. рис. 1.8). Поэтому был предпринят дополнительный анализ влияния загрязнения СОЖ механическими примесями на физические и технологические показатели механической обработки.

Известно, что в процессе функционирования технологического оборудования СОЖ загрязняется металлической стружкой и другими отходами механической обработки. Например, образующийся при шлифова-

нии и попадающий в СОЖ шлам состоит в основном из мелкой металлической стружки размером 5...50 мкм и частиц абразива и связки круга размером 20...150 мкм, причем на долю металлической стружки приходится 80...98 % всей массы шлама, который содержит также соединения абразива и связки, атмосферную пыль, волокнистые и смазочные материалы.

Особенно остро влияние загрязнения СОЖ механическими примесями стало ощущаться при внедрении на промышленных предприятиях централизованных систем подачи СОЖ к шлифовальному оборудованию. Эксплуатация таких систем показала, что загрязнение СОЖ шлифовальным шламом приводит к заиливанию трубопроводов и накопительных емкостей шламом. Непрерывное накопление шлама и других загрязнений вызывает закупоривание системы и выход ее из строя, что, естественно, недопустимо. Механические примеси способствуют развитию бактерий в СОЖ, что приводит к разложению СОЖ и сокращению ее срока службы. Загрязнение СОЖ шлифовальным шламом обуславливает неоднородное распределение бактерий в объеме жидкости, так как на поверхностях частиц шлама создаются благоприятные условия для интенсивного размножения бактерий. По данным исследований, выполненных на кафедре «Технология машиностроения» Ульяновского политехнического института (УлПИ), водные эмульсии на основе эмульсола ИХП-45Э, склонные к бактериальному разложению, в присутствии механических примесей разлагаются в 3 – 5 раз быстрее [31]. При наличии в эмульсионных СОЖ механических примесей скорость их расслоения при температуре 20...25 °С более чем в 10 раз превышает скорость расслоения эмульсии, не содержащей загрязнений: 5 %-ная эмульсия Укринол-1, содержащая металлическую стружку, расслаивалась за 14 дней, без стружки – сохранялась в течение 60 сут. и более.

Загрязнение СОЖ отходами шлифования существенно снижает качество шлифованных деталей. Установлено, что механические примеси являются причиной появления на шлифованной поверхности царапин. Многие авторы отмечали, что содержащиеся в СОЖ механические примеси отрицательно влияют и на другие показатели эффективности операций шлифования. Например, возрастание концентрации шлама в СОЖ до 1 г/л и более приводило к уменьшению стойкости круга на 15...30 %, а в некоторых случаях – в 1,6 раза, снижению съема металла на 27 % и коэффициента шлифования примерно на 30 % [31]. Среднее арифметическое отклонение профиля R_a шлифованных заготовок увеличилось в 2 – 4 раза, погрешности геометрической формы обработанных деталей в продольном и поперечном сечениях увеличились примерно в 2 раза.

Обширные исследования влияния содержащихся в СОЖ механических примесей на физические показатели и технологическую эффективность шлифовальных операций выполнены Л.В. Худобиным и его учениками [9, 11, 23, 31, 62, 68, 73, 76, 82, 86, 98, 99, 107, 108 и др.].

Так, Е. П. Гульнов [31] установил, что частицы механических примесей, попавшие вместе с СОЖ под действием воздушных потоков и центробежной силы в зону контакта шлифовального круга с заготовкой, вступают в контакт с объектами процесса шлифования. При этом некоторые частицы вступают в силовой контакт с абразивными зёрнами, другие попадают во впадины между ними. Вступая в контакт с зёрнами шлифовального круга, частицы примесей увеличивают нагрузку на них, что может привести к разрушению зёрен. Большая часть частиц вступает в контакт со связкой круга и зёрнами, не контактирующими с шлифуемой поверхностью заготовки, так как количество режущих зёрен при шлифовании составляет примерно 10 % всего количества абразивных зёрен, находящихся на рабочей поверхности круга. Разрушение связки усиливает изнашивание шлифовального круга. С увеличением массовой доли механических примесей в СОЖ (1 % триэтаноламина, 0,6 % кальцинированной соды, остальное – вода) увеличивается число их контактов с поверхностью круга, вследствие чего возрастает интенсивность его разрушения и затупления абразивных зёрен, что ведет к увеличению скорости его изнашивания и уменьшению периода стойкости (рис. 1.10, а).

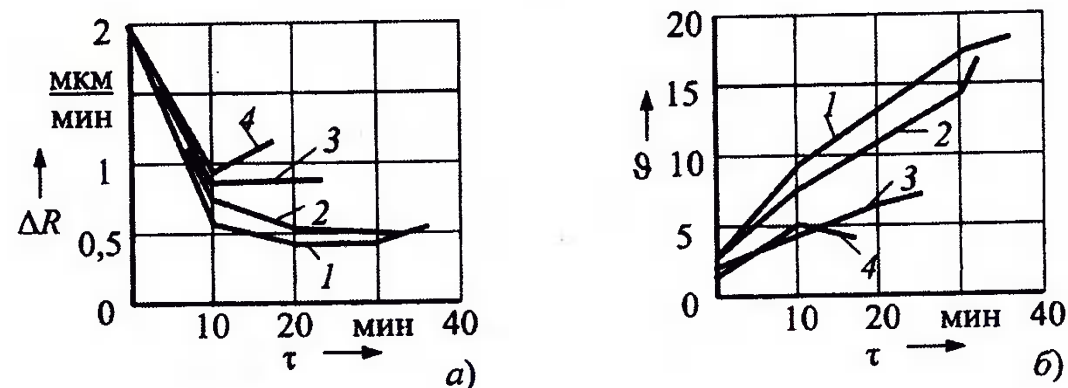


Рис. 1.10. Зависимость скорости размерного изнашивания ΔR (а) и условного коэффициента засаливания θ (б) шлифовального круга от длительности τ круглого наружного шлифования заготовок из стали 45, HRC 45...48 и концентрации c механических примесей в СОЖ [31]: круг 1–600×40×305 24A16HC17K5; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; $v_s = 0,3$ мм/мин; 1, 2, 3, 4 – концентрация механических примесей соответственно 0; 0,5; 1; 2 г/л

В начале шлифования на поверхности круга имеется некоторое количество слабо закрепленных и разрушенных правкой абразивных зерен. В процессе шлифования эти зерна выкрашиваются, поверхность круга становится более ровной и наступает период его стабильной работы (см. рис. 1.10, а, кривая 1). С увеличением концентрации механических примесей в СОЖ период стабильной работы круга сокращается (кривые 2, 3) и при концентрации 2 г/л этап стабильной работы вообще отсутствует (кривая 4).

Более крупные частицы глубже внедряются в обрабатываемую заготовку и интенсивнее разрушают и затупляют абразивные зерна. Очень мелкие частицы не влияют на изнашивание шлифовального круга, но при большой их концентрации уменьшают зазор между кругом и заготовкой; в результате этого уменьшается расход СОЖ через зону резания, что отрицательно влияет на эффективность шлифования.

Заметно сказывается на изнашивании круга также твердость частиц. Металлические частицы шлифовального шлама, вступая в контакт с зернами и связкой, деформируются и меньше внедряются в шлифовальный круг, чем гораздо более твердые абразивные частицы, которые значительно сильнее изнашивают круг.

Влияние содержащихся в СОЖ механических примесей на процесс шлифования зависит от материала обрабатываемых заготовок. С ухудшением обрабатываемости сталей скорость изнашивания резко увеличивается (рис. 1.11, кривая 5).

С уменьшением зернистости шлифовальных кругов в силовой контакт с абразивными зернами вступает большое количество частиц механических примесей, которые не могут свободно разместиться в межзе-

ренном пространстве круга. Уменьшаются расход СОЖ через зону шлифования и количество частиц, попадающих в зону контакта. Эти два фактора оказывают противоположное влияние на ΔR . Абсолютный прирост скорости изнашивания при различных концентрациях примесей в СОЖ для кругов 24A25HC17K5 и 24A16HC17K5 оказался примерно одинаковым (см. рис. 1.11, кривые 2 и 3). Более твердые круги изнашиваются менее интенсивно (сравни кривые 1 и 4).

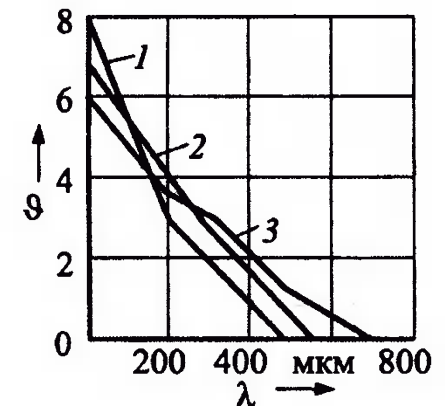
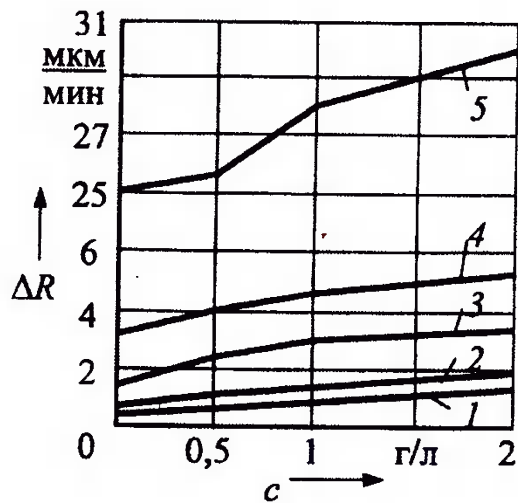
С интенсификацией режимов шлифования режим изнашивания круга изменяется, как правило, в сторону самозатачивания. При этом темп роста скорости изнашивания круга в зависимости от скорости врезной подачи при шлифовании с различными концентрациями примесей в СОЖ примерно одинаков, однако доля изнашивания шлифовального круга под действием механических примесей, содержащихся в СОЖ, уменьшается. Например, загрязнение СОЖ примесями до 1 г/л при шлифовании кругом 24A16HC17K5 со скоростью подачи 0,3 мм/мин привело к увеличению скорости изнашивания круга при обработке заготовок из стали 45, HRC 45...48 на 130 %, а для заготовок из стали P18, HRC 62...64 – на 45 %; при шлифовании со скоростью подачи 0,7 мм/мин увеличение скорости изнашивания составило для стали 45...45 %, для стали P18 – 28 %. Механические примеси не только разрушают рабочую поверхность круга, но и в известной степени способствуют удалению налипшего на абразивные зерна металла, вследствие чего засаливание круга уменьшается (см. рис. 1.10, б). Одновременно металлические частицы забивают поры круга, увеличивая глубину засаливания. Как следует из рис. 1.12, в приповерхностном слое абразива засаливание уменьшается с увеличением концентрации механических примесей в СОЖ; на глубине (150...300) мкм и более степень засаливания возрастает с увеличением концентрации примесей в СОЖ, так как примеси, находящиеся в СОЖ, одновременно

Рис. 1.11. Зависимость скорости размерного изнашивания ΔR шлифовального круга от концентрации c механических примесей в СОЖ при круглом наружном шлифовании [31]:

1 – 4 – образцы из стали 45, HRC 45...48; круги 1 – 250×20×76; 1, 2, 3, 4 – соответственно 24A25HT17K5; 24A25HC17K5; 24A16HC17K5, 24A25HCM17K5; 5 – заготовки из стали P18, HRC 62...64, круг 24A25HCM17K5; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; $v_s = 0,3$ мм/мин

Рис. 1.12. Зависимость условного коэффициента засаливания θ от глубины засаливания λ шлифовального круга и концентрации c механических примесей в СОЖ при круглом наружном шлифовании [31]:

заготовки из стали 45, HRC 45...48; круг 1–250×20×76 24A16HC17K5; СОЖ – 3 %-ная Укринол-1М; $v_s = 0,3$ мм/мин; $\tau = 4$ мин; 1, 2, 3 – соответственно $c = 0$; 1; 2 г/л



уменьшают количество металла, налипшего на абразивные зерна, и увеличивают забивание пор металлическими частицами.

Как уже было сказано, механические примеси, попадающие вместе с СОЖ в зону шлифования, вызывают появление на поверхности детали отдельных царапин, причем глубина и количество последних зависят от размеров, твердости и концентрации примесей в СОЖ. Влияние примесей на качество шлифованных деталей зависит также и от длительности шлифования. На начальной стадии шлифования, когда влиянием изнашивания круга на шероховатость обработанной поверхности можно пренебречь, количество царапин возрастает линейно с увеличением концентрации механических примесей в СОЖ (рис. 1.13). Гораздо более твердые абразивные частицы оставляют более глубокий след на шлифованной поверхности, поэтому с увеличением содержания в шламе абразивных частиц количество и глубина царапин увеличиваются при любых концентрациях примесей. Глубина царапин при постоянном составе примесей с возрастанием их концентрации в СОЖ увеличивается незначительно (см. рис. 1.13, кривые 6, 7, 8). Небольшое увеличение глубины царапин можно объяснить возрастанием вероятности попадания в зону контакта крупных частиц в связи с увеличением их концентрации в СОЖ.

С увеличением концентрации механических примесей в СОЖ шероховатость поверхности увеличивается (рис. 1.14), при этом с увеличением скорости врезной подачи круга относительное влияние концентрации примесей на величину Ra уменьшается [31]. Концентрация примесей 0,1 г/л не значима (см. рис. 1.14, кривые 1 и 2), так как существует определенный предел концентрации частиц в СОЖ, ниже которого влияние примесей на Ra соизмеримо с погрешностью поставленного эксперимента.

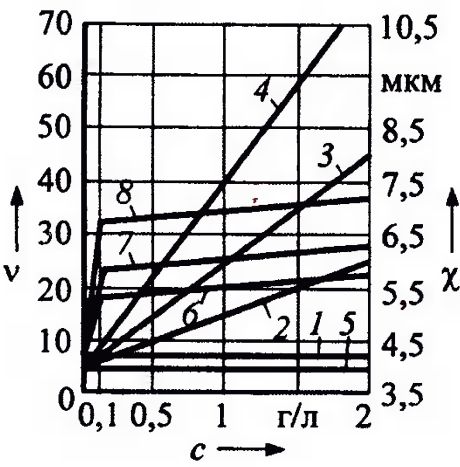
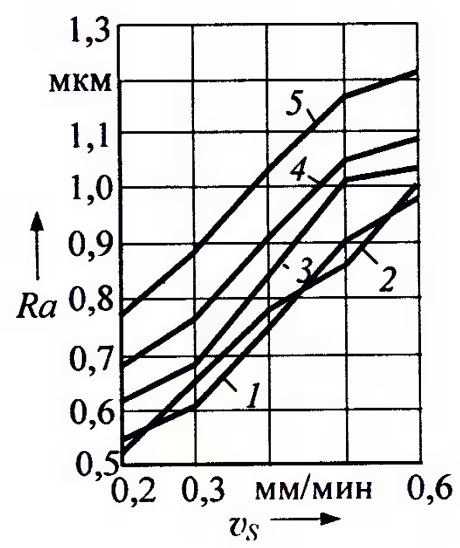


Рис. 1.13. Зависимость количества v (кривые 1, 2, 3, 4) и глубины χ (5, 6, 7, 8) царапин на участке длиной 2 мм шлифованной поверхности от концентрации c механических примесей в СОЖ [31]: заготовки из стали 45, HRC 45...48; круг 1–250×20×76 24A25HC17K5; $v_s = 0,3$ мм/мин; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; припуск 0,3 мм; длительность выхаживания 7 с; 1 и 5 – металлическая стружка без абразивных частиц; 2 и 6 – шлам; 3 и 7 – шлам + абразивный порошок; 4 и 8 – абразивный порошок размером 25 мкм

Рис. 1.14. Зависимость параметра шероховатости Ra от скорости врезной подачи v_s и концентрации c механических примесей в СОЖ при круглом наружном шлифовании без выхаживания [31]: заготовки из стали 45, HRC 45...48; круг 1–250×20×76 24A25HC17K5; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; припуск 0,3 мм; 1, 2, 3, 4, 5 – соответственно $c = 0; 0,1; 0,5; 1; 2$ г/л



Частицы механических примесей, вступающие в силовой контакт с абразивными зернами круга, приводят также к повышению контактной температуры и появлению прижогов на шлифуемой поверхности в виде отдельных штрихов. Уменьшение расхода СОЖ через зону шлифования при увеличении концентрации в ней механических примесей также способствует повышению контактной температуры. На начальной стадии шлифования отдельные редкие штриховые прижоги появлялись при концентрации механических примесей: 0,3 г/л при шлифовании заготовок из стали 45, HRC 45...48, кругом 24A16HSM17K5; 0,5 г/л – при шлифовании кругом 24A25HSM17K5 и 0,8 г/л – кругом 24A40HSM17K5. Количество деталей с прижогами постепенно увеличивалось с повышением концентрации механических примесей в СОЖ.

Рельеф рабочей поверхности и колебания круга являются, как известно, определяющими факторами в формировании шероховатости, волнистости и макрогеометрии шлифованной поверхности. Как отмечалось выше, при длительном шлифовании неравномерное изнашивание круга приводит к искажению геометрической формы его рабочей поверхности и увеличению амплитуды колебаний в технологической системе. Все это отрицательно сказывается на шероховатости поверхности (рис. 1.15) и точности формы (рис. 1.16) детали, причем шероховатость и погрешность формы возрастают с увеличением концентрации механических примесей в СОЖ.

Интенсивное разрушение рабочей поверхности шлифовального круга и затупление зерен ведут не только к росту высотных параметров шероховатости поверхности и погрешности геометрической формы деталей, но и к массовому появлению штриховых прижогов на всей шлифуемой

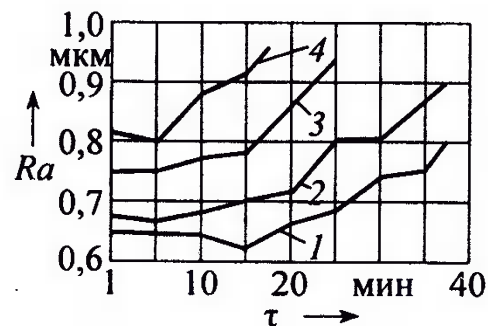


Рис. 1.15. Зависимость параметра шероховатости Ra от длительности круглого наружного шлифования τ без выхаживания и концентрации c механических примесей в СОЖ [31]: заготовки из стали 45, HRC 45... 48; круг 1–250×20×76 24A25HC17K5; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; $v_s = 0,3$ мм/мин; 1, 2, 3, 4 – соответственно $c = 0; 0,5; 1; 2$ г/л

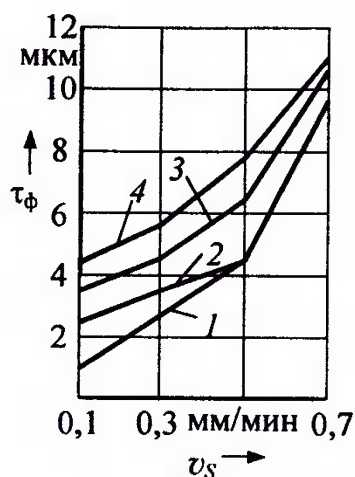


Рис. 1.16. Зависимость погрешности формы τ_ϕ в поперечном сечении детали от скорости v_s врезной подачи и концентрации c механических примесей в СОЖ при круглом наружном шлифовании [31]: заготовки из стали 45, HRC 45... 48; круг 1–250×20×76 24A16HC17K5; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; 1, 2, 3, 4 – соответственно $c = 0; 0,5; 1; 2$ г/л

поверхности. М.С. Степанов [86], исследовавший влияние концентрации механических частиц в СОЖ на качество поверхностного слоя деталей при шлифовании, установил, что уменьшение загрязненности СОЖ приводит к уменьшению контактной температуры (рис. 1.17), сокращению количества и размера зон с вторично закаленной структурой, к благоприятным изменениям микротвердости (рис. 1.18) и снижению толщины структурно-измененного слоя на 14 – 28 % (рис. 1.19).

Увеличение концентрации примесей в СОЖ приводит к уменьшению периода стойкости кругов по критерию прижообразования (появление массовых прижогов) (рис. 1.20) [8]. При шлифовании торцовых поверхностей влияние механических примесей в СОЖ на прижообразование сильнее, чем при шлифовании цилиндрических поверхностей. При малых подачах это наиболее заметно и объясняется тем, что при торцовом шлифовании силовой контакт между зернами круга, частицами механических примесей и поверхностью заготовки более длителен, чем при круглом наружном шлифовании цилиндрических поверхностей, что приводит к более длительному температурному воздействию на поверхность заготовки. С увеличением скорости подачи шлифовального круга

более 0,7 мм/мин различия в прижообразовании на торцовых и цилиндрических поверхностях исчезали.

Рис. 1.17. Влияние загрязненности СОЖ механическими примесями c на температуру θ в зоне круглого наружного шлифования [86]: материал заготовок – сталь ШХ15, HRC 60...62; круг 1–600×25×305 24A25HCM26K5; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; $v_k = 50$ м/с, $v_k/v_s = 60$, $v_s = 0,12$ мм/мин

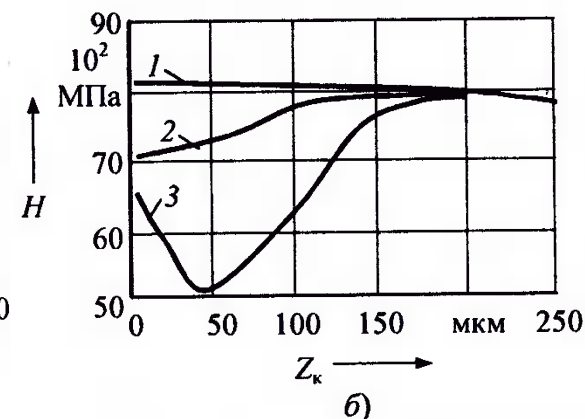
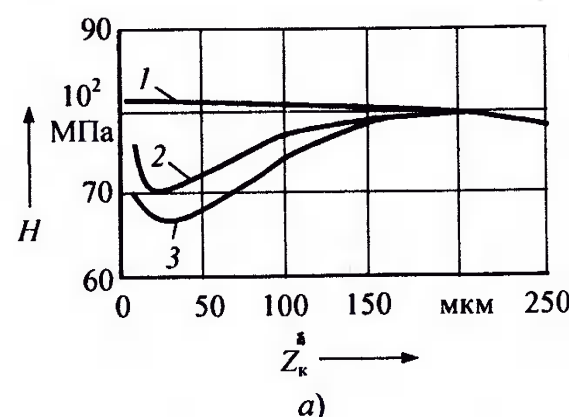
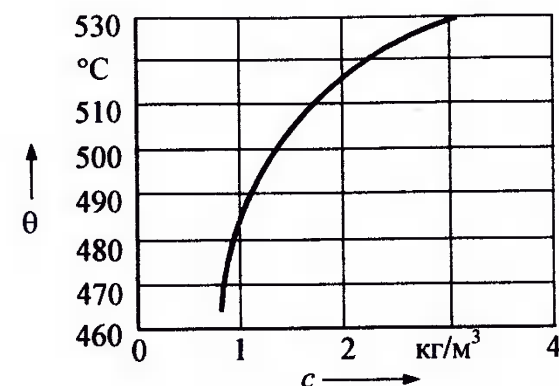


Рис. 1.18. Изменение микротвердости H в поверхностном слое шлифованных деталей в зависимости от расстояния Z_k от поверхности детали и концентрации c механических примесей в СОЖ [86]: материал заготовок – сталь ШХ15, HRC 60...62; шлифовальный круг 1–600×25×305 24A25HCM26K5; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; $v_k = 50$ м/с, $v_k/v_s = 60$; а и б – соответственно $v_s = 0,08; 0,12$ мм/мин; 1 – исходная микротвердость, 2 и 3 – соответственно $c = 1,1$ и $3,1$ кг/м³

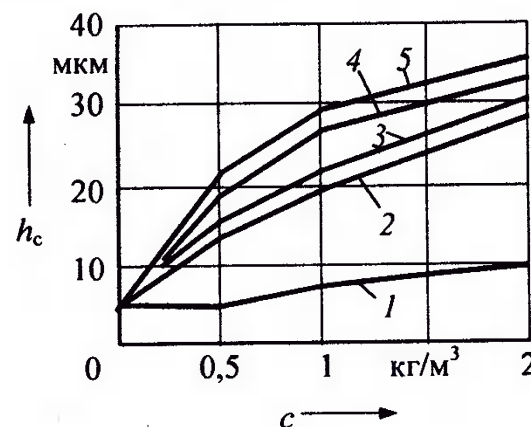


Рис. 1.19. Влияние размеров твердых частиц, содержащихся в СОЖ, на толщину структурно-измененного слоя h_c [86]: материал заготовок – сталь 45, HRC 45...48, $v_k = 35$ м/с, $v_s = 0,03$ мм/мин; шлифовальный круг 24A25HC17K5; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно $d = 3, 10, 20, 40$ и 50 мкм

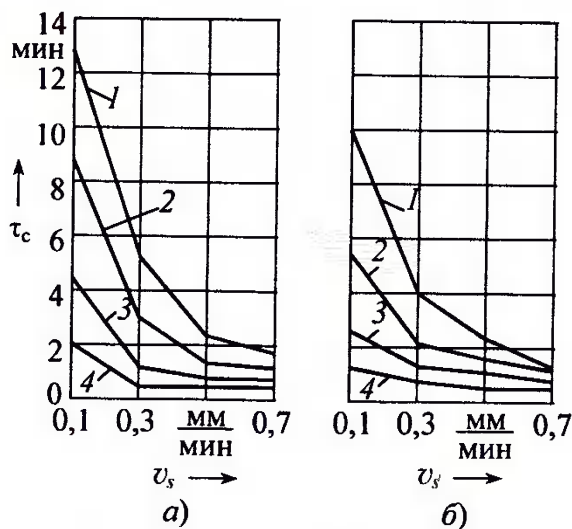


Рис. 1.20. Зависимость периода стойкости τ_c шлифовального круга по критерию прижообразования от скорости врезной подачи v_s и концентрации c механических примесей в СОЖ при круглом наружном шлифовании при обработке цилиндрических (а) и торцовых (б) поверхностей [8]:

заготовки из стали ШХ15, HRC 62...64; круг 1-250×20×76 24A25HC17K5; $v_s = 0,3$ мм/мин; СОЖ — 3 %-ная эмульсия Укринол-1М; 1, 2, 3, 4 — соответственно $c = 0; 0,5; 1; 2$ г/л

Таким образом, многочисленные исследования и многолетний опыт промышленности свидетельствуют о существенном негативном влиянии загрязнения СОЖ механическими примесями на изменение ее физико-химических параметров и технологическую эффективность при абразивной обработке и прежде всего при шлифовании. Поэтому общепризнана необходимость оснащения технологического оборудования, выполняющего абразивную обработку, устройствами и системами для стабилизации свойств СОЖ путем очистки их от механических примесей. Очистка СОЖ приводит к существенному повышению эффективности операций обработки заготовок и лезвийными инструментами. Это часто недооценивают, полагая, что тщательная очистка СОЖ необходима только на операциях абразивной обработки, являющихся, как правило, заключительными в технологическом процессе механической обработки заготовок и формирующих выходные характеристики качества деталей. Между тем, установлено, что оснащение, например, фрезерных станков фильтрующими устройствами приводит в ряде случаев к повышению стойкости фрез в 5 – 10 раз, при этом скорость резания можно увеличить в 2 раза, а скорость подачи — в 1,5 раза. Оснащение станков для глубокого сверления фильтрами, очищающими СОЖ от частиц размером более 10 и 2 мкм, обеспечило повышение стойкости сверл соответственно до 5000 и 13500 обработанных между переточками сверл отверстий. На многошпиндельных станках очистка СОЖ способствовала увеличению стойкости сверл с внутренним охлаждением в 2 раза, а разверток, расточных и фасонных резцов, неперетачиваемых многогранных пластинок — в 1,4 – 1,8 раза. Одновременно шероховатость обработанной поверхности уменьшилась на 20 %, а заточные работы сократились на 55 %. При проведении аналогичных исследований на Ульяновском автомобильном за-

воде было установлено, что с уменьшением концентрации механических примесей, попадающих вместе с СОЖ в зону точения, снижается износ резцов и соответственно увеличивается период их стойкости. Это, в свою очередь, ведет к снижению времени, затрачиваемого на наладку оборудования, и увеличению сменной наработки деталей B (рис. 1.21).

Исследованиями [68] установлено, что некачественная очистка СОЖ от механических примесей приводит к увеличению износа сверл, зенкеров и разверток на 20...30 %, повышению энергозатрат на 5...15 %, ухудшает точность формы обработанных отверстий на 15...25 %, увеличивает высотные и уменьшает шаговые параметры шероховатости поверхности отверстий соответственно на 20...40 и 10...20 %. При развертывании отверстий негативное влияние качества очистки СОЖ более ощутимо, чем при сверлении и зенкерованиях. На операции точения присутствие в СОЖ механических примесей приводит к снижению периода стойкости резцов на 15...20 % и ухудшению шероховатости на 20...25 % (рис. 1.22, 1.23).

Заметим в заключение, что в упомянутых выше и других экспериментальных исследованиях влияния чистоты СОЖ на технологическую эффективность процессов шлифования и лезвийной обработки СОЖ загрязняли механическими примесями определенного гранулометрического состава. При исследовании процесса шлифования, например, «модельный шлам» получали путем прокаливании реального шлама, чтобы удалить из него плохо разделяемые агрегаты металлической стружки и отдельные стружки большой протяженности, и последующего его рассеивания по фракциям (по размерам частиц). Естественно, исследование

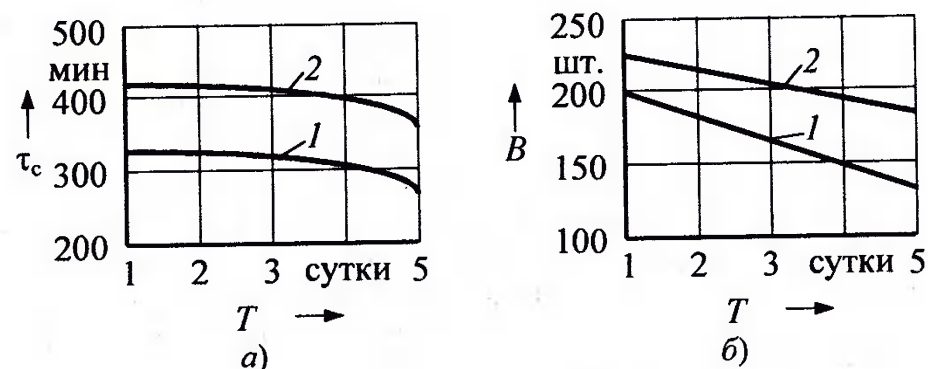


Рис. 1.21. Влияние концентрации c механических примесей в СОЖ на период стойкости τ_c токарных резцов (а) и суточный выпуск продукции B (б) [68]: 1, 2 — соответственно $c = 0,2; 0,1$ г/л; материал заготовки — СЧ 20, материал режущей части инструмента — ...Р6М5, частота вращения шпинделя — 500 мин⁻¹, продольная подача — 0,4 мм/об, глубина резания — 2 мм

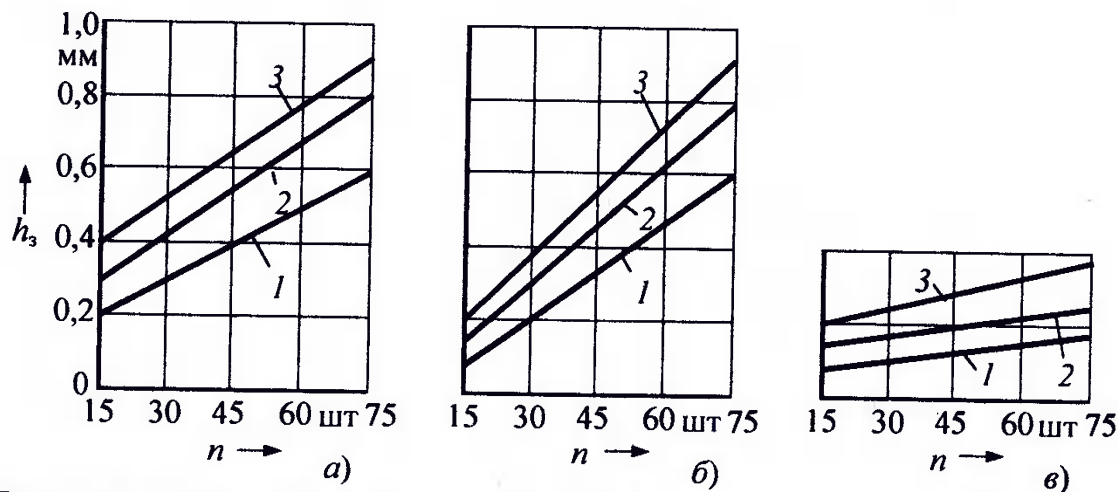


Рис. 1.22. Влияние концентрации механических примесей c на износ по задней грани инструмента h_z в зависимости от количества обработанных отверстий n при сверлении (а), зенкеровании (б), развертывании (в) [68]: материал заготовок – СЧ 20; 1, 2, 3 – $c = 0$; 2; 4 г/л; материал инструмента Р6М5, частота вращения шпинделя при сверлении и зенкеровании – 800 мин^{-1} , при развертывании – 400 мин^{-1} ; подача при сверлении – $0,3 \text{ мм/об}$, зенкеровании – $0,5 \text{ мм/об}$, развертывании – $1,0 \text{ мм/об}$

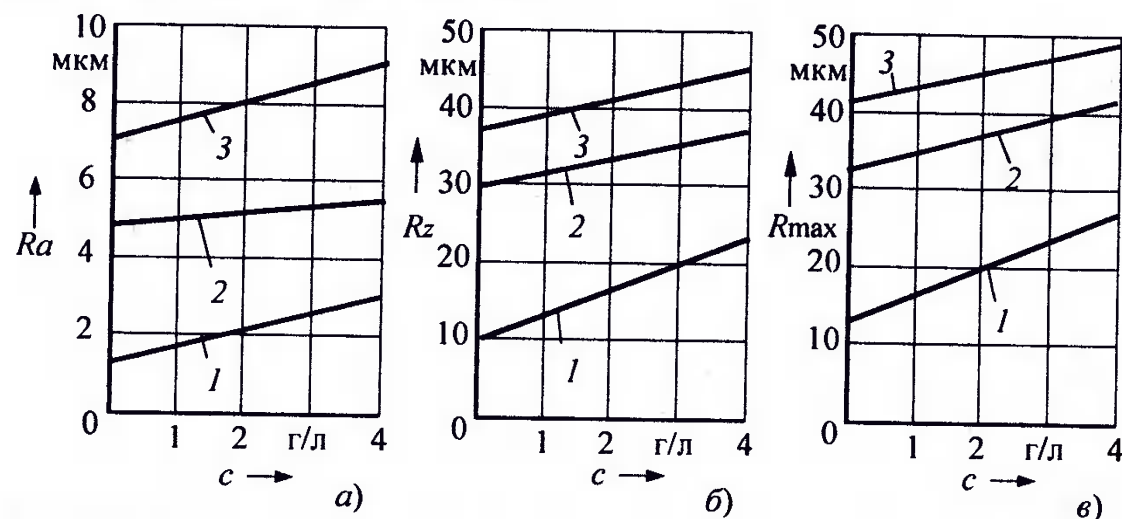


Рис. 1.23. Влияние концентрации механических примесей c на среднее арифметическое отклонение профиля Ra (а), высоту неровностей профиля Rz (б), наибольшую высоту неровностей профиля $R_{\max}$ (в) отверстий [68]: 1, 2, 3 – развертывание, зенкерование, сверление отверстий в заготовках из чугуна СЧ20. Условия обработки см. рис. 1.22

«модельного шлама» внесло определенные погрешности в количественные результаты эксперимента. В связи с этим в п. 3.2 представлены исследования, проведенные в условиях, максимально приближенных к реальным условиям выполнения шлифовальных операций.

Учитывая весьма сложный нелинейный характер влияния содержания механических примесей в СОЖ на технологические показатели механической обработки и отсутствие аналитических разработок, адекватно отражающих это влияние, нами было предпринято моделирование профиля поверхности заготовки, формируемого при шлифовании с применением СОЖ, с учетом загрязнения последней механическими примесями (см. далее п. 1.3).

1.3. ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ, ШЛИФОВАННОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОЖ

Так как процесс формирования профиля шлифованной поверхности происходит под действием множества факторов, как детерминированных (режимы шлифования), так и стохастических (профиль круга, загрязненность СОЖ), то в настоящем параграфе представлен обобщенный вероятностный подход к расчету характеристик шлифованных поверхностей, являющийся развитием подхода А.В. Королева и Ю.К. Новоселова [54, 55]. При этом процесс шлифования рассматривается в контексте взаимодействия двух распределенных систем: множества режущих кромок абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности шлифовального круга, и начальной шероховатости шлифуемой поверхности (опорной кривой) [18].

Для нахождения функции распределения высот вершин зерен шлифовального круга над уровнем связки в процессе обработки рассмотрим схему его рабочей поверхности, показанную на рис. 1.24. Ось y направлена по нормали к рабочей поверхности круга. За нулевой уровень принято математическое ожидание уровня связки [54] при известной функции ее распределения $F_c(y)$. В первом приближении можно считать, что

$$F_c(y) = \Phi(y/\sigma_c),$$

где σ_c – дисперсия уровня связки.

Функцию распределения диаметров абразивных зерен круга можно представить следующей зависимостью [18]:

$$F_a(y) = \Phi\left(\frac{\ln y - d_a}{s_a}\right),$$

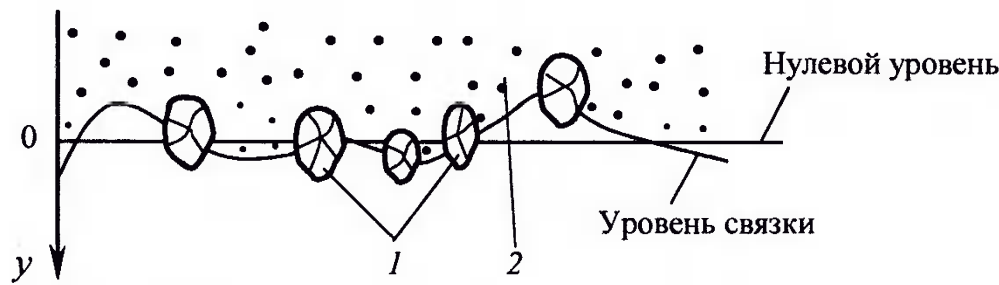


Рис. 1.24. Схема рабочей поверхности шлифовального круга:
1 – абразивные зёрна; 2 – связка

где параметры d_a и s_a – определяются через математическое ожидание m_a и дисперсию σ_a^2 диаметров абразивных зёрен:

$$m_a = e^{d_a + \frac{s_a^2}{2}}; \quad \sigma_a^2 = e^{2d_a + s_a^2} (e^{s_a^2} - 1).$$

Таким образом, распределение уровня связки можно считать нормальным (гауссовским), распределение диаметров абразивных зёрен круга – логарифмически нормальным [52], а распределение высот вершин зёрен над уровнем связки – равномерным (по крайней мере, сразу после правки круга [54]). Для абразивных зёрен диаметром d_0 плотность распределения высоты их вершин над уровнем связки

$$p_B^{d_0}(y) = \begin{cases} \frac{1}{d_0} & \text{при } 0 \leq y \leq d_0; \\ 0 & \text{при } d_0 < y < 0. \end{cases}$$

Однако уже на начальном этапе работы шлифовального круга закон распределения высот вершин абразивных зёрен над уровнем связки изменяется вследствие их износа и разрушения. Кроме того, межзёренные пространства (поры) постепенно забиваются частицами шлама. Поэтому на первом этапе решения задачи нахождения функции распределения высот вершин зёрен шлифовального круга не будем конкретизировать закон плотности распределения высоты выступа $p_B^{d_0}(y)$ и получим соответствующие выражения в общем виде.

Обозначим плотность распределения зёрен круга по диаметрам $p_a(y) = F'_a(y)$. Тогда вероятность того, что диаметр зёрна, находящегося на рабочей поверхности круга, не превышает d_0 , равна $P_1 = p_a(d_0) dd_0$.

Вероятность того, что координата вершины зёрна диаметром d_0 будет меньше заданного значения y , равна

$$P_2 = \int_{-\infty}^y \left[p_c(s) \int_0^{\min(y-s, d_0)} p_B^{d_0}(t) dt \right] ds,$$

где $p_c(s) = F'_c(s)$ – плотность распределения уровня связки.

Перемножив вероятности P_1 и P_2 (в силу независимости соответствующих им случайных событий) и проинтегрировав по возможному диапазону диаметров абразивных зёрен круга, получим выражение для функции распределения вершин зёрен круга:

$$F_B(y) = \int_0^{+\infty} p_a(d_0) \left\{ \int_{-\infty}^y \left[p_c(s) \int_0^{\min(y-s, d_0)} p_B^{d_0}(t) dt \right] ds \right\} dd_0. \quad (1.1)$$

Так как результирующей характеристикой процессов износа и засаливания круга можно считать среднюю высоту вершин зёрен над уровнем связки, которая изменяется во времени, рассмотрим динамику плотности распределения $p_B^{d_0}(y)$. Введем функцию распределения:

$$B_\alpha(y) = \int_{-\infty}^y b_\alpha(s) ds,$$

где плотность распределения случайной величины α

$$b_\alpha(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < y < 0; \\ (\alpha + 1)(1 - x)^\alpha & \text{при } 0 \leq y \leq 1, \alpha > -1. \end{cases} \quad (1.2)$$

Закон изменения величины α (рис. 1.25) можно представить выражением

$$\alpha(t) = k_1 \ln(1 + t^{k_2}) + \alpha_0; \quad k_1, k_2 > 0.$$

На графике (см. рис. 1.25) $\alpha_{кр}$ – критическое значение параметра α , при котором необходима правка круга.

Параметр τ_k зависит от режима обработки заготовки и от обрабатываемости материала, из которого она изготовлена.

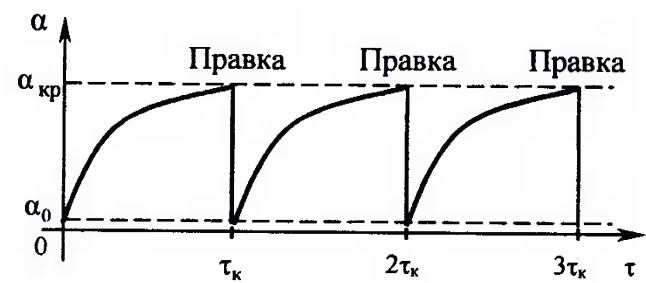


Рис. 1.25. Зависимость параметра α от времени обработки τ с учетом правки круга

Первые два центральных момента случайной величины α с функцией распределения $B_\alpha(y)$ можно вычислить, используя формулы интегрирования по частям:

$$M\alpha = (\alpha + 1) \int_0^1 y(1-y)^\alpha dy = \frac{1}{\alpha + 2};$$

$$M\alpha^2 = (\alpha + 1) \int_0^1 y^2(1-y)^\alpha dy = \frac{2}{(\alpha + 2)(\alpha + 3)};$$

$$D\alpha = M\alpha^2 - (M\alpha)^2 = \frac{\alpha + 1}{(\alpha + 2)^2(\alpha + 3)}.$$

Графики плотности $b_\alpha(y)$ для значений динамического параметра $\alpha = 0; 1/2; 1; 2$ имеют вид, показанный на рис. 1.26.

Используем выражение (1.2) для определения функции $p_B^{d_0}(y)$ в выражении (1.1). В этом случае

$$p_B^{d_0}(y) = \frac{(\alpha + 1)}{d_0} \left(1 - \frac{y}{d_0}\right)^\alpha, \quad (1.3)$$

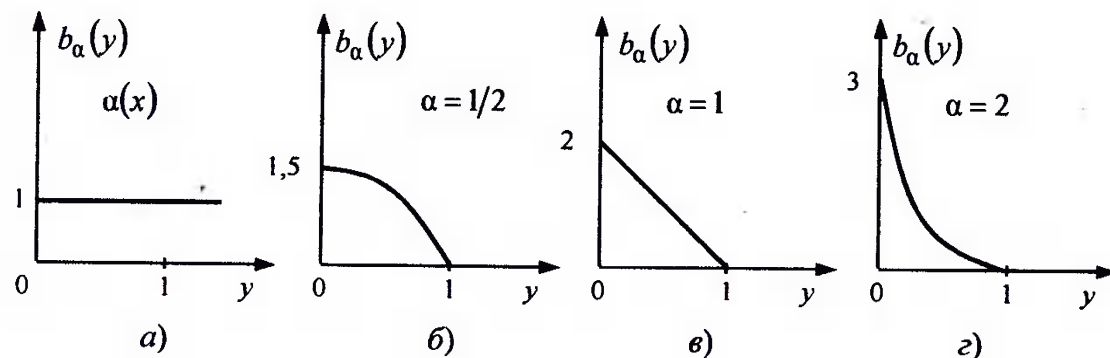


Рис. 1.26. Графики плотности $b_\alpha(y)$:
а, б, в, г – соответственно при $\alpha = 0; 1/2; 1; 2$

где $y \in [0, d_0]$, $\alpha \in (-1, +\infty)$, причем $\int_0^{d_0} p_B^{d_0}(y) dy = 1$. Тогда интеграл в квадратных скобках в выражении (1.1) можно найти в явном виде:

$$\int_0^{\min(y-s, d_0)} \frac{(\alpha + 1)}{d_0} \left(1 - \frac{t}{d_0}\right)^\alpha dt = 1 - \left(1 - \frac{\min(y-s, d_0)}{d_0}\right)^{\alpha+1}. \quad (1.4)$$

Подставив (1.4) в (1.1), получим выражение для динамической функции распределения высот вершин абразивных зерен круга над уровнем связки в процессе шлифования:

$$F_B^\alpha(y) = \int_0^{+\infty} p_a(d_0) \left\{ \int_{-\infty}^y p_c(s) \left[1 - \left(1 - \frac{\min(y-s, d_0)}{d_0}\right)^{\alpha+1} \right] ds \right\} dd_0. \quad (1.5)$$

Вероятностная модель шлифовального круга, разработанная А.В. Королевым и Ю.К. Новоселовым [54, 55], не учитывает динамику процессов, происходящих с кругом при его эксплуатации, а также влияние механических примесей, попадающих вместе с СОЖ в зону обработки, на изменение вероятностных характеристик круга $F_B^\alpha(y)$, $F_c(y)$.

Предположим, что известны $F_a(y)$, $F_B^\alpha(y)$, а также

$F_{ш}(y) = \Phi\left(\frac{\ln y - d_{ш}}{s_{ш}}\right)$ – функция распределения диаметров абразивных

частиц шлама в СОЖ и $F_3(y) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln y - d_3}{s_3}\right)$ – вероятность налипания

частицы шлама диаметром y на рабочую поверхность круга.

Наряду с функцией $F_3(y)$ будем также рассматривать функцию $\bar{F}_3(y) = 1 - F_3(y)$, определяющую вероятность того, что частица шлама диаметром y не налипнет на рабочую поверхность круга (и не попадет в зону шлифования) (рис. 1.27).

Определим вероятность налипания частицы шлама на рабочую поверхность круга с учетом распределения частиц шлама в СОЖ по размерам:

$$\bar{\varepsilon}_B = \int_0^{+\infty} F_3(y) dF_{ш}(y) = 1 - \Phi\left(\frac{d_{ш} - d_3}{\sqrt{s_{ш}^2 + s_3^2}}\right). \quad (1.6)$$

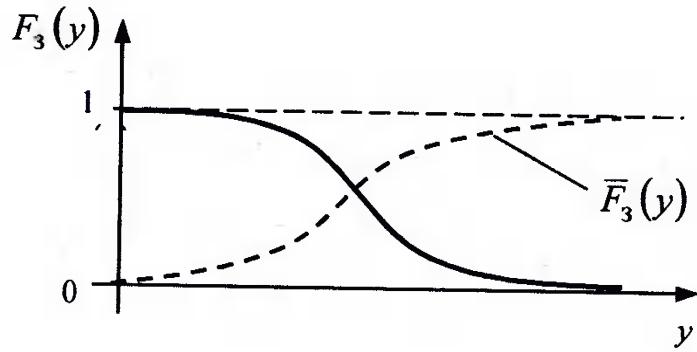


Рис. 1.27. Вероятность $F_3(y)$ налипания частицы шлама диаметром y на рабочую поверхность круга

Функция распределения частиц шлама, попавших в зону шлифования:

$$F_{\Pi}(x) = \frac{1}{\varepsilon_B} \int_0^x F_3(u) dF_{\text{ш}}(u). \quad (1.7)$$

Функция распределения частиц шлама, не попавших в зону шлифования:

$$F_0(y) = \frac{1}{1 - \varepsilon_B} \int_0^y \bar{F}_3(u) dF_{\text{ш}}(u). \quad (1.8)$$

С использованием полученных зависимостей можно подсчитать центральные моменты m_{Π} , σ_{Π}^2 ; m_0 , σ_0^2 , а также приближенно найти функцию распределения высот вершин абразивных зерен круга над уровнем связки.

Введем случайные величины: ξ_i — уровень вершин абразивных зерен круга и налипших на рабочую поверхность круга частиц шлама; d_{0i} — диаметр абразивного зерна круга; d_i — диаметр налипшей частицы шлама (рис. 1.28).

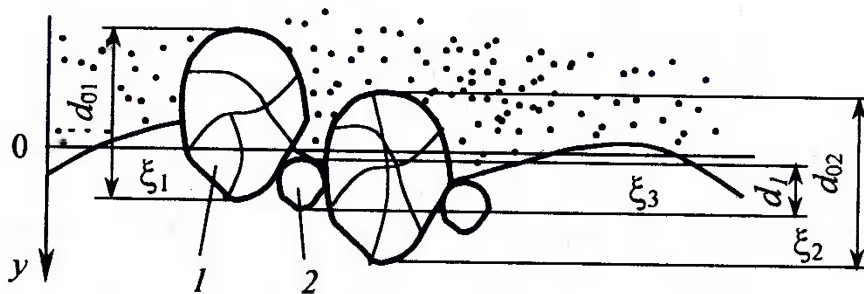


Рис. 1.28. Схема изменения рабочей поверхности круга:
1 — абразивное зерно; 2 — частица шлама

Будем считать, что соседние абразивные зерна круга выступают над нулевым уровнем на величину $\alpha_1 \in [0, 1]$ и $\alpha_2 \in [0, 1]$ от своего диаметра, а независимые случайные величины α_1 и α_2 имеют функцию распределения $B_{\alpha}(y)$. Тогда уровень вершин частиц шлама с учетом двух соседних абразивных частиц круга

$$\xi_3 = \frac{1}{2}(\xi_1 - \alpha_1 d_{01} + \xi_2 - \alpha_2 d_{02}) + d_1.$$

Параметр ξ_3 — случайная величина с некоторой функцией распределения $F_{\text{HB}}(y)$. Первые два центральных момента случайной величины ξ_3 найдем следующим образом:

$$m_{\text{HB}} = m_B - \frac{m_a}{\alpha + 2} + m_{\Pi}; \quad (1.9)$$

$$\sigma_{\text{HB}}^2 = \frac{1}{2} \sigma_B^2 + \frac{2(\alpha + 2) \sigma_a^2 + (\alpha + 1) m_a^2}{2(\alpha + 2)^2 (\alpha + 3)} + \sigma_{\Pi}^2. \quad (1.10)$$

На основе полученных зависимостей можно определить результирующую функцию распределения высот вершин абразивных зерен круга с учетом частиц шлама, размещенных в межзеренном пространстве круга:

$$F_{\Sigma B}^{\alpha}(y) = \beta F_B^{\alpha}(y) + (1 - \beta) F_{\text{HB}}^{\alpha}(y), \quad (1.11)$$

где $\beta \in (0, 1)$ — коэффициент размещения частиц шлама в межзеренном пространстве круга.

Математическое ожидание и дисперсию высот вершин над уровнем связки можно вычислить следующим образом:

$$m_{\Sigma p} = \beta m_B + (1 - \beta) m_{\text{HB}}; \quad (1.12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\Sigma p}^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} y^2 dF_{\Sigma B}^{\alpha}(y) - m_{\Sigma B}^2 = \\ &= \beta M \xi_B^2 + (1 - \beta) M \xi_{\text{HB}}^2 - (\beta m_B + (1 - \beta) m_{\text{HB}})^2 = \\ &= \beta \sigma_B^2 + (1 - \beta) \sigma_{\text{HB}}^2 + \beta(1 - \beta) (m_B - m_{\text{HB}})^2. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Необходимое и достаточное условие уменьшения шероховатости рабочей поверхности круга в процессе шлифования:

$$\sigma_{\Sigma B} < \sigma_B. \quad (1.14)$$

После подстановки в условие (1.14) выражения (1.13) получим:

$$\beta(1-\beta)(m_B - m_{HB})^2 < (1-\beta)(\sigma_B^2 - \sigma_{HB}^2).$$

С учетом выражений (1.9) и (1.10) из (1.13) следует:

$$\sigma_B^2 > 2\beta \left(\frac{m_a}{\alpha+2} - m_{\Pi} \right)^2 + \frac{2(\alpha+2)\sigma_a^2 + (\alpha+1)m_a^2}{2(\alpha+2)^2(\alpha+3)} + 2\sigma_{\Pi}^2. \quad (1.15)$$

Анализ условия (1.15) показывает, что оно может быть выполнено при введении в СОЖ мелкого однородного шлама с $m_{ш} \ll m_a$ и $\sigma_{ш}^2 \approx 0$. В этом случае можно прогнозировать уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности заготовки при загрязнении СОЖ механическими примесями, что подтверждается результатами экспериментальных исследований [31]. В случае невыполнения условия (1.15) загрязнение СОЖ механическими примесями приводит к увеличению высотных параметров рельефа рабочей поверхности круга.

Рассмотрим далее влияние распределения высот вершин абразивных зерен на рабочей поверхности круга на формирование профиля шлифованной поверхности заготовки.

Допустим, что известны следующие данные:

1) функция распределения высот вершин зерен на рабочей поверхности шлифовального круга

$$F_B(y) = 1 - \Phi \left(\frac{y - m_B}{\sigma_B} \right);$$

2) функция распределения высот микронеровностей на поверхности заготовки до обработки

$$F_{шp}(y) = \Phi \left(\frac{y - m_{шp}}{\sigma_{шp}} \right),$$

где $m_{шp}$, $\sigma_{шp}$ — соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение высот микронеровностей на поверхности заготовки.

Тогда среднее уменьшение высоты микронеровностей в процессе обработки заготовки можно найти следующим образом:

$$\bar{\zeta} = \int_{-\infty}^{+\infty} F_B(y) dF_{шp}(y) = 1 - \Phi \left(\frac{m_{шp} - m_B}{\sqrt{\sigma_{шp}^2 + \sigma_B^2}} \right).$$

Функции распределения удаленного $F_y(y)$ и оставшегося $F_o(y)$ материала заготовки имеют вид:

$$F_y(y) = \frac{1}{\zeta} \int_{-\infty}^y F_B(t) dF_{шp}(t); \quad (1.16)$$

$$F_o(y) = \frac{1}{1-\zeta} \int_{-\infty}^y (1 - F_B(t)) dF_{шp}(t). \quad (1.17)$$

На рис. 1.29 $p_y(y)$ и $p_o(y)$ — плотности распределения соответственно удаленного и оставшегося материала заготовки (первые производные от $F_y(y)$ и $F_o(y)$).

Если принять гипотезу о нормальном распределении функций $F_y(y)$ и $F_o(y)$ [18]:

$$F_y(y) = \Phi \left(\frac{y - m_y}{\sigma_y} \right); \quad F_o(y) = \Phi \left(\frac{y - m_o}{\sigma_o} \right),$$

то можно приближенно найти $F_y(y)$ и $F_o(y)$, не вычисляя интегралы (1.16) и (1.17). Итоговые формулы для расчета m_y , σ_y ; m_o , σ_o имеют следующий вид:

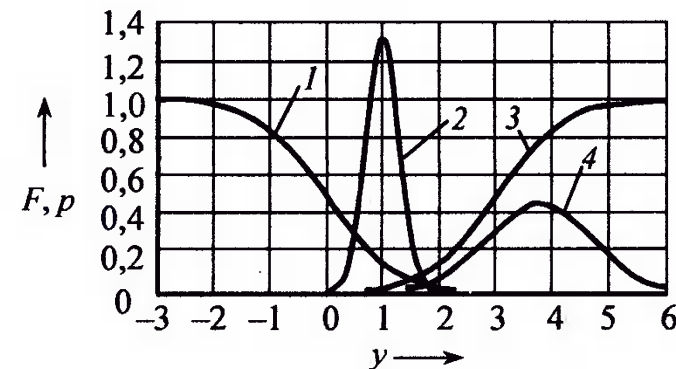


Рис. 1.29. Графики функций $F(y)$ и плотностей распределений $p(y)$:

1 — $F_B(y)$; 2 — $p_y(y)$; 3 — $F_{шp}(y)$; 4 — $p_o(y)$

$$m_y = m_{\text{шп}} - \sqrt{-2\sigma_y^2 \ln \left[\frac{\sigma_y}{\zeta \sigma_{\text{шп}}} \left(1 - \Phi \left(\frac{m_{\text{шп}} - m_{\text{в}}}{\sigma_{\text{в}}} \right) \right) \right]}; \quad (1.18)$$

$$m_o = m_{\text{шп}} + \sqrt{-2\sigma_o^2 \ln \left[\frac{\sigma_o}{(1-\bar{\zeta})\sigma_{\text{шп}}} \Phi \left(\frac{m_{\text{шп}} - m_{\text{в}}}{\sigma_{\text{в}}} \right) \right]}. \quad (1.19)$$

При $\sigma_{\text{шп}} \leq \sigma_{\text{в}}$ можно предложить следующие полуэмпирические зависимости для нахождения дисперсий, входящих в зависимости (1.18) и (1.19):

$$\sigma_y = \sigma_{\text{шп}} + \frac{\beta \sigma_{\text{шп}}^2 \sqrt{1-\bar{\zeta}}}{\sigma_{\text{в}}}; \quad (1.20)$$

$$\sigma_o = \sigma_{\text{шп}} + \frac{\alpha \sigma_{\text{шп}}^2 (\bar{\zeta}^2 - 2\bar{\zeta})}{\sigma_{\text{в}}}, \quad (1.21)$$

где $\alpha \approx 0,246$; $\beta \approx -0,261$ – константы, найденные численно, исходя из критерия наилучшего приближения к медиане.

При $\sigma_{\text{шп}} > \sigma_{\text{в}}$ функции распределения удаленного и оставшегося материала заготовки на нормальной плоскости имеют вид гипербол с характеристиками начальной шероховатости заготовки и шлифовального круга в качестве асимптот. Здесь применима следующая зависимость:

$$F_o(y) = \frac{1}{1-\bar{\zeta}} F_{\text{ш}}(y) F_{\text{в}}(y) - \frac{\bar{\zeta}}{1-\bar{\zeta}} \tilde{F}_o(y),$$

где $\tilde{F}_o(y)$ – функция распределения оставшегося материала при

$$\begin{cases} \tilde{F}_{\text{шп}}(y) = 1 - F_{\text{в}}(y); \\ \tilde{F}_{\text{в}}(y) = 1 - F_{\text{шп}}(y). \end{cases}$$

$$\text{Тогда } F_y(y) = \frac{1}{\zeta} F_{\text{ш}}(y) - \frac{1-\bar{\zeta}}{\zeta} F_o(y).$$

Приведем пример использования разработанной методики для решения обратных задач. Пусть известны средние арифметические отклонения профиля поверхности до Ra^o и после Ra^H шлифования и снятый припуск Δ_0 . Необходимо найти функции распределения $F_{\text{в}}(y)$, $F_{\text{ш}}(y)$ и среднее уменьшение высоты микронеровностей в процессе обработки заготовки $\bar{\zeta}$.

Известно, что для нормального распределения $Ra = \sigma \sqrt{2/\pi}$. Поэтому:

$$\sigma_{\text{шп}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} Ra^H, \quad m_{\text{шп}} = 3\sigma_{\text{шп}}, \quad F_{\text{шп}}(y) = \Phi \left(\frac{y - m_{\text{шп}}}{\sigma_{\text{шп}}} \right);$$

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{\pi}{2}} Ra^o, \quad m_o = \Delta_0 + 3\sigma_o, \quad F_o(y) = \Phi \left(\frac{y - m_o}{\sigma_o} \right).$$

Тогда среднее уменьшение высоты микронеровностей и параметры распределения высот вершин абразивных зерен шлифовального круга определяются следующим образом:

$$\bar{\zeta} \approx 1 - F_o(m_{\text{шп}} + 3\sigma_{\text{шп}});$$

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{\alpha \sigma_{\text{ш}}^2}{s_o - \sigma_{\text{шп}}} (\bar{\zeta}^2 - 2\bar{\zeta});$$

$$m_{\text{в}} = m_{\text{шп}} - \sqrt{\sigma_{\text{шп}}^2 + \sigma_{\text{в}}^2} \Phi^{-1}(1-\bar{\zeta}).$$

$F_y(y)$ можно найти по формулам (1.18) и (1.20) для прямой задачи, так как известны $F_{\text{шп}}(y)$ и $F_{\text{в}}(y)$.

Полученные итоговые зависимости (1.18) – (1.21) позволяют прогнозировать профиль шлифованной поверхности детали (заготовки) с учетом содержащихся в СОЖ механических примесей. Для практического использования этих зависимостей необходима информация о распределении механических примесей в СОЖ по размерам.

С помощью дисперсионного анализа ферромагнитной компоненты шлифовального шлама, проведенного фотоседиментационным способом [11, 58], установлено, что закон распределения частиц шлама по фракциям приближается к логарифмически нормальному [11].

Для математической формализации зависимости размера частиц шлифовального шлама от условий обработки провели многофакторное экспериментальное исследование процесса круглого наружного окончательного шлифования на станке мод. 3Б161 заготовок из стали ШХ 15, HRC 61...64 кругом 1–600×40×305 при рабочей скорости круга $v_k = 50$ м/с. Окружная скорость заготовки составляла $v_3 = 50$ м/мин. Шлифовальный круг правили алмазным карандашом С3 по циклу: 3 прохода с врезной подачей 0,03 мм/ход; 1 проход без врезной подачи; скорость продольной подачи алмазного карандаша составляла 200 мм/мин. В качестве СОЖ использовали 3 %-ную эмульсию Укринол-1. СОЖ подавали в зону шлифования свободно падающей струей (поливом).

Результаты опыта обрабатывали, придерживаясь единой шкалы размеров частиц с модулем $\sqrt[3]{4}$, т.е. ряда 1,6 – 2,5 – 4,0 – 6,3 – 10 – 16 – 25 – 40 – 63 мкм. В пределах фракции $(d_i, \dots, d_{i+1})$ размеры всех частиц считали равными среднему диаметру частиц $\bar{d}_i$:

$$\bar{d}_i = \frac{d_i + d_{i+1}}{2}.$$

Средний размер частиц шлама определяли по формуле

$$\bar{d}_{\text{ш}} = \sum_{i=1}^n \bar{d}_i f_i, \quad (1.22)$$

где f_i – частота частиц i -ой фракции в шламе; n – число фракций.

В качестве параметра оптимизации выбрали средний размер (диаметр) частиц шлифовального шлама $\bar{d}_{\text{ш}}$. Это объясняется значительным влиянием параметра $\bar{d}_{\text{ш}}$ на эффективность как процесса шлифования, так и процесса очистки СОЖ от шлифовального шлама. Кроме того, погрешность измерения $\bar{d}_{\text{ш}}$ не превышает 5 %.

Наиболее значимые факторы выявили по результатам предварительных экспериментов: зернистость $d_{\text{аз}}$ и твердость $T_{\text{кр}}$ шлифовального круга, скорость врезной подачи круга v_s и время шлифования τ (табл. 1.2). Эти факторы легко контролируются и не зависят от других факторов.

В результате проведения рандомизированных во времени экспериментов, поставленных по плану полнофакторного эксперимента типа 2^4 , и расчета коэффициентов аппроксимирующей функции получена регрессионная математическая модель:

1.2. Уровни факторов и интервалы их варьирования

Уровень фактора и интервал варьирования	Зернистость X_1 , мкм	Твердость (по Роквеллу) X_2	Скорость врезной подачи X_3 , мм/мин	Время шлифования X_4 , с
Основной	260	19	0,475	95
Верхний	400	29,5 (C1)	0,80	180
Нижний	120	8,5 (CM1)	0,15	10
Интервал варьирования	140	10,5	0,325	85

$$\begin{aligned} \bar{d}_{\text{ш}} = & 31 + 3,6 X_1 + 2,0 X_2 + 2,2 X_3 - 3,1 X_4 + 0,25 X_1 X_2 + 1,2 X_1 X_3 - \\ & - 0,35 X_1 X_4 - 0,19 X_3 X_4 + 0,075 X_1 X_2 X_3 - 0,125 X_1 X_3 X_4 + \\ & + 0,013 X_1 X_2 X_4 - 0,2 X_2 X_3 X_4 - 0,038 X_1 X_2 X_3 X_4, \end{aligned} \quad (1.23)$$

где $X_1, \dots, X_4$ – кодированные значения факторов, представленных в табл. 1.2 (нижним уровням факторов соответствует значение –1, верхним +1).

Для проверки адекватности модели использовали метод дисперсионного анализа. В случае адекватности математической модели справедливо неравенство

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_p^2} < F_T, \quad (1.24)$$

где F_p , F_T – соответственно расчетное и табличное значения критерия Фишера; дисперсия адекватности $S_{\text{ад}}^2$ и дисперсия воспроизводимости S_p^2 исследуемого показателя:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} n_1 (\bar{y}_i - \hat{y}_a)^2}{n_2 (n_3 - 1)}; \quad S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{n_1} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n_2 (n_1 - 1)},$$

где n_1 – число параллельных опытов; n_2 – число опытов; $n_3 = 4$ – число независимых переменных; $\bar{y}_i$ – среднее арифметическое значение пара-

метра оптимизации по n_1 наблюдениям; $\hat{y}_a$ – математическое ожидание параметра оптимизации (расчетное значение параметра); y_{id} – значение параметра оптимизации в параллельных опытах.

Для нашего случая $F_p = 0,165/9,1 = 0,018 < 2,4$. Таким образом, математическая модель выбрана правильно.

Значимость коэффициентов регрессии b_i проверяли по критерию Стьюдента, используя следующее условие:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{b_i}} > t_{кр}, \quad (1.25)$$

где $S_{b_i} = \sqrt{S_p^2 / n_2 n_1}$ – дисперсия коэффициентов регрессии.

При 16 степенях свободы и уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение $t_{кр} = 1,96$. В анализируемом случае оказались значимыми коэффициенты при независимых факторах и смешанном взаимодействии $X_1 X_3$. Все остальные коэффициенты регрессии незначимы. В результате уравнение (1.23) приняло следующий вид:

$$\bar{d}_{ш} = 31 + 3,6 X_1 + 2,0 X_2 + 2,2 X_3 - 3,1 X_4 + 1,2 X_1. \quad (1.26)$$

После перехода от кодированных значений факторов к натуральным величинам получили

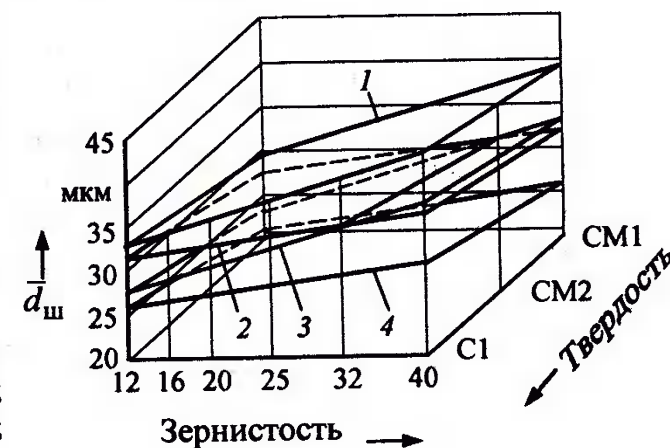
$$\bar{d}_{ш} = 24,3 + 0,014 d_{аз} + 0,19 T_{кр} + 0,1 v_s - 0,037 t + 0,026 d_{аз} v_s. \quad (1.27)$$

Анализ уравнения регрессии (1.27) показал, что твердость круга $T_{кр}$ и время шлифования t независимо влияют на гранулометрический состав шлифовального шлама. Кроме того, отмечен эффект парного взаимосвязанного влияния зернистости и скорости врезной подачи шлифовального круга на размер образующихся при шлифовании частиц механических примесей $\bar{d}_{ш}$. Об этом свидетельствуют графики (рис. 1.30).

Увеличение зернистости, твердости и скорости врезной подачи шлифовального круга приводит к увеличению $\bar{d}_{ш}$ (коэффициенты регрессии при соответствующих переменных имеют положительный знак) в противоположность времени шлифования t . Так, при увеличении зернистости, твердости и врезной подачи круга в 3 раза средний размер частиц

Рис. 1.30. Влияние зернистости и твердости шлифовального круга на средний размер частиц механических примесей $\bar{d}_{ш}$ [11]:

заготовки из стали ШХ15, HRC 61...64; круг 1 – 600×40××305; 1 – $v_s = 0,8$ мм/мин; $\tau = 10$ с; 2 – $v_s = 0,15$ мм/мин; $\tau = 10$ с; 3 – $v_s = 0,8$ мм/мин; $\tau = 180$ с; 4 – $v_s = 0,15$ мм/мин; $\tau = 180$ с



механических примесей $\bar{d}_{ш}$ увеличился соответственно на 45, 15 и 10 %, а при таком же изменении времени шлифования величина $\bar{d}_{ш}$ уменьшилась на 3 % (табл. 1.3, рис. 1.31 и 1.32).

1.3. Результаты полнофакторного экспериментального исследования влияния твердости и зернистости шлифовального круга на средний размер частиц механических примесей $\bar{d}_{ш}$ [11]

Время шлифования τ , с	Скорость подачи v_s , мм/мин	Твердость круга (по Роквеллу)	Зернистость круга	Параметр $\bar{d}_{ш}$, мкм
10	0,15	8,5 (СМ1)	12	27,5
			40	32,3
	0,80	29,5 (С1)	12	31,5
			40	36,3
		8,5 (СМ1)	12	29,5
			40	39,1
		29,5 (С1)	12	33,5
			40	43,1
180	0,15	8,5 (СМ1)	12	21,3
			40	26,1
		29,5 (С1)	12	25,3
			40	30,1
	0,80	8,5 (СМ1)	12	23,3
			40	32,9
		29,5 (С1)	12	27,3
			40	36,8



Рис. 1.31. Влияние зернистости шлифовального круга на средний размер частиц механических примесей $\bar{d}_{ш}$ [11]:
заготовки из стали ШХ15, HRC 61...64; круг 1 — 600×40×305; 1, 3 — $v_s = 0,15$ мм/мин; $\tau = 10$ с; 2, 4 — $v_s = 0,8$ мм/мин; $\tau = 180$ с; 1, 2 — твердость круга C1; 3, 4 — твердость CM1



Рис. 1.32. Влияние твердости шлифовального круга на средний размер частиц механических примесей $\bar{d}_{ш}$ [11]:
заготовки из стали ШХ 15, HRC 61...64; круг 1 — 600×40×305; 1, 4 — $v_s = 0,8$ мм/мин; $\tau = 180$ с; 2, 3 — $v_s = 0,15$ мм/мин; $\tau = 10$ с; 1, 2 — зернистость круга 40; 3, 4 — зернистость 12

Эти закономерности объясняются тем, что при увеличении зернистости и твердости шлифовального круга уменьшается число абразивных зерен на единице площади его рабочей поверхности и соответственно увеличивается объем стружки, снимаемой единичным зерном. Уменьшение среднего размера частиц шлама $\bar{d}_{ш}$ при увеличении времени шлифования t связано с затуплением абразивных зерен круга и потерей им режущей способности. Наибольшее значение параметра $\bar{d}_{ш} = 43,1$ мкм зафиксировано при шлифовании заготовки кругом зернистостью 40 и твердостью C1 со скоростью врезной подачи $v_s = 0,8$ мм/мин в течение 10 с. При уменьшении зернистости, твердости и скорости подачи круга до нижнего уровня ($d_{аз} = 120$ мкм; $T_{кр} = 8,5$; $v_s = 0,15$ мм/мин) и увеличении продолжительности шлифования до 180 с средний размер частиц шлифовального шлама $\bar{d}_{ш}$ уменьшился до 21,6 мкм (см. табл. 1.3 и рис. 1.30).

Разработанная математическая модель (1.18) – (1.21), дополненная эмпирическим уравнением (1.27), позволяет не только достоверно прогнозировать профиль шлифованной поверхности заготовки с учетом содержащихся в СОЖ механических примесей, но и качественно объяснить

наблюдавшийся в опытах различный характер изменения параметра Ra (см. рис. 1.8 и 1.15).

Методические подходы, изложенные в настоящем параграфе, и математические модели (1.18) – (1.21) и (1.27) использовали при расчете норм чистоты СОЖ, заложенных в ГОСТ Р 50558–93 «Промышленная чистота. Жидкости смазочно-охлаждающие. Общие технические требования» [68] и в ГОСТ Р 50815–95 «Промышленная чистота. Жидкости смазочно-охлаждающие. Требования к чистоте смазочно-охлаждающих жидкостей на операциях круглого наружного и плоского шлифования периферией круга» [30]. Результаты вероятностного моделирования использовали также при расчете очистителей и магнитных коагуляторов (см. гл. 4).

1.4. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕГРАДАЦИИ СОЖ

Как следует из многолетнего промышленного опыта и анализа научно-технической информации (см., например, п. 1.2), изменение свойств СОЖ в процессе ее функционирования неизбежно приводит к ухудшению и дестабилизации показателей механической обработки. В связи с этим, естественно, становится все более актуальной для предприятий машиностроительного комплекса проблема предотвращения деградации СОЖ при ее эксплуатации, стабилизации на заданном уровне на длительный срок (до года и более) ее функциональных и эксплуатационных свойств, полного исключения залповых сбросов СОЖ в окружающую среду. Тем самым, проблема предотвращения деградации СОЖ приобрела еще и экологическое значение.

Наиболее сложными с технологической, технической и экономической точек зрения являются системы применения наиболее распространенных в промышленности эмульсионных СОЖ (до 90 % объема всех водных СОЖ). Основные сложности при этом связаны с низкой устойчивостью эмульсионных СОЖ к микробиологическому поражению, интенсивной их деградацией в процессе функционирования, а также необходимостью разделения дисперсионной и дисперсной фаз при утилизации отработанных эмульсий и регенерации эмульсолов. В связи с этим принят анализ процесса деградации именно эмульсионной СОЖ при ее функционировании.

Внутри кругового графа деградации эмульсионной СОЖ (рис. 1.33) прямыми линиями показаны взаимосвязи возмущающих факторов между собой, причем наиболее значимые связи даны утолщенными линиями.



Рис. 1.33. Граф деградации эмульсионной СОЖ

Раскрытие взаимосвязи (взаимообусловленности) порождаемых этими факторами процессов, их влияния на состав и состояние жидкости, ее технологическую эффективность позволяет проанализировать механизмы деградации СОЖ и дать их системное описание, а также создать основы для разработки ресурсосберегающего экологизированного технологического процесса применения СОЖ.

Рассмотрим основные факторы (процессы) (табл. 1.4), которые необходимо учитывать при анализе процесса деградации СОЖ.

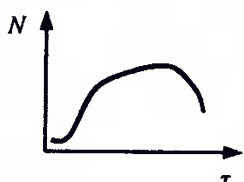
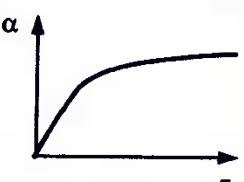
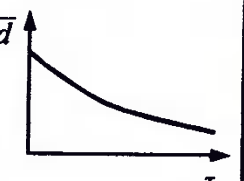
1.4. Мероприятия по предотвращению деградации СОЖ в процессе ее функционирования

Процессы и факторы, ухудшающие функциональные свойства СОЖ	Следствия	Характер изменения параметров процесса*)	Мероприятия по предотвращению деградации СОЖ
1	2	3	4
Теплообмен в зоне механической обработки и со средой. Сжатие в насосах и трение в скоростных очистителях	Нагрев СОЖ		Термостабилизация, понижение кратности оборота СОЖ, уменьшение числа ступеней насосов, снижение напора в системе применения

Продолжение табл. 1.4

1	2	3	4
Испарение водной фазы в зоне механической обработки и на открытых поверхностях	Накопление солей жесткости в СОЖ		Водоподготовка, использование дистиллятора, предотвращение испарения СОЖ
Пиролиз и гидролиз в зоне механической обработки. Появление микрофлоры	Деструкция композиции эмульсии		Добавки компонентов эмульсола или СОЖ с корректированием состава, подавление развития микрофлоры
Унос со шламом и заготовками, разбрызгивание, «угар» в зоне механической обработки, утечки, расслоение, биопоражение	Потеря СОЖ		Герметизация системы применения СОЖ, технологического оборудования, возврат СОЖ из шлама
	Изменение концентрации эмульсии		Возврат СОЖ из шлама, коррекция состава СОЖ, подавление бактерий
Потеря ПАВ со шламом, заготовками, биопоражение СОЖ	Дисперсионная деструкция		Диспергирование, коррекция состава. Бицидная обработка
Утечки с оборудования, смыв с поверхностей заготовок	Накопление «инородного» масла		Коррекция состава, флотация, удаление масла с поверхности СОЖ в емкостях
Смыв шлама из зоны механической обработки, недостаточная степень очистки	Накопление шлама в СОЖ		Очистка СОЖ от механических примесей. Понижение кратности оборота СОЖ в СП

Продолжение табл. 1.4

1	2	3	4
Застаивание СОЖ, заражение внешней средой	Развитие микрофлоры		Бактерицидная обработка, флотация, исключение застывания СОЖ, энергетические воздействия, организационные мероприятия
Воздействие на СОЖ магнитных и других энергетических полей	Энергоактивация		Использование устройств с оптимальной напряженностью поля
Низкая степень очистки СОЖ	Накопление тонких фракций механических и иных примесей		Тонкая очистка СОЖ от механических примесей

*¹) Обозначения: τ – время; T – температура; ΔM – изменение массы микроорганизмов; c_3 , c_m , $c_{ш}$ – концентрация соответственно эмульсола, инородных масел и шлама в СОЖ; f – частота; $\bar{d}$ – размер частиц шлама; α – поляризуемость молекул СОЖ.

1. Накопление теплоты в жидкости, способствующее интенсификации сопутствующих процессов.

Основными причинами нагрева СОЖ являются нагрев жидкости в зоне механической обработки в результате теплообмена и ее нагрев в насосных агрегатах вследствие сжатия. Снижение интенсивности нагрева обеспечивается уменьшением числа ступеней насосов и снижением напора в системах применения. Управление тепловыми процессами осуществляется в СП СОЖ путем термостабилизации с использованием специального оборудования.

В соответствии с законом внутреннего динамического равновесия, вещество, энергия и другие качества СОЖ взаимосвязаны настолько, что увеличение теплосодержания немедленно приводит к развитию цепных реакций. В частности, при повышении температуры СОЖ до 30...35 °С

интенсифицируется развитие микроорганизмов, особенно при увеличении содержания в СОЖ механических примесей и «инородных» масел. Увеличение концентрации микроорганизмов свыше 10^5 клеток/мл в свою очередь приводит к снижению показателя pH, возникновению следов коррозии на обрабатываемых заготовках, уменьшению концентрации эмульсии, ухудшению технологических (в особенности смазочных) и санитарно-гигиенических свойств СОЖ. Между тем, на сегодня нет не только системного аналитического описания этого процесса, но и соответствующего информационного обеспечения.

2. Накопление солей жесткости в СОЖ в результате испарения ее водной основы (см. табл. 1.4) препятствует полному эмульгированию и растворению компонентов СОЖ, вызывает истощение СОЖ и ухудшает ее антикоррозионные свойства. Кроме того, повышенное содержание в воде сульфатов благоприятствует размножению сульфатредуцирующих бактерий, вызывающих поражение эмульсионных СОЖ [46, 47].

3. Деструкция композиции эмульсии – изменение состава компонентов эмульсии вследствие ее пиролиза и гидролиза в зоне механической обработки, а также выделения продуктов жизнедеятельности микроорганизмов.

Состав СОЖ «восстанавливается» на соответствующих операциях путем введения добавок свежеприготовленной СОЖ и отдельных ее компонентов.

4. Накопление «инородных» масел вследствие утечек из гидравлических систем станков также способствует развитию микрофлоры [65, 127]; в той или иной степени предотвращается путем использования соответствующих очистителей, например, флотаторов.

5. Накопление механических и иных примесей в СОЖ приводит к ухудшению качества обработанных поверхностей заготовок, снижению стойкости инструментов и производительности обработки, дестабилизации свойств СОЖ и сокращению срока ее функционирования [116, 126, 128].

Основную трудность представляет декантация из СОЖ мелкодисперсных механических примесей размером менее 10 мкм. Для противодействия процессу накопления в СОЖ мелкодисперсных примесей рекомендуется вводить в технологический процесс применения СОЖ операции ее тонкой очистки.

6. Дисперсионная деструкция эмульсионных СОЖ в результате того, что в жидкости снижается количество диспергаторов (поверхностно-активных веществ), происходят коагуляция, коалесценция и расслоение

эмульсии. Причем процесс этот последовательный: скоалесцировавшие мицеллы способствуют выделению из СОЖ эмульсионной фазы и интенсифицируют процесс ее деградации.

Пока отсутствуют надежные методики и математические модели, позволяющие достоверно оценивать состояние СОЖ в процессе ее функционирования и прогнозировать его изменение под действием возмущающих факторов и управляющих воздействий.

7. Развитие микрофлоры проходит через ряд этапов – появление спор, развитие клонов, появление и развитие колоний [3].

Большинство СОЖ признают отработанными по причине биопоражения. Физические методы борьбы с микрофлорой (кроме пастеризации) не дают устойчивых результатов, последствие их не превышает двух-трех суток. Между тем, пастеризацию до последнего времени считали слишком энергозатратным способом. В итоге физические методы не нашли широкого применения [33, 84].

Распространенные химические методы борьбы с микрофлорой позволили статистически надежно поднять срок функционирования СОЖ лишь до 1 – 2 месяцев в силу адаптируемости микрофлоры к биоцидам. К тому же выбор биоцидов затруднен их избирательным воздействием на микрофлору [84].

Целесообразно разработать систему управления численностью микрофлоры в СОЖ, в которой использовались бы внутренние механизмы саморегуляции численности микрофлоры при определенных внешних воздействиях, что впоследствии удалось реализовать при разработке технологии предотвращения биопоражения СОЖ (см. гл. 3).

8. Активация СОЖ, заключающаяся во временном изменении свойств жидкости в нужном направлении внешними энергетическими воздействиями (механическими, термическими, электрическими, электрохимическими и магнитными). Механизмы энергетической активации СОЖ часто очень сложны, теория многих ее видов, например, магнитной, акустической, ударными волнами, электромагнитной, находится лишь в начальной стадии разработки.

Активация СОЖ может являться не только результатом специально-го внешнего воздействия, но и побочным следствием воздействия на СОЖ элементов системы ее применения, реализующих другие функции. Так, магнитная сепарация СОЖ неизбежно сопровождается и ее магнитной активацией. Благоприятное воздействие магнитной активации вод-ных СОЖ на технологические показатели механической обработки дока-зана многочисленными экспериментами и опытом промышленности [59].

Установлено также, что магнитная обработка СОЖ способствует повы-шению качества очистки ее от механических примесей в баках-отстойниках, фильтрах и других очистителях. [11, 62] (результаты соот-ветствующих теоретико-экспериментальных исследований приведены также в гл. 4). В качестве иллюстрации на рис. 1.34 приведены некоторые результаты нашего исследования влияния магнитной активации СОЖ в магнитном сепараторе на среднее арифметическое отклонение Ra профи-ля шлифованной поверхности и размерный износ круга ΔR [11].

Для обеспечения максимального срока функционирования СОЖ при построении систем их применения стремятся, разумеется, к подавлению в процессе их функционирования возмущающих факторов, способствующих деградации СОЖ, и к использованию позитивных факторов. Не-смотря на то что к настоящему времени в первой попытке созданы науч-ные основы стабилизации свойств СОЖ, выявлены основные механизмы их разрушения и истощения, до сих пор на практике отсутствуют СП СОЖ, в которых были бы реализованы эти научные разработки. Причины этого будут рассмотрены в п. 1.5.

Попытаемся далее разработать концепцию ресурсосбережения и экологизации в системах применения СОЖ в машиностроительных про-изводствах и рассмотрим принципы, которым должны отвечать соответ-ствующие технологии и технические средства.

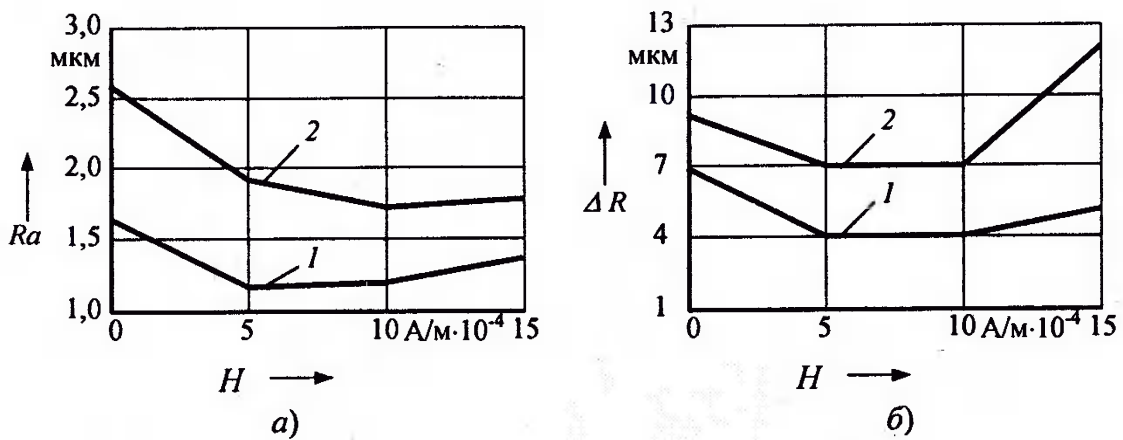


Рис. 1.34. Влияние напряженности магнитного поля H при активации СОЖ на среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности Ra (a) и размерный износ круга ΔR (б) при круглом наружном врезном шлифовании [11]:
1, 2 – v_s соответственно 3; 7 мм/мин; материал заготовок – сталь 40Х; круг 1–600×25×305 24A16HC17K5; $v_k = 50$ м/с, $v_s = 50$ м/мин; СОЖ – содо-нитритный раствор

1.5. КОНЦЕПЦИЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

1.5.1. Принципиальные положения

Глобальной проблемой современных технологий машиностроения является разработка малоотходных ресурсосберегающих технологических процессов, обеспечивающих возможность создания производств с минимальным количеством отходов, вредные воздействия которых на окружающую среду не превышают допустимых санитарно-гигиенических норм. Цель развития ресурсосберегающих и экологизированных технологий – создание системы максимально замкнутых технологических циклов с полным использованием поступающего сырья и отходов. Это – попытка воспроизвести природные циклы, так как биосфера является предельно замкнутой системой, где все элементы взаимосвязаны и обуславливают друг друга.

Современная техногенная экономика является открытой системой, где получение относительно небольшого конечного продукта требует огромных затрат ресурсов и сопровождается большим количеством отходов [37, 38]. По отношению к общему объему отчуждаемого природного вещества конечный продукт сейчас составляет всего 2...4 %, а подавляющая остальная часть идет в отходы (пустая порода, шлаки, стоки и т. д.). С этой точки зрения безотходные технологии являются идеальной моделью, на которую должны ориентироваться современные производства. Однако, абсолютно безотходное производство невозможно, поэтому можно рассчитывать лишь на малоотходное (экологизированное) производство [26, 64].

Первым и наиболее значимым этапом экологизации процессов применения СОЖ является совершенствование существующих технологий, что должно привести к экономии природных ресурсов, сокращению или предотвращению вредных выбросов, развитию и модернизации очистных сооружений, минимизации отходов. Поэтапная трансформация традиционных технологий применения СОЖ в малоотходные и ресурсосберегающие на втором этапе позволит перейти от открытых систем применения СОЖ со свободным входом ресурсов и переработкой отходов к полуоткрытым – с частичным использованием извлекаемых материалов и переработкой отходов, а затем и к циклически замкнутым системам с максимально полной переработкой всех поступающих ресурсов, необходимых при функционировании СОЖ, и использованию отходов в качест-

ве сырья для других производств. Последним этапом развития малоотходных технологий применения СОЖ является организация разумного депонирования или захоронения неминуемых остатков и нейтрализация неустраняемых энергетических потерь. Такая трансформация изменяет сам технологический принцип, так как в настоящее время в большинстве случаев борьба с загрязнениями и отходами осуществляется лишь на последнем технологическом этапе путем использования фильтров, очистных сооружений и пр. (прямые природоохранные мероприятия). Такой способ экологизации технологий применения СОЖ экономически нецелесообразен и экологически неэффективен, поскольку неизбежно ведет к удорожанию производства по мере увеличения требований к степени очистки выбросов и достигнет в конце концов такой стоимости, которая превысит стоимость самих объектов. При этом возникает противоречие между существующими технологиями применения СОЖ и новыми требованиями к защите окружающей среды. При господствующей в настоящее время на предприятиях нерациональной технологии применения СОЖ дополнять соответствующую технику сооружениями для разложения отработанной СОЖ при малом сроке ее функционирования нецелесообразно.

Переход на качественно новую технологию применения СОЖ с замкнутым циклом использования вещества позволит резко сократить потребление необходимых материалов из окружающей среды. Все вещество при такой технологии будет функционировать в социальной среде и новое количество вещества потребуются лишь для расширенного воспроизводства и компенсации неизбежных потерь, как в живой природе.

Основополагающим тезисом является предельная минимизация потерь производственных ресурсов, затрачиваемых при реализации технологических процессов механической обработки с использованием СОЖ, и исключение сбросов отработанной СОЖ и продуктов ее переработки в окружающую среду путем обеспечения замкнутых технологических циклов применения СОЖ.

На основе общесистемных, общетехнических и общетехнологических законов, а также законов инженерной экологии сформулируем систему принципов, которыми необходимо руководствоваться при создании ресурсосберегающих экологизированных технологий и СП СОЖ:

1. Принцип системной экологизации СП СОЖ в рамках системной экологизации производства.

Экологизированные ресурсосберегающие СП СОЖ следует разрабатывать в рамках системного подхода к экологизации предприятия в целом и СП СОЖ в частности, поскольку экологическая эффективность

предприятия и любой системы зависит от экологичности всех составляющих их элементов, а выборочная экологизация отдельных элементов системы не обеспечивает экологическую чистоту и безопасность системы и всего производства, так как она «гаснет» в цепи иерархии неэкологизированной производственной системы в целом. Производство необходимо строить в соответствии с законами системной целостности саморегулирующихся экосистем и использовать при этом ресурсосберегающие технологии, дающие на выходе минимум вредных выбросов, а также перерабатывать все отходы СП СОЖ с целью извлечения из них и повторного использования ценных ресурсов – металла, масел, воды и др. Уровни системности СП СОЖ сильно различаются – от простых индивидуальных, обслуживающих, например, один металлорежущий станок, до высокопроизводительных комплексов СП СОЖ, обслуживающих целые производственные корпуса [15] (рис. 1.35).

Реализация этого принципа означает, в частности, наличие в структуре СП СОЖ подсистем рекуперации соответствующих ресурсов. Вопросам выбора структуры СП СОЖ и технологическому обеспечению подсистем рекуперации металлов, минеральных масел и воды из шламов и отработанной СОЖ посвящена гл. 3.

Организация процессов утилизации отходов машиностроительными и металлургическими предприятиями в настоящее время является весьма трудной научно-технической задачей. Установки для утилизации требуют значительных капиталовложений, затрат тепло- и электроэнергии, воды, использования средств автоматики, наличия компетентного обслуживающего персонала. В этом плане оптимальным является сочетание общезаводских и локальных систем очистки. Последние позволяют из-

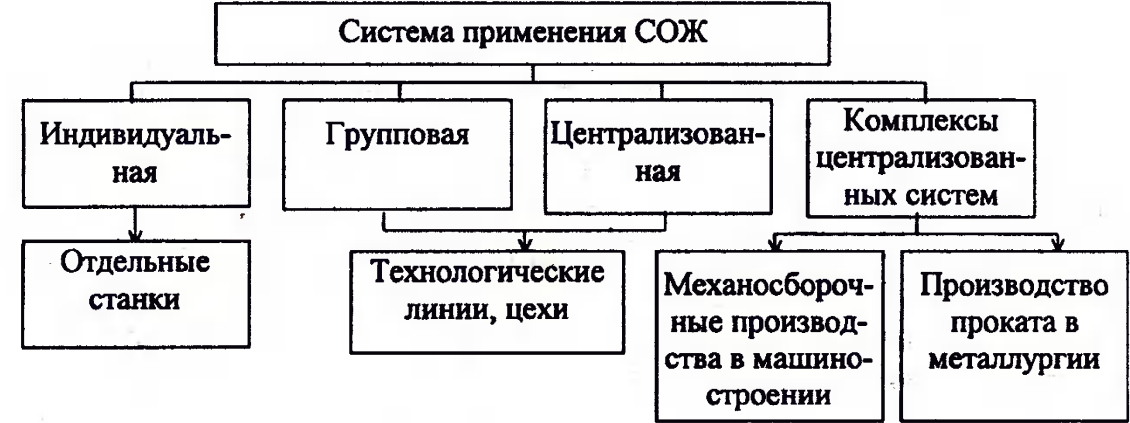


Рис. 1.35. Уровни системности СП СОЖ

влекать из СОЖ подлежащие утилизации компоненты вблизи от источников загрязнений (при высоких их концентрациях и повышенной производительности технологических элементов) и, тем самым, упростить очистку СОЖ в заводских сооружениях.

2. Принцип организации замкнутых циклов движения материальных потоков в СП СОЖ.

Реализация этого принципа наиболее эффективно обеспечивает минимизацию негативного воздействия на окружающую среду (отходов системы) при одновременном уменьшении потребления внешних ресурсов.

При разработке СП СОЖ реализация принципа организации замкнутых циклов предполагает решение комплекса научно-технических и технологических вопросов, связанных с восстановлением отработанной СОЖ и последующей ее рециклизацией, непрерывным извлечением из СОЖ и рекуперацией механических примесей и «инородных» масел. (Системному решению этих вопросов посвящена гл. 3.)

Рециклизация СОЖ позволяет исключить ее залповые сбросы в поверхностные водоемы и уменьшить техногенную нагрузку на окружающую среду. Кроме того, в СП СОЖ необходимо улавливать, конденсировать и повторно использовать СОЖ, испаряющуюся и разбрызгиваемую в процессе металлообработки, а также минимизировать потери СОЖ со шламовыми отходами и стружкой.

3. Принцип исключения или минимального использования химических методов борьбы с микроорганизмами в СОЖ.

Для борьбы с микробиологическим поражением СОЖ целесообразно использовать естественные механизмы регуляции численности бактерий (см. гл. 3) и, в частности, межвидовую конкуренцию микроорганизмов в СОЖ. Например, целесообразно периодически подавлять жизнедеятельность анаэробных бактерий, создавая при этом благоприятные условия для существования (развития) аэробных бактерий и неблагоприятные условия для анаэробных. Этот принцип реализуется путем периодической аэрации СОЖ.

4. Принцип обратимости процессов, протекающих в СОЖ.

Многие источники (см., например, [84]) указывают, что изменения, происходящие в СОЖ в процессе ее функционирования, необратимы. Однако экспериментальные исследования (см. гл. 3, а также [42, 43, 44, 75]) показывают, что определенными физико-химическими воздействиями на СОЖ можно восстанавливать ее эксплуатационный и технологический ресурсы, которые при биопоражении необратимо теряются.

5. Принцип предотвращения негативного воздействия вредных факторов (испарение, разбрызгивание СОЖ и т.д.).

Этот принцип реализуется путем использования технологий и техники, позволяющих исключать вредные факторы из производственных процессов или участие человека в нем.

6. Принцип обеспечения возможности развития (модернизации) СП СОЖ и ее элементов при изменении условий функционирования системы.

Возможным решением является модульная организация СП СОЖ, когда ее подсистемы выполняют в виде отдельных модулей, функционирующих как в автономном режиме, так и совместно с другими модулями.

7. Принцип минимального использования в СП СОЖ расходных материалов.

Предпочтение следует отдавать СП СОЖ, не использующим расходные материалы (в особенности дорогостоящие фильтрующие материалы – металлическую вату, керамические микрофильтрующие мембраны, тканые и нетканые материалы, полиэфирные волокна, нейлоны, бумагу, кизельгур, перлит, диатомит, асбест, древесную муку, инфузорную землю), что позволяет сократить количество не утилизируемых отходов, идущих в отвалы, и соответственно уменьшить техногенную нагрузку на окружающую среду и повысить экономическую эффективность СП СОЖ.

8. Общетехнические принципы построения сложных систем в применении к СП СОЖ.

Малая энергозатратность СП СОЖ при максимальном коэффициенте полезного действия.

Снижение энергозатрат становится особенно актуальным в высоко-расходных централизованных СП СОЖ современных машиностроительных и металлургических предприятий в связи с экономической недоступностью для большинства предприятий высокопроизводительных устройств, обеспечивающих качественную тонкую очистку СОЖ. Перспективным способом снижения энергозатратности СП СОЖ является организация неполнопоточной компенсационной тонкой очистки СОЖ, заключающейся в выполнении тонкой очистки не всего потока, а лишь его части (с производительностью 3...25 % производительности СП СОЖ) таким образом, чтобы при этом подавить накопление механических и иных примесей во всем объеме СОЖ (см. гл. 2).

Оптимизация размеров и месторасположения СП СОЖ и ее элементов.

Возможность существенной экономии производственных площадей открывает многоуровневое расположение технологических элементов СП СОЖ, различных по своему функциональному назначению. Компактность позволяет располагать в ограниченных по площади помещениях сложные системы. В связи с этим целесообразен переход от напорных систем к безнапорным. В таких системах уменьшается число емкостей и насосов. При этом обеспечивается существенное снижение энергозатрат.

Возможным путем реализации рассматриваемого принципа является также совмещение технологических элементов СП СОЖ в пространстве. Например, весьма эффективным оказывается совмещение флотационной и гравитационной очистки СОЖ в одной емкости, а также совмещение функций транспортирования СОЖ и предварительной ее очистки путем размещения элементов подсистемы очистки СОЖ в трубопроводе (см. гл. 5).

При решении проектно-конструкторских задач, связанных с принципом оптимизации размеров и месторасположения элементов и СП СОЖ, целесообразно использовать математические методы параметрического анализа (см. гл. 2 и 4).

Обеспечение оптимальной и надежной работы всех элементов СП СОЖ.

Нельзя рассчитывать на предельный (максимально эффективный) режим работы элементов СП СОЖ, так как это может вызвать их быстрый износ и выход из строя. Поэтому при проектировании СП СОЖ необходимо закладывать оптимальные, а не максимально эффективные режимы работы всех ее элементов (своего рода «крейсерский» режим).

С целью повышения надежности СП СОЖ необходимо, чтобы технологические функции каждого элемента системы подстраховывались другими (не такими же) элементами (принцип обеспечения необходимого разнообразия). В этом случае выход из строя одного элемента системы не приведет к ее резкому функциональному изменению. Этот принцип нашел удачное техническое решение в установках «Вита-С», в которых функция очистки СОЖ возложена на очистители трех типов – бак-отстойник, магнитный сепаратор и флотатор (см. гл. 5).

Гибкость технологических процессов и автоматизированное (адаптивное) управление СП СОЖ и ее элементами (рис. 1.36).

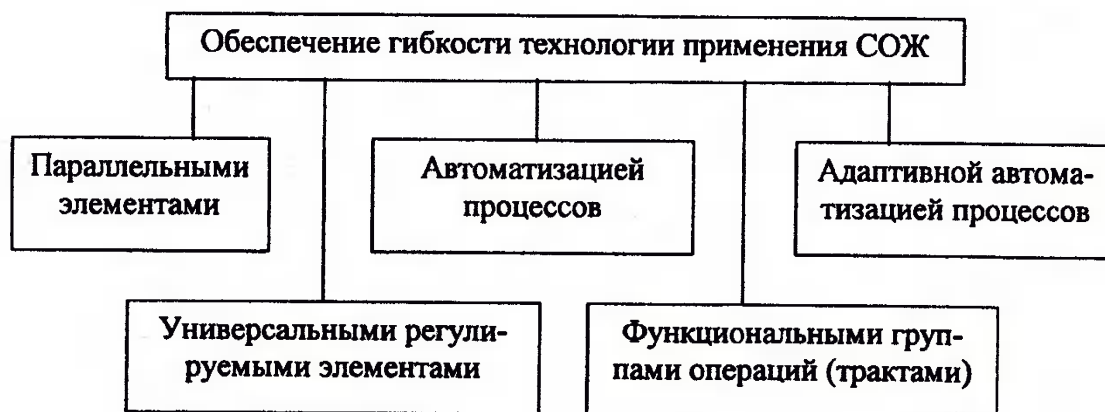


Рис. 1.36. Направления обеспечения гибкости технологии применения СОЖ

Реализация этого принципа является одним из определяющих условий обеспечения важнейшего свойства любой технической системы – эмерджентности*.

При реализации адаптивного управления целесообразно использовать средства активного контроля свойств СОЖ [75], позволяющие контролировать и управлять рядом параметров СОЖ, например, концентрацией эмульсола и механических примесей, рН-показателем, содержанием кислорода и др. Это позволит оптимизировать работу как отдельных элементов, так и всей СП СОЖ. Без формирования математического аппарата, включающего комплекс математических моделей, описывающих процессы функционирования элементов системы (СОЖ, очистители и т.д.), нельзя решить задачу оптимального адаптивного управления ею. Примером гибкого (адаптивного) управления работой кассетного магнитного сепаратора может служить управление циклом его разгрузки (очистка магнитных патронов от шлама), осуществляемое в зависимости от толщины налипшего на патрон шлама (см. гл. 5).

1.5.2. Технологии и системы применения СОЖ на машиностроительных и металлургических предприятиях

Рассмотрим далее технологии и системы, построенные на основе перечисленных выше принципов.

При традиционной для машиностроительных и металлургических предприятий технологии применения СОЖ (рис. 1.37) циркулирующая в

* Эмерджентность – наличие у системного целого особых свойств, не присущих его подсистемам и блокам, а также сумме элементов, не объединенных системообразующими связями.

СП обратная СОЖ подается на технологическое оборудование, где проявляются ее функциональные действия. Собранный с технологического оборудования СОЖ направляется в подсистему очистки и рециркуляции (оборота), где очищается от механических и иных примесей и подвергается необходимой коррекции. Затем жидкость снова подается на технологическое оборудование, и так цикл за циклом в течение одного-двух месяцев. Отработанная СОЖ подается на установку разложения на водную и масляную фазы. Затем водная фаза транспортируется на нейтрализацию и с другими водными стоками сбрасывается в водный бассейн. Загрязненные нефтепродуктами шламы из подсистем очистки, разложения СОЖ и нейтрализации водных стоков размещаются на специализированных свалках. Впоследствии нефтепродукты вымываются в водный бассейн [25]. Аэрозоли, образующиеся на металлообрабатывающем оборудовании в зоне обработки, через вентсистему проникают в окружающую воздушную среду и с осадками выпадают в водный бассейн.

Анализ научно-технической информации [15, 56, 78, 84 и др.] и результатов обследования СП СОЖ, функционирующих на ведущих отечественных машиностроительных (Волжском, Камском и Ульяновском автомобильных заводах, Заволжском моторостроительном заводе, Московском, Саратовском и Самарском подшипниковых заводах и др.) и металлургических предприятиях (комбинатах в г.г. Липецке и Череповце) привели к следующим выводам:

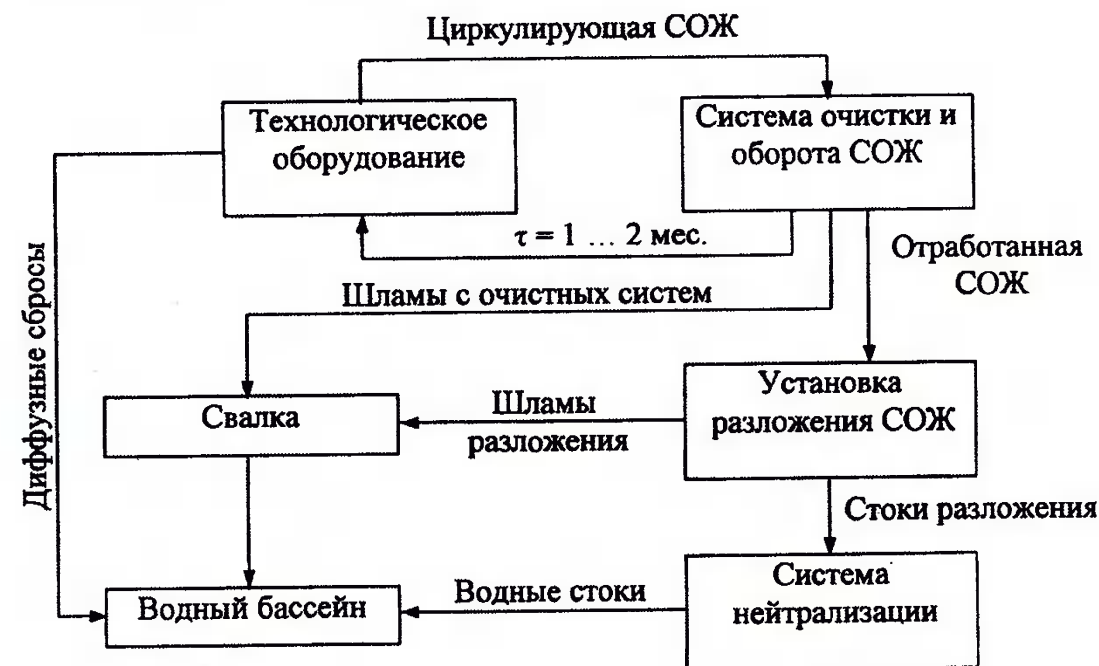


Рис. 1.37. Типовой технологический процесс применения СОЖ

1) с той или иной степенью полноты в действующих производствах реализованы лишь принципы оптимизации размеров и месторасположения СП СОЖ и ее элементов, а также обеспечения оптимальной работы основных элементов системы;

2) все существующие СП СОЖ организованы с нарушением принципов системной экологизации и организации замкнутых циклов движения материальных потоков, не обеспечивают достаточно длительного срока функционирования СОЖ, предполагают значительное количество отходов, энерго- и ресурсоемки, и поэтому запрограммированы на ухудшение экологической ситуации;

3) большинство из существующих СП СОЖ предполагает использование в подсистеме очистки СОЖ расходных фильтроматериалов, являющихся дополнительным отходом и усугубляющим негативное воздействие СП СОЖ на окружающую среду.

В соответствии с предлагаемой технологией в проектируемой СП должны быть предусмотрены (рис. 1.38):

1) система очистки и рециркуляции СОЖ, обеспечивающая оборот жидкости до 12 месяцев и более (вследствие чего резко уменьшаются сбросы отработанной СОЖ на переработку);

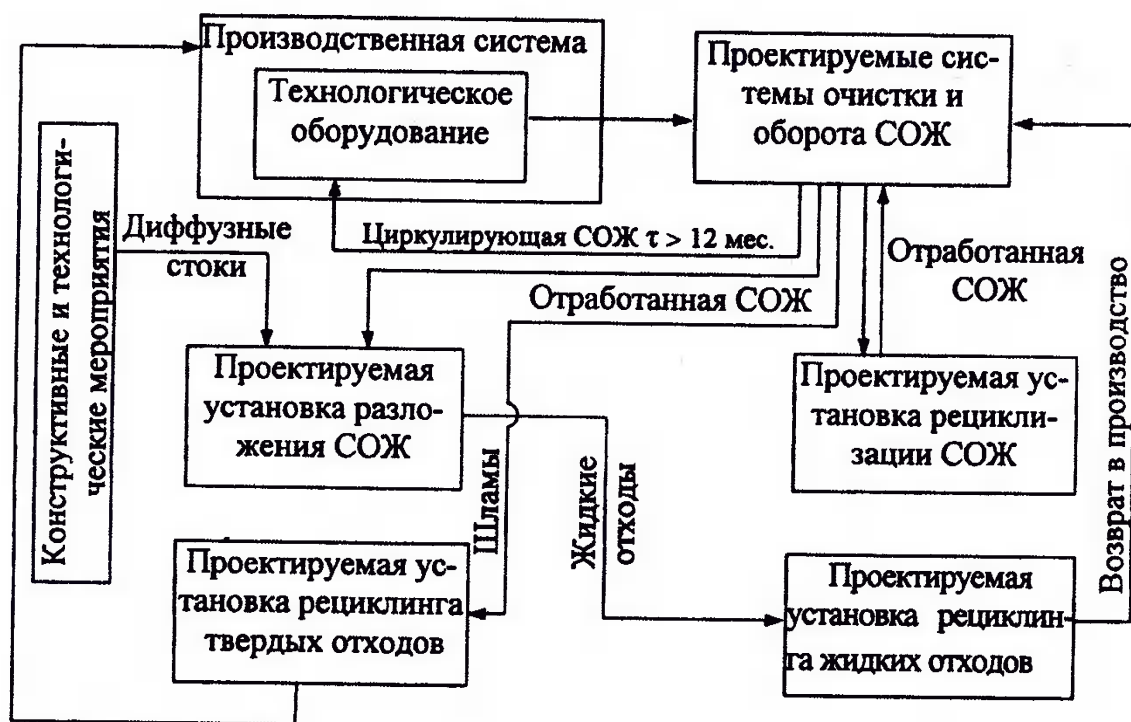


Рис. 1.38. Проектируемый экологизированный ресурсосберегающий технологический процесс применения СОЖ

2) установка восстановления отработанной СОЖ без разложения на водную и масляную фазы;

3) установка экологически чистого разложения СОЖ небольшой производительности (поскольку сбросы СОЖ на разложение резко снижаются);

4) установки отдельного рециклинга водной, масляной и твердой фаз, входящих в состав водных стоков разложения, аэрозолей и шламов [4];

5) установка возврата аэрозолей из вентсистем;

6) установка обеспечения экологической безопасности.

В ходе разработки ресурсосберегающей экологизированной технологии применения СОЖ на промышленном предприятии была составлена структурная схема технологического процесса переработки отходов от применения СОЖ (рис. 1.39). Технология переработки этих отходов системно увязана с технологией переработки прочих технологических водных и нефтесодержащих жидкостей по аналогии с трофическими цепочками в природе.

Применение СОЖ на металлорежущих станках и технологическом оборудовании металлургических предприятий обуславливает возможность представления ее как предмета массового потребления. Система применения СОЖ в этом случае рассматривается как "производитель" предмета массового потребления при наложении условия его экологизации и минимизации потребления ресурсов, а металлообрабатывающее производство — как массовый потребитель СОЖ.

Ресурсосберегающая экологизированная СП СОЖ — это организационно оформленное, системно интегрированное, механизированное или автоматизированное вспомогательное производство, обеспечивающее потребность предприятия в СОЖ при ограничении антропогенного воздействия на окружающую среду и минимизации затрачиваемых ресурсов.

Главными причинами, обуславливающими необходимость создания ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ, являются: необходимость ресурсосбережения как неотъемлемого компонента обеспечения экономичности любых технологических процессов; необходимость предотвращения или снижения техногенного давления на окружающую среду как непереносимого условия выживания человека. Основными предпосылками создания ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ являются накопленный опыт разработки технологии применения СОЖ на машиностроительных и металлургических предприятиях в России и за рубежом, а также собственный опыт разработки соответствующей техники реализации таких прогрессивных технологий.

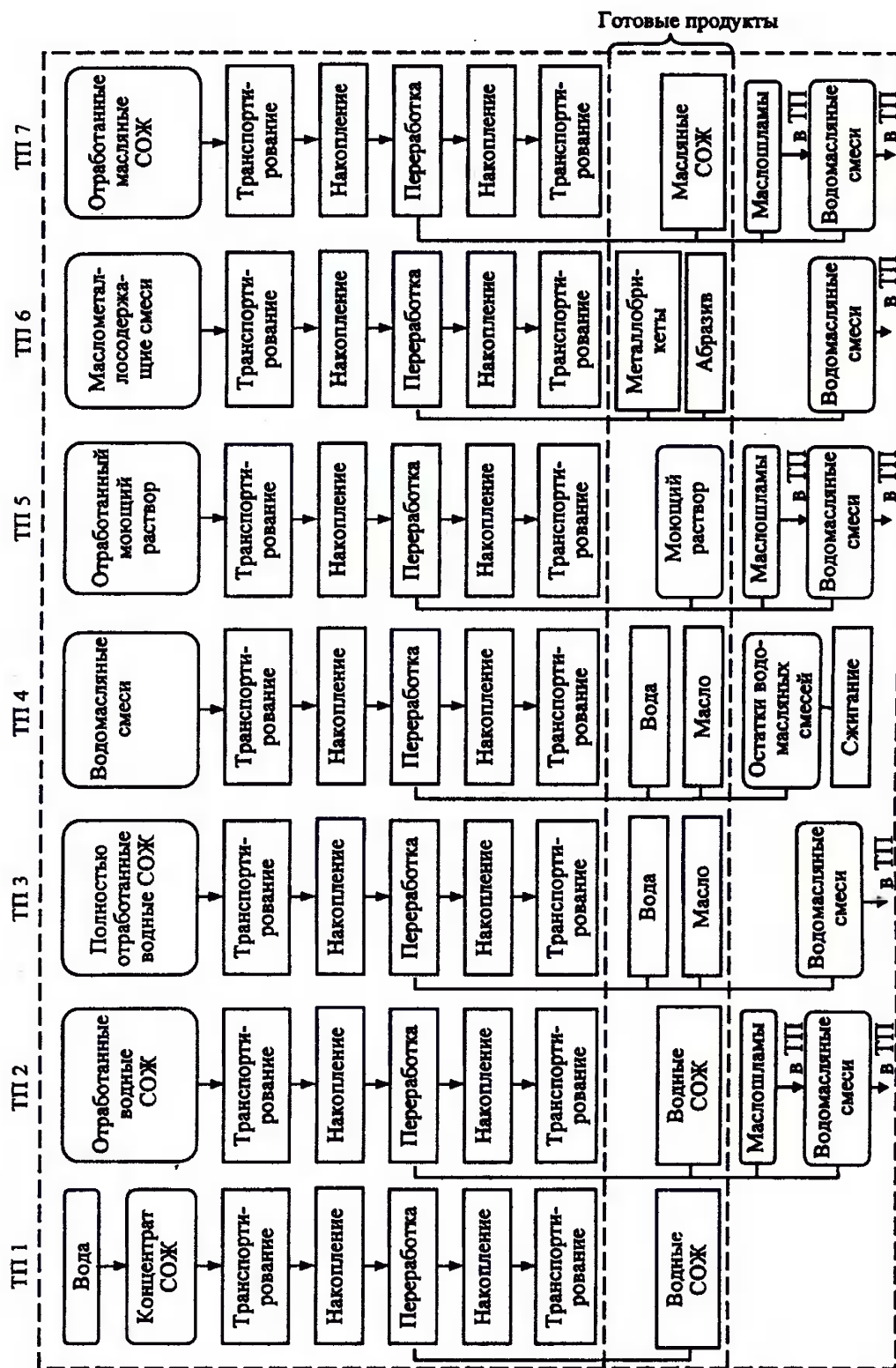


Рис. 1.39. Структурная схема системного технологического процесса переработки отработанных водных и масляных СОЖ, моющих растворов и СОЖ, содержащих шламы:
ТП 1 – ТП 7 – номера технологических процессов

Основные трудности, которые необходимо преодолеть при создании ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ заключаются в следующем: несформированность и неоформленность базы знаний и базы данных, являющихся информационной основой разработки и проектирования подобных систем; отсутствие нормативного обеспечения технологических требований к качеству СОЖ; отсутствие высокоэффективной, надежной и достаточно доступной элементной основы ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ; отсутствие комплекса техники активного контроля состояния СОЖ; нескоординированность усилий исследователей, работающих над созданием современных ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать лингвистическое, информационное, организационное, экономическое, эргономическое, математическое, программное и правовое обеспечение технологического процесса ресурсосберегающего применения СОЖ.

Создание ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ оправдано при обеспечении следующих технико-экономических показателей: повышение производительности металлообрабатывающего оборудования как минимум на 10...15 %; снижение потерь от брака, связанных с нарушением технологических требований к СОЖ; снижение расхода основных материалов в 2 раза и более; ликвидация использования вспомогательных материалов; уменьшение энергозатрат в несколько раз; увеличение времени между залповыми сбросами СОЖ на разложение до года и в перспективе их полная ликвидация; снижение количества обслуживающего персонала в 2 раза и более; ликвидация потребности в ручном труде при обслуживании и эксплуатации экологизированных ресурсосберегающих СП СОЖ.

Ресурсосберегающая экологизированная СП СОЖ рассматривается как подсистема производства машиностроительного или металлургического производства. В свою очередь такая СП СОЖ имеет собственную иерархическую структуру внутренних специализированных подсистем (второго порядка). СП СОЖ взаимодействует на инфраструктурном уровне с прочими подсистемами завода, что сильно осложняет анализ и обоснование эффективности ее создания.

Функционально целесообразно организовывать централизованно-децентрализованную ресурсосберегающую экологизированную СП СОЖ, в которой часть операций технологического процесса выполняется централизованно, а часть – децентрализованно.

Как всякая система, СП СОЖ должна быть системно структурирована (рис. 1.40). В основе структурирования лежит функциональное назначение структурных элементов. Кроме того, системность структурирования СП СОЖ в немалой степени связана с прерывистостью операции: часть операций технологического процесса применения СОЖ выполняется непрерывно в течение цикла рециркуляции, а часть – только по завершению этого цикла; периодические операции связаны с подготовкой системы к выполнению циклической части операций. Кроме того, операции технологического процесса пространственно разделены.

Операции (подсистемы), связанные с очисткой, разложением и восстановлением СОЖ, выполняются в рамках одной пространственно-сопряженной системы рециркуляции. Подсистемы, осуществляющие переработку твердых отходов и масла, могут быть размещены в отдельных помещениях в данном производственном корпусе или вообще за его пределами на удалении до нескольких километров.

Из представленной в табл. 1.5 матрицы совместимости основных операций технологического процесса рециркуляции СОЖ следует, что пространственно совмещается большинство основных операций. Особенно интересно использование идеи их совмещения с транспортированием – принцип, эффективность которого многократно подтверждалась опытом промышленности, например, в виде роторной технологии, обеспечивающей резкое снижение затрат всех видов ресурсов.

Структура нормативно-технического обеспечения ресурсосберегающего экологизированного применения водоземulsionных СОЖ представлена на рис. 1.41. Сами же нормативы в основном пока отсутствуют или плохо обоснованы.

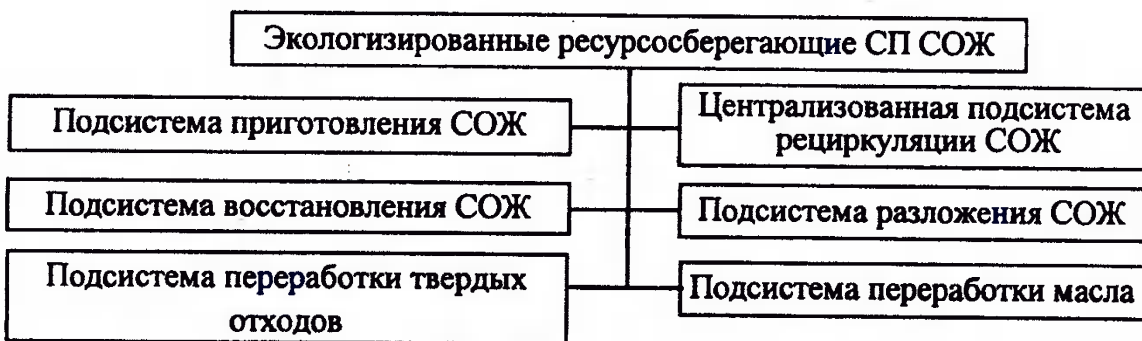


Рис. 1.40. Системно-структурированная схема ресурсосберегающей экологизированной СП СОЖ

1.5. Матрица совместимости основных операций технологического процесса применения СОЖ

[illegible]



Рис. 1.41. Структура нормативно-технического обеспечения ресурсосберегающего экологизированного применения эмульсионных СОЖ

Последовательность разработки ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ представлена на рис. 1.42, а этапы моделирования СП СОЖ – на рис. 1.43. Объект управления ввиду его сложности представлен в виде модели, учитывающей воздействие внешней среды. Основными исходными данными для построения модели ресурсосберегающей экологизированной СП СОЖ служат характеристики элементов структуры и их количественные соотношения, характеристики стабильности, взаимосвязь с окружающей средой. На основе декомпозиции модели на частные математические модели выбирают функции, подлежащие автоматизированному управлению, выявляют структуру управления. Макроуровень – это концептуальное представление и логическое проектирование, микроуровень – физическое проектирование ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ или элементов, из которых она состоит.

При логическом проектировании определяют множество моделей управления, которые реализуют все подлежащие автоматизации функции управления, устанавливают множество задач, решаемых в экологизированных ресурсосберегающих СП СОЖ. На этапе синтеза, на логическом уровне формальными методами осуществляют синтез организационной, функциональной, алгоритмической и технической структур. Последовательность этапов моделирования СП СОЖ показана на рис. 1.44.

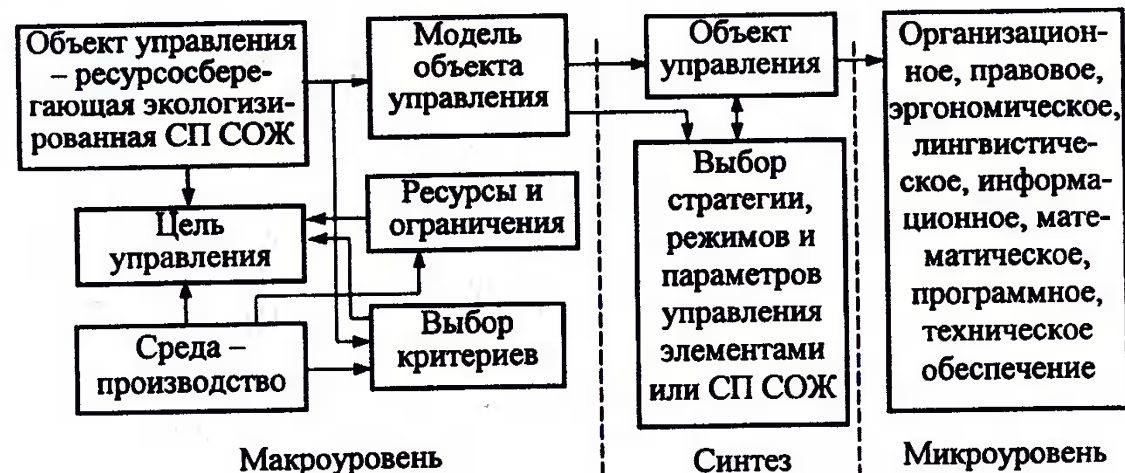


Рис. 1.42. Последовательность разработки ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ

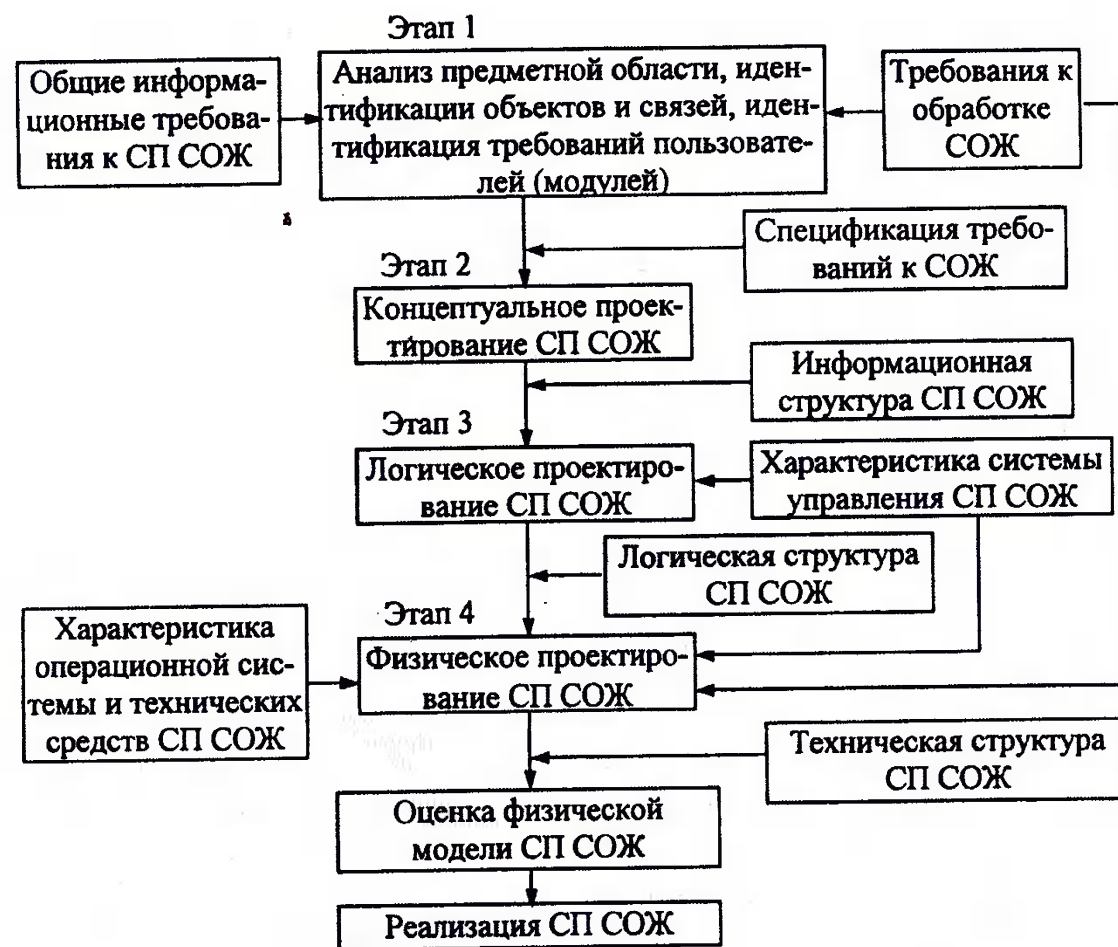


Рис. 1.43. Основные этапы моделирования СП СОЖ



Рис. 1.44. Этапы моделирования СП СОЖ

При разработке аппарата математического обеспечения нам предстоит создать комплекс математических моделей функционирования СП СОЖ: очистки СОЖ в патронных магнитных сепараторах; процесса фильтрования СОЖ; гравитационной очистки и флотации СОЖ и др.

1.5.3. Критерии оценки эффективности и перспективные направления развития технологии и техники применения СОЖ

Для количественной оценки экономико-технологической и экологической эффективности СП СОЖ и их элементов на основе изложенных выше принципов разработана система критериев, представленная в табл. 1.6 и предназначенная для использования как при проектировании новых СП СОЖ, так и при анализе существующих систем. В последней (четвертой) графе приведены значения показателей (критериев), которым должна соответствовать любая вновь создаваемая или модернизируемая СП СОЖ.

1.6. Критерии технико-экономической эффективности СП СОЖ

Наименование критерия	Единица измерения	Значение критерия для систем	
		существующих	проектируемых
1	2	3	4
Экологические критерии			
Часовая производительность СП СОЖ, Q	м^3	Q	$0,5Q$
Объем разовой заправки емкостей	м^3	$0,15 Q$	$0,15 Q$
Число сбросов СОЖ на разложение в год	—	12	1
Объем одного сброса СОЖ на разложение	м^3	$0,09Q$	
Годовой объем СОЖ, сбрасываемых на разложение	м^3	$1,08Q$	$0,09Q$
Годовой объем стока нефтепродуктов разложения СОЖ, сбрасываемых на разбавление (масс. доля эмульсии 3 %)	м^3	$0,32 \cdot 10^{-2} Q$	$0,27 \cdot 10^{-4} Q$
Степень выделения нефтепродуктов при разложении СОЖ	%	0,90	0,99
Годовой объем стоков после разбавления стоков, полученных при разложении СОЖ	м^3	$6,5 \cdot 10^4 Q$	$5,4 \cdot 10^2 Q$
Выделение нефтепродуктов в шламы	м^3	$29 \cdot 10^{-3} Q$	$0,27 \cdot 10^{-3} Q$
Затраты на утилизацию 1 м^3 нефтепродуктов, содержащихся в шламах ($C_{\text{СОЖ}}$ — стоимость 1 м^3 свежеприготовленной СОЖ)	руб.	$0,1 C_{\text{СОЖ}}$	
Годовой объем приготовления СОЖ	м^3	$3,6 Q$	$1,8 Q$
Удельные капитальные затраты на СП СОЖ (на 1 $\text{м}^3/\text{ч}$ производительности)	$\frac{\text{руб.}}{\text{м}^3/\text{ч}}$	$(0,2 \dots 0,3) \cdot 10^5$	$(0,1 \dots 0,2) \cdot 10^5$
Удельный годовой расход фильтроматериалов (на 1 $\text{м}^3/\text{ч}$ производительности)	$\frac{\text{руб.}}{\text{м}^3/\text{ч}}$	$2,7 \cdot 10^3$	—

Продолжение табл. 1.6

1	2	3	4
Энергозатраты	кВт · ч	35	0,5
Удельная площадь, занимаемая СП СОЖ (на 1 м ³ /ч производительности)	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3/\text{ч}}$	0,3...0,4	0,1
Надежность обеспечения системой применения СОЖ заданного значения концентрации механических примесей	—	0,60...0,70	0,90...0,99
Степень очистки СОЖ	%	60...80	95...99
Тонкость очистки d_{50} (диаметр частиц, 50 % которых удаляется из СОЖ)	мкм	15...30	2...5
Экономическая эффективность СП СОЖ (на 1 м ³ /ч производительности)	$\frac{\text{руб.}}{\text{м}^3/\text{ч}}$	—	3000...7500

Таким образом, на основе анализа научно-технической информации, результатов проведенных теоретико-экспериментальных исследований и опыта применения СОЖ на машиностроительных предприятиях можно сделать следующие выводы:

СОЖ является неотъемлемым элементом обеспечения технологических процессов механической обработки, позволяющим повысить и стабилизировать производительность обработки, надежно обеспечить заданные характеристики качества деталей машин и других изделий, многократно повысить стойкость инструмента и уменьшить энергозатраты;

технологическая эффективность СОЖ реализуется в зоне механической обработки через ее функциональные действия – смазочное, охлаждающее, моющее, диспергирующее и демпфирующее, которые, в свою очередь, определяются составом и свойствами СОЖ, технологией и оборудованием для ее применения. В процессе функционирования СОЖ постепенно теряет свой исходный технологический потенциал вследствие истощения, загрязнения механическими и иными примесями, биопоражения и действия других факторов, что приводит к снижению технологической эффективности операций механической обработки и эксплуатационных характеристик самой СОЖ. Выработавшая свой ресурс СОЖ подлежит сбросу или разложению, а стоки и образующиеся в результате разложения отходы – утилизации;

загрязнение СОЖ механическими примесями оказывает непосредственное влияние на формирование профиля обработанной поверхности детали и качество ее поверхностного слоя, является доминирующим фактором, лимитирующим срок функционирования СОЖ между ее залповыми сбросами. Разработанная математическая модель позволяет достоверно прогнозировать шероховатость шлифованной поверхности с учетом содержания в СОЖ механических примесей и предназначена для использования при расчетах норм чистоты СОЖ и соответствующих очистителей;

широко применяемые в машиностроении технологии и оборудование для очистки СОЖ и защиты ее от биопоражения не обеспечивают достаточно длительной стабилизации свойств СОЖ и технологической эффективности металлообрабатывающих производств, обуславливают большие и часто непродуктивные затраты ресурсов, не соответствуют современным экологическим требованиям;

одним из основных факторов, сдерживающих использование новых технологий применения СОЖ при механической обработке, являются высокая стоимость соответствующего оборудования и большие эксплуатационные затраты.

В связи с этим предложена концепция ресурсосбережения и экологизации в системах применения СОЖ в машиностроительных производствах, включающая комплекс соответствующих принципов, критерии оценки эффективности проектируемых и действующих технологий и техники применения СОЖ и общую структуру таких систем, и сформулирована следующая цель работы: *повышение эффективности технологических процессов механической обработки на основе разработки, научно обоснования и реализации ресурсосберегающего экологизированного технологического обеспечения машиностроительных производств смазочно-охлаждающими жидкостями.*

Основопологающим тезисом является предельная минимизация потерь производственных ресурсов, затрачиваемых при реализации технологических процессов механической обработки с использованием СОЖ, и исключение сбросов отработанной СОЖ и продуктов ее переработки в окружающую среду путем обеспечения замкнутых технологических циклов применения СОЖ.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

разработать комплекс математических моделей, позволяющих количественно оценить состояние СОЖ в любой заданный момент времени для любой технологической ситуации – от единичного металлорежущего

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ

2.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ

Ужесточение требований к технико-экономической эффективности и экологической безопасности современных СП СОЖ предопределяет необходимость постановки и решения оптимизационных задач на стадии проектирования этих систем и их элементов. В наиболее общем виде структура оптимизационной задачи состоит из целевой функции (критерия) оптимизации – энергоемкости, ресурсоемкости, стоимости обслуживания системы, срока функционирования СОЖ и др. и системы ограничений, связывающих конструктивные и режимные параметры системы применения СОЖ с критерием. Надежной основой для постановки и решения оптимизационных задач является математическое моделирование. Однако пока отсутствуют математические модели, адекватно отражающие технологический процесс применения СОЖ. Известные работы в этой области [71, 72, 75, 90, 91, 109, 110, 132], как правило, связаны либо с исследованиями физико-химических, биохимических и других процессов, происходящих в СОЖ, либо с решением частных вопросов конструирования новых систем ее приготовления, очистки, контроля и т.п. Такое положение не позволяет выйти на автоматизированное проектирование СП СОЖ и в значительной степени сдерживает создание новых систем.

Комплекс разработанных математических моделей, необходимых для научного обоснования предлагаемых технологических, схемотехнических и конструктивных решений, представлен в виде морфологического дерева на рис. 2.1.

Анализ и синтез СП СОЖ требуют соответствующего математического и программного обеспечения, позволяющего решать практические задачи на разных стадиях проектирования, при этом синтез СП СОЖ непосредственно связан с решением задач параметрического анализа. Существующие методы параметрического анализа позволяют исследовать СП СОЖ и их функционирование, корректно ставить задачи анализа, проводить оптимальный параметрический синтез СП СОЖ.

станка до металлообрабатывающих цехов и производств, моделировать, анализировать и оптимизировать системы применения СОЖ любой заданной сложности;

разработать технологии ресурсосберегающего экологизированного обеспечения машиностроительных производств СОЖ, включая технологии очистки СОЖ от механических и иных примесей, восстановления отработанных СОЖ, утилизации отходов систем применения СОЖ путем рекуперации металла и масел из шламов и отработанной СОЖ и последующей их регенерации;

теоретически и экспериментально исследовать эффективность процессов очистки СОЖ от механических и иных примесей в очистителях различного типа – гравитационных, магнитных, флотационных;

разработать новую элементную основу стабильно высокоэффективных ресурсосберегающих экологизированных систем применения СОЖ при механической обработке;

рассчитать, спроектировать, изготовить, испытать и внедрить в машиностроительные и другие производства высокоэффективные ресурсосберегающие экологизированные системы применения СОЖ для единичного технологического оборудования, поточных технологических линий, цехов и предприятий;

обеспечить возможность реализации предложенных решений в действующем производстве путем минимизации необходимых капиталовложений;

спроектировать, изготовить, испытать и внедрить в машиностроении и других отраслях промышленности ресурсосберегающие экологизированные технологии и технику восстановления отработанной СОЖ и других технологических жидкостей, рекуперации воды, масла и металла из отходов, полученных при разложении отработанных СОЖ, регенерации воды и масла.



Рис. 2.1. Дерево математических моделей технологического процесса применения СОЖ:

блоки с полужирным текстом означают разработанные модели

Основными элементами (факторами), которые необходимо рассмотреть при моделировании СП СОЖ, являются: собственно СОЖ с заданным составом и свойствами; технологическое оборудование (например, металлорежущий станок), в рабочей зоне которого реализуются функциональные свойства СОЖ и происходит ее истощение; подсистема очистки СОЖ, в которой происходит частичное или полное восстановление функциональных свойств СОЖ; подсистема трубопроводов, обеспечи-

вающая циркуляцию СОЖ между технологическим оборудованием и системой очистки.

Численные математические модели описания процесса функционирования СОЖ с учетом сделанных выше замечаний можно сформировать при представленном ниже формальном описании СП СОЖ. Векторно описывается совокупность параметров, соответствующих системной реализации функций; в скалярной форме описывается изменение параметра, соответствующего выполнению отдельно взятой функции.

Рассмотрим формальное описание основных элементов СП СОЖ, учитывая сделанные выше замечания [62].

За модель СОЖ примем среду, состояние которой определяет вектор $\bar{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_m\} \in E^m$. Координаты этого вектора равны концентрациям различных компонентов, в том числе механических примесей в жидкости, ее температуре, физико-механическим, химическим и другим свойствам. Размерность m вектора $\bar{C}$ зависит от практической потребности в полноте описания СОЖ.

Обозначим через $t = [0, t_3]$ время функционирования СОЖ в системе, через $q \in [0, \infty] = Q_v$ – производительность СП СОЖ, m^3/c , t_3 – время функционирования СОЖ в системе до залпового сброса.

Если СП СОЖ обслуживает N единиц технологического оборудования (далее станков), то i -й станок будем считать точечным преобразователем, описываемым отображением $\bar{X}_i: E^m \rightarrow E^m$ и областью возможных режимов обработки Q_i . При этом под режимом обработки Q_i понимается функция $\bar{\tau}: t \rightarrow E^n$, где n – число элементов режима обработки. Содержательный смысл отдельных координат вектора функции $\bar{\tau}(t)$ определяется переменными во времени глубиной, скоростями резания и подачи (шлифования) и другими факторами, причем не исключается $\bar{\tau}(t) = \text{const}$. Таким образом,

$$Q_i = \left\{ \bar{\tau}_{il}: t \rightarrow E^n \mid l = \overline{1, I_i} \right\}; \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.1)$$

где I_i – число возможных комбинаций элементов режима обработки на i -м станке.

Учитывая вышеизложенное, представим отображение $\bar{X}_i: E^m \rightarrow E^m$ векторным отображением $\bar{X}_i: Q_i \times E^m \times Q_v \times t \rightarrow E^m$ со значениями

$$\bar{C}_i'' = \bar{X}_i \left[\bar{\tau}_i(t), \bar{C}_i', q_i, t \right]; \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.2)$$

где $\bar{C}_i', \bar{C}_i''$ – состояние СОЖ до и после прохождения через i -й станок с объемным расходом q_i ; $\bar{\tau}_i \in Q_i$ – заданный режим обработки заготовки.

Отображение $\bar{X}_i$ является математической моделью i -го станка.

Воспользуемся изложенными выше соображениями при описании системы очистки СОЖ, считая общее число очистителей равным L . Определим для j -го очистителя область допустимых режимов его эксплуатации U_j . Элементами этой области являются управляющие функции $\bar{u} : t \rightarrow E^n$. Таким образом

$$U_j = \left\{ \bar{u}_{jl} : t \rightarrow E^n \mid l = \overline{1, J_j} \right\}; \quad j = \overline{1, L}, \quad (2.3)$$

где J_j – число возможных комбинаций элементов режима эксплуатации j -го очистителя, причем допускается $U_j = \emptyset$.

Допустим, описание очистителя задано областью его конструктивных параметров $V_j \subset E^{n_j}$, где n_j – число этих параметров. Тогда математической моделью j -го очистителя является векторное отображение $\bar{Y}_j : U_j \times V_j \times E^m \times Q_v \times t \rightarrow E^m$ со значениями

$$\bar{C}_j'' = \bar{Y}_j \left[\bar{u}_j(t), \bar{v}_j, \bar{C}_j', q_j, t \right]; \quad j = \overline{1, L}, \quad (2.4)$$

где $\bar{C}_j', \bar{C}_j''$ – состояние СОЖ до и после прохождения через j -й очиститель с интенсивностью q_j ; $\bar{u}_j \in U_j$, $\bar{v}_j \in V_j$.

Величина q_j зависит от конструкции и режима работы очистителя:

$$q_j = q_j \left[\bar{u}_j(t), \bar{v}_j \right]; \quad j = \overline{1, L}. \quad (2.5)$$

Чтобы учесть изменение свойств СОЖ в системе трубопроводов, свяжем с k -ым трубопроводом векторное отображение $\bar{Z}_k : W_k \times E^m \times Q_v \times t \rightarrow E^m$, аналогичное отображению $\bar{Y}_j$. При этом

$$\bar{C}_k'' = \bar{Z}_k \left(\bar{w}_k, \bar{C}_k', q_k, t \right); \quad k = \overline{1, l}, \quad (2.6)$$

где $\bar{C}_k', \bar{C}_k''$ – состояние СОЖ на входе и выходе k -го трубопровода; $\bar{w}_k$ – вектор конструктивных параметров из допустимой области W_k ; q_k – объемный расход СОЖ в k -м трубопроводе; l – общее число трубопроводов.

Размерность вектора $\bar{w}_k$ определяется числом конструктивных параметров трубопровода, среди которых могут быть, например, его длина и средний диаметр.

Отображение $\bar{Z}_k$ является математической моделью k -го трубопровода. При этом

$$q_k = q_k(\bar{w}_k). \quad (2.7)$$

Предположим, что транспортирование СОЖ в рабочие зоны станков обеспечивается точечным источником давления (насосом). Модель l -го насоса представим в виде следующей функции:

$$f_l(i) = \begin{cases} p_l, & \text{при } i = l; \\ 0, & \text{при } i \neq l; \end{cases} \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.8)$$

где p_l – давление, создаваемое l -м насосом.

Рассмотрим далее множества

$$X = \left\{ \bar{X}_i \mid i = \overline{1, N} \right\}; \quad Y = \left\{ \bar{Y}_j \mid j = \overline{1, L} \right\}; \quad Z = \left\{ \bar{Z}_k \mid k = \overline{1, l} \right\}; \quad F = \left\{ f_l \mid l = \overline{1, N} \right\}, \quad (2.9)$$

где $\bar{X}_i, \bar{Y}_j, \bar{Z}_k, f_l$ – модели, представленные соответственно зависимостями (2.2), (2.4), (2.6), (2.8).

Пусть $\Pi : X \cup Y \cup Z \cup F \rightarrow \rho$ – однозначное отображение подмоделей (2.9) в некоторое точечное множество ρ , причем

$$\Pi(X \cup Y \cup Z \cup F) = \Pi(X) \cup \Pi(Y) \cup \Pi(Z) \cup \Pi(F) = \rho.$$

Тогда за математическую модель СП СОЖ примем четырехдольный ориентированный граф

$$\Gamma = \langle \rho, \sigma \rangle, \quad (2.10)$$

в котором каждая вершина из множества ρ сопоставляется с воздействием на СОЖ определенного элемента системы, а множество дуг σ – направления течения СОЖ в отдельных трубопроводах.

Построение модели Γ на основе уравнения (2.10) учитывает все перечисленные выше элементы и параметры системы применения СОЖ. Кроме того, модель можно уточнить путем подсоединения моделей систем подготовки СОЖ, ее контроля и диагностики [62]. Поэтому данная модель адекватна реальной СП СОЖ как части основного производства.

Практическая ценность модели (2.10) в значительной степени определяется ее идентификацией, т.е. конкретизацией соответствующих подмоделей с учетом целого комплекса сложных физико-химических процессов. Многие из них, с точки зрения системного моделирования, в настоящее время изучены недостаточно. Это порождает проблему идентификации модели, для разрешения которой необходимы дополнительные допущения при ее практическом использовании. Рассмотрим такие допущения на примере решения задачи анализа конкретного варианта СП СОЖ (рис. 2.2).

Пусть СП СОЖ обслуживает N станков. На каждый станок из главной магистрали с помощью насоса f_1 подается СОЖ. Отработанная СОЖ поступает на пункт сбора, а затем насосом f_2 прокачивается через L последовательно соединенных очистителей со степенью очистки соответственно $\epsilon_1, \dots, \epsilon_L$. Каждый очиститель имеет свой слив в пункт сбора, а последний из них подключен к главной магистрали системы (такой вариант компоновки СП СОЖ обеспечивает замкнутый цикл ее работы).

Требуется определить концентрации компонентов в СОЖ перед ее подачей в рабочие зоны станков, считая технические характеристики СП СОЖ известными.

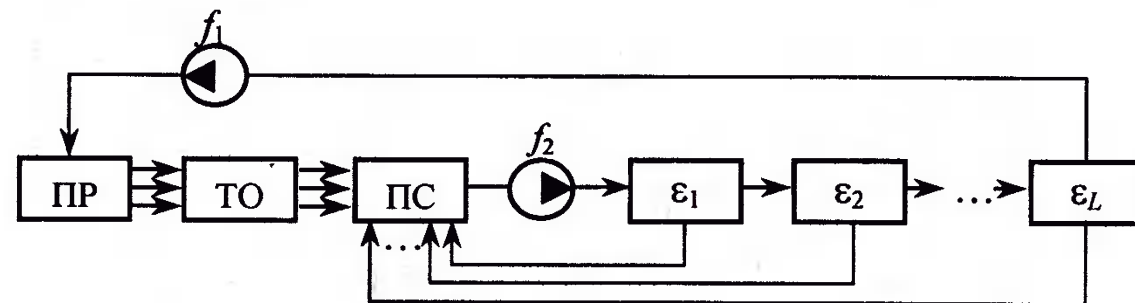


Рис. 2.2. Схема СП СОЖ:

ПР – пункт распределения; ТО – технологическое оборудование;
ПС – пункт сбора СОЖ (накопительная емкость); ($\epsilon_1 - \epsilon_L$) – система очистки СОЖ, состоящая из L элементов

Рассмотрим работу системы в установившемся режиме. СОЖ примем за рабочее тело, обеспечивающее внутри системы массоперенос M ее компонентов. Тогда состояние СОЖ будет характеризоваться вектором $\bar{C} = \{c_1, \dots, c_l, \dots, c_M\}$, где c_l – массовая концентрация l -го компонента.

Допустим, что i -й станок загрязняет СОЖ с интенсивностью $\bar{\eta}^i = \{\eta_1^i, \dots, \eta_l^i\}$, где η_l^i – массовый расход l -й примеси (механические частицы, «инородные» масла) с i -го станка. С учетом этого i -й станок примем за абстрактный смеситель объема ΔV^i , мгновенно изменяющий концентрацию примесей в рабочем теле. Пренебрегая объемом примесей в сравнении с объемом СОЖ в системе, запишем изменение концентрации l -й примеси i -м станком:

$$\Delta C_l^i = \frac{\eta_l^i}{q_i}; \quad l = \overline{1, M}.$$

Таким образом,

$$\bar{C}_i'' = \bar{C}_i' + \frac{\eta_l^i}{q_i}; \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.11)$$

где $\bar{C}_i'$, $\bar{C}_i''$ – состояние СОЖ соответственно подаваемой и собираемой с i -го станка.

Очевидно, что интенсивность загрязнения СОЖ i -м станком зависит от режима обработки:

$$\bar{\eta}^i = \bar{\eta}^i[\bar{\tau}_i(t)]; \quad i = \overline{1, N}. \quad (2.12)$$

Формулы (2.11) и (2.12) определяют общее отображение (2.2) для частного случая.

Допустим, что концентрации l -го компонента СОЖ на входе и выходе j -го очистителя связаны соотношением

$$c_{jl}'' = (1 - \epsilon_{jl})c_{jl}'; \quad 0 \leq \epsilon_{jl} \leq 1; \quad j = \overline{1, L}; \quad l = \overline{1, M}, \quad (2.13)$$

причем степень очистки

$$\epsilon_{jl} = \epsilon_{jl}[\bar{u}_j(t), \bar{v}_j, q_j].$$

Ясно, что (2.13) – частный случай отображения (2.4), так как

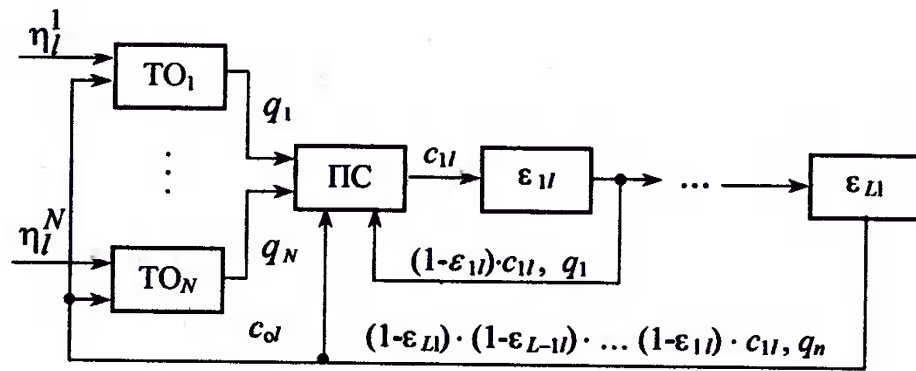


Рис. 2.3. Схема массопереноса в СП СОЖ:
обозначения см. в надписи к рис. 2.2

$$c_{jl}^* = (1 - \varepsilon_{jl} [\bar{u}_j(t), \bar{v}_j, q_j]) c_{jl}^*, \quad j = \overline{1, L}, \quad l = \overline{1, M}. \quad (2.14)$$

Пренебрегая влиянием системы трубопроводов на состояние СОЖ, исследуем массоперенос в СП СОЖ с помощью схемы (рис. 2.3).

Массоперенос l -го компонента СОЖ рассчитаем для наихудшего случая, когда $\eta_l^i = \max \eta_l^i(t) \tau_i(t)$, $i = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, M}$.

Согласно (2.11) концентрация l -го компонента СОЖ перед ее поступлением в накопительную емкость будет

$$c_l^i = c_{0l} + \frac{\eta_l^i}{q_i}, \quad (2.15)$$

где c_{0l} — концентрация l -й примеси в СОЖ, протекающей через пункт распределения.

Кроме того, в пункт сбора сливается L потоков жидкости из очистителей системы, причем j -й поток несет l -ю примесь с концентрацией

$$c_{jl} = \prod_{s=1}^j (1 - \varepsilon_{sl}) c_{1l}, \quad (2.16)$$

где c_{1l} — концентрация l -й примеси в СОЖ на входе первого очистителя.

Найдем массу l -й примеси Δm_l , попавшей в пункт сбора за время Δt со всех станков и очистителей системы:

$$\Delta m_l = \sum_{i=1}^N c_l^i q_i \Delta t + \sum_{j=1}^L c_{jl} q_j \Delta t.$$

Отсюда с учетом (2.15), (2.16) получим

$$\Delta m_l = \left(\sum_{i=1}^N c_{0l} q_i + \sum_{i=1}^N \eta_l^i + \sum_{j=1}^L \prod_{s=1}^j (1 - \varepsilon_{sl}) c_{1l} q_j \right) \Delta t. \quad (2.17)$$

Пренебрегая суммарным объемом механических примесей, найдем объем жидкости, поступившей в пункт сбора за время Δt :

$$\Delta V = \left(\sum_{i=1}^N q_i + \sum_{j=1}^L q_j \right) \Delta t. \quad (2.18)$$

Из (2.17), (2.18) следует:

$$c_{1l} = \frac{\Delta m_l}{\Delta V} = \frac{c_{0l} \sum_{i=1}^N q_i + \sum_{i=1}^N \eta_l^i + c_{1l} \sum_{j=1}^L \prod_{s=1}^j (1 - \varepsilon_{sl}) q_j}{\sum_{i=1}^N q_i + \sum_{j=1}^L q_j}. \quad (2.19)$$

Поскольку $c_{0l} = \prod_{s=1}^L (1 - \varepsilon_{sl}) c_{1l}$, то из (2.19) имеем

$$c_{1l} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_l^i}{\sum_{i=1}^N q_i + \sum_{j=1}^L q_j - \prod_{s=1}^L (1 - \varepsilon_{sl}) \sum_{i=1}^N q_i - \sum_{j=1}^L \prod_{s=1}^j (1 - \varepsilon_{sl}) q_j}. \quad (2.20)$$

Из выражения (2.20) следует, что концентрация c_{0l} l -й примеси в СОЖ перед ее подачей на станки

$$c_{0l} = \frac{\prod_{s=1}^L (1 - \varepsilon_{sl}) \sum_{i=1}^N \eta_l^i}{\left(1 - \prod_{s=1}^L (1 - \varepsilon_{sl}) \right) \sum_{i=1}^N q_i + \sum_{j=1}^L \left(1 - \prod_{s=1}^j (1 - \varepsilon_{sl}) \right) q_j}; \quad l = \overline{1, M}. \quad (2.21)$$

Математическая модель (2.21) позволяет определить численным методом все множество состояний СОЖ по параметру «содержание механических примесей» с учетом объема выпуска продукции, эффективности очистного оборудования и управляющего воздействия обслуживающего персонала. При этом учтено накопление в СОЖ пропускаемых очистителем механических примесей.

Рассмотренная математическая модель СП СОЖ реализована в оригинальных программных средствах в виде макетного образца, имитирующего работу автоматизированной системы применения СОЖ.

Рассмотрим пример решения практической задачи анализа СП СОЖ, схема которой показана на рис. 2.4, с использованием разработанных программных средств. Считаем известными следующие параметры системы: количество станков – 3 единицы; очистителей – 2 единицы; анализируемых компонентов СОЖ – 2 (механические примеси и «инородные» масла). Исходная концентрация в СОЖ механических примесей – $0,8 \text{ кг/м}^3$, «инородных» масел – $0,5 \text{ кг/м}^3$ (см. также табл. 2.1).

Степень очистки СОЖ от механических примесей в очистителе ε_1 – 0,8, от инородных масел ε_2 – 0,9. Объемный расход СОЖ, подаваемой на станки № 1, 2 и 3, соответственно 50; 30; 5 л/мин. Отход СОЖ с очистителей ε_1 и ε_2 – соответственно 2 и 3 л/мин.

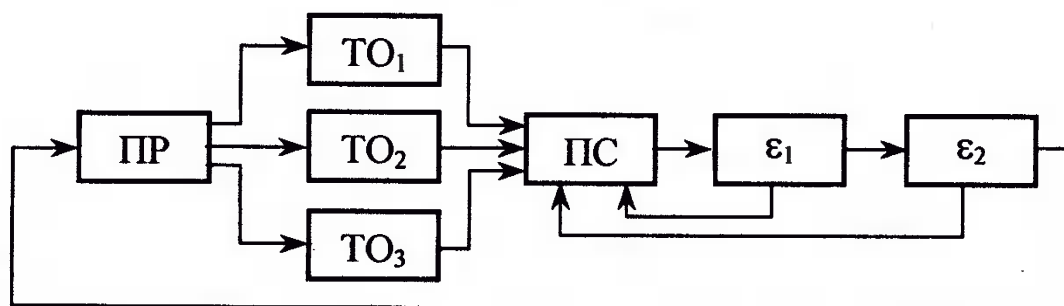


Рис. 2.4. Схема СП СОЖ: обозначения см. в надписи к рис. 2.2

2.1. Интенсивность загрязнения СОЖ на станках (исходные данные)

Показатель	Интенсивность загрязнения, кг/мин		
	Станок № 1	Станок № 2	Станок № 3
Механические примеси	0,03	–	–
«Инородные» масла	–	0,04	0,01

Считаем заданными предельно допустимые концентрации анализируемых компонентов в СОЖ: механические примеси – $0,06 \text{ кг/м}^3$; инородные масла – $0,08 \text{ кг/м}^3$. Необходимо определить концентрации анализируемых компонентов СОЖ при установившемся и переходном режимах очистки.

В результате моделирования работы СП СОЖ определили параметры переходного (табл. 2.3) и установившегося (табл. 2.2) режимов очистки, а также получили оценку технологической эффективности подсистемы очистки СОЖ (табл. 2.4).

2.2. Результаты расчета установившегося режима очистки СОЖ

Показатель	Исходная концентрация c , кг/м ³	Интенсивность загрязнения СОЖ всеми станками, кг/мин	Степень очистки ε	Конечная концентрация c_o , кг/м ³
Механические примеси	0,8	0,03	0,8	0,075
«Инородные» масла	0,5	0,05	0,9	0,057

2.3. Результаты расчета переходного режима очистки СОЖ

Показатель	Исходная концентрация c , кг/м ³	Изменение параметров по циклам оборота СОЖ в системе №					Конечная концентрация c_o , кг/м ³
		1	2	3	4	5	
Механические примеси	0,8	0,214	0,102	0,080	0,076	0,075	0,075
«Инородные» масла	0,5	0,100	0,061	0,057	0,057	0,057	0,057

2.4. Технологическая эффективность СП СОЖ

Показатель	Исходная концентрация c , кг/м ³	Конечная концентрация c_o , кг/м ³	Допустимая концентрация, [с] кг/м ³	Оценка эффективности
Механические примеси	0,8	0,075	0,06	Не удовлетворяет требованиям
«Инородные» масла	0,5	0,057	0,08	Удовлетворяет требованиям

Используем в качестве примера модель (2.21) для расчета динамики нарастания концентрации ферромагнитных примесей в СОЖ (табл. 2.5), подаваемой на три клетки (с первой по третью) четырехклетьевого стана холодной листовой прокатки, эксплуатируемого в ОАО «Северсталь» (г. Череповец).

Исходные данные для расчета: объем СОЖ в системе $V = 300 \text{ м}^3$; объем свежеприготовленной СОЖ, добавляемой в СП для поддержания постоянного ее объема, $V_{\text{СОЖ}} = 40 \text{ м}^3/\text{сут.}$; концентрация и масса феррочастиц в свежеприготовленной СОЖ $c_{\text{ф}} = 0,06 \text{ кг/м}^3$ и $M_{\text{ф}} = 2,3 \text{ кг}$; объем СОЖ, переливаемой из СП СОЖ, обслуживающей четвертую клетку стана, $V_{\text{п}} = 35 \text{ м}^3$; концентрация и масса феррочастиц в СОЖ, переливаемой из другой СП, $c_{\text{ф}} = 0,1 \text{ кг/м}^3$ и $M_{\text{п}} = 3,5 \text{ кг}$; масса феррочастиц, поступающих из зоны прокатки в СОЖ, $M_{\text{ст}} = 54 \text{ кг}$. В качестве СОЖ использовалась 2 %-ная эмульсия «Квакерол-671». Концентрацию c феррочастиц в СОЖ определили колориметрированием по методике лаборатории ОАО «Северсталь».

Необходимую для расчета степень очистки СОЖ в СП найдем как отношение массы феррочастиц, удаляемых очистителем за определенный промежуток времени, к массе феррочастиц, поступающих в СОЖ из зоны прокатки. Поскольку при этом задействуются весь объем СП СОЖ и большие массы феррочастиц, то такой подход обеспечит высокую достоверность расчета. Степень очистки

$$\varepsilon = (M_{\text{ф.уд}}/M_{\text{ф.ст}}) \cdot 100 \%,$$

где $M_{\text{ф.уд}}$ – масса феррочастиц, удаленных в очистителях СП СОЖ, кг; $M_{\text{ф.ст}}$ – масса феррочастиц, попавших в СОЖ из зоны прокатки, кг:

$$M_{\text{ф.ст}} = M_{\text{ф.уд}} + M_{\text{ф.о}},$$

где $M_{\text{ф.о}}$ – масса феррочастиц в очищенной СОЖ, кг:

$$M_{\text{ф.о}} = c_{\text{ф}} V.$$

В упрощенном виде модель (2.16) можно представить уравнением

$$C_{0\Sigma} = C_{\text{вх}\Sigma} (1 - \varepsilon_{\Sigma}),$$

где $C_{\text{вх}\Sigma}$ – количество механических примесей, входящее в единицу объема СОЖ в процессе обработки, суммированное по всем размерам частиц, г/л; $C_{0\Sigma} = (C_{0\Sigma i} - C_{0\Sigma i-1})$ – количество механических примесей, оставшихся в единице объема СОЖ после i -го цикла очистки, за вычетом наблюдаемого остаточного количества механических примесей в очищенной жидкости в $(i - 1)$ цикле очистки, г/л.

2.5. Расчет динамики нарастания концентрации феррочастиц в СОЖ

Время календарное, сутки	Масса феррочастиц в СОЖ после очистки $M_{\text{оч}} = M_{\text{ст}} (1 - \varepsilon)$, кг	Масса феррочастиц в очищенной СОЖ $M_{\text{оч}}$, кг	Суммарная масса феррочастиц в СОЖ $M_{\text{сум}} = M_{\text{ф}} + M_{\text{п}} + M_{\text{оч}}$, м^3	Концентрация феррочастиц в СОЖ после очистки $c_{\text{ф}} = M_{\text{сум}}/V$, кг/м ³	Приращение концентрации феррочастиц в СОЖ $\Delta c_{\text{ф}}$, кг/м ³
1	2,7	17,1	25,6	0,071	0,007
2	2,7	24,8	33,3	0,093	0,006
3	2,7	26,2	34,7	0,096	0,003
4	2,7	27,4	35,9	0,100	0,004
5	2,7	28,5	37	0,103	0,002
6	2,7	29,07	37,57	0,104	0,002
7	2,7	29,74	38,24	0,106	0,002
8	2,7	30,2	38,7	0,108	0,002
9	2,7	30,6	39,1	0,109	0,002
10	2,7	31	39,5	0,110	0,001
11	2,7	31,35	39,85	0,111	0,001
12	2,7	31,64	40,14	0,112	0,001
13	2,7	31,92	40,42	0,112	0,001
14	2,7	32,21	40,71	0,113	0,001
15	2,7	32,5	41	0,114	0,001

Для определения $M_{\text{ф.уд}}$ необходимо оценить массу феррочастиц, удаляемых во всех очистителях СП СОЖ за определенный промежуток времени.

Масса феррочастиц, декантируемых из СОЖ в кассетном магнитном сепараторе, $M_{\text{ф.уд}}^{\text{КМС}}$, во флотаторе – $K_{\text{ф.уд}}^{\text{ф}}$ и барабанном магнитном сепараторе – $M_{\text{ф.уд}}^{\text{БМС}}$ за сутки:

$$M_{\text{ф.уд}} = M_{\text{ф.уд}}^{\text{КМС}} + K_{\text{ф.уд}}^{\text{ф}} + M_{\text{ф.уд}}^{\text{БМС}} = 153 + 101 + 1,5 = 255,5 \text{ кг/сутки.}$$

Степень очистки в СП СОЖ ε равна:

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{ф.уд}}}{M_{\text{ф.уд}} + \Delta M_{\text{фо}}} = \frac{255,5}{255,5 + 3,5} = 0,986,$$

т.е. 98,6 %.

По результатам расчета концентрации $c_{\text{ф}}$ феррочастиц в СОЖ построена кривая 1 (рис. 2.5). Экспериментальные данные по динамике нарастания концентрации феррочастиц в СОЖ (кривая 2 на рис. 2.5) получены по данным лабораторных анализов маслоэмульсионного отделения ОАО «Северсталь». За начало отсчета принято время залива свежеприготовленной СОЖ.

Адекватность нелинейной расчетной зависимости (см. рис. 2.5) проверяли с помощью коэффициента парной корреляции R :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}},$$

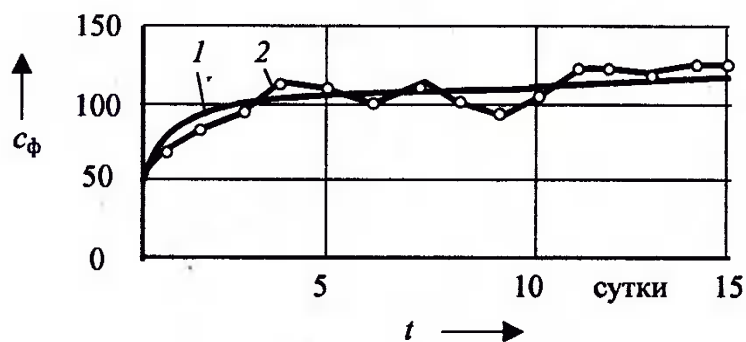


Рис. 2.5. Концентрация $c_{\text{ф}}$ феррочастиц в очищенной СОЖ: 1 – моделирование; 2 – эксперимент

где y_i – экспериментальное значение параметра (концентрация $c_{\text{ф}}$ феррочастиц в очищенной СОЖ); $\bar{y}$ – среднее арифметическое значение параметра; $\hat{y}_i$ – теоретическое (расчетное) значение параметра; $\bar{\hat{y}}$ – среднее арифметическое значение параметра по результатам расчета; n – число значений параметра y_i .

Коэффициент корреляции R принимает значения от нуля до единицы, причем чем ближе значение R к единице, тем более достоверны полученные расчетные данные.

Точность модели оценивали на основе величины ε_a среднего расхождения между теоретическими (расчетными) и экспериментальными значениями параметра:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}.$$

Математическая модель является адекватной, если значение ε_a меньше критического, равного 20 %.

В табл. 2.6 приведены расчетные и экспериментальные данные о концентрации феррочастиц, необходимые для проверки адекватности выполненных расчетов динамики изменения концентрации $c_{\text{ф}}$ феррочастиц в очищенной СОЖ.

Статистическая обработка расчетных и экспериментальных данных показала, что при $n = 15$ коэффициент парной корреляции $R = 0,97$, а величина среднего расхождения ε_a между теоретическими и экспериментальными значениями параметра $c_{\text{ф}}$ составляет 9,8 %, что свидетельствует об адекватности расчетного изменения концентрации феррочастиц реальному процессу накопления этих частиц в СОЖ.

Рассмотрим далее параметрическую оптимизацию СП СОЖ. Модель (2.10) позволяет решать типовые задачи синтеза СП СОЖ, возникающие при их создании.

2.6. Концентрация $c_{\text{ф}}$ феррочастиц в очищенной СОЖ, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^3$

Сутки		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
c_{ϕ}	Расчет	71	93	96	100	103	104	106	108	109	110	111	112	112	113	114
	Экспери- мент	62	80	84	118	110	100	119	101	93	105	124	121	118	120	125

Введем для краткости изложения соглашения о терминологии. Назовем основной элемент СП СОЖ α -элементом, если α – имя соответствующей модели из семейства (2.9). Например, X_3 элемент – системное имя станка № 3 и т.д.

Вектор $\bar{C}_\alpha \in E^m$ назовем – α -состоянием СОЖ, если $\bar{C}_\alpha$ – состояние жидкости на выходе α элемента, а функцию $\bar{C}_\alpha(t)$ α -траекторией системы.

Вектор $\bar{C}_s = \{\bar{C}_{X1}, \dots, \bar{C}_{XN}, \bar{C}_{Y1}, \dots, \bar{C}_{YL}, \bar{C}_{Z1}, \dots, \bar{C}_{ZI}, \bar{C}_{f1}, \dots, \bar{C}_{fN}\}$

будем называть системным состоянием СОЖ, а функцию $\bar{C}_s(t)$ – системной траекторией.

Ясно, что α -траектория описывает изменение состояния СОЖ на выходе α -элемента в период функционирования. Системная траектория – описание изменения состояния СОЖ в процессе функционирования. Таким образом, системная и α -траектории дают представление о работе системы. Однако задача любой СП СОЖ заключается в обслуживании основного производства, и ее функционирование – не самоцель. Поэтому модель (2.10) нуждается в дополнении моделью влияния СП СОЖ на основное производство. С этой целью рассмотрим вектор $\bar{p} = \{p_1, \dots, p_M\}$, каждая координата которого – параметр основного производства, зависящий от состояния СОЖ в системе ее применения. Тогда воздействие СОЖ на производственные параметры выражается функцией влияния

$$\bar{p} = \bar{p}(\bar{C}_s); \quad \bar{p} \in E^m, \quad (2.22)$$

где $\bar{C}_s$ – системное состояние СОЖ.

В конкретных случаях отдельные или все координаты вектора $\bar{p}$ могут зависеть лишь от отдельных α -состояний СОЖ.

Модель (2.10), дополненная функцией влияния (2.22), позволяет решать задачи технико-экономического анализа СП СОЖ.

Пусть $\Gamma = \langle \rho, \sigma \rangle$ – модель СП СОЖ, расширенная функцией влияния $\bar{p}_s(\bar{C}_s)$.

Задачей анализа СП СОЖ будем называть построение вектор-функции $\bar{p}_s[\bar{C}_s(t)]$ при произвольно выбранных технологиях, режимах

и параметрах модели Γ из их допустимых областей.

Пусть $\sigma^m \subseteq E^m$ – допустимая область изменения параметра основного производства. Задачей синтеза системы применения СОЖ будем считать построение допустимых областей значений для ее конструктивных параметров и топологии σ , обеспечивающих выполнение условия $\forall t \in t, \bar{p}_s[\bar{C}_s(t)] \in E^m$.

Заметим, что описание СП СОЖ одной только функцией влияния недостаточно, так как оно не затрагивает других важных характеристик, таких, например, как надежность, экономичность. Поэтому модель Γ необходимо дополнить векторным функционалом

$$\bar{k} = \{k_1[\bar{p}_s(t)], \dots, k_r[\bar{p}_s(t)]\}, \quad (2.23)$$

каждая компонента которого есть конкретный технико-экономический показатель работы СП СОЖ.

Математическое описание СП СОЖ можно представить в виде неявно заданной функции:

$$F(\Phi, X) = 0. \quad (2.24)$$

Состояние СП СОЖ характеризуется элементами вектора

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_N), \quad (2.25)$$

которые могут изменять свои значения в ограниченной области

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}; \quad i = \overline{1, N}. \quad (2.26)$$

Функция (2.24) ставит в соответствие каждому набору значений переменных (2.25) в области (2.26) некоторое значение Φ . Для детерминированной функции (2.24), при отсутствии дополнительных ограничений на (2.25), область (2.26) представляет собой скалярное поле значений Φ . При этом Φ является критерием оценки состояния СП СОЖ. Экстремальное значение (минимум) Φ в области (2.26) можно определить численными методами.

Для решения задачи минимизации функции нескольких вещественных переменных в ограниченной области рекомендуются восемь алгоритмов метода случайного поиска, которые условно обозначим: А1, А2, А3, А4, А5, А6, А7, А8.

Предлагаемые алгоритмы можно разделить на две группы. В алгоритмах первой группы шаг в произвольном направлении поиска выполняется после неудачного предыдущего шага, а в случае удаи шаги повторяются в том же направлении. В этих алгоритмах применяется линейная тактика поиска. Алгоритмы второй группы построены по другому принципу – после каждого удачного шага выбирается новый шаг в случайном направлении. Таким образом, в предлагаемых алгоритмах используются два способа выбора направления: случайный и парными пробами – делают два шага из одной исходной точки в противоположных направлениях и за направление рабочего шага выбирают направление шага с меньшим значением функции.

Принципиальное отличие предлагаемых алгоритмов от известных алгоритмов случайного поиска заключается в способе выбора приращений. На каждом шаге поиска в предлагаемых алгоритмах приращение получают не все переменные, а группы переменных, т.е. поиск ведут не во всем пространстве параметров, а в подпространствах. Размерность подпространства при каждом выборе шага поиска определяется случайно и может колебаться от 1 до N . Другая отличительная особенность этих алгоритмов состоит в наличии функциональной связи между приращениями переменных, входящих в состав подпространства.

Рекомендуемые алгоритмы случайного поиска в подпространствах можно записать в виде следующих рекуррентных выражений:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x_{i+1}; \quad x_i = x_{i-h} \text{ при } (\Phi(x_{i-1}) < \Phi(x_i)) \vee (g(x_i) < 0),$$

где h – число последовательных неудачных шагов поиска; Δx_{i+1} имеет в алгоритме А1 следующий вид:

$$\Delta x_{i+1} = \begin{cases} a\xi_{i+1} & \text{при } (i=0) \vee (|\Delta x_i| = |\Delta x_{i-1}|) \wedge (h > 1); \\ \Delta x_i & \text{при } (\Phi(x_{i-1}) \geq \Phi(x_i)) \wedge (g(x_i) \geq 0); \\ -\Delta x_i & \text{при } (|\Delta x_i| \neq |\Delta x_{i-1}|) \wedge (h \geq 1); \end{cases}$$

в алгоритме А2

$$\Delta x_{i+1} = \begin{cases} a\xi_{i+1} & \text{при } (i=0) \vee (|\Delta x_i| = |\Delta x_{i-1}|) \wedge (h > 1) \vee \\ & \vee (\Phi(x_{i+1}) \geq \Phi(x_i)) \wedge (g(x_i) \geq 0); \\ -\Delta x_i & \text{при } (|\Delta x_i| \neq |\Delta x_{i-1}|) \wedge (h \geq 1), \end{cases}$$

где a – максимальная величина рабочего шага поиска; Δx_{i-1} , Δx_i , Δx_{i+1} – векторы приращений соответственно на $(i-1)$, i , $(i+1)$ -м шаге поиска; $\Phi(x_{i-1})$, $\Phi(x_i)$, $\Phi(x_{i+1})$ – значения критериев качества после соответственно $(i-1)$, i , $(i+1)$ шага поиска; ξ_{i+1} – вектор случайных чисел:

$$\xi_{i+1} = (0, \dots, 0, \xi_k^{i+1}, \xi_{k+1}^{i+1}, \dots, \xi_l^{i+1}, 0, \dots, 0),$$

где $\xi_k^{i+1} = \xi_{k+1}^{i+1} = \dots = \xi_l^{i+1} = \psi$ – случайное, равномерно распределенное число, выбираемое из интервала $[-1, 1]$; k , l – случайные числа, распределенные на отрезке $[1, N]$ и упорядоченные условием $k \leq l$.

Для регулируемого выбора чисел k и l , определяющих размерность подпространства, предложена специальная процедура выбора подпространства, в котором некоторые числовые значения параметров α_1 , β_1 , m_1 позволяют задавать различные закономерности изменения частот $N_i = f(\alpha_1, \beta_1, m_1, N)$ выбора переменных при $i = 1, N$.

В двух других алгоритмах использована идея поиска не в одном, а в нескольких подпространствах. В связи с этим можно записать: в алгоритме А3

$$\Delta x_{i+1} = \begin{cases} \sum_{j=1}^t a\xi_{i+1}^j & \text{при } (i=0) \vee (|\Delta x_i| = |\Delta x_{i-1}|) \wedge (h > 1); \\ \Delta x_i & \text{при } (\Phi(x_{i-1}) \geq \Phi(x_i)) \wedge (g(x_i) \geq 0); \\ -\Delta x_i & \text{при } (|\Delta x_i| \neq |\Delta x_{i-1}|) \wedge (h \geq 1); \end{cases}$$

в алгоритме А4

$$\Delta x_{i+1} = \begin{cases} \sum_{j=1}^t a\xi_{i+1}^j & \text{при } (i=0) \vee (|\Delta x_i| = |\Delta x_{i-1}|) \wedge (h > 1) \vee \\ & \vee (\Phi(x_{i-1}) \geq \Phi(x_i)) \wedge (g(x_i) \geq 0); \\ -\Delta x_i & \text{при } (|\Delta x_i| \neq |\Delta x_{i-1}|) \wedge (h \geq 1). \end{cases}$$

В этих алгоритмах на каждом шаге поиска общее приращение равно сумме приращений t – подпространства, где t – равновероятное целое случайное число, принимающее значение 1, 2 или 3. Для каждого j -подпространства, размерность которого определяется случайными целыми числами k_j и l_j , равномерно распределенными на отрезке $[1, N]$ и упорядоченными условием $k_j \leq l_j$, вектор случайных чисел

$$\xi_{i+1}^j = (0, \dots, 0, \xi_{kj}^{i+1}, \xi_{kj+1}^{i+1}, \dots, \xi_{jl}^{i+1}, 0, \dots, 0),$$

где $\xi_{kj}^{i+1} = \xi_{kj+1}^{i+1} = \dots = \xi_{jl}^{i+1} = \psi_j$ – случайное число, равномерно распределенное на отрезке $[-1, 1]$.

Алгоритмы А5, А6, А7, А8 аналогичны соответственно алгоритмам А1, А2, А3, А4 и отличаются от них наличием адаптации рабочего шага в ходе поиска. В этих алгоритмах, при достижении заданного числа последовательных неудачных шагов поиска, происходит дробление (уменьшение в 2 раза) максимальной величины шага поиска. Прекращение поиска локального минимума функции с использованием описанных алгоритмов осуществляется по заданному числу расчетов значения функции, а также по минимальной величине относительного шага поиска (в алгоритмах с дроблением шага поиска).

Предлагаемые алгоритмы метода случайного поиска экстремального значения функции нескольких переменных в ограниченной области реализованы в программном модуле. Сходимость численного решения к точному подтверждена тестовыми расчетами. Разработанные алгоритмы и программный модуль использовали при параметрическом анализе патронного магнитного сепаратора (см. далее гл. 4) и при анализе СП СОЖ в гибком автоматизированном производстве.

Таким образом, сформулирован общий подход к построению математических моделей СП СОЖ. Предлагаемый подход позволяет учитывать как детерминированные, так и стохастические особенности СП СОЖ. Разработана модель (2.1) – (2.21) функционирования СП СОЖ, адекватность которой подтверждена экспериментально. Математическая модель (2.10) СП СОЖ открыта для включения моделей подсистем приготовления СОЖ, их контроля и диагностики, а также может быть дополнена моделью влияния СП СОЖ на показатели основного производства, что в свою очередь в дальнейшем позволит перейти к постановке и решению задач синтеза СП СОЖ, а также оценки их технико-экономической

эффективности. Теоретические и экспериментальные исследования и математические модели протекающих в СП СОЖ процессов, позволяющие уточнить модель (2.10), приведены в последующих параграфах, моделирование и параметрический анализ основных конструктивных элементов СП СОЖ представлены в гл. 4.

В качестве примера в табл. 2.7 и на рис. 2.6 приведены результаты расчетов технико-экономической эффективности различных вариантов подсистемы очистки СОЖ, полученных с учетом перечисленных уточнений.

2.7. Расчетная технико-экономическая эффективность подсистем очистки СОЖ

Показатель	Схема подсистемы очистки			
	1*	2*	4*	3*
Производительность, м ³ /ч	800		200	
Степень очистки ϵ , %	13,0	30,0	74,0	98,0
Масс. доля феррочастиц $c_{\text{фо}}$, %	0,088	0,071	0,026	0,004
Годовые затраты на фильтроматериалы, млн руб.	–	0,12	–	–
Число сбросов СОЖ в год	66	22	2,8	1
Годовые затраты на замену СОЖ, млн руб.	19,8	9,8	1,3	0,3
Годовая отсортировка проката по параметру «грязь», % (т)	0,48 (2660)	0,33 (1829)	0,025 (138)	–
Годовые потери на отсортировке по параметру «грязь», млн руб.	2,7	1,8	0,14	–
Годовые затраты на электроэнергию, млн руб.	0,50	0,60	0,50	0,02

* Номера схем на рис. 2.7.

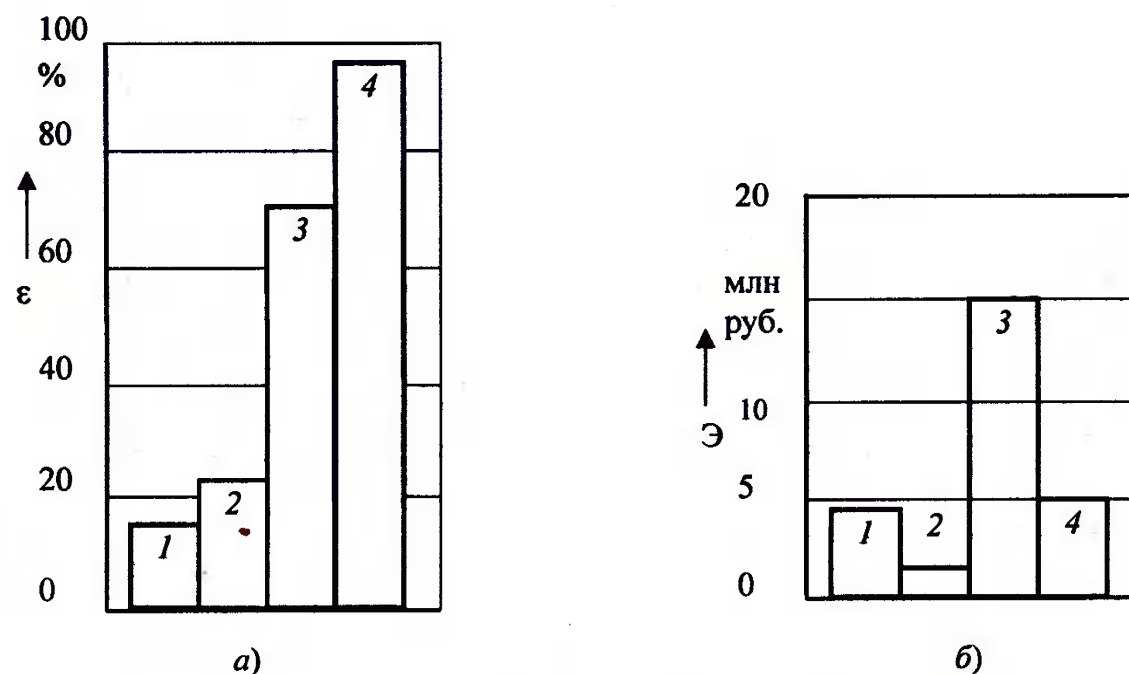


Рис. 2.6. Степень очистки (а) СОЖ и экономический эффект (б) различных вариантов подсистемы очистки СОЖ: 1 – 4 – схемы на рис. 2.7

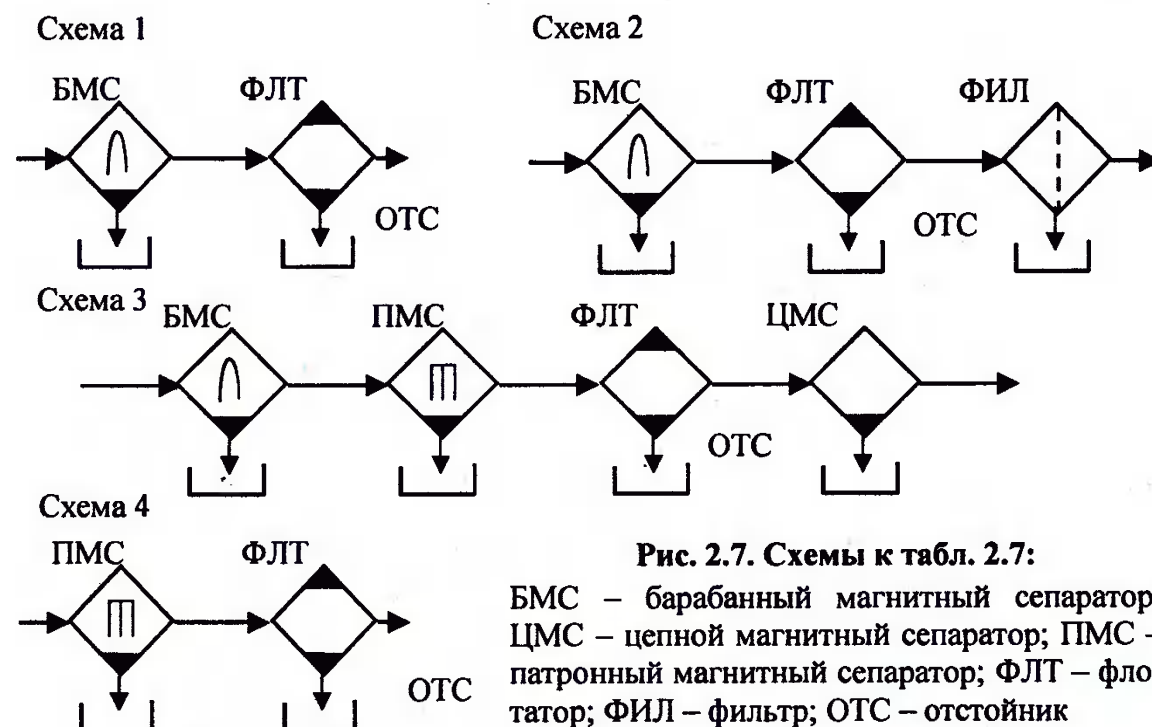


Рис. 2.7. Схемы к табл. 2.7:

БМС – барабанный магнитный сепаратор; ЦМС – цепной магнитный сепаратор; ПМС – патронный магнитный сепаратор; ФЛТ – флотатор; ФИЛ – фильтр; ОТС – отстойник

2.2. КРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДИСПЕРСНОГО СОСТОЯНИЯ СОЖ

Изменение дисперсного состояния СОЖ в процессе ее функционирования приводит к ухудшению функциональных и эксплуатационных свойств жидкости (см. п. 1.4). Учитывая, что, как уже указывалось, до 90 % объема СОЖ, применяемых при металлообработке, приходится на долю эмульсионных, ниже предпринято моделирование дисперсного состояния эмульсионных СОЖ с целью прогнозирования его изменения в процессе функционирования. Моделирование проводили в критериальной форме, как это принято при описании адгезии и других физико-химических процессов.

Основной характеристикой эмульсионной СОЖ, с точки зрения ее применения, является размер частиц d дисперсной фазы (дисперсность). Изменение дисперсности связано с изменением термодинамических (поверхностной энергии, температуры фазового перехода) и физико-механических свойств (вязкости, упругости) СОЖ, а также с агрегативной устойчивостью частиц дисперсной фазы. Эмульсионные СОЖ, как указано в п. 1.1, представляют собой наиболее грубодисперсные среди всех СОЖ смеси с размером частиц $d \geq 10^{-7}$ м. В исследованиях дисперсного состава СОЖ различают тонкодисперсные ($d = 10^{-7} \dots 10^{-6}$ м) и грубодисперсные ($d > 10^{-6}$ м) эмульсии [28, 62].

Микроскопический анализ СОЖ показал, что дисперсная фаза эмульсий может находиться в следующих состояниях: диспергированном, коагулированном, коалесцированном и пленочном (рис. 2.8). Это объясняется агрегацией частиц дисперсной фазы СОЖ в ходе ее функционирования. Интенсивность этого процесса зависит от внутренних (избыточная поверхностная энергия) и внешних (температура, примеси и т.д.) факторов. Каждое состояние дисперсной фазы соответствует определенному положению на кривой распределения массовой концентрации частиц по размерам. Изменение массовой концентрации c_d частиц размера d_i дисперсной фазы характеризует изменение физико-химических свойств СОЖ, определяющих ее технологическую эффективность и срок функционирования.

Размеры частиц дисперсной фазы и однородность эмульсии зависят от технологии ее приготовления: интенсивности* и продолжительности

* Под интенсивностью диспергирования в большинстве случаев понимают скорость движения жидкости в смесительных или других устройствах СП СОЖ.

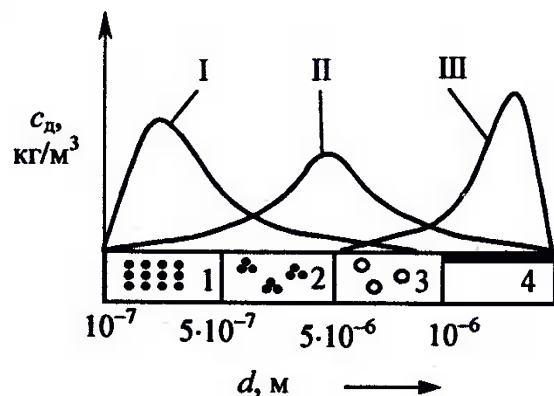


Рис. 2.8. Распределение массовой концентрации c_d дисперсной фазы эмульсии по размерам частиц:

I – после приготовления эмульсии; II – в процессе функционирования; III – отработанная СОЖ; 1, 2, 3, 4 – соответственно тонкодисперсное, коагулированное, коалесцированное и пленочное состояние

работы применяемых смесительных устройств, температуры диспергируемой жидкости и ее концентрации [84]. Причем с повышением дисперсности частиц увеличивается однородность и стабильность эмульсий.

С увеличением продолжительности диспергирования уменьшается размер частиц дисперсной фазы до некоторого значения, которое определяется возможностями применяемого устройства, его энергетическими характеристиками (рис. 2.9).

Температура диспергируемой жидкости оказывает влияние на размер частиц через изменение вязкости и поверхностного натяжения: с повышением температуры жидкости снижаются ее вязкость и поверхностное натяжение, что облегчает процесс диспергирования. Однако значительное повышение температуры уменьшает адсорбцию молекул поверхностно-активных веществ на поверхности раздела фаз, что снижает устойчивость образующихся частиц дисперсной фазы.

Концентрация компонентов СОЖ оказывает влияние на дисперсность частиц через процессы агрегации, при этом тонкодисперсные частицы легче получить в малоконцентрированных жидкостях.

Для анализа дисперсного состояния эмульсионных СОЖ используем количественное описание состояний их дисперсной фазы [62]. Учитывая,

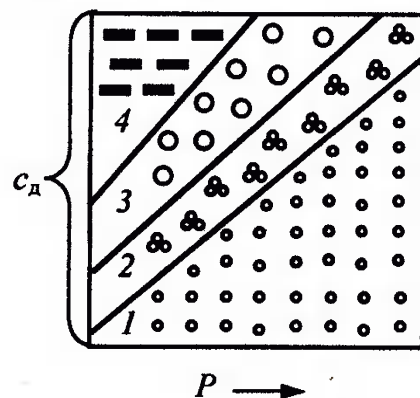


Рис. 2.9. Влияние затрачиваемой мощности P при приготовлении эмульсионной СОЖ на ее дисперсное состояние:

1, 2, 3, 4 – см. в подписи к рис. 2.8

что в эмульсионных СОЖ масса дисперсной фазы, находящейся в коллоидном состоянии, пренебрежимо мала, запишем уравнение баланса масс дисперсной фазы в следующем виде:

$$m_3 = m_d + m_{кг} + m_{кл} + m_{п}, \quad (2.27)$$

где m_d , $m_{кг}$, $m_{кл}$, $m_{п}$ – масса дисперсной фазы соответственно в диспергированном, коагулированном, коалесцированном и пленочном состоянии, кг.

Уравнения баланса масс дисперсной фазы СОЖ в процессе функционирования, описывающие ее деградацию, представлены в табл. 2.8.

2.8. Процесс деградации эмульсионных СОЖ

№ этапа деградации	Дисперсное состояние СОЖ по этапам ее деградации		Уравнение баланса масс
	Схематическое изображение	Описание	
1		Полное диспергирование эмульсола	$m_3 = m_d$
2		Появление агрегатов мицелл – коагуляция	$m_3 = m_d + m_{кг}$
3		Появление грубодисперсных мицелл – коалесценция	$m_3 = m_d + m_{кг} + m_{кл}$
4		Появление пленок	$m_3 = m_d + m_{кг} + m_{кл} + m_{п}$
5		Исчезновение одиночных мицелл	$m_3 = m_{кг} + m_{кл} + m_{п}$
6		Исчезновение агрегатов мицелл	$m_3 = m_{кл} + m_{п}$
7		Полная деградация – расслоение эмульсии на водную и масляную фазы (в виде пленки)	$m_3 = m_{п}$

Интенсивность перехода дисперсной фазы из одного состояния в другое можно обозначить критерием по аналогии с числом адгезии или числом коагуляции [39]

$$m_d = m_3 \alpha, \tag{2.28}$$

где α – число эмульгирования, т.е. вероятность перехода дисперсной фазы СОЖ в тонкодисперсное состояние в процессе ее приготовления.

В результате коагуляции часть дисперсной фазы переходит в коагулированное состояние

$$m_{кг} = m_d \beta, \tag{2.29}$$

где β – число коагуляции, т.е. вероятность перехода дисперсной фазы в коагулированное состояние.

По аналогии с (2.29), масса скоалесцировавшей фазы определяется как

$$m_{кл} = m_{кг} \gamma, \tag{2.30}$$

где γ – число коалесценции, т.е. вероятность слияния мицелл размером $d = (1...5) \cdot 10^{-6}$ м.

На последнем этапе мицеллы всплывают и образуют пленки на поверхности СОЖ (этому немало способствует наличие «инородных» масел в СОЖ)

$$m_{п} = m_{кл} \delta, \tag{2.31}$$

где δ – число конденсации, т.е. вероятность образования масляной пленки на поверхности СОЖ.

После подстановки выражений (2.28) – (2.31) в уравнение (2.27) и деления левой и правой его частей на m_d , получим критериальное уравнение баланса дисперсных состояний СОЖ:

$$1 = \alpha + \alpha \beta + \alpha \beta \gamma + \alpha \beta \gamma \delta. \tag{2.32}$$

В уравнении (2.32) каждое слагаемое отражает связь состояний дисперсной фазы СОЖ, при этом учитывается вероятность ее перехода из одного состояния в другое.

Для практического использования зависимости (2.32) необходимо определить функции, раскрывающие содержание входящих в нее критериев. На этапе приготовления СОЖ необходимо установить зависимости между конструктивными параметрами устройств приготовления СОЖ и фазовым состоянием жидкости. Для этапа функционирования необходи-

мо выявить зависимости между возмущающими факторами и соответствующими изменениями состояний СОЖ. В связи с отсутствием аналитических зависимостей критериев α, β, γ и δ от условий функционирования СОЖ авторами предпринята попытка упрощения критериального описания дисперсного состояния СОЖ с использованием нормально-логарифмического распределения частиц дисперсной фазы по размерам, характерного (по наблюдению авторов) для эмульсии.

Разработанная упрощенная математическая модель изменения массовой концентрации c частиц размера d на этапах приготовления (2.33) и функционирования (2.34) СОЖ позволяет выбирать устройства, параметры и режим их работы из условия получения СОЖ требуемой дисперсности, а также на основе начальной массовой концентрации частиц размера d , коэффициентов потерь q и агрегации ψ дисперсной фазы определять дисперсное состояние СОЖ:

$$c_d(d, t_n) = ic'_d(di); \tag{2.33}$$

$$c_d(d, t) = c'_d \left(de^{-\psi t} \right) e^{-\left[\psi t + \frac{qd\Delta m}{\psi \Delta m} \left(1 - e^{-\psi \Delta m t} \right) \right]}, \tag{2.34}$$

где $c_d(d, t)$ и $ic'_d(di)$ – функции массовой концентрации частиц дисперсной фазы размера d ; c'_d, c_d – соответственно начальная (после приготовления СОЖ) и текущая (соответствующая определенному моменту времени) массовая концентрация частиц дисперсной фазы размера d , кг/м³; $i = \bar{d}/\bar{d}_0$ – степень диспергирования; $\bar{d}_0, \bar{d}$ – средний размер частиц дисперсной фазы соответственно в начальный (после приготовления СОЖ) и текущий моменты времени, м; t_n, t – соответственно длительность приготовления (перемешивания) и функционирования СОЖ, ч; Δm – коэффициент пропорциональности, характеризующий зависимость потери массы дисперсной фазы от размера частиц.

Отсутствие методик аналитического расчета величин q и ψ для реальных технологических процессов применения СОЖ обуславливает необходимость их экспериментального определения.

Эксперименты проводили на плоскошлифовальном станке 3Е711ВФ1. Шлифовали образцы из стали 45, HRC 40...45 кругами 1 – 250×25×76 характеристик 24А12НСМ27К5, 24А16НСМ27К5, 24А25НСМ27К5, 24А40НСМ27К5. Рабочая скорость круга составляла

$v_k = 35$ м/с; скорость заготовки (стола станка) $v_s = 12$ м/мин, вертикальная подача круга $S_t = (0,002...0,02)$ мм/дв. ход. В качестве СОЖ использовали 5 %-ные эмульсии ЭТ2 и ИХП-45Э. СОЖ приготавливали на установке для интенсивного механического диспергирования при окружной скорости ротора $v_{рот} = 94; 150; 250$ м/с [28]. По пробам, которые брали ежедневно, фиксировали изменение дисперсного состояния СОЖ при помощи гранулометра ГИУ-1М, подключенного к персональному компьютеру, оснащенного цифровой видеокамерой и микроскопом. Для обработки результатов измерений использовали специальное программное обеспечение, позволяющее определять статистические параметры распределения (среднее значение, среднее квадратическое отклонение, медиана, коэффициенты вариации, асимметрии и эксцесса).

Установлено, что рассогласование результатов экспериментальных и теоретико-экспериментальных исследований на этапе приготовления жидкости объясняется в основном погрешностями определения важнейшей характеристики устройства приготовления СОЖ – степени диспергирования i (табл. 2.9, рис. 2.10).

В результате исследований получены эмпирические зависимости для определения коэффициентов агрегации и потерь, учитывающие концентрацию, дисперсность СОЖ и условия шлифования:

$$\psi = \psi_m k_{\psi_1} k_{\psi_2};$$

(2.35)

$$q = q_m k_{q_1} k_{q_2},$$

(2.36)

2.9. Плотность распределения массовой концентрации c_d частиц размера d_i в зависимости от режима приготовления 5 %-ных эмульсий ЭТ2 и ИХП-45Э

СОЖ	$v_{рот},$ м/с	Интервал размеров $d_i \cdot 10^{-6}, \text{ м}$								
		0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	5 – 6	6 – 7	7 – 9	9 – 12
ЭТ 2	94	0,67	0,0094	0,037	0,048	0,083	0,048	0,035	0,0076	0,066
	150	0,84	0,01	0,026	0,011	0,0078	0,01	0,078	–	0,054
	250	0,89	0,08	0,02	0,0067	0,001	0,0067	–	–	–
ИХП-45Э	94	0,795	0,001	0,06	0,024	0,013	0,024	0,039	–	0,042
	150	0,826	0,015	0,042	0,051	0,029	0,036	–	–	–
	250	0,807	0,01	0,029	0,052	0,019	0,024	0,019	0,036	–

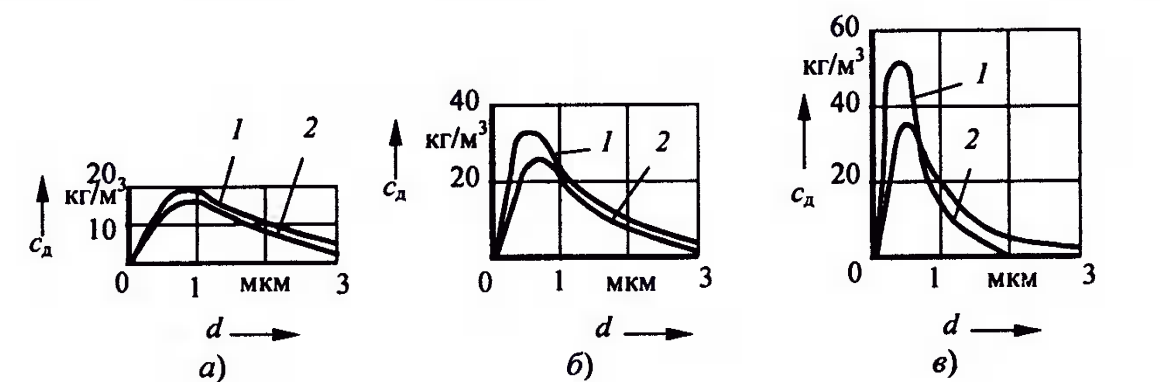


Рис. 2.10. Изменение массовой концентрации c_d дисперсной фазы в 5 %-ной эмульсии ЭТ2 в зависимости от режима приготовления СОЖ:
а, б, в – соответственно $v_{рот} = 94; 150; 250$ м/с; 1, 2 – соответственно расчетные и экспериментальные значения степени диспергирования i

где ψ_m, q_m – табличные значения коэффициентов соответственно агрегации и потерь (табл. 2.10); k_{ψ_1}, k_{ψ_2} и k_{q_1}, k_{q_2} – коэффициенты влияния соответственно зернистости и вертикальной подачи круга на изменение ψ и q (табл. 2.11).

Относительные погрешности опытного определения коэффициентов ψ и q , приведенные к доверительной вероятности 0,95, не превышали $\pm 6\%$.

Подстановка значений q и ψ в уравнение (2.34) позволяет определить дисперсное состояние СОЖ в процессе функционирования. Анализ этапа функционирования СОЖ показал следующее: СОЖ, приготовленная при малых $v_{рот}$ в установке интенсивного механического дисперги-

2.10. Изменение коэффициентов агрегации и потерь

Массовая концентрация эмульсола в СОЖ c_3 , кг/м ³	Коэффициент агрегации $\psi_m \cdot 10^3$				Коэффициент потерь $q_m \cdot 10^3$			
	Средний диаметр частиц дисперсной фазы $\bar{d} \cdot 10^{-6}$, м							
	0,5	1	3	5	0,5	1	3	5
30	7	5,1	2,7	1,5	6	6,9	8,3	10
50	10	8,2	4,8	2,7	10	12,4	14,1	15
100	25	17	10	6,8	22	29	34	39

2.11. Поправочные коэффициенты k_{ψ_1} , k_{ψ_2} и k_{q_1} , k_{q_2}

Зернистость круга $d_3 \cdot 10^{-6}$, м		120	160	250	400
k_1	k_{ψ_1}	1	0,96	0,93	0,89
	k_{q_1}	1,02	1	0,96	0,94
Подача круга S_{2x} , мм/дв.ход		0,002	0,005	0,01	0,02
k_2	k_{ψ_2}	1,04	1	0,95	0,89
	k_{q_2}	1,06	1	0,98	0,92

рования, имеет грубодисперсную структуру, что приводит к повышенным потерям массы дисперсной фазы и к уменьшению ее концентрации (в этом случае снижается вероятность столкновения частиц дисперсной фазы); как следствие, коэффициент агрегации ψ уменьшается; для тонкодисперсных эмульсий коэффициент потерь q меньше, чем для грубодисперсных.

Таким образом, с увеличением $v_{рот}$ снижается коэффициент потерь q , а коэффициент агрегации ψ увеличивается. При этом растет массовая концентрация тонкодисперсной фазы. Уменьшение размера частиц приводит к уменьшению их агрегативной устойчивости. Это обусловлено увеличением расклинивающего давления адсорбционно-сольватного слоя между мелкими частицами и стремлением системы к уменьшению межфазовой поверхности. Поэтому коэффициент ψ с увеличением времени функционирования СОЖ возрастает.

Во многих случаях срок функционирования СОЖ в значительной степени зависит от концентрации СОЖ и ее дисперсного состава. В связи с этим были проведены исследования изменения массовой концентрации дисперсной фазы в 5 %-ной эмульсии ЭТ2 (режим приготовления $v_{рот} = 250$ м/с) в процессе ее функционирования (рис. 2.11, 2.12). Условия проведения экспериментов описаны выше.

Уменьшение концентрации эмульсии связано с адсорбцией частиц дисперсной фазы на шламе и их коагуляцией (см. рис. 2.12) преимущественно за счет частиц максимального размера как наименее устойчивых к

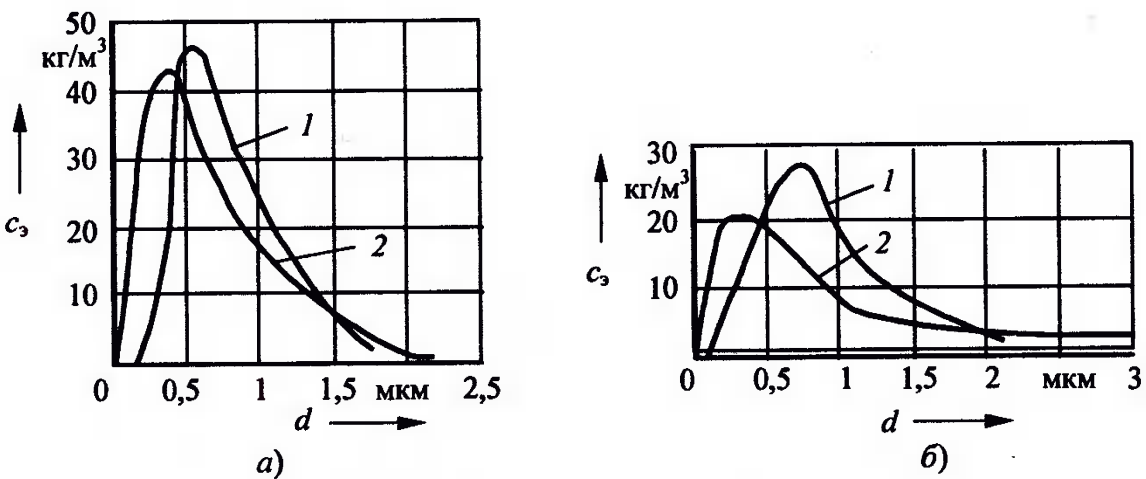


Рис. 2.11. Массовая концентрация c_3 эмульсора в 5 %-ной эмульсии ЭТ2: а, б – время функционирования СОЖ соответственно $t = 24; 48$ ч; 1, 2 – соответственно расчетная и экспериментальная кривые

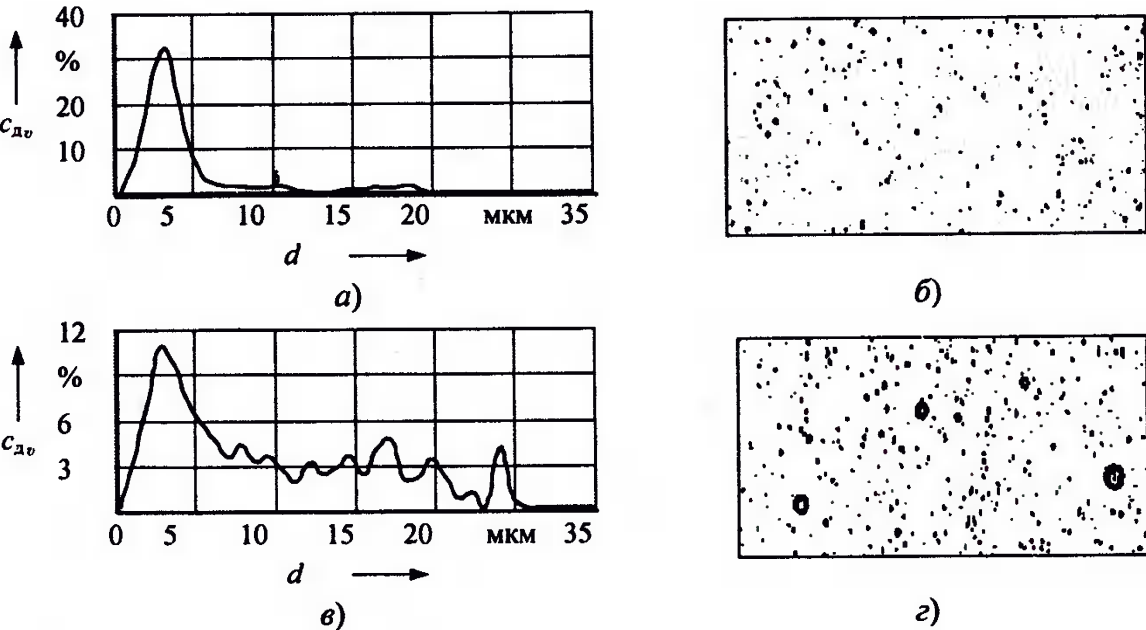


Рис. 2.12. Объемная доля c_{dv} частиц эмульсора (а, в) и микрофотографии (размер кадра 350×630 мкм) (б, г) 5 %-ной эмульсии ЭТ2: а, б – время функционирования СОЖ $t = 5$ сут; в, г – $t = 25$ сут

действию возмущающих факторов [28, 79]. Поэтому для увеличения срока функционирования СОЖ важно, чтобы свежеприготовленная эмульсия имела минимально возможные размеры частиц дисперсной фазы, чтобы уменьшить вероятность их агрегации. Кроме того, естественно, следует

использовать очистители, обеспечивающие высокую тонкость и степень очистки СОЖ.

Адекватность расчетных и экспериментальных данных проверяли с помощью *F*-критерия Фишера, расчетное значение F_p которого

$$F_p = \frac{(n-k)R^2}{(k-1)(1-R^2)} ;$$
$$R = \sqrt{\frac{\delta^2}{\sigma^2}} .$$

Здесь δ^2 и σ^2 соответственно дисперсии выравненных $(\hat{y}_i)$ и исходных (y_i) значений результативного признака:

$$\delta^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2}{n}} ; \quad \sigma^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{n}} .$$

Критическое значение *F*-критерия $F_{кр}$ определяли по таблицам *F*-распределения при степенях свободы $v_1 = k - 1$, $v_2 = n - k$ и уровне значимости α ($\alpha = 0,05$; $\alpha = 0,01$). Через *n* и *k* обозначены соответственно число наблюдений и число параметров в уравнении регрессии.

Если $F_{кр} < F_p$, то полученные расчетные значения (уравнения) считаются статистически значимыми с вероятностью $p = 1 - \alpha$.

Значимость коэффициентов a_i уравнения линейной регрессии

$$\hat{y} = a_0 + a_1x$$

проверяли с помощью t_p -критерия Стьюдента

$$t_p = \frac{|a_i|}{\sqrt{\sigma_{a_i}^2}} ,$$

где σ_{a_i} – дисперсия коэффициента регрессии.

Параметр модели признается статистически значимым, если

$$t_p > t_{кр}(\alpha; v = n - k),$$

где α – уровень значимости; $v = n - k$ – число степеней свободы.

Для расчета уравнений регрессии, проверки значимости и адекватности гипотетического распределения использовали статистические программы «Statistika» и «StatGraphics».

В данном случае $\delta^2 = 0,0107 \text{ кг/м}^3$; $\sigma^2 = 0,0181 \text{ кг/м}^3$; $n = 15$; $k = 1$. В результате $R^2 = 0,352$; $F_p = 30,2$. Табличное значение *F*-критерия при $\alpha = 0,05$ и степенях свободы $v_1 = 1$, $v_2 = 13$ составляет 27,8. Так как $F_{кр} < F_p$, то построенная модель статистически значима с вероятностью 95 %.

Для оценки точности модели была подсчитана величина ϵ_a среднего расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями параметра c_a , которое составило 19,7 %. Это приводит к выводу об адекватности построенной модели реальным условиям функционирования СОЖ.

Таким образом, уравнения (2.35), (2.36) удовлетворительно описывают дисперсное состояние СОЖ на этапах их приготовления и функционирования и могут быть использованы для уточнения модели (2.10).

С точки зрения управления составом и свойствами СОЖ в процессе ее функционирования наибольший интерес представляет изучение переходных процессов, происходящих в СОЖ при смешивании нескольких ее компонентов (в том числе загрязненных). Процессы смешивания нескольких компонентов СОЖ в накопительных емкостях имеют место, например, на этапах приготовления СОЖ и сбора ее со станков. В общем случае процесс смешивания нескольких компонентов СОЖ в емкости можно представить схемой, показанной на рис. 2.13.

Жидкость поступает в емкость через *n* труб с объемными расходами $Q_{v1}(t), Q_{v2}(t), \dots, Q_{vn}(t)$ и массовыми концентрациями $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$ некоторого вещества*. Из емкости вытекает жидкость с расходом $Q_v(t)$ и концентрацией $c(t)$. Будем считать, что емкость имеет постоянную площадь поперечного сечения *S*, а объем *V(t)* и высота *h(t)* столба жидкости изменяются во времени. Кроме того, предполагаем, что содержимое емкости перемешивается таким образом, что концентрация вещества в выходном потоке равна концентрации вещества в баке. Исходя из этих предположений, уравнения баланса масс для емкости можно записать в виде

* В зависимости от постановки задачи под веществом понимаются как компоненты СОЖ, так и механические примеси.

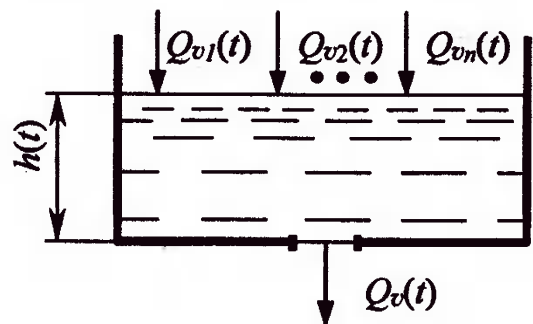


Рис. 2.13. Схема смешивания СОЖ в накопительной емкости

$$\begin{cases} \frac{dV(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_{vi}(t) - Q_v(t); \\ \frac{d}{dt}[c(t)V(t)] = \sum_{i=1}^n c_i(t)Q_{vi}(t) - c(t)Q_v(t). \end{cases} \quad (2.37)$$

Воспользовавшись законом Торичелли, определим скорость истечения жидкости

$$v(t) = \zeta \sqrt{2gh(t)},$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ζ – эмпирический коэффициент (для воды $\zeta = 0,62$).

Если σ – площадь отверстия (м^2), через которое жидкость вытекает из емкости, то

$$Q_v(t) = \sigma v(t) = \sigma \zeta \sqrt{2gV(t)/S} = K \sqrt{V(t)};$$

$$K = \sigma \zeta \sqrt{2g/S} = \text{const}.$$

В установившемся состоянии расходы $Q_{v10}, Q_{v20}, \dots, Q_{vn0}, Q_{v0}$, объем V_0 и концентрации $c_{10}, c_{20}, \dots, c_{n0}, c_0$ постоянны и удовлетворяют условиям

$$\begin{cases} 0 = \sum_{i=1}^n Q_{vi0} - Q_{v0}; \\ 0 = \sum_{i=1}^n c_i Q_{vi0} - c_0 Q_{v0}; \\ Q_{v0} = K \sqrt{V_0}. \end{cases} \quad (2.38)$$

Из этих соотношений по заданным значениям $c_{i0}, Q_{vi0}, i = 1, 2, \dots, n$ можно определить Q_{v0}, c_0 и V_0 .

В общем случае возможны отклонения от установившегося режима. Обозначим $\mu_i(t) = Q_{vi}(t) - Q_{vi0}$; $v_i(t) = c_i(t) - c_{i0}, i = 1, 2, \dots, n$; $\xi_1(t) = V(t) - V_0$, $\xi_2(t) = c(t) - c_0$. Тогда

$$\begin{aligned} Q_v(t) &= K \sqrt{V(t)} = K \sqrt{V_0 + \xi_1(t)} = K \sqrt{V_0} \left(1 + \frac{\xi_1(t)}{V_0}\right)^{1/2} = \\ &= K \sqrt{V_0} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\xi_1(t)}{V_0} + \dots\right) = Q_{v0} + \frac{Q_{v0}}{2V_0} \xi_1(t) + \dots \end{aligned}$$

Систему уравнений (2.37) запишем в виде

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1(t) = \sum_{i=1}^n (\mu_i(t) + Q_{vi0}) - Q_{v0} - \frac{Q_{v0}}{2V_0} \xi_1(t) - \dots; \\ \frac{d}{dt}[(\xi_2(t) + c_0)(\xi_1(t) + V_0)] = \sum_{i=1}^n (v_i(t) + c_{i0})(\mu_i(t) + Q_{vi0}) - \\ - (\xi_2(t) + c_0)(Q_{v0} + \frac{Q_{v0}}{2V_0} \xi_1(t) + \dots). \end{cases}$$

Линеаризовав уравнения системы с учетом выражений (2.38), получим

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) - \frac{1}{2} \frac{Q_{v0}}{V_0} \xi_1(t); \\ c_0 \dot{\xi}_1(t) + V_0 \dot{\xi}_2(t) = \sum_{i=1}^n [c_{i0} \mu_i(t) + Q_{vi0} v_i(t)] - Q_{v0} \xi_2(t) - \frac{c_0 Q_{v0}}{2V_0} \xi_1(t) \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1(t) + \frac{1}{2} \frac{Q_{v0}}{V_0} \xi_1(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t); \\ \dot{\xi}_2(t) + \frac{Q_{v0}}{V_0} \xi_2(t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{c_{i0} - c_0}{V_0} \mu_i(t) - Q_{vi0} v_i(t) \right]. \end{cases} \quad (2.39)$$

Системы уравнений (2.37) и (2.39) получены в предположении, что изменения расходов вытекающих потоков $Q_{vi}(t)$ и концентраций вещества $c_i(t)$ мгновенно сказываются на изменении концентрации $c(t)$ вытекающей жидкости. В более точной модели необходимо учесть, во-первых, время движения жидкости по трубам (транспортное запаздывание) и, во-вторых, то, что для перемешивания жидкости в емкости для выравнивания концентрации требуется также некоторое время (технологическое запаздывание). Оба эти фактора можно учесть, введя запаздывание в уравнения (2.37) и (2.39). С учетом запаздываний τ_i система уравнений (2.37) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dV(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_{vi}(t - \tau_i) - Q_v(t); \\ \frac{d}{dt}[c(t)V(t)] = \sum_{i=1}^n c_i(t - \tau_i)Q_{vi}(t - \tau_i) - c(t)Q_v(t). \end{cases}$$

Введя запаздывания в линеаризованную модель (2.39), получим

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1(t) + \frac{1}{2} \frac{Q_{v0}}{V_0} \xi_1(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t - \tau_i); \\ \dot{\xi}_2(t) + \frac{Q_{v0}}{V_0} \xi_2(t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{i0} - C_0}{V_0} \mu_i(t - \tau_i) + Q_{vi0} v_i(t - \tau_i) \right]. \end{cases} \quad (2.40)$$

Решение системы (2.40) при начальных условиях $\xi_1(0) = 0$, $\xi_2(0) = 0$ приводит к следующим выражениям:

$$\xi_1(t) = e^{-\frac{Q_{v0}}{2V_0}t} \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{\frac{Q_{v0}}{2V_0}\tau} \mu_i(t - \tau_i) d\tau;$$

$$\xi_2(t) = e^{-\frac{Q_{v0}}{V_0}t} \sum_{i=1}^n \int_0^t e^{\frac{Q_{v0}}{V_0}\tau} \left[\frac{C_{i0} - C_0}{V_0} \mu_i(t - \tau_i) + Q_{vi0} v_i(t - \tau_i) \right] d\tau.$$

Рассмотрим важный для практики частный случай. Предположим, что расход поступающей в емкость жидкости и концентрация анализи-

руемого вещества постоянны, т.е. $Q_{vi}(t) \equiv Q_{vi} = \text{const}$, $c_i(t) \equiv c_i = \text{const}$, $i = 1, 2, \dots, n$.

В этом случае $Q(t) = K\sqrt{V(t)}$. Тогда система (2.37) примет вид

$$\begin{cases} \frac{dV(t)}{dt} = A - K\sqrt{V(t)}; \\ d[c(t)V(t)]/dt = B - c(t)K\sqrt{V(t)}, \end{cases} \quad (2.41)$$

где $A = \sum_{i=1}^n Q_{vi}$ — суммарный объемный расход входного потока, м³/с;

$B = \sum_{i=1}^n c_i Q_{vi}$ — суммарный массовый расход вещества, поступившего в емкость, кг/с.

Из второго уравнения системы (2.41) вычтем первое, умноженное на $c(t)$. В результате получим равносильную (2.41) систему

$$\begin{cases} dV/dt = A - K\sqrt{V}; \\ V dc/dt = B - Ac. \end{cases} \quad (2.42)$$

Первое уравнение системы (2.42) представим в виде $dt = dV / (A - K\sqrt{V})$.

После интегрирования получим

$$t = -2 \left(K\sqrt{V} + A \ln |A - K\sqrt{V}| \right) / K^2 + \bar{C}_1, \quad (2.43)$$

где $\bar{C}_1$ — произвольная постоянная.

Исключив dt из уравнений системы (2.42), получим

$$\frac{dV}{A - K\sqrt{V}} = \frac{Vdc}{B - Ac} \quad \text{или} \quad \frac{dV}{V(A - K\sqrt{V})} = \frac{dc}{B - Ac}.$$

Интегрирование приводит к зависимости

$$c = B / A + \bar{C}_2 (A - K\sqrt{V})^2 / V, \quad (2.44)$$

где $\bar{C}_2$ — произвольная постоянная.

Зададим начальные условия:

$$V(0) = V_0, \quad c(0) = c_0. \quad (2.45)$$

Интегралы (2.43), (2.44), удовлетворяющие начальным условиям (2.45), запишем в виде

$$t = \frac{2}{K^2} \left(K\sqrt{V_0} - \sqrt{V} + A \ln \left| \frac{A - K\sqrt{V_0}}{A - K\sqrt{V}} \right| \right); \quad (2.46)$$

$$c = \frac{B}{A} + \frac{(Ac_0 - B)V_0}{A(A - K\sqrt{V_0})^2} \frac{(A - K\sqrt{V})^2}{V}.$$

Исследуем поведение функций $V(t)$ и $c(t)$. Из системы (2.42) непосредственно следует, что $dt/dV = 1/(A - K\sqrt{V})$. Отсюда следует, что функция $t = t(V)$ возрастает в интервале $(0, (A/K)^2)$ и убывает в интервале $((A/K)^2, \infty)$. При $V = (A/K)^2$ производная $dt/dV = \infty$ (рис. 2.14, а).

Дифференцирование по V выражения (2.46) дает

$$\frac{dt}{dV} = \frac{1}{A - K\sqrt{V}}; \quad \frac{dc}{dV} = -\frac{(Ac_0 - B)V_0(A - K\sqrt{V})}{(A - K\sqrt{V_0})^2 V^2}.$$

Отсюда

$$\frac{dc}{dt} = \frac{dc}{dV} \frac{dV}{dt} = \frac{dc/dV}{dt/dV} = -\frac{(Ac_0 - B)V_0(A - K\sqrt{V})^2}{(A - K\sqrt{V_0})^2 V^2}.$$

Из полученного следует, что $dc/dt > 0$ при $c_0 < B/A$ и $dc/dt < 0$ при $c_0 > B/A$. На рис. 2.14, б показаны графики функции $c = c(t)$, соответствующие начальным значениям $c_0 = c_0^{(1)} < B/A$ и $c_0 = c_0^{(2)} > B/A$.

Таким образом, для каждого из параметров V и c возможны три варианта поведения во времени (см. рис. 2.14): асимптотическое уменьшение до определенной величины (кривые 1); отсутствие изменений во

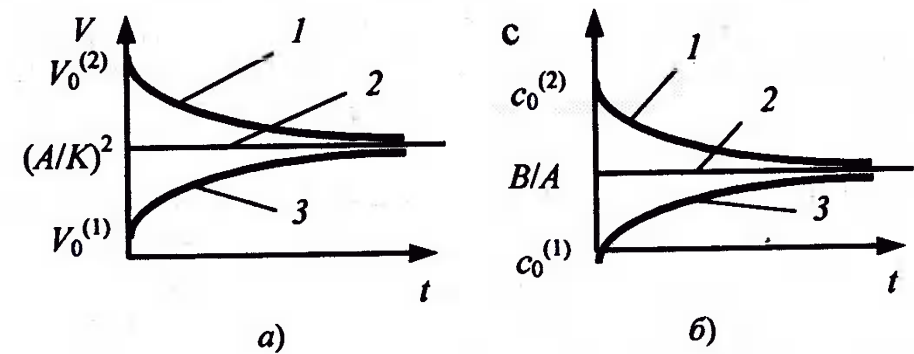


Рис. 2.14. Изменение функций $V = V(t)$ (а) и $c = c(t)$ (б) во времени: 1, 2, 3 – варианты поведения функций

времени (кривые 2); асимптотическое увеличение до определенной величины (кривые 3).

Из системы уравнений (2.46) следует также, что если $V_0 = (A/K)^2$, то $V(t) \equiv (A/K)^2$; если $c_0 = B/A$, то $c(t) \equiv B/A$. При $t \rightarrow \infty$ $V(t) \rightarrow (A/K)^2$, $c(t) \rightarrow B/A$, т.е. каковы бы ни были начальные условия, с течением времени в емкости устанавливается постоянный объем жидкости $V = (A/K)^2$ с постоянной концентрацией вещества $c = B/A$. При $n = 1$, концентрация в емкости будет такая же, как в поступающей жидкости: $c = B/A = c_1 Q_{v1} / Q_{v1} = c_1$. В общем случае ($n > 1$) устанавливается «средневзвешенная» концентрация

$$c = B/A = \frac{\sum_{i=1}^n c_i Q_{vi}}{\sum_{i=1}^n Q_{vi}}. \quad (2.47)$$

Соотношение (2.47) можно использовать для расчета концентрации любого компонента СОЖ (в том числе механических примесей) на выходе из накопительной емкости по заданным значениям концентрации этого компонента во входных потоках. Погрешность расчета определяется точностью измерения концентраций c_i и объемных расходов входных потоков Q_{vi} .

Критериальный подход к исследованию и описанию динамики изменения свойств СОЖ с учетом переходного процесса перемешивания компонентов позволяет прогнозировать стабильность СОЖ, являющуюся важнейшей характеристикой СП СОЖ при металлообработке.

2.3. СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СОЖ, ПРИМЕНЯЕМОЙ НА ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Как показано в главе 1, одним из основных факторов, влияющих на качество обработанных поверхностей детали или заготовки, является загрязнение СОЖ механическими примесями. Стабильность чистоты СОЖ определяется закономерностями работы очистителей, производящих очистку жидкости от механических и иных примесей, которые неизбежно загрязняют ее в процессе функционирования [62].

Важнейшей характеристикой очистителя, определяющей качество очистки СОЖ, является степень очистки ε , оценивающая относительную долю удаленного шлама в общей его массе:

$$\varepsilon = \frac{Q_{my}}{Q_{mн}} = \frac{Q_{mн} - Q_{mo}}{Q_{mн}} = 1 - \frac{Q_{mo}}{Q_{mн}}, \quad (2.48)$$

где Q_{my} – масса шлама, удаляемого из СОЖ в единицу времени, кг/с; $Q_{mн}$ – масса шлама, поступающего в очиститель вместе с загрязненной СОЖ в единицу времени, кг/с; Q_{mo} – масса шлама, выходящего из очистителя вместе с очищенной СОЖ в единицу времени, кг/с.

Если представить $Q_{mн}$, Q_{mo} в виде произведения объемного расхода СОЖ $Q_{vн}$, $Q_{vо}$ соответствующего потока на массовую концентрацию в нем шлама, то уравнение (2.48) примет следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{c_n Q_{vн} - c_o Q_{vо}}{c_n Q_{vн}} = 1 - \frac{c_o Q_{vо}}{c_n Q_{vн}}, \quad (2.49)$$

где $Q_{vн}$ – объемный расход СОЖ на входе очистителя, м³/с; $Q_{vо}$ – объемный расход СОЖ на выходе очистителя (производительность очистки), м³/с; c_n , c_o – массовая концентрация механических примесей в СОЖ соответственно до и после очистки, кг/м³.

Обозначим $Q_{vy}/Q_{vн}$ через α_o , $Q_{vо}/Q_{vн}$ через $(1-\alpha_o)$, где Q_{vy} – объемный расход удаляемого шлама, м³/с; α_o – коэффициент отхода СОЖ со шламом. Тогда

$$\varepsilon = 1 - \frac{Q_{mo}}{Q_{mн}} (1 - \alpha_o). \quad (2.50)$$

Среднее число частиц шлама, поступивших в очиститель и оставшихся в единице объема СОЖ, обозначим соответственно N_n и N_o . Предположим, что частица шлама, поступающая в очиститель и имеющая размер (например, диаметр) x , удаляется с вероятностью $F(x)$. Тогда график, характеризующий работу очистителя, можно представить в виде, показанном на рис. 2.15.

Заменим величины Q_{mo} и $Q_{mн}$ соответственно на N_o и N_n , а также учтем, что степень очистки ε определяется вероятностью F удаления из СОЖ частиц размером x . Тогда

$$F = 1 - \frac{N_o (1 - \alpha_o)}{N_n}, \quad (2.51)$$

$$N_o = N_n \frac{(1 - F)}{(1 - \alpha_o)} \quad \text{или} \quad N_o = N_n \frac{q}{(1 - \alpha_o)},$$

где q – вероятность того, что частица останется в СОЖ.

После того как жидкость в системе совершит один оборот (цикл), число частиц данной фракции в единице объема будет

$$N_n^1 = \frac{Q_{vн} N_n + Q_{vо} \frac{N_n q}{(1 - \alpha_o)}}{Q_{vн}} = N_n (1 - q).$$

После второго цикла число частиц на входе в очиститель составит

$$N_n^2 = \frac{Q_{vн} N_n + Q_{vо} \frac{(1 - q)}{(1 - \alpha_o)} N_n q}{Q_{vн}} = N_n (1 + q + q^2).$$

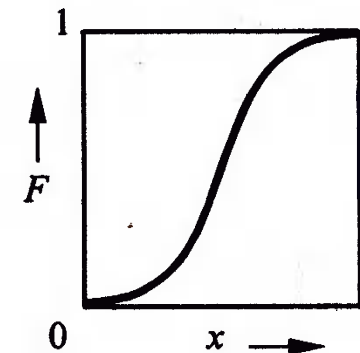


Рис. 2.15. Функция $F(x)$ распределения вероятности удаления частиц шлама из СОЖ в зависимости от их размера x [11]

Аналогично, после n -го цикла

$$N_{\text{и}}^n = N_{\text{и}} \left(1 + q + q^2 + \dots + q^n \right) = N_{\text{и}} \frac{(1 - q^{n+1})}{(1 - q)}. \tag{2.52}$$

Так как размер частиц шлама является случайной величиной и имеет нормально-логарифмическое распределение [11], плотность распределения

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x} e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}},$$

где $\bar{a}$ и σ – соответственно среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения параметра $\ln x$.

Среднее число частиц в единице объема СОЖ, размеры которых находятся в интервале $[x; x + \Delta x]$,

$$N_{\Delta x} = N \int_x^{x+\Delta x} p(x) dx, \tag{2.53}$$

где N – среднее число частиц, поступающих со станка в единицу объема СОЖ за первый цикл.

Число частиц, поступающих в очиститель на n -ом цикле и имеющих размеры от x до $x + \Delta x$, определяется выражением

$$N_{\Delta x}^n = N \int_x^{x+\Delta x} \frac{1 - q^{n+1}(x)}{1 - q(x)} p(x) dx. \tag{2.54}$$

Тогда общее число частиц, входящих в очиститель на n -м цикле в единицу объема СОЖ,

$$N_{\text{и}}^n = N \int_x^\infty \frac{1 - q^{n+1}(x)}{1 - q(x)} p(x) dx = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_x^\infty \frac{1 - q^{n+1}(x)}{1 - q(x)} e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx. \tag{2.55}$$

Аналогично получим, что число частиц N_0^n , остающихся в очистителе и удаленных из СОЖ N_y^n на n -м цикле, определяется зависимостями:

$$N_0^n = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \sigma (1 - \alpha_0)} \int_x^\infty \frac{q(x) - q^{n+2}(x)}{x p(x)} e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx; \tag{2.56}$$

$$N_y^n = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \sigma \alpha_0} \int_x^\infty \frac{1 - q^{n+1}(x)}{x} e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx. \tag{2.57}$$

С учетом выражений (2.56), (2.57) найдем массовую концентрацию шлама в СОЖ до и после очистки:

$$c_y^n = \frac{\rho N}{6\sigma \alpha_0} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \int_x^\infty x [1 - q^{n+1}(x)] e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx; \tag{2.58}$$

$$c_{\text{и}}^n = \rho \frac{N}{6\sigma} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \int_x^\infty \frac{1 - q^{n+1}(x)}{p(x)} x^2 e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx; \tag{2.59}$$

$$c_0^n = \frac{\rho N}{6\sigma (1 - \alpha_0)} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \int_x^\infty \frac{q(x) - q^{n+2}(x)}{p(x)} x e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx. \tag{2.60}$$

Определим степень очистки, используя уравнение (2.48):

$$\varepsilon^n = \frac{\int_x^\infty x^2 [1 - q^n(x)] e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx}{\int_x^\infty x^2 \left[\frac{1 - q^{n+1}(x)}{p(x)} \right] e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx}. \tag{2.61}$$

Тогда при числе циклов, стремящемся к бесконечности, т.е. при работе очистителя в установившемся режиме, степень очистки определяется зависимостью

$$\varepsilon^\infty = \frac{\int_0^\infty x^2 e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx}{\int_0^\infty x^2 / p(x) e^{-\frac{(\ln x - \bar{a})^2}{2\sigma^2}} dx} \tag{2.62}$$

Все вышеизложенное касается очистки СОЖ в отдельных очистителях. Однако в большинстве случаев системы очистки, особенно групповые и централизованные, состоят из нескольких очистителей, соединенных последовательно.

Выразим параметры $(1-\alpha_0)$ и q системы очистки, включающей несколько очистителей, через параметры $(1-\alpha_0)_i$ и q_{oi} отдельных очистителей. Тогда

$$q = q_1 q_2 \dots q_n; \quad (1-\alpha_0) = (1-\alpha_{o1}) \dots (1-\alpha_{on}). \tag{2.63}$$

В качестве примера рассмотрим работу двух фильтров для очистки СОЖ с размерами ячеек фильтровальной сетки 50×50 и 100×100 мкм. Функции распределения вероятности удаления частиц шлама в исследуемых фильтрах получали экспериментально (рис. 2.16).

В качестве СОЖ использовали 3 %-ную эмульсию Укринол-1. Плотность распределения частиц шлама по размерам определяли по результатам гранулометрического анализа шлама (рис. 2.17), образующегося при круглом наружном врезном шлифовании образцов из стали 45, HRC 40...45, кругом 24A25НСМ17К5. Рабочая скорость круга составляла 50 м/с; окружная скорость заготовки $v_3 = 50$ м/мин; скорость врезной подачи круга $v_s = 0,9$ и 1,5 мм/мин.

При моделировании работы фильтров использовали зависимости (2.56), (2.60) – (2.62). Значение коэффициента удаления СОЖ со шламом α_0 приняли равным 0,05 (5 % общего объема СОЖ в технологической системе) [84].

Рис. 2.16. Функции распределения вероятности удаления частиц шлама по размеру x [62]: 1, 2 – размеры ячейки сетки соответственно 50×50 и 100×100 мкм

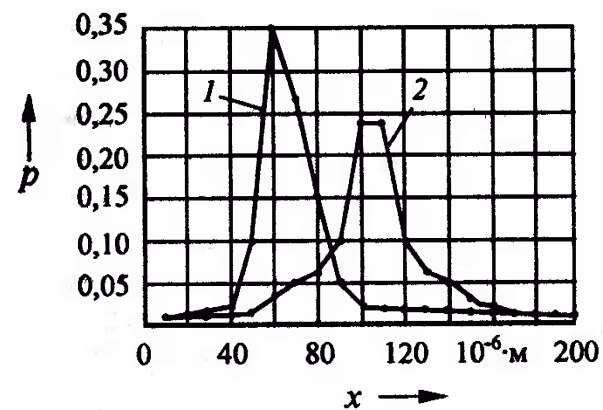
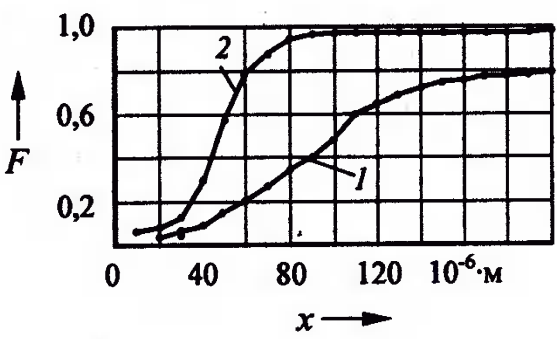


Рис. 2.17. Плотности распределения частиц шлама по размеру x [62]: 1, 2 – соответственно $v_s = 0,9$ и 1,5 мм/мин

Установлено, что зависимость c_0 от времени носит экспоненциальный, монотонно возрастающий характер. Причем, чем более интенсивно возрастает вероятность удаления частиц шлама по мере увеличения их размеров, тем меньше остаточная концентрация шлама в СОЖ c_0 и интенсивность ее увеличения во времени (рис. 2.18).

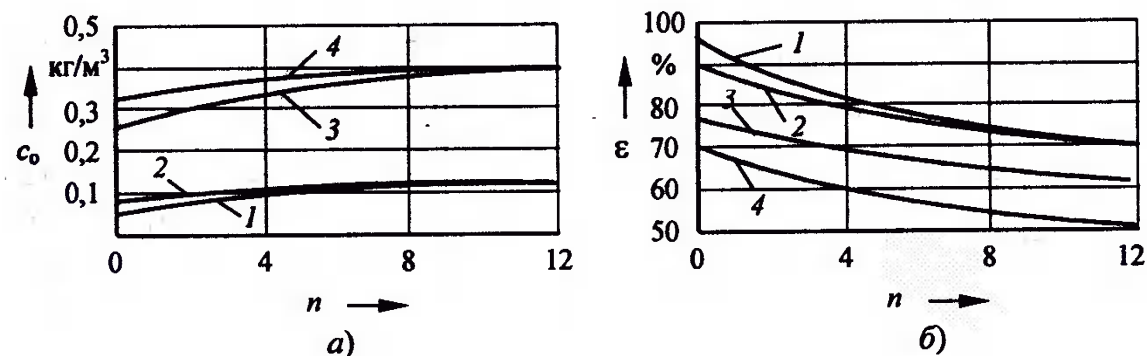


Рис. 2.18. Зависимость остаточной концентрации c_0 (а) и степени очистки ε (б) от числа циклов (оборотов) n [62]: 1, 2 – размеры ячейки сетки 50×50 мкм; 3, 4 – то же, 100×100 мкм; 1, 3 – $v_s = 1,5$ мм/мин; 2, 4 – $v_s = 0,9$ мм/мин

Большое влияние на эффективность работы системы очистки оказывает распределение частиц по размерам. В шламе, полученном при шлифовании с $v_s = 1,5$ мм/мин (шлам № 1), 70 % частиц имеют размер $(70...140) \cdot 10^{-6}$ м, а при $v_s = 0,9$ мм/мин (шлам № 2) основная масса частиц (90 %) находится в интервале размеров $(50...90) \cdot 10^{-6}$ м (см. рис. 2.9). Установлено, что смещение центра группирования частиц шлама по размерам в сторону уменьшения приводит, при прочих равных условиях, к увеличению остаточной концентрации шлама в СОЖ (см. рис. 2.10). Так, для фильтровальной сетки 50×50 мкм величина c_0 изменяется в диапазоне $0,055...0,087$ кг/м³ для шлама № 1 и в диапазоне $0,084...0,120$ кг/м³ для шлама № 2.

Таким образом, установлено, что остаточная концентрация шлама в СОЖ монотонно возрастает во времени и зависит от эффективности работы системы очистки (вероятности удаления частиц шлама) и от размера частиц шлама (плотности распределения частиц по размерам).

Установленные тенденции справедливы также при расчете числа частиц, остающихся в СОЖ после очистки. При очистке жидкости от шламов № 1 и № 2 количество частиц шлама после первого цикла очистки N_0^1 для сетки 50×50 мкм равно соответственно $3,63 \cdot 10^6$ и $3,1 \cdot 10^7$; для сетки 100×100 мкм – $9,0 \cdot 10^7$ и $3,7 \cdot 10^7$. После десятого цикла очистки N_0^{10} составляет для тех же условий соответственно $2,5 \cdot 10^8$ и $4,5 \cdot 10^8$; $3,8 \cdot 10^8$ и $6,4 \cdot 10^8$.

Далее моделировали следующий цикл работы системы очистки, состоящей из двух фильтров с сетками 50×50 и 100×100 мкм (рис. 2.19).

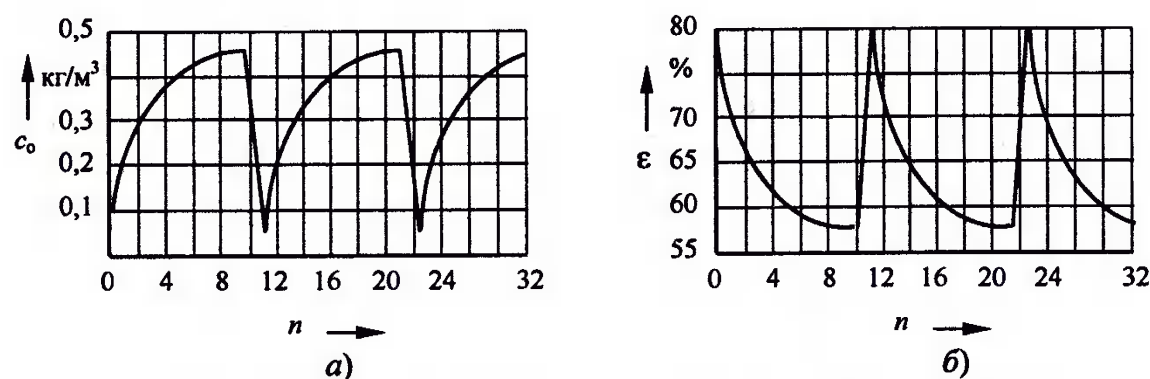


Рис. 2.19. Моделирование работы системы очистки СОЖ [62]: зависимость остаточной концентрации c_0 (а) и степени очистки ϵ (б) от числа циклов n

В течение первых десяти циклов работает фильтр с сеткой 100×100 мкм. Эффективность его работы снижается со временем (уменьшается степень очистки ϵ), в СОЖ накапливаются мелкодисперсные примеси, остаточная концентрация шлама в СОЖ c_0 возрастает. На одиннадцатом цикле включается более эффективный очиститель с сеткой 50×50 мкм. При этом степень очистки возрастает более чем на 20 % ($\epsilon = 79$ %), а остаточная концентрация шлама c_0 падает до $0,05$ кг/м³. Затем цикл работы системы повторяется (см. рис. 2.19).

Экспериментальную проверку разработанных математических моделей проводили в условиях основного производства Вологодского подшипникового завода на системе очистки СОЖ, оснащенной гидроциклонами Г-250 и батареями гидроциклонов БГЦ-80 (объем СОЖ в системе составлял 80 м³; производительность – 180 м³/ч). В ходе исследований определяли (в течение одной смены – 8 ч) остаточную концентрацию шлама в СОЖ c_0 (рис. 2.20).

Процесс очистки СОЖ моделировали, используя зависимости (2.54) – (2.56), (2.58) – (2.60), при следующих исходных параметрах: плотность шлама $\rho = 7880$ кг/м³; $\alpha_0 = 0,05$; $N_n = 10^8$ шт.

В результате сопоставления экспериментальных и расчетных данных установлено, что величина среднего расхождения ϵ_a между теоретическими (расчетными) и экспериментальными значениями параметра c_0 составила 9,9 %. Коэффициент парной корреляции между расчетными и экспериментальными значениями остаточной концентрации шлама $R = 0,94$, что соответствует тесной корреляционной связи. При этом расчетный уровень доверия равен $22,29 > 3$, что свидетельствует об адекватности полученных математических моделей. Использование этих моделей позволяет прогнозировать динамику изменения степени очистки СОЖ в процессе ее функционирования и рассчитать остаточное содержание механических примесей в СОЖ после ее очистки в любых очистителях и системах очистки.

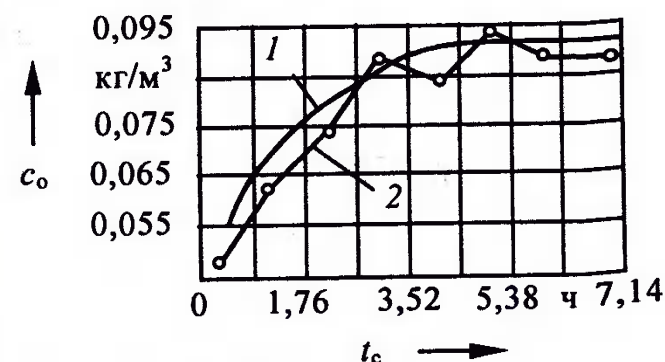


Рис. 2.20. Зависимость остаточной концентрации шлама в СОЖ c_0 от времени функционирования системы t_c [62]: 1 – расчетная зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

Очевидно, что наибольшую стабильность состояния СОЖ обеспечивают очистители с высокой тонкостью очистки за счет минимальной интенсивности накопления мелкодисперсных частиц в СОЖ. Однако, как правило, чем более тонкую очистку СОЖ обеспечивает очиститель, тем менее он производителен при прочих равных условиях, а значит, характеризуется большими удельными эксплуатационными затратами на очистку единицы объема СОЖ. Особенно остро проблема качественной очистки СОЖ стоит в СП СОЖ металлургических предприятий, отличающихся большими объемами и расходами (производительностью) и, как следствие, наибольшими эксплуатационными затратами на очистку СОЖ. На наш взгляд, при создании ресурсосберегающей экологизированной системы применения СОЖ наиболее эффективной и перспективной является двухконтурная неполнопоточная схема организации очистки СОЖ (рис. 2.21). При этом функция очистки разделяется на две: первая – удаление из загрязненной СОЖ, поступающей с технологического оборудования, основной массы механических примесей, вторая – предотвращение накопления мелкодисперсных частиц механических примесей в СОЖ; причем выполнение функций распределяется между разными контурами системы очистки. В первом контуре очистка СОЖ производится высокопроизводительным, относительно «грубым» очистителем, во втором – осуществляется периодическая или непрерывная неполнопоточная (с производительностью 3...25 % производительности первого контура) компенсационная тонкая очистка.

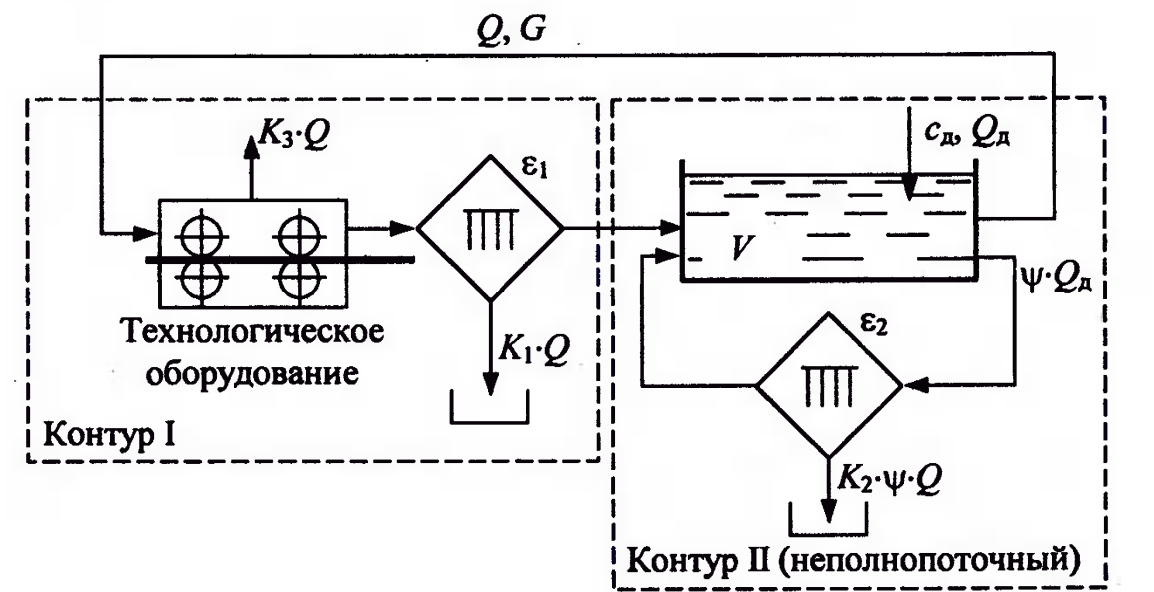


Рис. 2.21. К расчету двухконтурной неполнопоточной системы очистки СОЖ

Для исследования процесса очистки СОЖ в неполнопоточных системах предпринято его математическое моделирование на основе построения и решения уравнения баланса массы механических примесей в СП СОЖ. Уравнение баланса массы механических примесей имеет вид:

$$V \frac{dc_0}{dt} = (\kappa G + \chi c_d Q_d) t - Q_{c_0} [\chi_1 \epsilon_1 + K_1 + K_3 + \Psi (\chi_2 \epsilon_2 + K_2)] - (\kappa_1 G + \chi_1 c_d Q_d) \epsilon_1 - (\kappa_2 G + \chi_2 c_d Q_d) \epsilon_2, \tag{2.64}$$

где V – объем системы очистки СОЖ, m^3 ; t – время, s ; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa$ – доля частиц механических примесей, поступающих с технологического оборудования, размером соответственно свыше d_1 , от d_2 до d_1 , от 0 до d_1 ; d_1 – тонкость очистки СОЖ в очистителе контура I (полнопоточном); d_2 – тонкость очистки СОЖ в очистителе контура II (неполнопоточном); G – интенсивность поступления механических примесей с технологического оборудования, $кг/с$; χ_1, χ_2, χ – доля частиц механических примесей в доливаемой СОЖ размером соответственно свыше d_1 , от d_2 до d_1 , от 0 до d_1 ; c_d – концентрация механических примесей в доливаемой СОЖ, $кг/м^3$; Q – производительность системы очистки СОЖ (полнопоточного контура), $м^3/с$; ϵ_1 – степень очистки СОЖ в очистителе контура I; ϵ_2 – степень очистки СОЖ в очистителе контура II; Ψ – коэффициент неполнопоточности контура II, $\Psi = [0, 1]$; K_1, K_2, K_3 – потери СОЖ в очистителях соответственно I и II контура и на технологическом оборудовании, доли от Q ; $Q_d = Q(K_1 + K_3 + K_2 \Psi)$ – объемный расход доливаемой СОЖ, $м^3/с$.

Решение уравнения баланса с начальным условием

$$c_0(0) = c_d,$$

представляет собой зависимость, связывающую концентрацию механических примесей в любой момент времени с параметрами очистителей, производительностью очистки и коэффициентом неполнопоточности второго контура очистки:

$$c_0(t) = \left(c_d + \frac{K}{A^2} + \frac{B}{A} \right) e^{At} - \frac{K}{A} \left(t + \frac{1}{A} \right) - \frac{B}{A}, \tag{2.65}$$

где

$$A = -\frac{Q}{V} [\chi_1 \epsilon_1 + K_1 + K_3 + \Psi (\chi_2 \epsilon_2 + K_2)];$$

$$K = \frac{\kappa G + \chi c_d Q_d}{V};$$

$$B = - \frac{(\kappa_1 G + \chi_1 c_d Q_d) \varepsilon_1 + (\kappa_2 G + \chi_2 c_d Q_d) \varepsilon_2}{V}.$$

Некоторые результаты расчета по полученной зависимости (2.65), выполненного для СП СОЖ, обслуживающей производство холоднокатанного листа в ОАО «Северсталь» (г. Череповец), показаны на рис. 2.22. При расчетах моделировали работу неполнопоточного контура в режимах, обеспечивающих $\psi = 0,05; 0,3$ при отсутствии поступления механических примесей со стана (при его простоях).

Анализ результатов исследований приводит к выводу, что и полнопоточная, и неполнопоточная схемы обеспечивают одинаковый уровень установившейся концентрации механических примесей в СОЖ $c_0(\infty) \rightarrow B$, не зависящий от коэффициента неполнопоточности ψ . При этом, естественно, с увеличением коэффициента неполнопоточности стабилизация концентрации механических примесей в системе происходит быстрее (см. рис. 2.22). Как и следовало ожидать, установившаяся концентрация механических примесей при работе только одного очистителя

первого контура (кривая 1) выше, чем при двухконтурной схеме. Из рис. 2.22 также следует, что эффективность неполнопоточной очистки при прочих равных условиях тем выше, чем больше разность между допустимой концентрацией $[c]$ механических примесей в СОЖ и значением параметра B , т.е. чем выше тонкость очистки в очистителе второго контура. Накопление механических примесей в СОЖ идет значительно медленнее, чем их удаление в очистителях с различными коэффициентами неполнопоточности. Так, для стабилизации концентрации механических примесей в СОЖ на уровне 0,5 г/л при исходной концентрации 1 г/л для очистителя второго контура с коэффициентом $\psi = 1$ требуется 2 ч, а для очистителя с $\psi = 0,05 \dots 6,00$ ч накопление механических примесей с 0 до 1 г/л происходит в течение 360 ч.

Следовательно, наиболее целесообразно использовать для второго неполнопоточного контура очистки СОЖ очистители с таким коэффициентом неполнопоточности ψ , которые препятствовали бы накоплению механических примесей в СОЖ. Другими словами, интенсивность накопления в СОЖ тонких механических примесей должна соответствовать интенсивности их удаления в неполнопоточном очистителе, что позволит значительно снизить стоимость СП СОЖ при заданном качестве очистки СОЖ.

В результате сопоставления расчетных и экспериментальных данных установлено, что величина ε , среднего расхождения между ними составила 8,3 %. Проверка статистической значимости теоретических (расчетных) кривых показала, что минимальное значение критерия Фишера (7,8) больше критического (6,85) при уровне значимости 95 %, что свидетельствует об адекватности математической модели (2.65) реальному процессу неполнопоточной очистки СОЖ.

2.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ ПРИ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Технологический процесс получения проката является завершающей стадией металлургического производства. При этом доля холоднокатаной листовой стали в общем выпуске проката достигает 60 %. Холодная прокатка в сочетании с термической обработкой позволяет получить тонколистовую сталь с высокими механическими свойствами, равномерной толщиной по ширине и длине, высоким качеством поверхности.

Станы холодной прокатки оборудованы системами охлаждения валков и подачи СОЖ на полосу во время прокатки, что способствует сни-

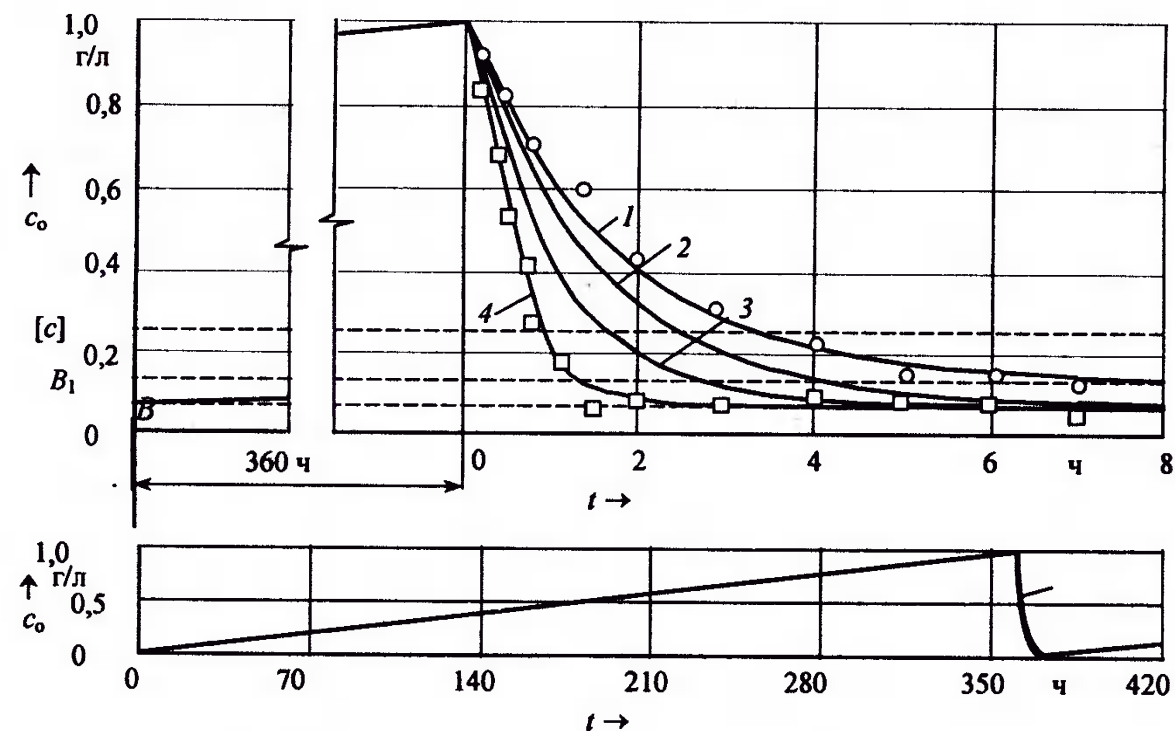


Рис. 2.22. Характер изменения концентрации механических примесей в системе очистки СОЖ в зависимости от коэффициента неполнопоточности ψ : 1, 2, 3, 4 – расчет соответственно при $\psi = 0$ (работает один очиститель); 0,05; 0,3; 1,0; $\circ$ – эксперимент для $\psi = 0$; $\square$ – то же, для $\psi = 1,0$

жению коэффициента трения между валками и прокатываемой полосой, уменьшению сопротивления деформации и давления металла на валки. Последнее уменьшает прогиб валков и упругую деформацию валков и деталей стана. Использование СОЖ при холодной прокатке способствует снижению расхода энергии, уменьшению износа валков, повышению производительности прокатки и качества листовой стали.

СП СОЖ при холодной прокатке отличаются большим объемом жидкости в системе (400...800 м³) и высокой производительностью 1500...2500 м³/ч. Поэтому очень важно иметь инструмент для быстрой и адекватной оценки эффективности функционирования СП СОЖ. Решить эту задачу можно с использованием балансового метода [62].

Рассмотрим стан для холодной прокатки металла и СП СОЖ в виде «черных ящиков», предполагая, что входные и выходные их показатели связаны некоторой математической операцией, моделирующей реакцию «черных ящиков» без детализации процессов, происходящих в них.

Модель построена путем составления алгебраических уравнений баланса, общая форма которых

$$\sum_{i=1}^{n_1} y_i = \sum_{j=1}^{n_2} K_j x_j, \quad (2.66)$$

где y_i , x_j – соответственно входные и выходные показатели системы; K_j – коэффициент; n_1 , n_2 – соответственно число входных и выходных показателей.

Рассмотрим СП СОЖ, обслуживающую стан холодной листовой прокатки (рис. 2.23).

Уравнение баланса СОЖ имеет вид

$$V_{\text{долив}}^{\text{СОЖ}} \pm \Delta V = V_{\text{ис.ст}}^{\text{СОЖ}} + V_{\text{раз.ст}}^{\text{СОЖ}} + V_{\text{ис.уст}}^{\text{СОЖ}} + V_{\text{ут.1}}^{\text{СОЖ}} + V_{\text{ут.2}}^{\text{СОЖ}}, \quad (2.67)$$

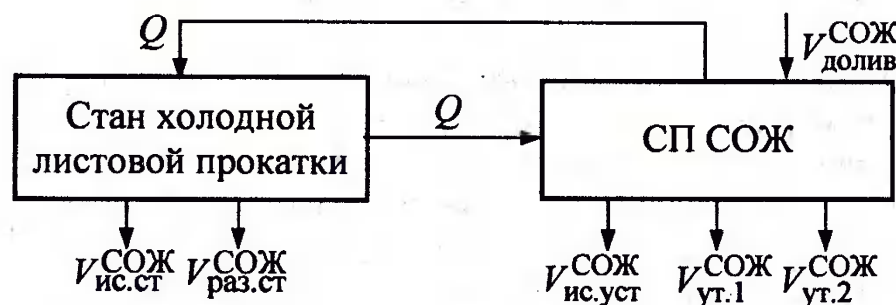


Рис. 2.23. Схема к расчету баланса объема СОЖ

где $V_{\text{долив}}^{\text{СОЖ}}$ – объем СОЖ, доливаемой в СП в течение суток, м³; ΔV – поправка, компенсирующая несоответствие входных и выходных показателей, вызванное колебанием объема СОЖ в системе относительно номинального значения, м³; $V_{\text{ис.ст}}^{\text{СОЖ}}$ – объем СОЖ, испаряющейся на стане в процессе прокатки металла в течение суток, м³; $V_{\text{раз.ст}}^{\text{СОЖ}}$ – объем СОЖ, разбрызгиваемой прокатываемым листом в течение суток, м³; $V_{\text{ис.уст}}^{\text{СОЖ}}$ – объем СОЖ, испаряющейся в системе ее применения в течение суток, м³; $V_{\text{ут.1}}^{\text{СОЖ}}$ – объем утечек СОЖ из СП в течение суток, м³; $V_{\text{ут.2}}^{\text{СОЖ}}$ – объем СОЖ, теряемой с удаляемым шламовым продуктом в течение суток, м³.

$$V_{\text{ис.ст}}^{\text{СОЖ}} = 24 K_{\text{ис.л}} B_{\text{л}} v_{\text{пр}} \Delta h_{\text{л}}, \quad (2.68)$$

где $K_{\text{ис.л}}$ – коэффициент испарения СОЖ с листа при прокатке; $B_{\text{л}}$ – ширина листа, м; $v_{\text{пр}}$ – скорость прокатки, м/ч; $\Delta h_{\text{л}}$ – изменение толщины прокатываемого листа, м;

$$v_{\text{пр}} = T_{\text{пр}} / h_{\text{лс}} B_{\text{л}} \rho_{\text{л}}, \quad (2.69)$$

где $T_{\text{пр}}$ – производительность прокатного стана, т/ч; $h_{\text{лс}} = (h_{\text{л.вх}} + h_{\text{л.вых}})/2$ – средняя толщина прокатываемого листа, м; $h_{\text{л.вх}}$, $h_{\text{л.вых}}$ – толщина листа соответственно на входе и выходе прокатного стана, м; $\rho_{\text{л}}$ – плотность прокатываемого металла, т/м³;

$$V_{\text{раз.ст}}^{\text{СОЖ}} = 24 K_{\text{раз}} v_{\text{пр}}, \quad (2.70)$$

где $K_{\text{раз}}$ – коэффициент, характеризующий потери СОЖ, разбрызгиваемой прокатываемым листом, м²;

$$V_{\text{ис.уст}}^{\text{СОЖ}} = 24 K_{\text{ис.уст}} S_{\text{уст}} T, \quad (2.71)$$

где $K_{\text{ис.уст}}$ – коэффициент, характеризующий испарение СОЖ из установки, м/°С; $S_{\text{уст}}$ – площадь открытой поверхности установки, м²; T – температура СОЖ в процессе функционирования, °С;

$$V_{\text{ут.1}}^{\text{СОЖ}} = 24 K_{\text{ут.1}} Q, \quad (2.72)$$

где $K_{ут.1}$ – коэффициент, характеризующий утечки СОЖ из СП СОЖ;
 Q – производительность СП СОЖ, м³/ч;

$$V_{ут.2}^{СОЖ} = 24K_{ут.2}M_{шл}, \tag{2.73}$$

где $K_{ут.2}$ – коэффициент, характеризующий утечки СОЖ вместе с удаляемым шламом, м³/кг; $M_{шл}$ – массовый расход удаляемого шлама, кг/ч:

$$M_{шл} = K_{СОЖ} c Q \epsilon, \tag{2.74}$$

где $K_{СОЖ}$ – коэффициент, определяющий долю СОЖ в удаляемом шламе, м³/кг; c – исходное содержание механических примесей в загрязненной СОЖ, кг/м³.

Основные факторы ($T_{пр}$, $B_{л}$, $v_{пр}$, $S_{уст}$ и др.), влияющие на потерю СОЖ и легко получаемые эмпирически, представлены в явном виде в зависимостях (2.68) – (2.74). Прочие же факторы опосредованно (в неявном виде) учитываются при помощи коэффициентов в этих же зависимостях, определяемых из решения системы уравнений (2.67).

В качестве примера составим и решим уравнения объема СОЖ для четырех- и пятиклетевого станов, функционирующих в основном производстве ОАО «Северсталь» (г. Череповец).

Для нахождения численных значений коэффициентов необходимо решить уравнение (2.67). Так как число коэффициентов (неизвестных) в уравнении (2.67) равно пяти, то необходимо составить минимум пять таких уравнений при различных значениях основных факторов. Для автоматизации расчета коэффициентов в уравнениях баланса была разработана соответствующая программа, позволяющая методом наименьших квадратов решать системы с любым числом уравнений и неизвестных (при числе уравнений, равном пяти, система уравнений является определенной; при большем числе уравнений система переопределенная).

В результате подстановки численных значений основных факторов (исходных данных), полученных эмпирически за период с 27.11.99 по 20.02.00, в уравнение (2.67) составлены две переопределенные системы уравнений баланса для четырех- и пятиклетевого станов при исходных данных, представленных в табл. 2.12.

После решения системы уравнений получили численные значения коэффициентов (табл. 2.13). Невязка и среднее квадратическое отклонение полученных результатов не превышают соответственно $1 \cdot 10^{-9}$ и 36 м^3 . Большое значение среднего квадратического отклонения объясня-

2.12. Пример исходных данных для расчета уравнения (2.67)

Стан	Дата	$V_{долив}^{СОЖ}, \text{ м}^3$ (y)	$B_{л} v_{пр} \Delta h_{л}$ (x ₁)	$v_{пр}, \text{ м/ч}$ (x ₂)	$S_{уст} T$ (x ₃)	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$ (x ₄)	$M_{шл}, \text{ кг/ч}$ (x ₅)
Четырех- клетевой	27.11.99	111,60	176,15	2447	2000	1500	722
	28.11.99	100,00	196,02	2723	2200	1500	780
	29.11.99	90,34	133,30	1730	1960	1500	693
Пятикле- товой	27.12.99	107,80	244,62	2548	2080	2250	895
	28.12.99	74,60	219,36	2285	2000	2250	806
	29.12.99	143,45	275,26	2867	2040	2250	914

2.13. Результаты решения переопределенных систем уравнений баланса

Стан	Коэффициенты					Среднее значение выходных показателей, м ³ /сут				
	$K_{ис.л}$	$K_{раз}$	$K_{ис.уст}$	$K_{ут.1}$	$K_{ут.2}$	$V_{ис.ст}^{СОЖ}$	$V_{раз.ст}^{СОЖ}$	$V_{ис.уст}^{СОЖ}$	$V_{ут.1}^{СОЖ}$	$V_{ут.2}^{СОЖ}$
Четырех- клетевой	3,313	0,023	0,203	0,185	0,095	74,38	0,32	4,56	4,15	2,13
Пятиклете- вой	4,214	0,025	0,195	0,238	0,116	110,47	0,35	4,43	6,17	3,22

ется значительными колебаниями объема СОЖ в СП относительно номинального значения, вызванными отсутствием в системе устройств для автоматического поддержания фиксированного (номинального) объема СОЖ.

Сравнение выходных показателей для четырех- и пятиклетевого стана показывает, что объемы СОЖ, испаряющейся из СП и разбрызгиваемой прокатываемым листом, для обоих станов практически одинаковы. Это объясняется одинаковыми открытыми площадями поверхностей установок, температурой СОЖ и примерно одинаковой скоростью прокатки. В то же время, для пятиклетевого стана наблюдается в 1,5 раза большее испарение СОЖ из зоны обработки $V_{ис.ст}^{СОЖ}$ по сравнению с четырехклетевым, что, очевидно, связано с большей его производительно-

стью, увеличенным числом рабочих валков, производящих деформацию (вытяжку) прокатываемого листа, а также большей шириной проката.

Показатели $V_{\text{ут.1}}^{\text{СОЖ}}$ и $V_{\text{ут.2}}^{\text{СОЖ}}$ для четырехклетевого стана имеют примерно на 25 % меньшие значения, чем для пятиклетевого. Наибольшие потери СОЖ, примерно 87 %, вызваны испарением в зоне обработки, а наименьшие – уносом СОЖ с листом (0,3 %).

Анализ данных (см. табл. 2.13), полученных в результате решения уравнения (2.67), показал, что доминирующим фактором негативного воздействия на окружающую среду является испарение СОЖ на стане в процессе прокатки $V_{\text{ис.ст}}^{\text{СОЖ}}$. В связи с этим возникает необходимость разработки эффективной технологии и техники улавливания, конденсации и возврата в систему испарившейся СОЖ.

Уравнение баланса (2.67) может быть полезно при оценке эффективности и экологичности работы различных прокатных станов и обслуживающих их СП СОЖ.

Аналогичным образом можно составить и другие уравнения балансов. Уравнение баланса по механическим примесям в СОЖ (рис. 2.24) имеет следующий вид:

$$Q_{\text{м}}^{\text{пк}} + Q_{\text{м}}^{\text{пр}} = Q_{\text{м}}^{\text{ун}} + Q_{\text{м}}^{\text{уд}} + Q_{\text{м}}^{\text{ос}} + Q_{\text{м}}^{\text{ут}}, \quad (2.75)$$

где $Q_{\text{м}}^{\text{пк}}$ – массовый расход механических примесей, попадающих в СОЖ с горячекатаным листом (подкатом), кг/ч; $Q_{\text{м}}^{\text{пр}}$ – массовый расход механических примесей, образующихся в результате холодной прокатки, кг/ч; $Q_{\text{м}}^{\text{ун}}$ – массовый расход механических примесей, уносимых с прокатываемым листом, кг/ч; $Q_{\text{м}}^{\text{уд}}$ – массовый расход механических примесей, удаляемых очистителями СП СОЖ, кг/ч; $Q_{\text{м}}^{\text{ос}}$ – массовый расход механических примесей, не удаленных СП СОЖ, кг/ч; $Q_{\text{м}}^{\text{ут}}$ – массовый расход механических примесей, содержащихся в СОЖ, теряемой в результате утечек, кг/ч.

Рассмотрим составляющие баланса:

$$Q_{\text{м}}^{\text{пк}} = K_{\text{пк}} T_{\text{пр}},$$

где $K_{\text{пк}}$ – коэффициент, характеризующий количество механических примесей на поверхности листа подката;

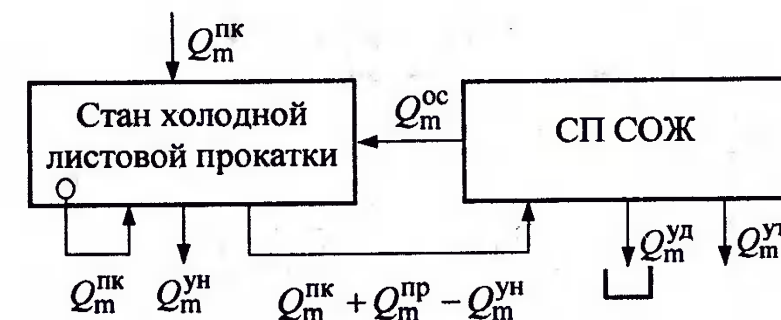


Рис. 2.24. Схема к расчету баланса по механическим примесям

$$Q_{\text{м}}^{\text{пр}} = K_{\text{пр}} T_{\text{пр}} h_{\text{л. вх}} / h_{\text{л. вых}},$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент, характеризующий количество механических примесей, образующихся в результате прокатки;

$$Q_{\text{м}}^{\text{ун}} = K_{\text{ун}} v_{\text{пр}},$$

где $K_{\text{ун}}$ – коэффициент, характеризующий количество механических примесей, уносимых на поверхности прокатываемого листа;

$$Q_{\text{м}}^{\text{уд}} = Q \sum_{i=1}^{n_0} c_i \varepsilon_i,$$

где c_i – концентрация механических примесей в загрязненной СОЖ по ступеням очистки, кг/м³; ε_i – степень очистки СОЖ по ступеням очистки; n_0 – количество ступеней очистки;

$$Q_{\text{м}}^{\text{ос}} = Q \sum_{i=1}^{n_0} (1 - \varepsilon_i) c_i; \quad Q_{\text{м}}^{\text{ут}} = c V_{\text{ут.1}}^{\text{СОЖ}}.$$

В результате решения системы уравнений баланса по механическим примесям для четырехклетевого стана с исходными данными по табл. 2.14 установлено, что до 98,9 % механических примесей, поступающих в СП СОЖ, удаляется очистителями, 0,9 % механических примесей остается в СОЖ и выпадает в осадок, а 0,2 % уносится из системы вместе с утечками СОЖ (табл. 2.15). Невязка и среднее квадратическое отклонение полученных результатов не превышают соответственно $1 \cdot 10^{-7}$ и 1,8 кг.

2.14. Исходные данные

Дата	$T_{\text{пр}}$ (y_1)	$T_{\text{пр}} h_{\text{л.вх}}/h_{\text{л.вых}}$ (y_2)	$v_{\text{пр}}$ (x_1)	$Q_{\text{м}}^{\text{уд}}$ (x_2)	$Q_{\text{м}}^{\text{ос}}$ (x_3)	$Q_{\text{м}}^{\text{ут}}$ (x_4)
27.11.99	57,2	171,6	2447	43,3	0,42	0,043
28.11.99	63,7	191,1	2723	46,8	0,45	
20.02.00	107,1	321,2	4574	75,0	0,73	

2.15. Результаты решения системы уравнений баланса по механическим примесям

Коэффициенты			Среднее значение входных и выходных показателей, кг/ч					
$K_{\text{пк}}$	$K_{\text{пр}}$	$K_{\text{ун}}$	$Q_{\text{м}}^{\text{пк}}$	$Q_{\text{м}}^{\text{пр}}$	$Q_{\text{м}}^{\text{ун}}$	$Q_{\text{м}}^{\text{уд}}$	$Q_{\text{м}}^{\text{ос}}$	$Q_{\text{м}}^{\text{ут}}$
0,5367	0,082	0,0007	34,1	17,07	1,71	48,7	0,49	0,043

Большие значения входных показателей $Q_{\text{м}}^{\text{пк}}$ и $Q_{\text{м}}^{\text{пр}}$ уравнения баланса по механическим примесям, по-видимому, объясняются некачественным травлением и промывкой подката.

Уравнение баланса по «инородным» маслам

$$Q_{\text{в м}} = Q_{\text{вз}} + Q_{\text{vy}} + Q_{\text{vo}}, \tag{2.76}$$

где $Q_{\text{в м}}$ – объемный расход «инородных» масел, поступивших в СП СОЖ, м³/ч; $Q_{\text{вз}}$ – объемный расход «инородных» масел, эмульгированных в СОЖ, м³/ч; Q_{vy} – объемный расход «инородных» масел, удаленных из СОЖ, м³/ч; Q_{vo} – объемный расход «инородных» масел, оставшихся в СОЖ (неэмульгированных), м³/ч.

Если объемный расход «инородных» масел $Q_{\text{в м}}$, попавших в СОЖ, меньше объемного расхода эмульгированных «инородных» масел $Q_{\text{вз}}$, то второе и третье слагаемые уравнения (2.76) будут равны нулю, а $Q_{\text{в м}} = Q_{\text{вз}}$:

$$Q_{\text{в м}} = K_{\text{п}} T_{\text{пр}},$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент, характеризующий объем «инородных» масел, поступивших в СП СОЖ;

$$Q_{\text{вз}} = K_{\text{эм}} V c_{\text{эмр}},$$

где $K_{\text{эм}}$ – коэффициент, характеризующий способность СОЖ эмульгировать «инородные» масла; $c_{\text{эмр}}$ – массовая концентрация эмульгаторов в СОЖ, кг/м³;

$$Q_{\text{vy}} = Q \sum_{i=1}^{n_0} c_i \varepsilon_i K_{\text{уд.м } i},$$

где $K_{\text{уд.м } i}$ – коэффициент, характеризующий долю «инородных» масел в удаляемом шламе по всем ступеням очистки;

$$Q_{\text{vo}} = Q \sum_{i=1}^{n_0} (1 - \varepsilon_i) K_{\text{ос.м } i} c_i,$$

где $K_{\text{ос.м } i}$ – коэффициент, характеризующий количество «инородных» масел, оставшихся в СОЖ.

Уравнение баланса по эмульсолу

$$V_3^{\text{п}} = V_3^{\text{о}} + V_3^{\text{у}} + V_3^{\text{н}}, \tag{2.77}$$

где $V_3^{\text{п}}$, $V_3^{\text{о}}$, $V_3^{\text{у}}$, $V_3^{\text{н}}$ – объем эмульсола соответственно поступившего в СОЖ, растворенного (эмульгированного) в СОЖ, удаленного в виде выделившейся масляной пленки и неудаленного (оставшегося) в виде масляной пленки, м³.

$$V_3^{\text{о}} = c_3 V,$$

где c_3 – концентрация эмульсии, кг/м³;

$$V_3^{\text{у}} = Q \sum_{i=1}^{n_0} c_i \varepsilon_i K_{\text{yi}},$$

где K_{yi} – коэффициент, показывающий долю масла, выделившегося из эмульсола, по отношению к общему объему «инородных» масел в СОЖ;

$$V_3^H = Q \sum_{i=1}^{n_0} (1 - \varepsilon_i) c_i K_{yi}.$$

Для экспериментального подтверждения адекватности полученных зависимостей исследовали баланс эмульсола, механических примесей и инородных масел в СП СОЖ, обслуживающей четырехклетевой стан холодной прокатки в ОАО «Северсталь» (г. Череповец) в период с 1.11.99 по 30.11.99 (рис. 2.25, 2.26). Графики (см. рис. 2.25) имеют две характерные особенности:

скачкообразный характер кривых, описывающих динамику соответствующих параметров состава и состояния СОЖ;

наличие участков плавного увеличения (накопления) параметров.

Анализ полученных результатов позволил выявить три доминирующих фактора воздействия на состав и свойства СОЖ в процессе ее функционирования, объясняющих такой характер изменения параметров СОЖ.

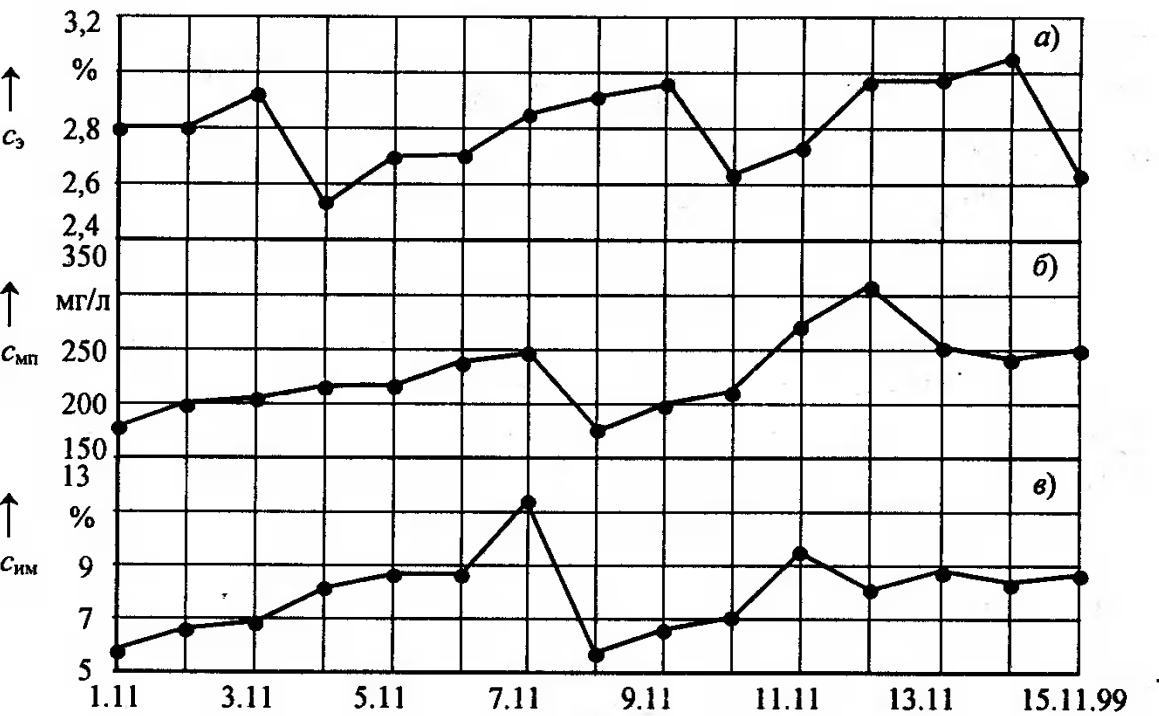


Рис. 2.25. Динамика изменения концентрации эмульсола c_3 , Квакерол-671 (а), механических примесей $c_{мп}$ (б) и «инородных» масел $c_{им}$ (в) в СОЖ, функционирующей на четырехклетевом стане холодной прокатки в ОАО «Северсталь»

Первый фактор – внесение загрязняющих веществ (механических примесей, «инородных» масел) в СОЖ непосредственно из зоны обработки или с технологического оборудования. Второй – непрерывное удаление загрязняющих веществ подсистемой очистки СП СОЖ. В результате этих противоположно направленных процессов массопереноса загрязняющих веществ концентрация c_0 накапливающихся в СОЖ загрязняющих веществ «копирует» концентрацию $c_{исх}$ веществ, внесенных с технологического оборудования (рис. 2.26):

$$c_0 = (1 - \varepsilon) c_{исх}.$$

Наконец, третьим фактором является периодическое внесение обслуживающим персоналом корректив посредством сброса и замены большей или меньшей части СОЖ, приводящее к скачкообразным изменениям параметров СОЖ (см. рис. 2.25).

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных (см. рис. 2.26) свидетельствует об их удовлетворительном согласовании: среднее расхождение ε_a между ними составило 15,6 %. При значении критерия Фишера, равном 6,85, обеспечивается значимость теоретической кривой на уровне 98 %, что свидетельствует об адекватности построенной математической модели (2.75) реальному процессу изменения концентрации механических примесей в СОЖ.

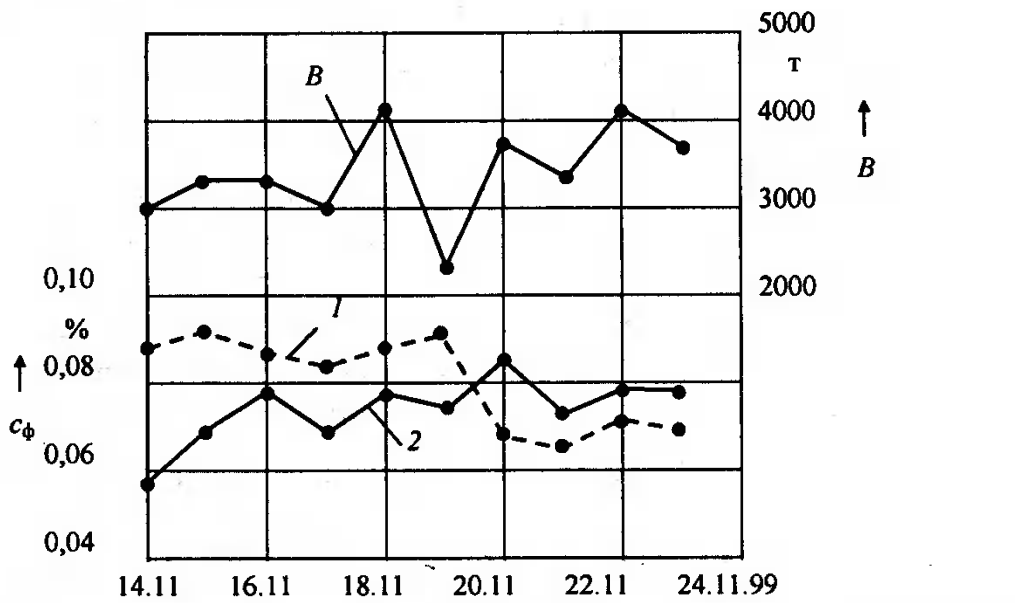


Рис. 2.26. Изменение выпуска проката B , фактической (линия 1) и расчетной (линия 2) концентрации ферромагнитных механических примесей в СОЖ, функционирующей на четырехклетевом стане холодной прокатки в ОАО «Северсталь»

Таким образом, рассмотренный балансовый метод, отличаясь простотой математического аппарата, позволяет прогнозировать состав и состояние СОЖ в процессе функционирования и оценивать эффективность и экологичность СП СОЖ как качественно, так и количественно.

2.5. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЧИСТОТЫ СОЖ И ХАРАКТЕРИСТИК ОЧИСТИТЕЛЕЙ КАК РЕЗУЛЬТАТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

Анализ процессов, протекающих в СП СОЖ, показывает, что большинство из них носит стохастический характер, а основные характеристики этих процессов с математической точки зрения часто являются результатом взаимодействия двух распределенных систем. Так, например, одной распределенной системой является гранулометрический состав механических примесей, попадающих в СОЖ, а другой – степень очистки СОЖ от механических примесей в зависимости от их размера. Результатами взаимодействия этих систем являются концентрация и гранулометрический состав накапливающихся в СОЖ в процессе ее функционирования механических примесей.

Прогнозировать результаты такого взаимодействия можно с помощью разработанного автором универсального метода расчета параметров взаимодействующих сложных распределенных систем на основе специальных преобразований координат. Известный метод Алландера [113] входит в него как составная часть. Основная идея метода заключается в том, что существует такое преобразование координат, которое позволяет все вычисления заменить операциями над прямыми линиями на некоторой плоскости. Эти операции подчиняются определенным законам, изложенным в данной работе. Рассмотрим возможности метода применительно к расчету параметров чистоты СОЖ и характеристик очистителей.

Основными характеристиками очистителя являются: $\epsilon(d)$ – степень очистки СОЖ по размеру d частиц механических примесей; $\bar{\epsilon}$ – средняя степень очистки.

Исследованиями [11, 62, 73] установлено, что степень очистки $\epsilon(d)$ распределена по логарифмически нормальному закону (рис. 2.27). Гранулометрический состав механических примесей также близок к логарифмически нормальному распределению частиц по размерам (рис. 2.28) с плотностью вероятности

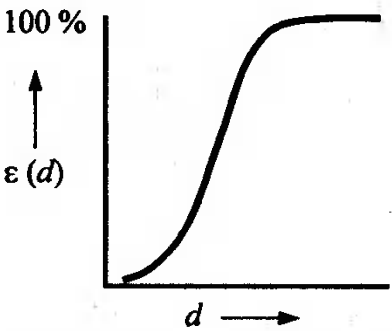


Рис. 2.27. Вероятность удаления частиц из СОЖ $\epsilon(d)$ в зависимости от их размера

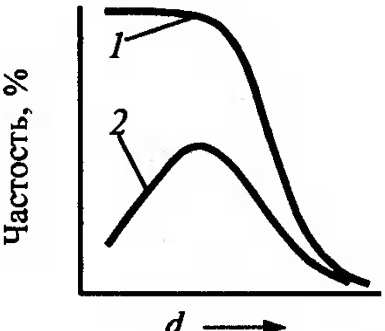


Рис. 2.28. Гранулометрический состав механических примесей [58]: 1 – накопленная частота; 2 – частота

$$p_n(d) = \frac{1}{s_n d \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln d - \ln d_n)^2}{2s_n^2}}, \tag{2.78}$$

где s_n – псевдосреднее квадратическое отклонение размеров частиц; d_n – медиана распределения частиц механических примесей.

Известен геометрический метод определения средней степени очистки СОЖ от механических примесей $\bar{\epsilon}$ [62], обеспечиваемой определенным очистителем, при известных $\epsilon(d)$ и $P_n(d)$ (функции распределения частиц механических примесей по размеру d в СОЖ до очистки (исходное)), распределенных по логарифмически нормальному закону.

В логарифмически нормальной плоскости (ордината градуирована по функции Лапласа $\Phi(x)$ стандартного нормального закона, а абсцисса – $\ln d$) зависимости $\epsilon(d)$ и $P_n(d)$ изображены прямыми линиями AF и FD соответственно (рис. 2.29). Из точки F опускают перпендикуляр

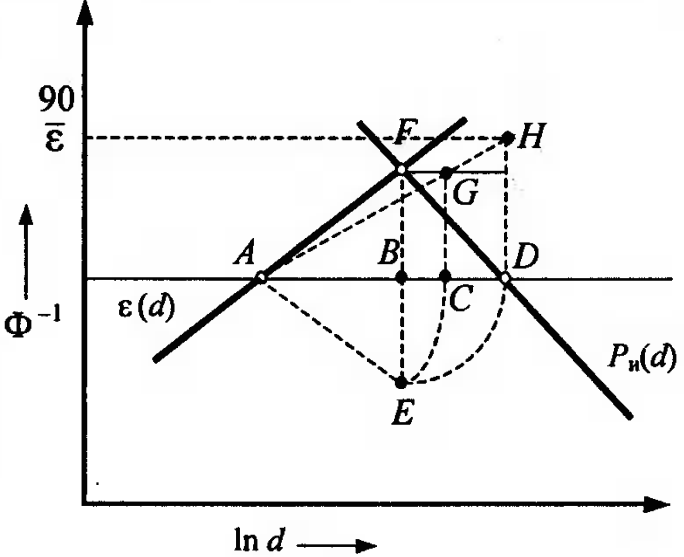


Рис. 2.29. Метод геометрического определения $\bar{\epsilon}$ по известным $\epsilon(d)$ и $P_n(d)$ [62]

FB к AD до точки E так, что $|BE| = |BD|$. Затем строят точку C так, что $|AC| = |AE|$. Из точки C восстанавливают перпендикуляр GC к AD так, что $|CG| = |BF|$. Через точки A и G проводят прямую до пересечения в точке H с перпендикуляром к AD , восстановленным из точки D . Ордината точки H и есть $\bar{\varepsilon} \cong 80\%$ данного очистителя.

В общем случае $\bar{\varepsilon}$ и функции распределения по размеру d частиц механических примесей, оставшихся в СОЖ после ее очистки $P_0(d)$ и удаленных очистителем из СОЖ $P_y(d)$, можно найти по следующим зависимостям:

$$\bar{\varepsilon} = \int_0^{\infty} \varepsilon(d) dP_H(d); \quad (2.79)$$

$$P_0(d) = \frac{1}{1-\bar{\varepsilon}} \int_0^d (1-\varepsilon(u)) dP_H(u); \quad (2.80)$$

$$P_y(d) = \frac{1}{\bar{\varepsilon}} \int_0^d \varepsilon(u) dP_H(u), \quad (2.81)$$

где u – переменная интегрирования.

На основании данных [62] $\varepsilon(d)$ и $P_H(d)$ описываются логарифмически нормальным распределением с большой точностью и имеют следующий вид:

$$\varepsilon(d) = \Phi \left[\frac{\ln d - \ln d_{\varepsilon}}{s_{\varepsilon}} \right] = \frac{1}{s_{\varepsilon} \sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{u} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_{\varepsilon})^2}{2s_{\varepsilon}^2}} du; \quad (2.82)$$

$$P_H(d) = \Phi \left[\frac{\ln d - \ln d_H}{s_H} \right] = \frac{1}{s_H \sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{u} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_H)^2}{2s_H^2}} du, \quad (2.83)$$

где $\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – функция Лапласа.

Известно, что для логарифмически нормального распределения с плотностью вероятности

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{sx\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - a)^2}{2s^2}}, & x > 0; \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (2.84)$$

истинное математическое ожидание и дисперсия равны соответственно:

$$M_{\xi} = e^{a + \frac{s^2}{2}}; \quad (2.85)$$

$$D_{\xi} = e^{2a + s^2} (e^{s^2} - 1). \quad (2.86)$$

Тогда из зависимостей (2.85) и (2.86) получим:

$$s = \sqrt{\ln \left(1 + \frac{D_{\xi}}{M_{\xi}^2} \right)}; \quad (2.87)$$

$$a = \ln \frac{M_{\xi}^2}{\sqrt{M_{\xi}^2 + D_{\xi}}}. \quad (2.88)$$

Заметим, что по методу Алландера [113] $\bar{\varepsilon}$ можно найти, не вычисляя интегралов:

$$\bar{\varepsilon} = \Phi \left(\frac{\ln d_H - \ln d_{\varepsilon}}{\sqrt{s_H^2 + s_{\varepsilon}^2}} \right). \quad (2.89)$$

Предположим, что $P_0(d)$ и $P_H(d)$ будут иметь логарифмически нормальное распределение. Если рассмотреть систему координат (ξ, η) на плоскости, где

$$\begin{cases} \xi = \ln d; \\ \eta = \Phi^{-1}(y), \end{cases}$$

где $\Phi^{-1}(y)$ – функция, обратная функции Лапласа, а $y \in (0, 1)$, то зависимости (2.82) и (2.83) примут линейный вид:

$$\eta = \frac{1}{s_{\epsilon}} (\xi - \ln d_{\epsilon}); \quad (2.90)$$

$$\eta = \frac{1}{s_{\eta}} (\xi - \ln d_{\eta}). \quad (2.91)$$

Таким образом, на логарифмически нормальной плоскости $\epsilon(d)$ и $P_{\eta}(d)$ являются прямыми с угловыми коэффициентами соответственно $k_{\epsilon} = 1/s_{\epsilon}$, $k_{\eta} = 1/s_{\eta}$. Получим распределение $P_y(d)$ частиц механических примесей, удаленных очистителем. По предположению:

$$P_y(d) = \frac{1}{s_y \sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{u} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_y)^2}{2s_y^2}} du =$$

$$= \frac{1}{\epsilon} \int_0^d \Phi\left(\frac{\ln u - \ln d_{\epsilon}}{s_{\epsilon}}\right) \frac{1}{s_{\eta} u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_{\eta})^2}{2s_{\eta}^2}} du.$$

Так как d – величина произвольная, то подынтегральные функции равны:

$$\frac{1}{\epsilon} \Phi\left(\frac{\ln u - \ln d_{\epsilon}}{s_{\epsilon}}\right) \frac{1}{s_{\eta} u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_{\eta})^2}{2s_{\eta}^2}} = \frac{1}{s_y u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_y)^2}{2s_y^2}}.$$

Подставим $u = d_{\eta}$ в последнее выражение, чтобы учесть размер исходных механических примесей в медиане, т.е. в наиболее вероятном случае:

$$e^{-\frac{(\ln d_{\eta} - \ln d_y)^2}{2s_y^2}} = \frac{s_y}{\epsilon s_{\eta}} \Phi\left(\frac{\ln d_{\eta} - \ln d_{\epsilon}}{s_{\epsilon}}\right).$$

Прологарифмируем:

$$-\frac{(\ln d_{\eta} - \ln d_y)^2}{2s_y^2} = \ln\left(\frac{s_y}{\epsilon s_{\eta}} \Phi\left(\frac{\ln d_{\eta} - \ln d_{\epsilon}}{s_{\epsilon}}\right)\right).$$

Тогда

$$\ln d_y = \ln d_{\eta} + \sqrt{\left| -2s_y^2 \ln\left(\frac{s_y}{\epsilon s_{\eta}} \Phi\left(\frac{\ln d_{\eta} - \ln d_{\epsilon}}{s_{\epsilon}}\right)\right) \right|}. \quad (2.92)$$

Зависимость (2.92) показывает, что средний размер удаленных частиц механических примесей $\bar{d}_y$ будет всегда больше среднего размера $\bar{d}_{\eta}$ частиц примесей до очистки СОЖ (исходных).

Найдем функцию распределения $P_0(d)$ для оставшихся в СОЖ частиц механических примесей:

$$P_0(d) = \frac{1}{s_0 \sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{u} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_0)^2}{2s_0^2}} du =$$

$$= \frac{1}{1-\epsilon} \int_0^d \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln u - \ln d_{\epsilon}}{s_{\epsilon}}\right)\right) \frac{1}{s_{\eta} u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_{\eta})^2}{2s_{\eta}^2}} du.$$

Так как d – величина произвольная, то подынтегральные функции равны:

$$\frac{1}{1-\epsilon} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln u - \ln d_{\epsilon}}{s_{\epsilon}}\right)\right) \frac{1}{s_{\eta} u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_{\eta})^2}{2s_{\eta}^2}} = \frac{1}{s_0 u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln u - \ln d_0)^2}{2s_0^2}}.$$

Подставим $u = d_{\eta}$:

$$e^{-\frac{(\ln d_{\eta} - \ln d_0)^2}{2s_0^2}} = \frac{s_0}{(1-\epsilon)s_{\eta}} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln d_{\eta} - \ln d_{\epsilon}}{s_{\epsilon}}\right)\right).$$

Прологарифмируем:

$$-\frac{(\ln d_{\eta} - \ln d_0)^2}{2s_0^2} = \ln\left(\frac{s_0}{(1-\epsilon)s_{\eta}} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln d_{\eta} - \ln d_{\epsilon}}{s_{\epsilon}}\right)\right)\right).$$

Тогда

$$\ln d_0 = \ln d_n - \sqrt{\left| -2s_0^2 \ln \left(\frac{s_0}{(1-\varepsilon)s_n} \left(1 - \Phi \left(\frac{\ln d_n - \ln d_\varepsilon}{s_\varepsilon} \right) \right) \right) \right|}. \quad (2.93)$$

Как следует из зависимости (2.93), средний размер оставшихся в СОЖ частиц $\bar{d}_0$ будет всегда меньше размера частиц механических примесей $\bar{d}_n$ до очистки (исходных).

Сравнение результатов расчета по зависимостям (2.92) и (2.93) для разных s_0 и s_y с точными значениями, полученными по уравнениям (2.80) и (2.81), позволило восстановить функциональные зависимости, исходя из критерия наилучшего приближения к медиане:

1) если $s_n \leq s_y$, то

$$s_y = \left(1 + 0,246s_n(\varepsilon^2 - 1) / s_\varepsilon \right) s_n; \quad (2.94)$$

$$s_0 = \left(1 - 0,261s_n \sqrt{\varepsilon} / s_\varepsilon \right) s_n. \quad (2.95)$$

2) если $s_n > s_\varepsilon$, то функции распределения $P_0(d)$ и $P_y(d)$ имеют вид гипербол, где функции распределения $P_n(d)$ и ε_d – асимптоты. В этом случае нельзя с малой погрешностью приблизить данные функции распределения к логарифмически нормальным и, следовательно, зависимости (2.92) – (2.95) становятся малоприменимыми.

Поступим следующим образом. Пусть $F(d)$ и $G(d)$ – две функции распределения на $(-\infty, +\infty)$, а $f(d)$ и $g(d)$ – соответствующие плотности вероятностей. Рассмотрим интеграл

$$J = \int_{-\infty}^d G(x) dF(x) = \int_{-\infty}^d f(x) \int_{-\infty}^x g(y) dy dx.$$

Интеграл J запишем как повторный интеграл для двойного интеграла по области Ω (рис. 2.30). Изменив порядок интегрирования, получим:

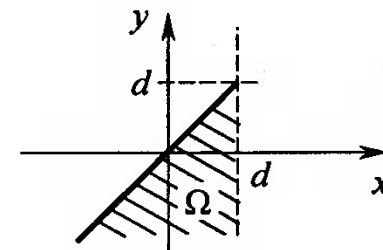


Рис. 2.30. Область интегрирования

$$\begin{aligned} J &= \int_{-\infty}^d g(y) \int_y^d f(x) dx dy = \int_{-\infty}^d g(y) (F(d) - F(y)) dy = \\ &= F(d) \int_{-\infty}^d g(y) dy - \int_{-\infty}^d g(y) F(y) dy = F(d) G(d) - \int_{-\infty}^d F(y) dG(y). \end{aligned}$$

Тогда

$$P_y(d) = \frac{1}{\varepsilon} P_n(d) \varepsilon(d) - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \tilde{P}_y(d), \quad (2.96)$$

где $\tilde{P}_y(d)$ – функция распределения по размерам частиц, удаленных из СОЖ при

$$\begin{cases} \tilde{P}_n(d) = \varepsilon(d); \\ \tilde{\varepsilon}(d) = P_n(d). \end{cases}$$

Таким образом, проблема нахождения $P_y(d)$ и $P_0(d)$ при $s_\varepsilon < s_n$ решена, так как $\tilde{P}_y(d)$ хорошо описывается логарифмически нормальным законом распределения, и

$$P_0(d) = \frac{1}{1-\varepsilon} P_n(d) - \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} P_y(d). \quad (2.97)$$

Если функции $\varepsilon(d)$ и $P_n(d)$ совпадают, то справедливо следующее соотношение:

$$P_n(d) = \varepsilon(d) = \Phi \left(\frac{\ln d - \ln m}{s} \right). \quad (2.98)$$

Распределение $P_y(d)$:

$$P_y(d) = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^d \Phi\left(\frac{\ln u - \ln m}{s}\right) d\Phi\left(\frac{\ln u - \ln m}{s}\right) = \frac{1}{\varepsilon} \frac{t^2}{2} \Big|_0^{\Phi\left(\frac{\ln d - \ln m}{s}\right)} = \quad (2.99)$$

$$= \frac{1}{2\varepsilon} \Phi^2\left(\frac{\ln d - \ln m}{s}\right).$$

Отметим, что в этом случае $\bar{\varepsilon} = 0,5$.

Распределение $P_0(d)$:

$$P_0(d) = \frac{1}{1-\varepsilon} \int_0^d \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln u - \ln m}{s}\right)\right) d\Phi\left(\frac{\ln u - \ln m}{s}\right) = \quad (2.100)$$

$$= \frac{1}{1-\varepsilon} \left(t - \frac{t^2}{2}\right) \Big|_0^{\Phi\left(\frac{\ln d - \ln m}{s}\right)} = \Phi\left(\frac{\ln d - \ln m}{s}\right) \left(2 - \Phi\left(\frac{\ln d - \ln m}{s}\right)\right).$$

Таким образом, в частном случае, решена задача (прямая) определения $\bar{\varepsilon}$ очистителя и параметров механических примесей, оставшихся в СОЖ (C_0 , $\bar{d}_0$, s_0) и удаленных из СОЖ (C_y , d_y , s_y) очистителем, при известных $\varepsilon(d)$ и $P_H(d)$. Рассмотрим теперь обратные задачи: задав любые три объекта из ряда $\varepsilon(d)$, $P_H(d)$, $P_y(d)$, $P_0(d)$ и $\bar{\varepsilon}$, необходимо найти два остальных.

Задача 1. Пусть известны распределения $P_0(d)$, $P_y(d)$, характеризующие соответственно парами параметров $\ln d_0$, s_0 и $\ln d_y$, s_y , а также $\bar{\varepsilon}$. Необходимо найти распределения $P_H(d)$ и $\varepsilon(d)$, т.е. $\ln d_H$, s_H , $\ln d_\varepsilon$, s_ε .

Обозначим $\alpha = 0,246$; $\beta = -0,261$ и выразим из (2.94) s_ε :

$$s_y = s_H + \alpha s_0^2 (\bar{\varepsilon}^2 - 1) / s_\varepsilon \Rightarrow s_\varepsilon = \frac{s_H^2}{s_y - s_H} \alpha (\bar{\varepsilon}^2 - 1). \quad (2.101)$$

Подставим полученное выражение в (2.95):

$$s_0 = s_H + \frac{\beta \sqrt{\varepsilon}}{\alpha (\bar{\varepsilon}^2 - 1)} (s_y - s_H).$$

Тогда

$$s_H = \frac{s_0 - s_y \theta}{1 - \theta}, \quad (2.102)$$

где $\theta = \frac{\beta \sqrt{\varepsilon}}{\alpha (\bar{\varepsilon}^2 - 1)}.$

Так как $P_H(d) = (1 - \bar{\varepsilon}) P_0(d) + \bar{\varepsilon} P_y(d)$, то

$$\ln d_H = \ln \frac{\bar{d}_H^2}{\sqrt{\bar{d}_H^2 + \sigma_H^2}}, \quad (2.103)$$

где $\bar{d}_H = (1 - \bar{\varepsilon}) \bar{d}_0 + \bar{\varepsilon} \bar{d}_y$; $\sigma_H^2 = (e^{s_H^2} - 1) \bar{d}_H^2$; $\bar{d}_0$, $\bar{d}_y$ — истинные математические ожидания размеров оставшихся и удаленных частиц механических примесей.

Воспользуемся уравнением (2.89) для определения $\ln d_\varepsilon$:

$$\ln d_\varepsilon = \ln d_H - \sqrt{s_H^2 + s_\varepsilon^2} \Phi^{-1}(\bar{\varepsilon}). \quad (2.104)$$

Последовательное применение зависимостей (2.101) – (2.104) приведет к решению поставленной задачи.

Задача 2. Известны распределения $P_H(d)$, $P_0(d)$ и $\bar{\varepsilon}$, т.е. числа $\ln d_0$, s_0 , $\ln d_H$, s_H и $\bar{\varepsilon}$. Необходимо найти распределения $P_y(d)$ и $\varepsilon(d)$, т.е. $\ln d_y$, s_y , $\ln d_\varepsilon$, s_ε .

Выразим из (2.95) величину s_ε :

$$s_\varepsilon = \frac{\beta \sqrt{\varepsilon}}{s_0 - s_H} s_H^2. \quad (2.105)$$

$\ln d_\varepsilon$ определим из уравнения (2.103). Далее найдем $P_y(d)$ по зависимостям (2.92) и (2.94) для $\ln d_y$ и s_y соответственно.

Задача 3. Известны распределения $P_y(d)$, $\varepsilon(d)$ и $\bar{\varepsilon}$, т.е. числа $\ln d_y$, s_y , $\ln d_\varepsilon$, s_ε и $\bar{\varepsilon}$. Необходимо найти распределения $P_H(d)$, $P_0(d)$, т.е. $\ln d_H$, s_H , $\ln d_0$, s_0 .

Найдем решение уравнения (2.94), приведя его к виду:

$$\frac{\alpha}{s_{\varepsilon}} \left(\varepsilon^2 - 1 \right) s_{\text{н}}^2 + s_{\text{н}} - s_{\text{у}} = 0. \quad (2.106)$$

Дискриминант этого уравнения

$$D = 1 + \frac{4\alpha}{s_{\varepsilon}} \left(\varepsilon^2 - 1 \right) s_{\text{у}}.$$

Корни уравнения (2.106) имеют следующий вид:

$$s_{\text{н}} = \frac{-1 \pm \sqrt{D}}{2\alpha \left(\varepsilon^2 - 1 \right)} s_{\varepsilon}, \quad (2.107)$$

где $s_{\text{н}}$ выберем из условий: $s_{\text{н}} > 0$, $s_{\text{н}} > s_{\text{у}}$.

Воспользуемся уравнением (2.104) для определения $\ln d_{\text{н}}$:

$$\ln d_{\text{н}} = \ln d_{\varepsilon} + \sqrt{s_{\text{н}}^2 + s_{\varepsilon}^2} \Phi^{-1}(\bar{\varepsilon}). \quad (2.108)$$

Далее можно найти $\ln d_0$ и s_0 для распределения $P_0(d)$ по зависимостям (2.93) и (2.95) соответственно.

Задача 4. Известны распределения $P_0(d)$, $\varepsilon(d)$ и $\bar{\varepsilon}$, т.е. заданы числа $\ln d_0$, s_0 , $\ln d_{\varepsilon}$, s_{ε} и $\bar{\varepsilon}$. Найти распределения $P_{\text{у}}(d)$, $P_{\text{н}}(d)$, т.е. $\ln d_{\text{у}}$, $s_{\text{у}}$, $\ln d_{\text{н}}$, $s_{\text{н}}$.

Найдем решение уравнения (2.95), приведя его к виду:

$$\begin{aligned} s_{\text{н}}^2 \frac{\beta \sqrt{\varepsilon}}{\sigma_{\varepsilon}} + s_{\text{н}} + s_0 &= 0; \\ D &= 1 + \frac{4\beta \sqrt{\varepsilon}}{s_{\varepsilon}} s_0; \\ s_{\text{н}} &= \frac{-1 \pm \sqrt{D}}{2\beta \sqrt{\varepsilon}} s_{\varepsilon}, \end{aligned} \quad (2.109)$$

где $s_{\text{н}}$ выберем из условий: $s_{\text{н}} > 0$, $s_{\text{н}} > s_0$.

$\ln d_{\text{н}}$ определим из уравнения (2.108). Далее найдем распределение $P_{\text{у}}(d)$, вычислив по зависимостям (2.92) и (2.94) соответственно $\ln d_{\text{у}}$ и $s_{\text{у}}$.

Задача 5. Известны распределения $P_{\text{у}}(d)$, $P_{\text{н}}(d)$ и $\bar{\varepsilon}$, т.е. заданы числа $\ln d_{\text{у}}$, $s_{\text{у}}$, $\ln d_{\text{н}}$, $s_{\text{н}}$ и $\bar{\varepsilon}$. Найти распределения $P_0(d)$, $\varepsilon(d)$, т.е. $\ln d_0$, s_0 , $\ln d_{\varepsilon}$, s_{ε} .

s_{ε} определим по зависимости (2.101), $\ln d_{\varepsilon}$ – по зависимости (2.104). Далее по зависимостям (2.93) и (2.95) рассчитаем соответственно $\ln d_0$, s_0 .

Задача 6. Известны распределения $P_{\text{у}}(d)$, $P_{\text{н}}(d)$, $P_0(d)$, т.е. заданы числа $\ln d_{\text{у}}$, $s_{\text{у}}$, $\ln d_{\text{н}}$, $s_{\text{н}}$, $\ln d_0$, s_0 . Найти распределения $\varepsilon(d)$ и $\bar{\varepsilon}$, т.е. $\ln d_{\varepsilon}$, s_{ε} и $\bar{\varepsilon}$.

$\bar{\varepsilon}$ определим из зависимости (2.103):

$$\bar{\varepsilon} = \frac{d_{\text{н}} - d_0}{d_{\text{у}} - d_0}, \quad (2.110)$$

s_{ε} определим по зависимости (2.101), $\ln d_{\varepsilon}$ – по (2.104).

Задача 7. Известны распределения $P_{\text{у}}(d)$, $P_0(d)$, $\varepsilon(d)$, т.е. заданы числа $\ln d_{\text{у}}$, $s_{\text{у}}$, $\ln d_0$, s_0 , $\ln d_{\varepsilon}$, s_{ε} . Найти распределение $P_{\text{н}}(d)$, $\bar{\varepsilon}$, т.е. $s_{\text{н}}$, $\ln d_{\text{н}}$, $s_{\text{н}}$, $\bar{\varepsilon}$.

$s_{\text{н}}$, $\bar{\varepsilon}$ определим путем решения нелинейной системы, состоящей из уравнений (2.94) и (2.95). Далее $\ln d_{\text{н}}$ рассчитаем по формуле (2.108).

Таким образом, задача расчета системы очистителей сводится к последовательному решению прямых и обратных задач для каждой ступени системы очистки. Достаточно простая форма изложенных законов позволила решить весь набор обратных задач (по результатам очистки восстановить исходные данные).

Рассмотрим обобщенный случай при произвольном распределении $P_{\text{н}}(d)$ частиц механических примесей в СОЖ до ее очистки. Представим распределение $P_{\text{н}}(d)$ в виде

$$P_{\text{н}}(d) = \Phi(\varphi(d)),$$

где $\Phi(d) = \Phi^{-1}(P_H(d))$ – неубывающая функция.

Если M_H – медиана размера частиц механических примесей в СОЖ до ее очистки, то $\Phi(M_H) = 0$. Предположим, что функция распределения степени очистки очистителя может быть записана с помощью функции $\Phi(d)$ следующим образом:

$$\varepsilon(d) = \Phi\left(\frac{\Phi(d) - m_\varepsilon}{s_\varepsilon}\right).$$

При этом плотность распределения частиц механических примесей в СОЖ до ее очистки имеет следующий вид:

$$P_H(d) = \frac{\Phi'(d)}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Phi^2(d)}{2}}.$$

Рассмотрим преобразование координат:

$$\begin{cases} \xi = \Phi(d); \\ \eta = \Phi^{-1}(\gamma). \end{cases}$$

Тогда на плоскости (ξ, η) функция распределения частиц механических примесей в СОЖ до ее очистки станет прямой, проходящей через точку 0, с угловым коэффициентом 1. Функция распределения степени очистки очистителя будет также прямой с угловым коэффициентом $1/s_\varepsilon$ и точкой пересечения с осью абсцисс m_ε .

Нахождение средней степени очистки очистителя $\bar{\varepsilon}$ по методу Алландера упрощается:

$$\bar{\varepsilon} = \Phi\left(\frac{-m_\varepsilon}{\sqrt{1+s_\varepsilon^2}}\right). \tag{2.111}$$

Предположим, что функции распределения частиц механических примесей, оставшихся в СОЖ после ее очистки $P_O(d)$ и удаленных очистителем $P_Y(d)$, будут также прямыми на плоскости (ξ, η) , т.е.

$$P_O(d) = \Phi\left(\frac{\Phi(d) - m_O}{s_O}\right) = \frac{1}{s_O \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^d \Phi'(u) e^{-\frac{(\Phi(u)-m_O)^2}{2s_O^2}} du; \tag{2.112}$$

$$P_Y(d) = \Phi\left(\frac{\Phi(d) - m_Y}{s_Y}\right) = \frac{1}{s_Y \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^d \Phi'(u) e^{-\frac{(\Phi(u)-m_Y)^2}{2s_Y^2}} du. \tag{2.113}$$

Найдем распределение $P_Y(d)$ частиц механических примесей, удаленных очистителем:

$$P_Y(d) = \int_{-\infty}^d \frac{\Phi'(u)}{s_Y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Phi(u)-m_Y)^2}{2s_Y^2}} du = \int_{-\infty}^d \frac{\Phi'(u)}{\varepsilon \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Phi^2(u)}{2}} \Phi\left(\frac{\Phi(u) - m_\varepsilon}{s_\varepsilon}\right) du.$$

Так как d – произвольное число, то подынтегральные функции равны. Функция $\Phi(u)$ монотонно возрастает, поэтому ее производная ни при каком значении u не равна нулю. Следовательно, справедливо следующее соотношение:

$$\frac{1}{s_Y} e^{-\frac{(\Phi(u)-m_Y)^2}{2s_Y^2}} = \frac{1}{\varepsilon} e^{-\frac{\Phi^2(u)}{2}} \Phi\left(\frac{\Phi(u) - m_\varepsilon}{s_\varepsilon}\right).$$

Подставим $u = m_H$, чтобы получить зависимость в наиболее вероятном случае:

$$\frac{1}{s_Y} e^{-\frac{m_Y^2}{2s_Y^2}} = \frac{1}{\varepsilon} \Phi\left(-\frac{m_\varepsilon}{s_\varepsilon}\right).$$

Прологарифмируем

$$-\frac{m_Y^2}{2s_Y^2} = \ln\left(\frac{s_Y}{\varepsilon} \Phi\left(-\frac{m_\varepsilon}{s_\varepsilon}\right)\right).$$

Отсюда

$$m_Y = \sqrt{\left|2s_Y^2 \ln\left(\frac{s_Y}{\varepsilon} \Phi\left(-\frac{m_\varepsilon}{s_\varepsilon}\right)\right)\right|}. \tag{2.114}$$

Найдем распределение частиц механических примесей в СОЖ после ее очистки. Проведя вывод аналогично предыдущему (зависимость (2.114)), получим

$$m_0 = -\sqrt{\left| 2s_0^2 \ln \left(\frac{s_1}{1-\varepsilon} \Phi \left(-\frac{m_\varepsilon}{s_\varepsilon} \right) \right) \right|}. \quad (2.115)$$

Уравнения (2.94) и (2.95) принимают следующий вид:

$$s_y = 1 + 0,246(\varepsilon^2 - 1)/s_\varepsilon; \quad (2.116)$$

$$s_0 = 1 - 0,261\sqrt{\varepsilon}/s_\varepsilon. \quad (2.117)$$

Рассмотрим еще один возможный случай. Пусть $P_H(d)$ и $\varepsilon(d)$ произвольные распределения одного типа, тогда:

$$P_H(d) = \Phi \left(\frac{\varphi(d) - \varphi(d_H)}{s_H} \right) = \frac{1}{s_H \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^d \varphi'(u) e^{-\frac{(\varphi(d) - \varphi(d_H))^2}{2s_H^2}} du;$$

$$\varepsilon(d) = \Phi \left(\frac{\varphi(d) - \varphi(d_\varepsilon)}{s_\varepsilon} \right) = \frac{1}{s_\varepsilon \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^d \varphi'(u) e^{-\frac{(\varphi(d) - \varphi(d_\varepsilon))^2}{2s_\varepsilon^2}} du.$$

Причем d_ε и d_H — соответственно медианы $\varepsilon(d)$ и $P_H(d)$. Таким образом, получаем преобразование координат:

$$\begin{cases} \xi = \varphi(d); \\ \eta = \Phi^{-1}(y). \end{cases}$$

Тогда на плоскости (ξ, η) функция распределения частиц механических примесей в СОЖ до ее очистки станет прямой, проходящей через точку $\varphi(d_H)$, с угловым коэффициентом $1/s_0$. Функция распределения степени очистки очистителя будет также прямой с угловым коэффициентом $1/s_\varepsilon$ и точкой пересечения с осью абсцисс $\varphi(d_\varepsilon)$.

Теперь предположим, что распределения частиц механических примесей в СОЖ после ее очистки и задержанных очистителем являются также прямыми на плоскости (ξ, η) , и, следовательно:

$$P_0(d) = \Phi \left(\frac{\varphi(d) - \varphi(d_0)}{s_0} \right); \quad P_y(d) = \Phi \left(\frac{\varphi(d) - \varphi(d_y)}{s_y} \right).$$

Заметим, что по методу Алландера, аналогично случаю с логарифмически нормальным распределением, степень очистки можно найти, не вычисляя интегралов:

$$\bar{\varepsilon} = \Phi \left(\frac{\varphi(d_H) - \varphi(d_\varepsilon)}{\sqrt{s_H^2 + s_\varepsilon^2}} \right). \quad (2.118)$$

Аналогично зависимостям (2.92) и (2.93) получим:

$$\varphi(d_y) = \varphi(d_H) + \sqrt{\left| -2s_y^2 \ln \left(\frac{s_y}{\varepsilon s_H} \Phi \left(\frac{\varphi(d_H) - \varphi(d_\varepsilon)}{s_\varepsilon} \right) \right) \right|}; \quad (2.119)$$

$$\varphi(d_0) = \varphi(d_H) - \sqrt{\left| -2s_0^2 \ln \left(\frac{s_0}{(1-\bar{\varepsilon})s_H} \left(1 - \Phi \left(\frac{\varphi(d_H) - \varphi(d_\varepsilon)}{2s_\varepsilon^2} \right) \right) \right) \right|}. \quad (2.120)$$

Величины s_0 и s_y найдем по зависимостям (2.94) и (2.95).

Обратные задачи в рассмотренном общем случае решаются аналогично рассмотренным выше. Необходимо только заменить во всех зависимостях $\ln d$ на $\varphi(d)$.

На рис. 2.31 представлены результаты численных расчетов распределения частиц механических примесей в СОЖ после ее очистки $P_0(d)$ и задержанных очистителем $P_y(d)$ с предсказанными прямыми для них. Максимальные ошибки для распределений $P_0(d)$ и $P_y(d)$ практически одинаковы и не превышают 3 % на их краях. Эти ошибки объясняются тем, что распределения $P_0(d)$ и $P_y(d)$ не являются прямыми на логарифмически нормальной плоскости, а также неидеальной точностью расчета по полуэмпирическим формулам (2.99) и (2.100). Заметим, что крае-

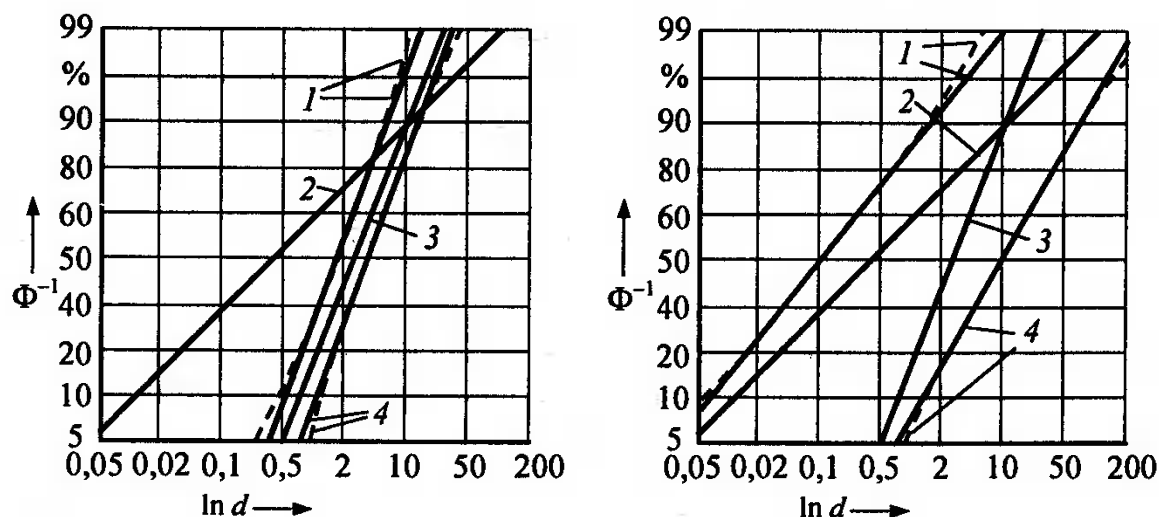


Рис. 2.31. Функции параметров чистоты СОЖ и характеристик очистителя: 1, 3, 4 – функции распределения частиц механических примесей соответственно оставшихся в СОЖ после очистки $P_o(d)$, находившихся в СОЖ до очистки $P_n(d)$, задержанных очистителем $P_y(d)$; 2 – $\varepsilon(d)$; $a - \bar{\varepsilon} = 67,26\%$; $b - \bar{\varepsilon} = 32,74\%$; --- – предсказанные прямые; ——— – численный эксперимент

вые ошибки для практических расчетов не имеют значения, так как в этих точках задержанные и незадержанные очистителем частицы механических примесей практически отсутствуют.

Графики (см. рис. 2.31, а и 2.31, б) обладают одной общностью – они сохраняют свой вид при любом преобразовании координат, т.е. при любой функции $\varphi(d)$. Таким образом, можно гарантировать, что каковы бы ни были функции $P_n(d)$, $\varepsilon(d)$ и каким бы образом мы их не выпрямляли, максимальная ошибка от этого не зависит.

Разработанная методика может быть использована для решения любых задач воздействия одной распределенной системы на другую распределенную систему (при взаимодействии по единому (одному) параметру). В частности, с использованием этой методики проводили моделирование работы и оптимизацию конструктивных параметров кассетного магнитного сепаратора (см. гл. 4).

2.6. ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Необходимость прогнозирования развития сложных многофакторных систем (каковыми являются и СП СОЖ) предопределяет необходимость изучения закономерностей их развития, которые удобно представ-

лять в виде функции развития. В предлагаемой модели развития СП СОЖ впервые использован нормально-логарифмический закон развития вместо трехпараметрических уравнений [62].

Развитие сложных систем, в соответствии с [62], можно описать обыкновенным дифференциальным уравнением Бернулли

$$\frac{dy}{dt} = p(t)y + q(t)y^2, \quad (2.121)$$

где y – анализируемый показатель развития; $p(t)$, $q(t)$ – коэффициенты.

Коэффициенты $p(t)$, $q(t)$ представляют в виде:

$$p(t) = Ae^{\alpha t}, \quad q(t) = Be^{\alpha t},$$

где $\alpha \neq 0$, $B \neq 0$, A – некоторые константы.

При этом уравнение (2.121) примет вид

$$\frac{dy}{dt} = Ae^{\alpha t}y + Be^{\alpha t}y^2. \quad (2.122)$$

Уравнение (2.122) решим с помощью подстановки $y = U(t)V(t)$:

$$U'V + UV' - Ae^{\alpha t}UV = Be^{\alpha t}U^2V^2.$$

Полученное уравнение преобразуем к виду

$$U'V + U[V' - Ae^{\alpha t}V] = Be^{\alpha t}U^2V^2. \quad (2.123)$$

Функцию $V = V(t)$ подберем так, чтобы разность в квадратных скобках уравнения (2.123) обратилась в 0, для чего нужно решить следующее уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{dV}{dt} = Ae^{\alpha t}V; \quad \frac{dV}{V} = Ae^{\alpha t}dt;$$

$$\ln V = \int Ae^{\alpha t}dt; \quad \ln V = \frac{A}{\alpha}e^{\alpha t} + c_1.$$

Полагая $c_1 = 0$, получим

$$V(t) = \exp\left(\frac{A}{\alpha}e^{\alpha t}\right). \quad (2.124)$$

После подстановки (2.124) в уравнение (2.123) последнее становится уравнением с разделяющимися переменными:

$$\begin{aligned} U' &= B e^{\alpha t} U^2 \exp\left(\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right); \quad \frac{dU}{U^2} = B e^{\alpha t} \exp\left(\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right) dt; \\ -\frac{1}{U} + c_2 &= \frac{B}{\alpha} \int \exp\left(\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right) d\left(e^{\alpha t}\right); \quad -\frac{1}{U} + c_2 = \frac{B}{A} \int \exp\left(\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right) d\left(\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right); \\ -\frac{1}{U} + c_2 &= \frac{B}{A} \int \exp\left(\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right); \quad U = \frac{1}{c_2 - \frac{B}{A} \exp\left(\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right)}. \end{aligned} \quad (2.125)$$

Теперь, учитывая (2.124), получим решение (2.122) в виде

$$\begin{aligned} y &= \frac{\exp\left(\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right)}{c_2 - \frac{B}{A} \exp\left(\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right)} = \frac{1}{c_2 \exp\left(-\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right) - \frac{B}{A}}; \\ y(t) &= \frac{\frac{1}{c_2}}{\exp\left(-\frac{A}{\alpha} e^{\alpha t}\right) - \frac{BA}{c_2}}. \end{aligned} \quad (2.126)$$

Поскольку уравнение (2.122) помимо t содержит три параметра — α, A, B , то его решение (2.126) является четырехпараметрическим семейством функций. Введя новые параметры $a = 1/c_2$; $\vartheta = -A/\alpha$; $a_1 = -BA/c_2$, запишем решение уравнения (2.122) в виде функции

$$y(t) = \frac{a}{\exp(\vartheta e^{\alpha t}) + a_1}. \quad (2.127)$$

Развитие сложных систем описывается так называемой S -функцией. Функция (2.127) будет S -функцией тогда и только тогда, когда параметры $\alpha, a, \vartheta, a_1$ удовлетворяют одному из трех условий:

$$1) \alpha < 0, a > 0, \vartheta > 0, a_1 > -1, e^{\vartheta}(\vartheta - 1) > a_1(\vartheta + 1); \quad (2.128)$$

$$2) \alpha < 0, a < 0, \vartheta < 0, a_1 < -1, e^{\vartheta}(\vartheta - 1) < a_1(\vartheta + 1); \quad (2.129)$$

$$3) \alpha > 0, a > 0, \vartheta < 0, a_1 > 0, e^{\vartheta}(\vartheta - 1) < a_1(\vartheta + 1). \quad (2.130)$$

Исследуем поведение функции (2.127) при $t \rightarrow +\infty$:

- а) если $\alpha < 0$, то $\lim_{t \rightarrow +\infty} \vartheta e^{\alpha t} = 0$; поэтому $\lim_{t \rightarrow +\infty} y(t) = a/(1 + a_1)$;
- б) если $\alpha > 0, \vartheta < 0$, то $\lim_{t \rightarrow +\infty} \vartheta e^{\alpha t} = -\infty$; поэтому $\lim_{t \rightarrow +\infty} y(t) = a/a_1$.

Наложив на функцию (2.127) при $t \rightarrow +\infty$ условие $\lim_{t \rightarrow +\infty} y(t) = 1$, по-

лучим следующие формулы связи между a и a_1 : $a = a_1 + 1$ при $\alpha < 0$; $a = a_1$ при $\alpha > 0$. Тем самым условия (2.128) – (2.130) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} \alpha < 0, a > 0, \vartheta > 0, a_1 = a - 1, e^{\vartheta}(\vartheta - 1) - (a - 1)(\vartheta + 1) &> 0; \\ \alpha < 0, a < 0, \vartheta < 0, a_1 = a - 1, e^{\vartheta}(\vartheta - 1) - (a - 1)(\vartheta + 1) &< 0; \\ \alpha > 0, a > 0, \vartheta < 0, a_1 = a, e^{\vartheta}(\vartheta - 1) - a(\vartheta + 1) &< 0. \end{aligned}$$

Полученные условия можно записать более компактно, если ввести величину

$$\vartheta_1 = \begin{cases} e^{\vartheta}(\vartheta - 1) - (a - 1)(\vartheta + 1) & \text{при } \alpha < 0; \\ e^{\vartheta}(\vartheta - 1) - a(\vartheta + 1) & \text{при } \alpha > 0. \end{cases}$$

Тогда справедлива следующая лемма: функция (2.127) будет S -функцией тогда и только тогда, когда параметры $\alpha, a, \vartheta, a_1$ удовлетворяют условиям:

$$a\vartheta\alpha < 0, \quad \vartheta\vartheta_1 > 0, \quad a_1 = \begin{cases} a - 1, & \text{при } \alpha < 0; \\ a & \text{при } \alpha > 0. \end{cases} \quad (2.131)$$

При этом, в случае $\alpha < 0$ будем называть (2.127) S -функцией 1-го типа, а в случае $\alpha > 0$ – 2-го типа.

Считая, что для S -функции (2.127) выполнено дополнительное условие $\lim_{t \rightarrow +\infty} y(t) = 1$, аппроксимируем ее функцией распределения нормально-логарифмического закона

$$F(t) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\ln t - m_\sigma}{\sigma}\right),$$

где m_σ , σ – параметры нормально-логарифмического закона; $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$ – функция Лапласа.

Аппроксимацию проведем по методу наименьших квадратов, минимизируя по параметрам m_σ , σ следующую функцию качества:

$$Q(m, \sigma) = \sum_{k=1}^n \left[\Phi\left(\frac{\ln t_k - m}{\sigma}\right) + \frac{1}{2} - y(t_k) \right]^2, \quad (2.132)$$

где $\{y(t_k)\}$, $(k = \overline{1, n})$ – множество значений S -функции в наперед выбранных n точках – узлах аппроксимации: $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Аналитическое решение поставленной задачи невозможно, поэтому решим ее численным методом. Это решение состоит из трех этапов:

- 1) ввод параметров α , a , b и проверка выполнимости условий (2.131);
- 2) выбор начального приближения параметров m_σ , σ ;
- 3) уточнение параметров m_σ , σ .

Поскольку первый этап в теоретическом плане совершенно ясен, остановимся на втором и третьем этапах.

Второй этап. Для выбора начального приближения параметров m_σ , σ установим приближенную связь между ними. Для этого вычислим значения $y(t_k)$ и найдем среднее арифметическое трех значений:

$$\bar{y} = 1/3 (y_{n_1-1} + y_{n_1} + y_{n_1+1}),$$

где n_1 – целая часть $n/2$.

Подберем такое значение аргумента $x = c_1$, при котором будет выполнено равенство

$$\bar{y} = 1/2 + \Phi(c_1).$$

Тогда параметры m_σ , σ можно связать соотношением $(\ln t_{n_1} - m_\sigma)/\sigma = c_1$, откуда получается следующая приближенная связь между m_σ , σ :

$$m_\sigma = \ln t_{n_1} - \sigma c_1. \quad (2.133)$$

Теперь вместо функции качества (2.132), зависящей от двух параметров m_σ , σ , получим приближенную функцию качества $Q_*(\sigma)$, зависящую только от одного параметра σ :

$$Q_*(\sigma) = \sum_{k=1}^n \left[\Phi\left(c_1 + \frac{\ln t_k - \ln t_{n_1}}{\sigma}\right) + \frac{1}{2} - y(t_k) \right]^2.$$

Точку минимума $\sigma = \sigma_0$ функции $Q_*(\sigma)$ можно найти численным методом. На наш взгляд, наиболее простым в программной реализации является следующий метод: с некоторым шагом h_σ просчитывают значения функции $Q_*(\sigma)$ в промежутке $(0, \sigma_{\max})$, где $\sigma_{\max}$ – наперед заданное максимально допустимое значение параметра σ . Затем выбирают то значение параметра σ , при котором $Q_*(\sigma)$ достигает наименьшего значения; это и будет приближенное значение оптимизируемого параметра $\sigma = \sigma_0$. Затем приближенное значение параметра $m_\sigma = m_0$ нужно уточнить по зависимости (2.133).

Третий этап. Находим множество допустимых значений параметров m_σ , σ . Из формулы (2.133) следует, что $|m_\sigma| \leq |\ln t_{n_1}| + \sigma |c_1|$. Значит, выбрав $m_{\max} = |\ln t_{n_1}| + \sigma_{\max} |c_1|$, получим в качестве области изменения параметров m_σ , σ следующий прямоугольник Π :

$$-m_{\max} \leq m_\sigma \leq m_{\max}, \quad 0 \leq \sigma \leq \sigma_{\max}. \quad (2.134)$$

Теперь для уточнения параметров m_σ , σ можно воспользоваться следующим алгоритмом. Выберем n_0 направлений изменения параметров m_σ , σ и вдоль каждого направления с шагом h вычислим значения функции качества $Q(m_\sigma, \sigma)$. Поиск по каждому направлению ведется до

тех пор, пока точка m_σ, σ находится внутри прямоугольника Π (рис. 2.32). Среди всех выделенных точек выберем точку, в которой значение функции качества $Q(m_\sigma, \sigma)$ будет минимальным (на рис. 2.32 она помечена звездочкой). Эта точка дает уточненные значения параметров m_σ, σ . При желании можно снова повторить поиск в n_0 направлениях, выбрав в качестве начальной точку (*), и т.д.

Направления поиска можно выбрать с помощью задания направляющих косинусов: $\cos 2\pi k / n_0, \sin 2\pi k / n_0, k = 0, 1, \dots, n_0 - 1$.

Поиск параметров при этом будем осуществлять по зависимостям:

$$m_\sigma = m_0 + \beta \cos \frac{2\pi k}{n_0}; \quad \sigma = \sigma_0 + \beta \sin \frac{2\pi k}{n_0}, \quad (2.135)$$

где $\beta = h, 2h, 3h, \dots$.

Для каждого k вычисления по зависимостям (2.135) ведем до тех пор, пока выполняются условия (2.134)

$$m_\sigma + m_{\max} \geq 0, \quad m_{\max} - m_\sigma \geq 0, \quad \sigma > 0, \quad \sigma_{\max} - \sigma \geq 0. \quad (2.136)$$

При желании полученное приближение можно уточнить, используя градиентный метод поиска минимума функции качества.

Уточнение проводится по зависимостям:

$$m_\sigma = m_* - \beta_* \frac{\partial Q}{\partial m_\sigma}; \quad \sigma = \sigma_* - \beta_* \frac{\partial Q}{\partial \sigma}, \quad (2.137)$$

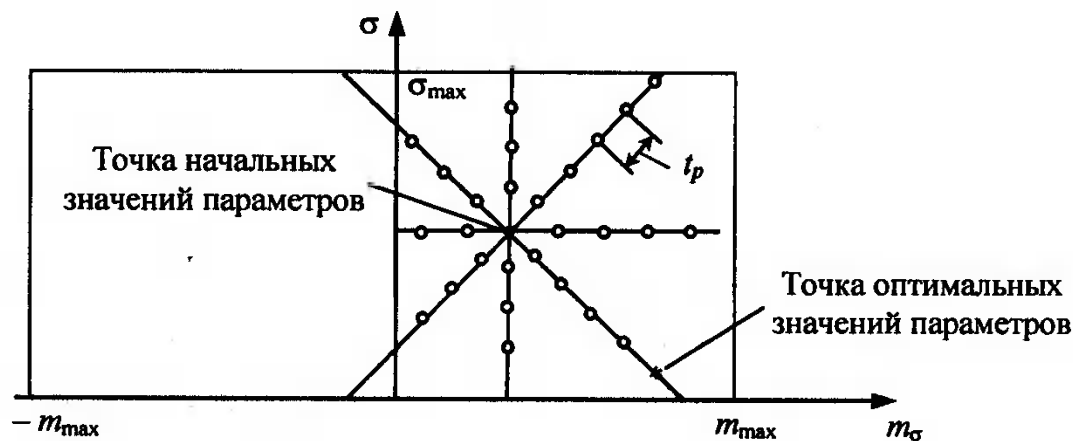


Рис. 2.32. Схема уточнения начальных значений параметров m_σ, σ

где (m_*, σ_*) – оптимальная точка, полученная на предыдущем шаге приближения по зависимостям (2.135), $\beta_* = h_1, 2h_1, 3h_1, \dots$, где $h_1 \ll h$ – новый шаг поиска, а частные производные вычисляются по зависимостям:

$$\frac{\partial Q}{\partial m_\sigma} = -\frac{2}{\sigma \sqrt{2\pi}} \sum_{k=0}^{n-1} \left[\frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{\ln t_k - m_\sigma}{\sigma} \right) - y(t_k) \right] e^{-\frac{(\ln t_k - m_\sigma)^2}{2\sigma^2}}; \quad (2.138)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \sigma} = -\frac{2}{\sigma \sqrt{2\pi}} \sum_{k=0}^{n-1} \left[\frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{\ln t_k - m_\sigma}{\sigma} \right) - y(t_k) \right] e^{-\frac{(\ln t_k - m_\sigma)^2}{2\sigma^2}} \frac{\ln t_k - m_\sigma}{\sigma}.$$

Следует отметить, что уточнение точки оптимума градиентным методом, как показали контрольные расчеты, потребовало больших затрат машинного времени по сравнению с предыдущими шагами при незначительном улучшении точности найденных параметров. Поэтому при решении практических задач последний шаг поиска не следует подключать.

Приведенный алгоритм решения задачи реализован в программе на алгоритмическом языке С.

В качестве примера рассмотрим далее аппроксимацию функции развития $S(t) = \frac{a}{e^{ae^{at}} + a_1}$ функцией распределения нормально-логарифмического закона:

$$S(t) = K \left[\frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{\ln t - m_\sigma}{\sigma} \right) \right], \quad (2.139)$$

где K – параметр аппроксимации.

При $x \geq 0$ функцию Лапласа с достаточной степенью точности можно аппроксимировать по формуле

$$\Phi(x) = \frac{1}{2} (1 - e^{-\gamma x}),$$

где $\gamma > 0$ – параметр аппроксимации.

Но так как $\Phi(-x) = -\Phi(x)$, $x \in (-\infty, \infty)$, то для аппроксимации функции Лапласа для всех $x \in (-\infty, \infty)$ используем следующие зависимости:

$$\Phi(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 - e^{-\gamma x}), & \text{если } x > 0; \\ \frac{1}{2}(e^{\gamma x} - 1), & \text{если } x \leq 0. \end{cases} \quad (2.140)$$

Преобразуем формулу (2.139) с учетом (2.140). Пусть $\ln t > m_\sigma$, тогда $x = (\ln t - m_\sigma)/\sigma > 0$, и значит

$$S(t) = K \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(1 - e^{-\gamma \frac{\ln t - m_\sigma}{\sigma}} \right) \right] = \frac{1}{2} K \left[2 - t^{\frac{-\gamma}{\sigma}} \left(e^{m_\sigma} \right)^{\frac{\gamma}{\sigma}} \right] = A \left[2 - \left(\frac{t_p}{t} \right)^\beta \right],$$

где $A = \frac{1}{2}K$, $t_p = e^{m_\sigma}$, $\beta = \gamma/\sigma > 0$ – новые параметры аппроксимации.

Пусть $\ln t \leq m_\sigma$, тогда $x = (\ln t - m_\sigma)/\sigma \leq 0$, и, следовательно,

$$S(t) = K \left[1 + \frac{1}{2} \left(e^{-\gamma \frac{\ln t - m_\sigma}{\sigma}} - 1 \right) \right] = A \left(\frac{t}{t_p} \right)^\beta.$$

Таким образом, вместо (2.139) получили новые аппроксимационные зависимости для функции развития $S(t)$:

$$S(t) = \begin{cases} A \left(\frac{t}{t_p} \right)^\beta, & \text{если } 0 \leq t \leq t_p; \\ A \left[2 - \left(\frac{t_p}{t} \right)^\beta \right], & \text{если } t > t_p. \end{cases} \quad (2.141)$$

Несмотря на то, что аппроксимация (2.141) задана двумя зависимостями, она является гладкой. Лишь вторая производная $S''(t)$ терпит разрыв в точке t_0 . В самом деле:

$$\lim_{t \rightarrow t_p - 0} S(t) = \lim_{t \rightarrow t_p + 0} A \left(\frac{t}{t_p} \right)^\beta = A;$$

$$\lim_{t \rightarrow t_p + 0} S(t) = \lim_{t \rightarrow t_p + 0} A \left[2 - \left(\frac{t_p}{t} \right)^\beta \right] = A,$$

т.е. непрерывность $S(t)$ доказана. Найдем $S'(t)$:

$$S'(t) = \begin{cases} \frac{A\beta}{t_p} \left(\frac{t}{t_p} \right)^{\beta-1}, & \text{если } 0 \leq t \leq t_p; \\ \frac{A\beta t_p}{t^2} \left(\frac{t_p}{t} \right)^{\beta-1}, & \text{если } t > t_p. \end{cases}$$

Вычислим:

$$\lim_{t \rightarrow t_p - 0} S'(t) = \lim_{t \rightarrow t_p - 0} \frac{A\beta}{t_p} \left(\frac{t}{t_p} \right)^{\beta-1} = \frac{A\beta}{t_p};$$

$$\lim_{t \rightarrow t_p + 0} S'(t) = \lim_{t \rightarrow t_p + 0} \frac{A\beta t_p}{t^2} \left(\frac{t_p}{t} \right)^{\beta-1} = \frac{A\beta}{t_p}.$$

Отсюда следует непрерывная дифференцируемость $S(t)$ для всех $t > 0$. Найдем $S''(t)$:

$$S''(t) = \begin{cases} \frac{A\beta(\beta-1)}{t_p^2} \left(\frac{t}{t_p} \right)^{\beta-2}, & \text{если } t \leq t_p; \\ -\frac{A\beta(\beta+1)}{t^4} t_p^2 \left(\frac{t_p}{t} \right)^{\beta-2}, & \text{если } t > t_p. \end{cases}$$

Вычислим:

$$\lim_{t \rightarrow t_p - 0} S''(t) = \lim_{t \rightarrow t_p - 0} \frac{A\beta(\beta-1)}{t_p^2} \left(\frac{t}{t_p} \right)^{\beta-2} = \frac{A\beta(\beta-1)}{t_p^2};$$

$$\lim_{t \rightarrow t_p + 0} S''(t) = \lim_{t \rightarrow t_p + 0} \frac{-A\beta(\beta+1)}{t^4} t_p^2 \left(\frac{t_p}{t} \right)^{\beta-2} = -\frac{A\beta(\beta+1)}{t_p^2}.$$

Отсюда следует, что в точке t_p функция $S''(t)$ терпит разрыв, и скачок будет

$$\delta_{S''}(t_p) = \lim_{t \rightarrow t_p+0} S''(t) - \lim_{t \rightarrow t_p-0} S''(t) = -\frac{2A\beta}{t_p^2}.$$

Кроме того, можно видеть, что $S''(t) > 0$ при $t < t_p$, $S''(t) < 0$ при $t > t_p$, т.е. $t = t_p$ – точка перегиба.

Отметим, что на начальном участке кривой ($0 \leq t \leq t_p$) величина параметра t неизвестна. Поэтому имеет смысл преобразовать зависимости (2.136) к виду

$$S(t) = \begin{cases} Bt^\beta, & \text{если } 0 \leq t \leq t_p; \\ Bt_p^\beta \left(2 - \frac{t_p^\beta}{t^\beta} \right), & \text{если } t > t_p, \end{cases} \quad (2.142)$$

где $B = At_p^{-\beta}$.

Параметры аппроксимации β , t_p , B в зависимости (2.142) находят комбинированным методом, объединяющим метод поиска и метод наименьших квадратов: параметры β , t_p находят методом поиска, а параметр B – методом наименьших квадратов.

Итак, пусть функция развития $S(t)$ задана таблицей своих значений в равноотстоящих точках t_1 , $t_2 = t_1 + \Delta t$, ..., $t_n = t_{n-1} + \Delta t$, где Δt – шаг параметра t :

t	t_1	t_2	...	t_n
$S(t)$	y_1	y_2	...	y_n

Допустим, что параметры β , t_p в зависимости (2.142) уже найдены.

Обозначим

$$\varphi(t) = \begin{cases} t^\beta, & \text{если } 0 \leq t \leq t_p; \\ t_p^\beta \left(2 - \frac{t_p^\beta}{t^\beta} \right), & \text{если } t > t_p. \end{cases} \quad (2.143)$$

Тогда зависимость (2.142) примет вид $S(t) = B\varphi(t)$.

Параметр B подберем так, чтобы функция качества

$$Q = \sum_{i=1}^n [B\varphi(t_i) - y_i]^2 \quad (2.144)$$

принимала наименьшее значение. Это означает, что

$$\frac{\partial Q}{\partial B} = 2 \sum_{i=1}^n [B\varphi(t_i) - y_i] \varphi(t_i) = 0.$$

Отсюда получаем зависимость для вычисления B :

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \varphi(t_i)}{\sum_{i=1}^n \varphi^2(t_i)}. \quad (2.145)$$

Параметры β , t_p отыщем методом направленного поиска. При этом заранее следует принять одну из гипотез: либо аппроксимируемая $S(t)$ -кривая имеет точку перегиба, и тогда ее следует искать, либо аппроксимируется начальный участок кривой, где нет точки перегиба. Рассмотрим обе ситуации.

Пусть аппроксимируемый участок $S(t)$ -кривой не имеет точки перегиба. Тогда $S(t) = Bt^\beta$, а функция качества Q должна иметь вид

$$Q = \sum_{i=1}^n (Bt_i^\beta - y_i)^2. \quad (2.146)$$

Заменив в (2.146) параметр B по зависимости (2.145), получим зависимость функции качества Q от одного параметра β . Причем, согласно постановке задачи, $\beta \geq 0$.

Выбрав начальное приближение параметра $\beta = \beta_0$, найдем то направление изменения параметра β , в котором функция качества (2.146) убывает. В этом направлении двигаемся с шагом h до тех пор, пока

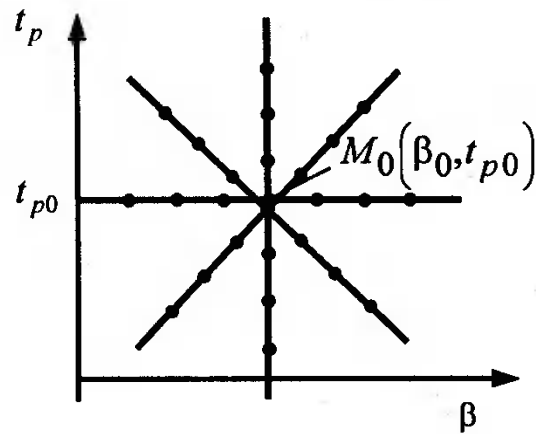


Рис. 2.33. Схема направлений поиска

выполняется неравенство $\beta \geq 0$ и убывает функция качества Q . Найденное таким образом значение параметра $\beta = \beta_{\text{опт}}$ будет оптимальным с определенной точностью. Для уточнения параметра $\beta_{\text{опт}}$ можно повторить ту же процедуру поиска, но с более мелким шагом из нового начального приближения $\beta = \beta_{\text{опт}}$.

Пусть теперь аппроксимируемый участок $S(t)$ -кривой

имеет точку перегиба. Значит, согласно (2.143), функция качества (2.144) зависит от трех параметров: β , t_p , B . После замены параметра B по зависимости (2.145) получим зависимости Q от двух параметров — β , t_p . Причем, согласно постановке задачи, $\beta \geq 0$, $t_p > 0$.

Выбрав начальное приближение параметров $\beta = \beta_0$, $t_p = t_{p0}$, найдем оптимальные значения $\beta = \beta_{\text{опт}}$, $t_p = t_{p \text{ опт}}$ по k наперед выбранным направлениям (рис. 2.33). Для этого на плоскости переменных β , t_p зададим k направлений, например, с помощью направляющих косинусов. Двигаясь вдоль каждого направления с шагом h до тех пор, пока либо нарушится одно из условий $\beta \geq 0$, $t_p > 0$, либо функция качества Q не начнет возрастать, получим тем самым на каждом направлении точку локального минимума функции качества Q . Выбрав среди них наименьшую, найдем оптимальные значения параметров $\beta = \beta_{\text{опт}}$, $t_p = t_{p \text{ опт}}$ с определенной точностью. Для уточнения этих параметров можно повторить поиск с более мелким шагом $h_1 < h$, взяв за начальное приближение $\beta = \beta_{\text{опт}}$, $t_p = t_{p \text{ опт}}$, и т.д.

Важнейшим для успешного поиска параметров аппроксимации является достаточно хороший выбор начальных значений параметров. Можно предложить следующий алгоритм решения этой задачи: во-первых, следует установить, имеется на кривой точка перегиба или нет. Для этого достаточно изучить знаки конечных разностей

$$\Delta^2 y_i = y_{i+1} - 2y_i + \Delta y_{i-1}, \quad (i = \overline{2, n-1}). \quad (2.147)$$

Так как $t_i = i\Delta t$, и в точке перегиба происходит смена знака второй производной, то путем линейной аппроксимации функции на участке смены знака второй производной найдем начальное приближение для точки перегиба:

$$t_{p0} = t_{i0} - \Delta t \frac{\Delta^2 y_{i0}}{\Delta^2 y_{i0+1} - \Delta^2 y_{i0}},$$

где i_0 — номер точки t_i , где впервые будет выполнено неравенство

$$\Delta^2 y_i \Delta^2 y_{i+1} < 0; \quad (2.148)$$

при этом следует иметь в виду, что случайный выброс какого-либо значения y_i аппроксимируемой функции может существенным образом изменить картину и определить точку перегиба гораздо раньше, чем она есть на самом деле. Чтобы компенсировать случайные выбросы значений y_i , следует предварительно их сгладить по формулам:

$$y_1^* = y_1, \quad y_n^* = y_n, \quad y_i^* = 1/2(y_{i-1} + y_{i+1}), \quad i = \overline{2, n-1}.$$

Во-вторых, следует определить начальное приближение параметра β . Для этого используем начальный участок кривой, на котором

$$y_i = B t_i^\beta; \quad (i = 1, 2, \dots, i_0),$$

где i_0 — значение параметра i , для которого выполняется неравенство (2.148).

Так как при $\Delta t \rightarrow 0$

$$(t_i + \Delta t)^\beta = t_i^\beta \left(1 + \frac{\Delta t}{t_i}\right)^\beta \approx t_i^\beta \left(1 + \beta \frac{\Delta t}{t_i}\right) = t_i^\beta + \beta t_i^{\beta-1} \Delta t,$$

то, очевидно, конечную разность Δy_i можно представить в виде

$$\Delta y_i = B(t_i + \Delta t)^\beta - B t_i^\beta \approx B \beta t_i^{\beta-1} \Delta t.$$

Следовательно,

Δy_i / y_i ≈ (Bβt_i^{β-1}Δt) / (Bt_i^β) = β Δt / t_i = β Δt / (iΔt) = β / i,

откуда β ≈ iΔy_i / y_i.

Усредняя это равенство по всем i (i = 1, n-1), получим формулу для определения начального приближения параметра β:

β_0 = 1 / (n-1) * Σ_{i=1}^{n-1} i * (y_{i+1} - y_i) / y_i.

Качество аппроксимации S(t)-кривой зависимостью (2.142) было проверено на контрольном примере, содержащем 14 вариантов S(t)-кривых. Параметры a, b, α, α_1 для S(t)-кривых подбирали таким образом, чтобы охватить все модельные случаи отношения параметров друг к другу. Для каждого из вариантов шаг Δt подбирали таким образом, чтобы двадцатью значениями функции охватить весь промежуток изменения S(t)-функции.

На ЭВМ рассчитали параметры аппроксимации β, B, t_p и величины дисперсии невязки √(Q/n) для всех 14 вариантов (табл. 2.16).

С помощью ЭВМ были просчитаны массивы значений аппроксимационных кривых. Для каждого из 14 вариантов рассчитывали массив значений S(t)-функции (массив Y) и соответствующий ему массив значений аппроксимационной кривой (массив Z), а также величины параметров кривых и параметров аппроксимации. Анализ массивов исходных значений Y и аппроксимационных кривых Z показал, что в большинстве случаев аппроксимационные кривые удовлетворительно согласуются с S-кривыми.

Разработанные модели и алгоритмы могут быть полезны при обработке статистических данных и выявлении тенденций развития сложных систем. В частности, с их использованием прогнозировали объем продаж техники применения СОЖ. Статистическая обработка и анализ прогнозируемых и фактических данных по динамике объема продаж техники применения СОЖ за период с января 1999 г. по январь 2002 г. выявили их тесную корреляционную связь: коэффициент парной корреляции был

2.16. Аппроксимация S(t)-функций

№ варианта	Параметры S(t)				Δt	Параметры аппроксимации			Дисперсия невязки √(Q/n)
	a	e	α	α_1		β	B	t_p	
1	5	3	-1	4	0,2	0,25989	0,73573	-	0,00598
2	2	2	-0,01	2	50	0,00243	0,61912	850,036	0,13151
3	1	20	-0,1	0	5	0,00494	0,63999	36,957	0,32214
4	0,001	1,1	-5	-0,99	0,2	0,88522	0,37313	5,56065	0,17276
5	0,1	10	-1	-0,9	0,5	1,28400	0,06510	11,2810	0,10332
6	-0,01	-0,2	-0,1	-1,01	5	1,80000	0,40936	-	0,24174
7	-3	-1	-2	-4	0,05	0,11522	0,99597	0,29817	0,03929
8	-5	-2	-0,1	-6	2	0,00151	0,93890	8,34816	0,05323
9	-0,1	-0,1	-1	-1,1	0,5	0,07443	0,84954	-	0,05378
10	1	-0,3	0,1	1	2	0,16240	0,54725	-	0,05770
11	1	-0,3	1	1	0,2	0,03000	0,80000	2,00000	0,08632
12	10	-0,3	1	10	0,25	0,00553	0,96266	2,29871	0,022339
13	0,1	-0,2	0,1	0,1	2	0,00884	0,44752	28,81841	0,22009
14	0,1	-0,2	5	0,1	0,05	1,170544	1,24929	1,17054	0,10419

равен $0,96 \pm 0,09$ %, среднее расхождение между расчетными и экспериментальными данными составило 9,7 % при расчетном уровне доверия $18,67 > 3$, что свидетельствует об адекватности предложенной модели.

В итоге выполненных аналитических и экспериментальных исследований сформулирован общий подход к построению математических моделей СП СОЖ, позволяющий учитывать как детерминированные, так и стохастические ее особенности.

Разработаны:

базовая математическая модель (2.10) системы применения СОЖ, открытая для включения моделей подсистем приготовления СОЖ, их контроля и диагностики. Эта модель может быть дополнена моделью влияния СП СОЖ на показатели основного производства, что позволит решать задачи оценки технико-экономической эффективности СП СОЖ;

уточняющие модель (2.10) критериальная модель (2.32) и упрощенная ее модификация (2.35), (2.36), описывающие дисперсное состояние СОЖ на этапах их приготовления и функционирования, а также модели баланса компонентов СОЖ (2.67), механических и иных примесей в СОЖ в процессе ее функционирования (2.75). Критериальный подход к исследованию и описанию динамики изменения свойств СОЖ позволяет прогнозировать стабильность СОЖ, являющуюся важнейшей характеристикой системы применения СОЖ при металлообработке, однако его реализация сопряжена с необходимостью получения большого массива экспериментальных данных;

балансовый метод исследования и прогнозирования изменения состава и состояния СОЖ в процессе функционирования, отличающийся простотой математического аппарата и позволяющий оценивать эффективность и экологичность СП СОЖ как качественно, так и количественно;

эффективный метод очистки СОЖ – двухконтурная неполнопоточная очистка, при которой функция очистки разделяется на две: первая – удаление основной массы механических примесей, поступающих с технологического оборудования, вторая – предотвращение накопления мелкодисперсных частиц механических примесей в СОЖ. Эти функции выполняют разные контуры подсистемы очистки: в первом контуре очистка СОЖ осуществляется высокопроизводительным относительно «грубым» очистителем; во втором контуре осуществляется периодическая или непрерывная неполнопоточная тонкая очистка;

модель развития сложных многофакторных систем, каковыми являются и СП СОЖ, в которой использован нормально-логарифмический

закон развития вместо трехпараметрических уравнений, что позволяет упростить решения соответствующих задач.

Показано, что задача расчета подсистемы очистки СОЖ может быть сведена к решению прямых (2.79) и обратных (2.101) – (2.110) задач взаимодействия двух распределенных систем последовательно для каждой ступени системы очистки. Прямая задача сводится к определению $\bar{\epsilon}$ очистителя и параметров механических примесей, оставшихся в СОЖ (C_0 , $\bar{d}_0$, s_0) и удаленных из СОЖ (C_y , d_y , s_y) очистителем при известных $\epsilon(d)$ и $P_n(d)$. Обратные задачи заключаются в отыскании любых двух параметров из ряда $\epsilon(d)$, $P_n(d)$, $P_y(d)$, $P_0(d)$ и $\bar{\epsilon}$ по заданным трем остальным.

Глава 3

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

3.1. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭКОЛОГИЗИРОВАННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

В настоящей главе представлена общая структура ресурсосберегающего экологизированного технологического процесса применения СОЖ и концептуальные технологические решения соответствующей СП СОЖ на основе разработанных принципов и критериев (см. гл. 1) и математических моделей (см. гл. 2).

В соответствии с современными представлениями [16, 22, 62, 84, 103, 105] ресурсосберегающий технологический процесс применения СОЖ на предприятии должен строиться по замкнутому безотходному циклу и включать мероприятия по хранению компонентов СОЖ, приготовлению, транспортированию, целевому использованию и диагностике СОЖ в процессе эксплуатации, а также по регенерации, утилизации и переработке отработанной СОЖ и ее компонентов.

Необходимым условием обеспечения замкнутости и безотходности СП СОЖ является наличие в ней определенной совокупности подсистем. Многолетний опыт кафедры «Технология машиностроения» УлГТУ в области проектирования и эксплуатации систем применения СОЖ в машиностроении и металлургии показывает, что обязательными (системообразующими) структурными элементами экологизированных ресурсосберегающих СП СОЖ являются следующие подсистемы:

подсистема (1-го порядка) обеспечения СОЖ основного технологического процесса механической или иной обработки, включающая модули (подсистемы 2-го порядка) приготовления СОЖ, транспортирования СОЖ к технологическому оборудованию (автоматическим линиям, станкам, прокатным станам и др.), сбора и транспортирования СОЖ от технологического оборудования, очистки загрязненной СОЖ от механических и иных примесей; контроля и коррекции состава СОЖ; управления развитием микрофлоры;

подсистема рециклизации отработанных ресурсов (эколого-технологическая подсистема), включающая модули разложения отработанной СОЖ, рециклизации СОЖ, ее водной основы и масляной фазы, рекуперации металла, масла и воды из шлама, рекуперации металла, масла и воды из аэрозолей, улавливаемых вентиляционной системой цеха;

подсистема обеспечения экологической безопасности, включающая модули нейтрализации отходов СП СОЖ (при необходимости).

Взаимосвязь перечисленных подсистем СП СОЖ (на примере водомасляных эмульсий) в виде схемы движения материальных потоков циркулирующих в системе продуктов представлена на рис. 3.1. Как указано в гл. 1, выбор именно эмульсионных СОЖ объясняется, во-первых, их широким применением в мировой практике машиностроительных и металлургических предприятий ввиду присущих им высоких функциональных свойств и относительно невысокой стоимости; во-вторых, технологический процесс применения эмульсионных СОЖ наиболее сложен вследствие особенностей их состава и низкой устойчивости к микробиологическому поражению.

Исходный продукт и техническая вода поступают в модуль приготовления СОЖ. Далее движение материальных потоков осуществляется по замкнутому циклу. Приготовленная СОЖ подается на технологическое оборудование, в рабочей зоне которого реализуются ее функциональные свойства. Здесь же происходят и наиболее интенсивные потери СОЖ, связанные с испарением, разбрызгиванием и уносом жидкости с заготовкой. Собираемая с технологического оборудования СОЖ поступает в подсистему очистки, а улавливаемые вентиляционной системой аэрозоли – в модуль рекуперации масла, воды и металла из аэрозолей.

После очистки от механических примесей и «инородных» масел, а также контроля состава и состояния СОЖ, отвечающая предъявляемым к ней требованиям, напрямую подается на технологическое оборудование. В противном случае отработанная СОЖ направляется в подсистему рециклизации и коррекции ее состава, а затем на технологическое оборудование.

Не подлежащая рециклизации отработанная СОЖ поступает в подсистему разложения, где происходит ее разделение на воду и масло. Шлам, удаленный из СОЖ в подсистеме очистки, поступает на рекуперацию, где происходит выделение из шлама масла, металла и воды. Вода, извлеченная в модулях разложения СОЖ и рекуперации, после рециклизации возвращается в модуль приготовления СОЖ, а масло может быть использовано в смазочном хозяйстве предприятия или возвращено в СП СОЖ после введения соответствующих присадок.

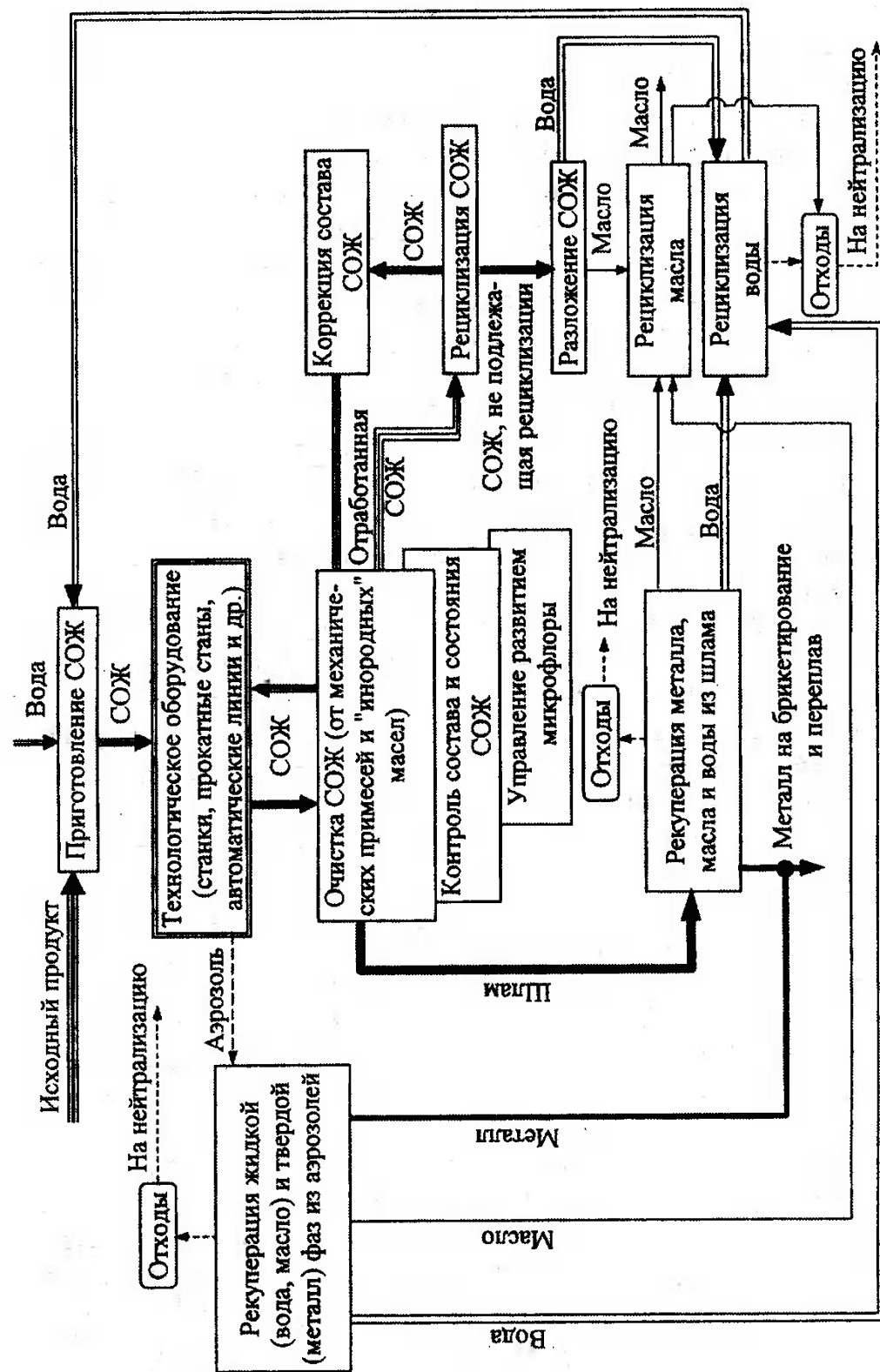


Рис. 3.1. Структурная схема функциональной взаимосвязи подсистем экологизированной ресурсосберегающей СП эмульсионных СОЖ

Металл, полученный в процессе рекуперации шлама и аэрозолей, направляется в модуль, где осуществляются его обработка и брикетирование с целью последующей переплавки. Отходы, образующиеся в процессе рекуперации, подлежат нейтрализации. Технологические решения по рекуперации шламов и масел представлены в пп. 3.5 и 3.6.

Представление взаимосвязей подсистем СП СОЖ в виде схемы движения материальных потоков (см. рис. 3.1) предназначено для нахождения рациональных компоновочных решений, согласования отдельных подсистем и их модулей по производительности и выработки критериев эффективного функционирования каждого модуля с точки зрения обеспечения максимального срока функционирования СОЖ — важнейшего критерия эффективности СП СОЖ в целом.

Движение материальных потоков СОЖ в СП обеспечивается транспортной подсистемой. Основным критерием эффективности этой подсистемы является ее энергопотребление, уменьшить которое можно за счет минимизации количества насосов в СП СОЖ (см. п. 3.3). При проектировании транспортной подсистемы следует учитывать возможность выполнения в этой подсистеме некоторых функций других подсистем, реализуя тем самым один из основных принципов (см. гл. 1) построения ресурсосберегающих СП СОЖ. В частности, предварительную очистку и извлечение большей части механических примесей из СОЖ целесообразно осуществлять уже во время ее транспортирования от технологического оборудования к подсистеме очистки. Примером является использование сливных магистральных трубопроводов, оснащенных скребковыми конвейерами, для удаления крупных механических примесей, оседающих в трубопроводе.

Можно выделить две группы факторов с противоположно направленным воздействием на срок функционирования СОЖ (рис. 3.2):

1) факторы негативного воздействия, характеризующие интенсивностью «ввода» в СОЖ в процессе ее эксплуатации механических примесей, «инородных» масел и солей, а также интенсивностью развития микрофлоры и интенсивностью потери эмульсола и присадок;

2) управляющие факторы, оказывающие позитивное воздействие на срок функционирования СОЖ и характеризующие интенсивностью вывода из СОЖ механических примесей, «инородных» масел, солей, а также интенсивностью подавления микрофлоры и добавления эмульсола и присадок.

Из рис. 3.2 следует, что срок функционирования СОЖ определяется разностью интенсивностей ввода и вывода из СП СОЖ соответствующих продуктов.

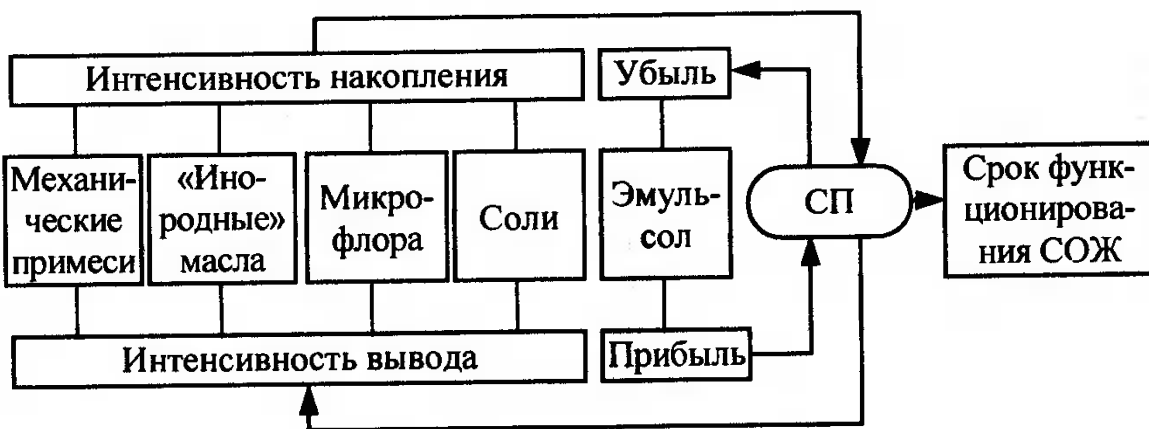


Рис. 3.2. Факторы, определяющие срок функционирования СОЖ

Интенсивность ввода механических примесей и «инородных» масел в СОЖ определяется параметрами технологической надсистемы – технологическим оборудованием, видом и режимами механической обработки.

Интенсивность вывода механических примесей и «инородных» масел из СОЖ определяется степенью очистки жидкости от примесей и производительностью подсистемы очистки (см. п. 3.2), а также эффективностью предварительной очистки СОЖ в подсистеме ее транспортирования от технологического оборудования к подсистеме очистки.

Интенсивность развития микрофлоры в СОЖ зависит от состава СОЖ, начального содержания микрофлоры в жидкости (на этапе ее приготовления), физико-химического воздействия основного технологического процесса на СОЖ, содержания «инородных» масел и механических примесей (см. п. 3.3).

Интенсивность подавления микрофлоры определяется наличием в СП СОЖ подсистемы контроля и управления составом и состоянием технологической жидкости, способной гибко и своевременно реагировать на структурные и фазовые изменения, происходящие в СОЖ в процессе ее эксплуатации.

Интенсивность накопления солей в СОЖ определяется на этапах ее приготовления (в зависимости от исходной концентрации солей в воде, рН-показателя воды, начальной концентрации микроорганизмов в воде) и эксплуатации. На этом втором этапе соли поступают в СОЖ с поверхностей обрабатываемых заготовок, деталей технологического оборудования, а также вместе с доливаемой в систему СОЖ.

Интенсивность потери эмульсола и присадок в СП СОЖ определяется качеством приготовления СОЖ, интенсивностью потерь эмульсола и присадок в ходе технологического процесса, а также интенсивностью

потерь эмульсола в подсистеме очистки, зависящей от вида применяемых очистителей.

Интенсивность долива эмульсола в СОЖ регулируется специальной подсистемой таким образом, чтобы поддерживать определенную концентрацию эмульсола.

Наличие двух групп противоположно направленных воздействий на СП СОЖ (см. рис. 3.2) свидетельствует о принципиальной возможности обеспечения бессточной эксплуатации СОЖ посредством организации управления интенсивностью вывода механических примесей, «инородных» масел и солей, интенсивностью развития микрофлоры и интенсивностью долива эмульсола в соответствующих подсистемах СП СОЖ. Обеспечение полной компенсации негативных воздействий технологического оборудования и СП СОЖ за счет управляющих воздействий неизбежно сопровождается увеличением капитальных затрат и стоимости эксплуатации подсистем и модулей, реализующих эти управляющие воздействия. Поэтому при оценке эффективности функционирования отдельных подсистем СП СОЖ необходимо руководствоваться системой критериев – экономических, технологических, технических и экологических (табл. 3.1). Учитывая иерархическую организацию СП СОЖ и встроенность ее в производственную надсистему, для экономической оценки целесообразно использовать относительные критерии $K_{уд i}$, $I_{уд i}$. При этом в знаменателях расчетных формул представлены показатели как рассматриваемой подсистемы, так и всех систем более высокого уровня иерархии.

Взаимосвязь показателей эффективности отдельных подсистем СП СОЖ с показателями эффективности системы в целом показана в табл. 3.2 и 3.3.

Дисперсность компонентов и однородность СОЖ, являющиеся важнейшими критериями эффективности подсистемы приготовления СОЖ (см. табл. 3.3), зависят, главным образом, от интенсивности* и продолжительности работы применяемых смесительных устройств, температуры диспергируемой жидкости и ее концентрации. Причем с повышением дисперсности частиц возрастают однородность и стабильность СОЖ. С увеличением продолжительности диспергирования уменьшается размер частиц компонентов СОЖ до некоторого значения, которое определяется возможностями применяемого устройства, его энергетическими

* Под интенсивностью диспергирования в большинстве случаев понимают скорость движения жидкости в смесительных устройствах.

3.1. Критерии эффективности функционирования основных подсистем СП СОЖ

Подсистема СП СОЖ	Экономические*	Технологические	Экологические
1	2	3	4
Приготовление СОЖ	1. Удельные капитальные затраты: 1.1. $K_{уд1} = K_{п}/K_{СП}$; 1.2. $K_{уд2} = K_{п}/Q$, $\text{руб} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$, 1.3. $K_{уд3} = K_{п}/Q_{п}$, $\text{руб} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$, 1.4. $K_{уд4} = K_{п}/П$, $\text{руб} \cdot \text{год} \cdot \text{ед}^{-1}$ 2. Удельные эксплуатационные издержки: 2.1. $I_{уд1} = I_{п}/I_{СП}$; 2.2. $I_{уд2} = I_{п}/Q$; 2.3. $I_{уд3} = I_{п}/Q_{п}$; 2.4. $I_{уд4} = I_{п}/П$	1. Дисперсность m и однородность δ эмульсии. 2. Концентрации c_{oi} компонентов СОЖ и их предельные отклонения. 3. Концентрации c'_{oi} «инородных» компонентов (микрофлора, масло, соли, механические примеси) и их предельные отклонения	—
Очистка СОЖ	1. Удельные капитальные затраты: 1.1. $K_{уд5} = K_{оч}/K_{СП}$; 1.2. $K_{уд6} = K_{оч}/Q$, $\text{руб} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$, 1.3. $K_{уд7} = K_{оч}/Q_{п}$, $\text{руб} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$, 1.4. $K_{уд8} = K_{оч}/П$, $\text{руб} \cdot \text{год} \cdot \text{ед}^{-1}$	1. Интенсивность извлечения механических примесей из СОЖ. 2. Интенсивность извлечения «инородных» масел. 3. Степень очистки по механическим примесям и «инородным» маслам. 4. Тонкость очистки. 5. Коэффициент (интенсивность) потерь эмульсии	1. Отход шлама. 2. Отход «инородных» масел. 3. Концентрация вредных веществ в отходах

Очистка СОЖ	2. Удельные эксплуатационные издержки: 2.1. $I_{уд5} = I_{оч}/I_{СП}$; 2.2. $I_{уд6} = I_{оч}/Q$; 2.3. $I_{уд7} = I_{оч}/Q_{п}$; 2.4. $I_{уд8} = I_{оч}/П$		
Восстановление, утилизация СОЖ	1. Удельные капитальные затраты: 1.1. $K_{уд9} = K_{в}/K_{СП}$; 1.2. $K_{уд10} = K_{в}/Q$, $\text{руб} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$, 1.3. $K_{уд11} = K_{в}/Q_{п}$, $\text{руб} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$, 1.4. $K_{уд12} = K_{в}/П$, $\text{руб} \cdot \text{год} \cdot \text{ед}^{-1}$ 2. Удельные эксплуатационные издержки: 2.1. $I_{уд9} = I_{в}/I_{СП}$; 2.2. $I_{уд10} = I_{в}/Q$; 2.3. $I_{уд11} = I_{в}/Q_{п}$; 2.4. $I_{уд12} = I_{в}/П$	1. Коэффициент регенерации. 2. Концентрации c_{pi} компонентов регенерируемой СОЖ. 3. Концентрация c'_{pi} «инородных» веществ в регенерируемой СОЖ	1. Отход СОЖ. 2. Концентрация вредных веществ в стоках, аэрозолях и твердых отходах

Продолжение табл. 3.1

1	2	3	4
Рекупера- ция из СОЖ ме- талла, масла и воды	1. Удельные капитальные затраты: 1.1. $K_{уд\ 13} = K_p / K_{СП}$; 1.2. $K_{уд\ 14} = K_p / Q$, руб · ч · м ⁻³ , 1.3. $K_{уд\ 15} = K_p / Q_n$, руб · ч · м ⁻³ , 1.4. $K_{уд\ 16} = K_p / П$, руб · год · ед ⁻¹ 2. Удельные эксплуатационные из- держки: 2.1. $I_{уд\ 13} = I_p / I_{СП}$; 2.2. $I_{уд\ 14} = I_p / Q$; 2.3. $I_{уд\ 15} = I_p / Q_n$; 2.4. $I_{уд\ 16} = I_p / П$	1. Коэффициент утилизации метал- ла. 2. Коэффициент утилизации масел. 3. Коэффициент утилизации воды	1. Отходы в виде сточных вод, аз- розолей, твер- дых отходов. 2. Концентрация вредных ве- ществ в твер- дых, жидких, га- зообразных от- ходах

* $K_{п}$, $K_{оч}$, $K_{в}$, $K_{р}$, $K_{СП}$ – капитальные затраты на подсистемы соответственно приготовления, очистки, вос-
становления СОЖ, рекуперации из СОЖ металла, масла и воды и на подсистему применения СОЖ, руб.;
 $I_{п}$, $I_{оч}$, $I_{в}$, $I_{р}$, $I_{СП}$ – эксплуатационные издержки на подсистемы соответственно приготовления, очистки,
восстановления СОЖ, рекуперации из СОЖ металла, масла и воды и систему применения СОЖ, руб.;
 $Q_{п}$, $Q_{оч}$, $Q_{в}$, $Q_{р}$, Q – производительность подсистемы соответственно приготовления, очистки, восстановления
СОЖ, рекуперации из СОЖ металла, масла и воды и системы применения СОЖ, м³/ч; П – годовой выпуск готовой
продукции, ед/год.

3.2. Показатели эффективности функционирования подсистем
экологизированных ресурсосберегающих СП СОЖ,
определяющие срок ее функционирования

Подсистема	Показатель эффективности функционирования
Приготовление СОЖ	Однородность состава и размер частиц дисперсной фазы в СОЖ
Контроль состояния СОЖ	Оперативность и достоверность результатов контро- ля. Номенклатура и число контролируемых показателей
Коррекция состава СОЖ	Состав и свойства СОЖ после коррекции
Очистка СОЖ	Степень очистки от механических примесей и «ино- родных» масел. Интенсивность накопления механи- ческих примесей и «инородных» масел в СОЖ
Управление разви- тием микрофлоры в СОЖ	Интенсивность развития микроорганизмов
Рециклизация СОЖ	Состав и свойства СОЖ после восстановления

3.3. Показатели эффективности функционирования
эколого-технологических подсистем СП СОЖ, определяющие
потребность производства в закупке металла, масла и воды

Подсистема	Показатель эффективности функционирования
Разложение СОЖ	Степень извлечения масла и воды из отрабо- танной СОЖ
Рециклизация минераль- ных масел	Содержание механических примесей и воды в минеральных маслах после рециклизации
Рекуперация жидкой (масла и воды) и твердой (металла) фаз из шлама и аэрозолей	Степень извлечения металла, масла и воды из шлама и аэрозолей

характеристиками. С точки зрения принципов построения ресурсосберегающих СП СОЖ подсистема приготовления СОЖ должна обеспечивать заданные дисперсность и однородность СОЖ при минимальных энергозатратах. С повышением температуры жидкости снижаются ее вязкость и поверхностное натяжение, что облегчает процесс диспергирования. Поэтому подогрев технической воды часто обеспечивает существенное сокращение энергозатратности подсистемы приготовления СОЖ за счет снижения мощности, затрачиваемой смесительным устройством. Концентрация компонентов СОЖ оказывает влияние на дисперсность частиц через процессы агрегации, при этом в малоконцентрированных жидкостях тонкодисперсные частицы получают с меньшими энергозатратами. Эффективность диспергирования может быть увеличена путем наложения на СОЖ низкоэнергетических ультразвуковых воздействий.

Анализ научно-технической и патентной информации и собственные исследования показывают [84, 97], что существующие технологии и подсистемы приготовления СОЖ достаточно эффективны. Для приготовления качественных СОЖ при минимальных энергозатратах можно рекомендовать двухступенчатые подсистемы, в которых в устройствах различного типа осуществляется предварительное и окончательное перемешивание. В качестве первой ступени целесообразно использовать механические смесители, в которых наиболее экономично диспергируется основная часть эмульсола. В качестве второй ступени можно рекомендовать перемешивание с помощью инжекторов, обеспечивающее тонкую дисперсность.

Технологические процессы, реализуемые в подсистемах контроля состояния СОЖ и коррекции ее состава, подробно описаны и исследованы в работах Ю.В. Полянского [71, 75 и др.], что избавляет от необходимости их рассмотрения в этой книге.

Технологические процессы и схемотехнические решения остальных подсистем, построенные в соответствии с принципами и критериями оценки эффективности ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ, рассмотрены ниже.

3.2. ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СОЖ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

На основе большого экспериментального материала в гл. 1 было показано, что загрязнение СОЖ механическими примесями оказывает существенное негативное влияние на технологическую эффективность операций механической обработки, является доминирующим фактором, определяющим длительность нормального функционирования СОЖ. В то

же время отмечалась целесообразность проведения дополнительных исследований влияния чистоты СОЖ на выходные показатели процессов механической обработки в условиях, максимально приближенных к реальным условиям современного производства: во-первых, с использованием в качестве загрязнителя СОЖ реальных (а не модельных, как во многих выполненных до сих пор работах) отходов механической обработки (шлифовальных шламов, например); во-вторых, при механической обработке на форсированных режимах; в-третьих, при стандартной схеме циркуляции СОЖ.

Именно в таких условиях проведены исследования влияния загрязнения СОЖ механическими примесями на эффективность круглого наружного шлифования заготовок из стали ШХ15, HRC 62...64, кругами 1 – 600×40×305 24A16HC17K5, 24A25HCM17K5, 24A25HC17K5. Окружная скорость круга $v_k = 35$ и 50 м/с; скоростью врезной подачи v_z , варьировали в широком диапазоне – от 0,5 до 7 мм/мин. В зону шлифования поливом с расходом 20 л/мин подавали водный раствор кальцинированной соды (1 %) и нитрита натрия (0,3 %) (СОЖ 1) или 3 %-ную эмульсию Укринол-1М (СОЖ 2). В качестве критериев оценки эффективности процесса шлифования без выхаживания использовали:

- 1) значение скорости врезной подачи v_z , мм/мин, при котором на поверхности шлифуемой заготовки появляются прижоги или огранка (далее это значение v_z именуется «критическая бесприжоговая подача $v'_{zкр}$ »);
- 2) коэффициент шлифования по объему $K_{ш}$;
- 3) среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности Ra .

По результатам экспериментов строили графики зависимости средних значений $v'_{zкр}$, $K_{ш}$, Ra и ωRa от концентрации в СОЖ механических примесей c_0 (г/л).

Экспериментальная установка, смонтированная на базе круглошлифовального станка мод. 3Б151П, обеспечивала возможность очистки СОЖ по нескольким вариантам:

- 1) последовательная очистка СОЖ в баке-отстойнике и путем многократного фильтрования через бумагу «Паратекс»: концентрация механических примесей $c_0 = 0,2...0,3$ г/л;
- 2) последовательная очистка СОЖ в баке-отстойнике и путем однократного фильтрования: $c_0 = 0,5...0,8$ г/л;
- 3) очистка СОЖ в баке-отстойнике: $c_0 = 1,0...2,0$ г/л.

Для сравнения шлифовали заготовки с подачей в зону обработки СОЖ, не содержащей механических примесей и загрязненной модельным (см. гл. 1) шлифовальным шламом.

Установлено, как и следовало ожидать, что закономерности влияния загрязнения СОЖ реальным и модельным шламом на шероховатость шлифованной поверхности (рис. 3.3 и 3.6), критическую бесприжоговую подачу (рис. 3.4) и коэффициент шлифования (рис. 3.5) идентичны: с увеличением концентрации в СОЖ механических примесей (шлама) среднее арифметическое отклонение профиля Ra шлифованной поверхности растет, а критическая бесприжоговая подача $v_{\text{кр}}$ и коэффициент шлифования $K_{\text{ш}}$ уменьшаются (все эти зависимости близки к линейным). При этом реальный шлам приводит к несколько меньшим изменениям Ra (кривые 1' и 2' на рис. 3.3), чем модельный (кривые 1 и 2), что вполне логично: в реальном шламе доля металлических частиц, слабо влияющих на формирование шероховатости шлифуемой поверхности заготовки, гораздо больше, чем в модельном. Разумеется, как и в любой технологической ситуации, шероховатость шлифованной поверхности ухудшается с увеличением скорости врезной подачи v_s (см. рис. 3.6) при любой загрязненности СОЖ.

Как известно, увеличение рабочей скорости v_k шлифовального круга обеспечивает возможность повышения производительности обработки.

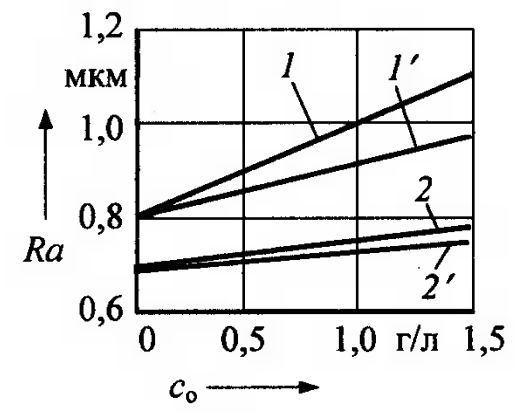


Рис. 3.4. Зависимость критической бесприжоговой подачи $v_{\text{кр}}$ от концентрации в СОЖ механических примесей c_o и рабочей скорости круга v_k : материал заготовок – сталь ШХ15, HRC 62...64; 1, 2 – круг 24А16НС17К5, СОЖ 1, соответственно $v_k = 35, 50$ м/с; 3 – круг 24А25НС17К5, СОЖ 2, $v_k = 50$ м/с; 4 – 24А25НСМ17К5, СОЖ 2, $v_k = 50$ м/с; шлам реальный

Рис. 3.3. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra шлифованной поверхности от концентрации в СОЖ механических примесей c_o и состава шлама: материал заготовок – сталь ШХ15, HRC 62...64; $v_k = 50$ м/с, $v_s = 0,5$ мм/мин; 1, 1' и 2, 2' – соответственно круг 24А25НС17К5 и 24А16НС17К5; 1, 2 и 1', 2' – соответственно модельный и реальный шламы

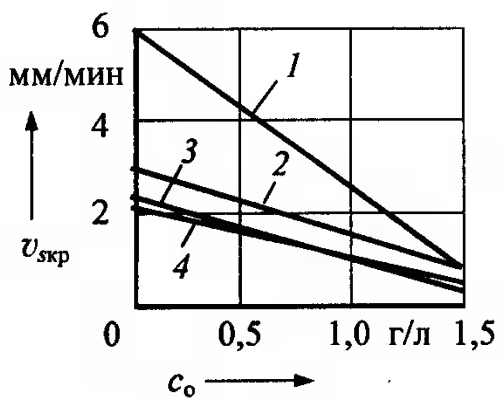


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента шлифования $K_{\text{ш}}$ от концентрации в СОЖ механических примесей c_o и скорости врезной подачи v_s : материал заготовок – сталь ШХ15, HRC 62...64; круг 24А16НС17К5; СОЖ 1; $v_k = 50$ м/с; 1, 2, 3 – соответственно $v_s = 0,5; 3,0; 7,0$ мм/мин; шлам реальный

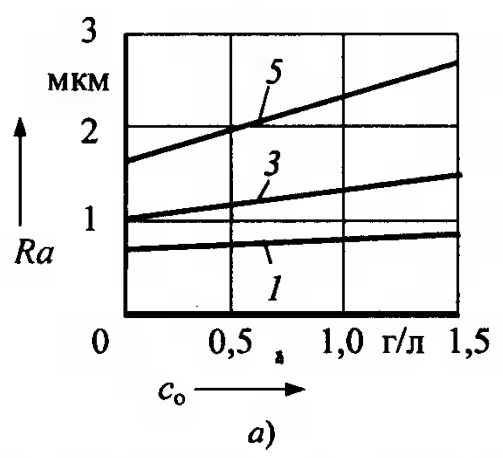
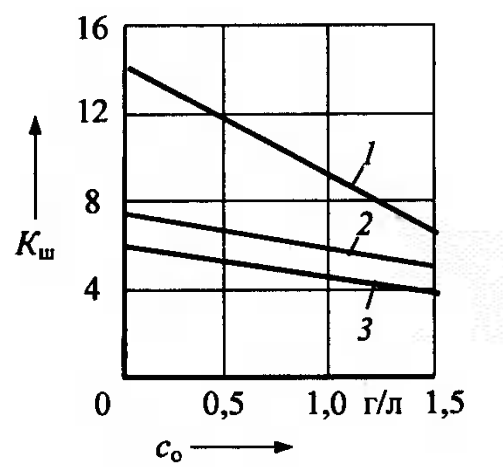
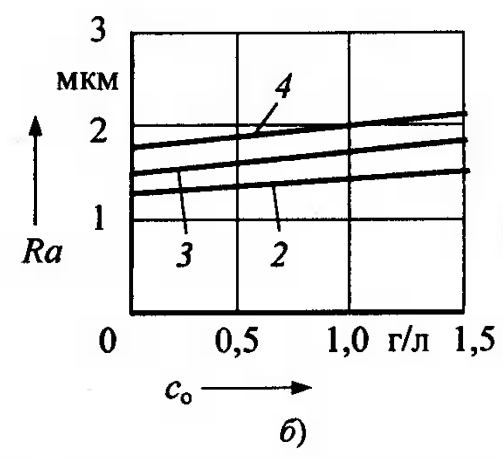


Рис. 3.6. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra шлифованной поверхности от концентрации в СОЖ механических примесей c_o и скорости врезной подачи v_s : а, б – круг соответственно 24А16НС17К5 (СОЖ 1), 24А25НСМ17К5 (СОЖ 2); $v_k = 50$ м/с; материал заготовок – сталь ШХ15, HRC 62...64; 1, 2, 3, 4, 5 – $v_s = 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 7,0$ мм/мин; шлам реальный



Так и в данном случае, абсолютные значения критической бесприжоговой подачи $v_{\text{кр}}$ во всем диапазоне изменения c_o (от 0 до 1,5 г/л) при шлифовании на скорости 50 м/с были несколько больше, чем при скорости 35 м/с (кривые 2 и 1 на рис. 3.4). Правда, при этом и темп уменьшения $v_{\text{кр}}$ с увеличением c_o при $v_k = 50$ м/с был больше, чем при $v_k = 35$ м/с. Подсистема очистки СОЖ является обязательной частью любой СП СОЖ. Как будет показано далее, операции очистки СОЖ непременно входят в технологические процессы защиты СОЖ от микробиологического поражения, восстановления отработанной СОЖ, извлечения и переработки шламового продукта и «инородных» масел, на основе которых строятся ресурсосберегающие экологизированные СП СОЖ.

При создании замкнутой СП СОЖ для различных видов механической обработки подсистема очистки СОЖ, являющаяся ее составной частью, должна удовлетворять следующим требованиям: 1) концентрация посторонних примесей в СОЖ не должна превышать допустимых значений в течение всего срока эксплуатации СОЖ; 2) производительность очистки СОЖ должна быть постоянной; 3) в очистителях СОЖ не должна разрушаться, ухудшать структуру, а следовательно, свои функциональные и эксплуатационные свойства; 4) подсистема должна функционировать в автоматическом режиме при минимальных потерях СОЖ; 5) подсистема должна быть компактной и надежной в эксплуатации.

На рис. 3.7 приведена классификация подсистем очистки СОЖ, выполненная на основе анализа производственного опыта и научно-технической информации [60, 66, 89] с целью выявления наиболее предпочтительных решений для использования в ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ.

С точки зрения наиболее полной реализации принципов организации замкнутых безотходных циклов и системной экологизации технологического процесса применения СОЖ (см. гл. 1) целесообразно использовать централизованные и групповые подсистемы очистки, так как в этих подсистемах гораздо проще и экономичнее, чем в индивидуальных, решаются вопросы очистки, восстановления, контроля СОЖ, а также организации подсистемы переработки шламов.

По этой же причине в ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ предпочтительно использовать стационарные подсистемы очистки СОЖ (по сравнению с переносными).

Выбор способа и устройства для очистки СОЖ (рис. 3.8), обеспечивающих требуемые показатели чистоты СОЖ (табл. 3.4), диктуется рядом технологических условий: видом операций механической обработки; гранулометрическим составом и физико-химическими свойствами механических примесей, попадающих в жидкость в процессе обработки заготовок; составом применяемых СОЖ и их расходом; требованиями к качеству поверхностей деталей.

Наиболее простыми и неотъемлемыми технологическими элементами практически любой централизованной и групповой подсистемы очистки СОЖ являются гравитационные очистители (баки-отстойники), в которых осуществляют предварительную очистку СОЖ от крупнодисперсных механических примесей. К их недостаткам относятся малая скорость сепарации, что приводит к необходимости увеличения размеров (объемов) отстойников, и длительный контакт шлама с СОЖ, приводящий к деградации последней. Вследствие этого гравитационные очистители целесообразно использовать в сочетании с другими устройствами.

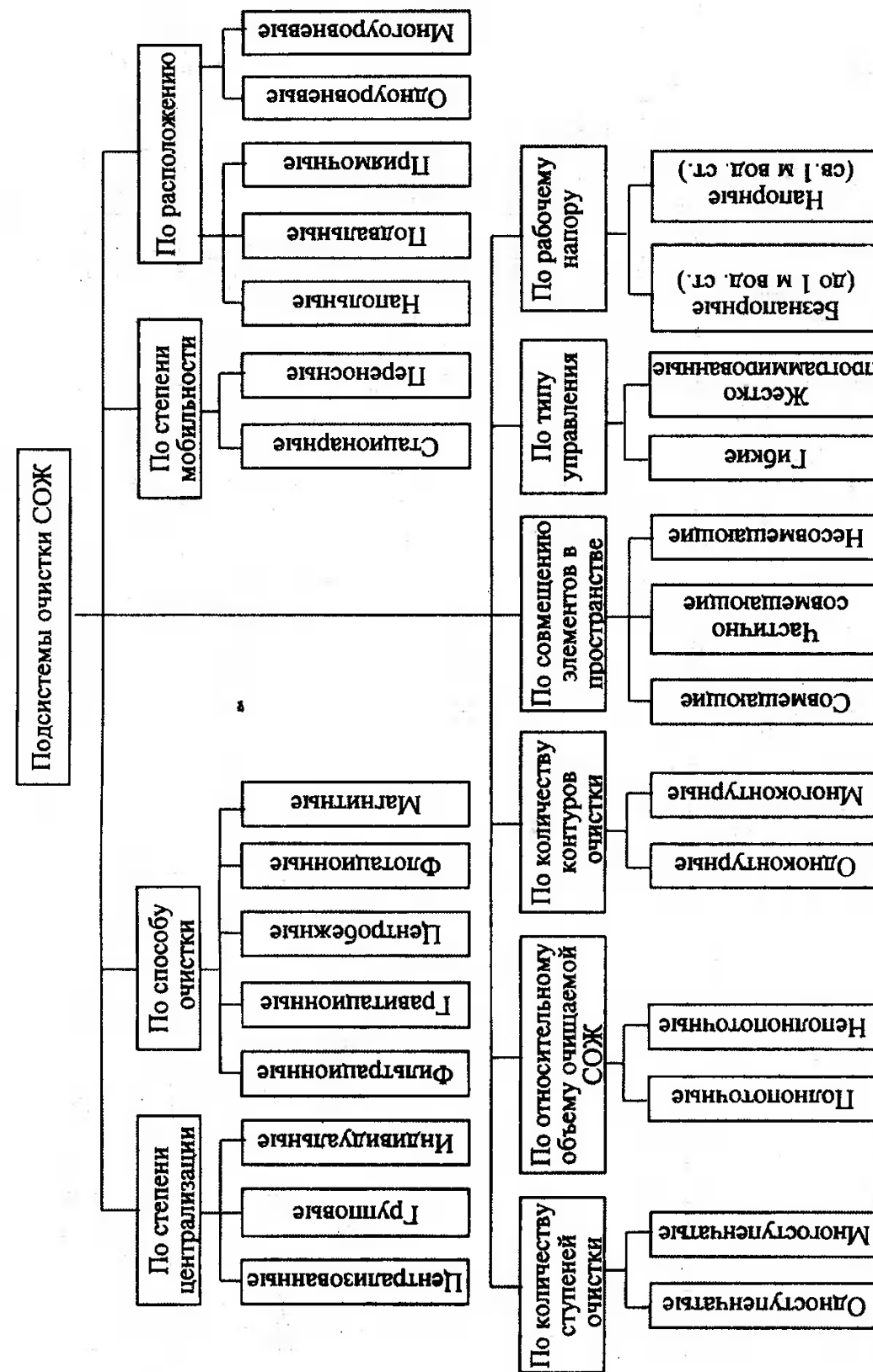


Рис. 3.7. Классификационная схема подсистем очистки СОЖ

3.4. Основные характеристики и области предпочтительного применения устройств для очистки СОЖ

Вид очистителя	Техническая характеристика		Предпочтительная область применения				Примечание
	Производительность, л/мин	Тонкость очистки d_{50} , мкм	Класс СОЖ	Допустимая загрязненность СОЖ $C_{гр}$, г/л	Вид шлама	Ограничения на размеры частиц шлама, мкм	
Фильтры намывные	150...10000	2...5	Любой	0,5	Любой	Нет	Рекомендуются как ступень окончательной очистки; бесперспективны в экологизированных ресурсосберегающих СП СОЖ
Фильтры патронные	3...300	0,1...10	Любой	0,5	Любой	Нет	
Фильтры с регулируемым фильтровальным полотном (самоочищающиеся)	25...200	3...40	Водные	≤ 5	Любой	Зависят от фильтрующего материала	Рекомендуются как ступень окончательной очистки
Фильтры сетчатые	30...400	40...500	Любой	≤ 10	Любой	Зависят от размеров ячейки сетки	Бесперспективны
Отстойники	Зависит от рабочего объема	100...500	Любой	Любая	Любой	Нет	Рекомендуются как ступень предварительной очистки
Фильтры-транспортёры	до 1000	25	Водные	0,5	Любой	Нет	Рекомендуются как ступень окончательной очистки

Вакуум-фильтры	≤ 15000	10...15	Водные	0,5	Шлифовальный	Нет	Рекомендуются как ступень окончательной очистки
Фильтры щелевые	≤ 15000	80...125	Любой	≤ 1	Любой	Нет	Рекомендуются как ступень окончательной очистки
Магнитные сепараторы: барабанные электромагнитные кассетные цепные	5...300 20...2400 20...340000 20...15000	20...75 10...50 3...5 5...10	Любой	Любая $\leq 0,5$ г/л Любая Любая	Ферромагнитный	Нет	Рекомендуются как обязательный элемент подсистемы очистки СОЖ от ферромагнитных примесей
Центрифуги	≤ 150	0,5...2	Любой	≤ 1	Любой	Нет	Рекомендуются для тонкой очистки в индивидуальных СП СОЖ и во втором контуре двухконтурных подсистем очистки СОЖ
Гидроциклоны	20...100	5...15	Синтетические и эмульсионные	≤ 10	Кроме легких сплавов	≥ 10	Бесперспективны в экологизированных ресурсосберегающих СП СОЖ
Флотаторы	≤ 12000	5...10	Высокоустойчивые синтетические и эмульсионные	0,4...0,5	Любой	≤ 30 мкм	Рекомендуются для тонкой очистки от мелкодисперсных частиц и инородных масел



Рис. 3.8. Устройства для очистки СОЖ

Наилучшую тонкость очистки обеспечивают фильтры, однако необходимость использования вспомогательных расходных фильтрующих материалов и их последующей утилизации, высокая степень истощаемости СОЖ, ограниченная нагрузка на фильтрующие элементы ($c_{\text{н}} = 0,3 \dots 0,5$ г/л), сложность эксплуатации существенно ограничивают применение фильтров в ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ. Одним из возможных путей решения этой задачи является ресурсосберегающее фильтрование СОЖ в самоочищающихся фильтрах с регенерируемым фильтрующим полотном. В этом случае исключается необходимость использования дорогостоящих фильтровальных материалов и затраты на его утилизацию.

Центрифуги обеспечивают относительно небольшую производительность очистки (до $150 \text{ м}^3/\text{ч}$) с высокой тонкостью очистки. Однако из-за сложности эксплуатации, высокой энергоемкости, недостаточной долговечности, потерь дисперсной фазы в эмульсионных СОЖ, нагрева СОЖ в процессе эксплуатации центрифуги используют обычно на операциях тонкого шлифования, хонингования, суперфиниширования, т.е., как правило, в индивидуальных системах применения СОЖ [83].

Гидроциклоны и батареи из них [53] обеспечивают относительно высокую степень очистки – $\epsilon = 85 \dots 92 \%$. В гидроциклоне не происходит истощения эмульсионных СОЖ благодаря отсутствию фильтрующих элементов, но очистка масляных СОЖ затрудняется из-за высокой их вязкости. Существенным недостатком гидроциклонов является их повышенный абразивный износ [6, 83] и забивание крупными примесями, а также нагрев СОЖ в процессе очистки.

Флотаторы, обладая существенными преимуществами, – простота конструкции, надежность в работе, возможность удаления «инородных» масел, в то же время не удаляют механические примеси размером более $15 \dots 20 \text{ мкм}$ и занимают большие площади [6, 84].

Магнитные сепараторы, естественно, отделяют от СОЖ преимущественно ферромагнитные частицы. Барабанные магнитные сепараторы, выпускаемые серийно, просты в эксплуатации, имеют низкую энергозатратность и сравнительно невысокую стоимость, их использование не приводит к истощению СОЖ и повышению ее температуры. Однако степень очистки СОЖ в барабанном магнитном сепараторе невысока (не более 70 %) вследствие высокой скорости потока СОЖ в сепараторе. Этот недостаток устранен в конструкциях патронных магнитных сепараторов, разработанных в УлГТУ.*

Кассетные и цепные патронные магнитные сепараторы обеспечивают высокую степень очистки СОЖ благодаря малой скорости потока жидкости в магнитной системе сепаратора, имеют малую энергоемкость и сравнительно невысокую стоимость (особенно цепные), не требуют расходных материалов, просты в обслуживании, компактны. Однако цепные сепараторы не рекомендуется использовать для очистки СОЖ на операциях абразивной обработки, так как они имеют большое число подвижных соединений, подверженных быстрому износу при попадании в них абразивных частиц. Кассетные магнитные сепараторы лишены недостатков, присущих цепным и барабанным магнитным сепараторам.

Из анализа данных, приведенных в табл. 3.4, следует, что в настоящее время нет очистителей, которые можно было бы однозначно рекомендовать для тех или иных условий. Поэтому реализация принципа функционально-структурного соответствия при создании экологизированной ресурсосберегающей СП СОЖ требует комбинирования в подсистеме очистки нескольких устройств таким образом, чтобы они взаим-

* Авторские свидетельства на изобретения N 1155434, 1346413 (СССР), 1755929, 2004980, 2027473, 2036691 (РФ); патенты РФ N 2096340, 2097107, 2097166, 2106179, 2109548, 2109576, 2119374.

но дополняли друг друга, компенсируя присущие каждому из них недостатки. Соединение устройств в подсистеме очистки осуществляют последовательно (многоступенчатые очистители) либо параллельно (многоконтурные очистители). Предпочтительные с точки зрения экологии и ресурсосбережения технологии многоступенчатой и многоконтурной очистки СОЖ сведены в табл. 3.5.

Многоступенчатая схема организации подсистемы очистки, примеры которой приведены на рис. 3.9, обеспечивает существенное повышение качества очистки СОЖ (тонкости и степени очистки) путем последовательного соединения различных очистителей. При разработке многоступенчатых схем очистки СОЖ следует отдавать предпочтение безнапорным элементам (работающим при напорах порядка 0,2...1 м водного

3.5. Предпочтительные технологические процессы очистки СОЖ

Вид обработки	Материалы заготовок	Технологическая схема		
		многоступенчатая	двухконтурная	
			Первый контур	Второй контур
Машиностроение	Лезвийная обработка	Стали	Флотация	Магнитная сепарация
		Чугуны		Центрифугирование, седиментация
		Цветные металлы и сплавы		
	Абразивная обработка	Стали незакаленные		Магнитная сепарация
		Стали закаленные		
		Чугуны	Флотация, магнитная сепарация	Центрифугирование, седиментация
Металлургия	Прокатка	Цветные металлы и сплавы	Флотация	
		Черные металлы	Флотация, магнитная сепарация	Центрифугирование, седиментация
		Цветные металлы и сплавы	Флотация	

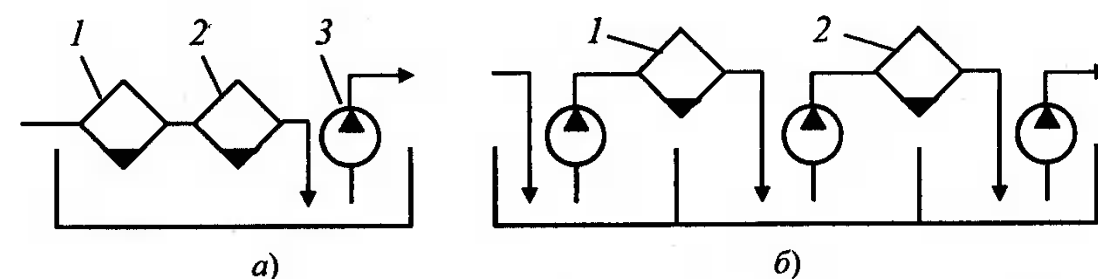


Рис. 3.9. Схемы многоступенчатой однонасосной (а) и многонасосной (б) подсистемы очистки СОЖ:

1, 2 – различные очистители; 3 – насос

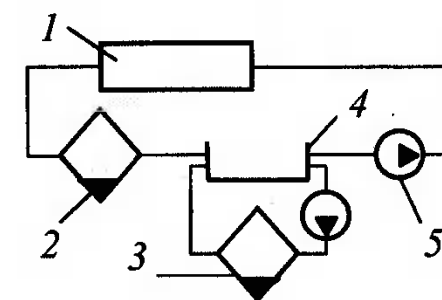
столба), что позволяет использовать однонасосные схемы (рис. 3.9, а), уменьшить размеры подсистемы очистки СОЖ, ее стоимость, энергопотребление, при этом уменьшаются утечки СОЖ путем сокращения числа насосов. Многоконтурная схема предназначена как для увеличения производительности очистки, так и для решения такой сложной и трудоемкой задачи, как предотвращение накопления мелкодисперсных (размером менее 5 мкм) механических примесей в СОЖ, которые, имея более развитую поверхность по сравнению с тем же массовым количеством крупнодисперсных частиц, ускоряют в 2 – 10 раз процесс расслоения эмульсионных СОЖ.

При многоконтурной схеме функция очистки СОЖ распределяется между несколькими контурами. Например, по схеме, показанной на рис. 3.10, в первом контуре производится высокопроизводительная очистка СОЖ от «инородных» масел и средне- и крупнодисперсных механических примесей, во втором – неполнопоточная (с производительностью 3...5 % производительности первого контура) тонкая очистка СОЖ с целью подавления тенденции к накоплению в ней мелкодисперсных частиц механических примесей.

Поскольку производительность второго контура невелика, капитальные затраты, связанные с его организацией, незначительны. Произ-

Рис. 3.10. Схема двухконтурной подсистемы очистки СОЖ:

1 – технологическое оборудование; 2 – очиститель первого контура; 3 – очиститель второго контура; 4 – емкость; 5 – насос



водственный опыт свидетельствует о высокой экономической и технологической эффективности двухконтурной неполнопоточной очистки в централизованных СП СОЖ в машиностроении и металлургии. Кроме того, двухконтурная организация подсистем очистки с неполнопоточным (низкопроизводительным) вторым контуром открывает возможности для расширения области применения центрифуг (в качестве очистителя второго контура) и вытеснения намывных фильтров, применение которых, как отмечалось ранее, не в полной мере отвечает принципам построения ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ.

С учетом тенденции к объединению в подсистеме очистки нескольких принципиально различных очистителей (см. табл. 3.5) важной задачей при проектировании подсистем очистки является снижение их материало- и энергоемкости за счет оптимизации размеров и расположения отдельных устройств. В этой связи, перспективными подсистемами очистки СОЖ являются те, в которых максимально совмещены в пространстве элементы отдельных устройств. Значительную экономию рабочего пространства обеспечивают системы с пространственным совмещением элементов (рис. 3.11), например, очистителя с емкостью для сбора СОЖ.

Резервом уменьшения размеров гравитационных очистителей является использование эффекта магнитной коагуляции частиц шлама. Этому вопросу посвящен п. 4.1.

В УЛГТУ разработан целый ряд технологических, схемотехнических и конструктивных решений, отвечающих требованиям ресурсосбережения, экологичности и эффективности очистки, большинство из которых защищено авторскими свидетельствами и патентами на изобретения. Оригинальная технология очистки СОЖ «Вита-С» (см. пп. 5.1, 5.2), совмещающая в одной емкости седиментационную, флотационную и магнитную очистку жидкости и позволяющая перейти на бессточную эксплуатацию СОЖ, отмечена дипломами, золотыми и серебряными медалями международных выставок в Брюсселе и Париже.

Использование технологии «Вита-С» позволяет нейтрализовать недостатки, присущие каждому очистителю в отдельности. Так, совме-

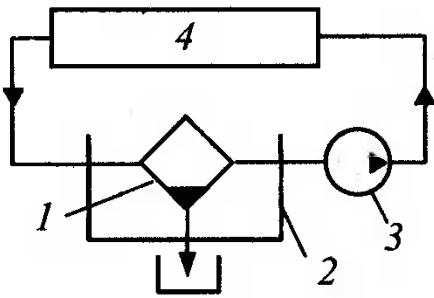


Рис. 3.11. Схема подсистемы очистки СОЖ с пространственным совмещением элементов:
1 – очиститель; 2 – емкость; 3 – насос;
4 – технологическое оборудование

ние флотационной и гравитационной очистки в одной емкости позволяет существенно сократить площадь, занимаемую установкой. Кроме того, уменьшение размеров гравитационного очистителя возможно за счет действия следующих факторов: магнитной коагуляции частиц шлама и, как следствие, увеличения скорости седиментации; очистки СОЖ только от крупных частиц шлама (размером более 20...30 мкм), так как более мелкие удаляются флотацией и магнитной сепарацией.

Для выбора рациональных схемотехнических решений и размеров очистителей, входящих в установку для очистки СОЖ «Вита-С», необходимо осуществить математическое моделирование процессов, происходящих в отмеченных выше очистителях, с учетом их взаимовлияния. Эти вопросы рассмотрены в гл. 4.

Концепция ресурсосберегающей экологизированной технологии применения СОЖ предполагает минимизацию времени контакта СОЖ с частицами механических примесей и «иноподобными» маслами. Следовательно, подсистема очистки СОЖ должна функционировать непрерывно. Поскольку рабочий цикл большинства типов очистителей состоит из полезного (собственно очистка СОЖ) и разгрузочного (удаление из очистителя извлеченных продуктов) этапов, то в ряде случаев эффективна параллельная схема соединения очистителей (рис. 3.12) с попеременным их включением таким образом, чтобы синхронизировать полезный цикл одного очистителя с циклом разгрузки другого и наоборот. Такая схема обеспечивает непрерывную очистку СОЖ, а также позволяет избежать загрязнения СОЖ вследствие аварийного выхода из строя какого-либо очистителя.

Для управления циклом очистки ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ целесообразно использовать модули гибкого управления (см. п. 4.4).

В ряде случаев целесообразно использовать подсистемы очистки СОЖ с регулируемыми (рис. 3.13) технологическими элементами. Как показывает производственный опыт [11, 15], в СП СОЖ в связи с неизбежным в процессе их функционирования периодическим повышением концентрации c_n механических примесей в загрязненной СОЖ, происходит также повышение концентрации примесей в очищенной СОЖ c_o (при постоянной степени очистки ϵ). Это приводит к ухудшению качественных показателей изготавливаемой продукции. Поэтому необходимо, чтобы ϵ изменялась в соответствии с изменением c_n таким образом, чтобы стабилизировать на требуемом уровне величину c_o . Это представ-

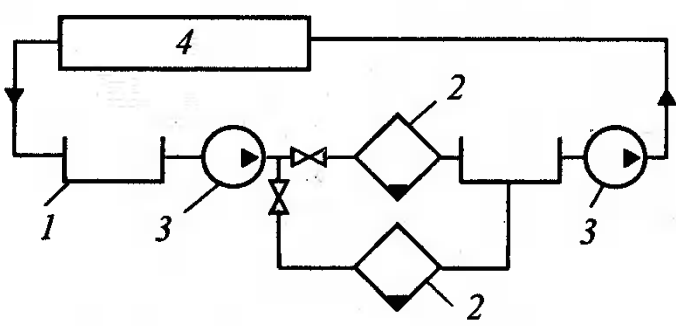


Рис. 3.12. Схема подсистемы очистки СОЖ с попеременно включаемыми технологическими элементами:
1 – емкость; 2 – очиститель; 3 – насос; 4 – технологическое оборудование

ляется возможным, если в очистителе при регулировании того или иного конструктивного или режимного фактора изменялась бы ϵ и, следовательно, c_0 .

Возможности использования электромагнитного сепаратора (ЭМС) как регулируемого очистителя СОЖ на операциях шлифования показывает рис. 3.14. Увеличение напряженности H магнитного поля в ЭМС приводит к повышению степени очистки СОЖ ϵ и снижению концентрации шлифовального шлама в очищенной СОЖ c_0 , что ведет к уменьшению параметра Ra .

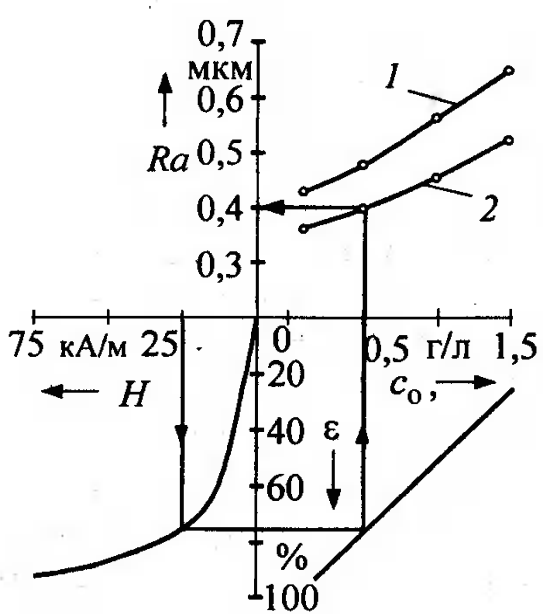


Рис. 3.14. Зависимость Ra шлифованной поверхности от степени очистки СОЖ ϵ в регулируемом ЭМС: образцы из стали 45, HRC 52...55; круг 24A12НСМ28К5; СОЖ – 3 %-ная эмульсия Укринол-1М (1) и 3 %-ный раствор Аквол-10М (2); скорость продольной подачи $v_s = 28$ м/мин; врезная подача $S_n = 0,005$ мм/ход; число проходов $n = 30$; $c_n = 2$ г/л; кривые построены по соответствующим регрессионным моделям

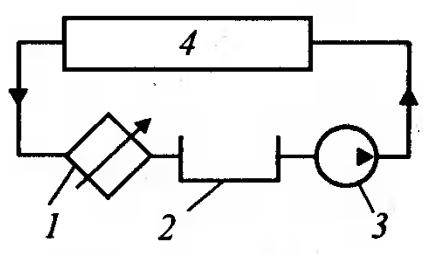


Рис. 3.13. Схема подсистемы очистки СОЖ с регулируемым технологическим элементом:
1 – регулируемый элемент; 2 – емкость; 3 – насос; 4 – технологическое оборудование

Таким образом, использование ЭМС в подсистеме очистки СОЖ позволяет стабилизировать качество выпускаемой продукции и содержание механических примесей в СОЖ. Математическое моделирование процесса очистки СОЖ в ЭМС, проведенное с целью выявления рациональных размеров его магнитной системы и режимных параметров, представлено в гл. 4.

Экономию материальных и энергетических ресурсов многоконтурные системы обеспечивают при обслуживании оборудования с различными требованиями к качеству СОЖ (рис. 3.15). Оборудование 1-й группы, не требующее тонко очищенной СОЖ, обслуживается подсистемой очистки 3. СОЖ, подаваемая на оборудование 2-й группы (требующее тонко очищенную СОЖ), дополнительно очищается в подсистеме очистки 4. Использование предложенного схмотехнического решения позволяет во много раз уменьшить капитальные затраты при прочих равных условиях.

В последнее время появляются предложения о целесообразности использования напольных СП СОЖ (рис. 3.16, в). В таких системах используют элеваторные (перегрузочные) элементы, позволяющие обойтись без сооружения подвальных помещений. Последние дороги, снижают гибкость производства и негативно сказываются на уровне вибраций и точности основного технологического оборудования. К тому же при необходимости модернизации, замены или ремонта СП СОЖ, расположенных в подвальных помещениях (см. рис. 3.16, а), зачастую возникают значительные трудности монтажа или демонтажа крупногабаритных устройств, приводящие к увеличению денежных затрат. Преимущество прямого размещения систем эксплуатации СОЖ заключается в возможности использования безнапорных систем слива СОЖ от технологического оборудования (рис. 3.16, б).

Примеры реализации принципов построения ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ в подсистеме очистки представлены в табл. 3.6.

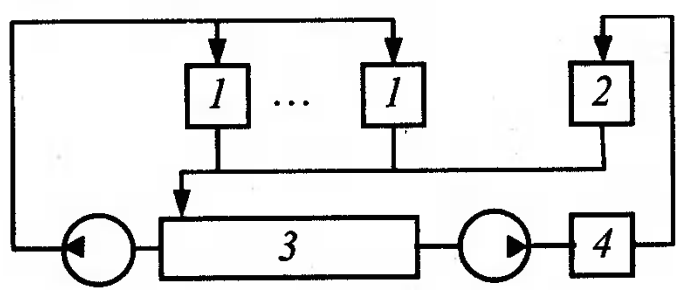
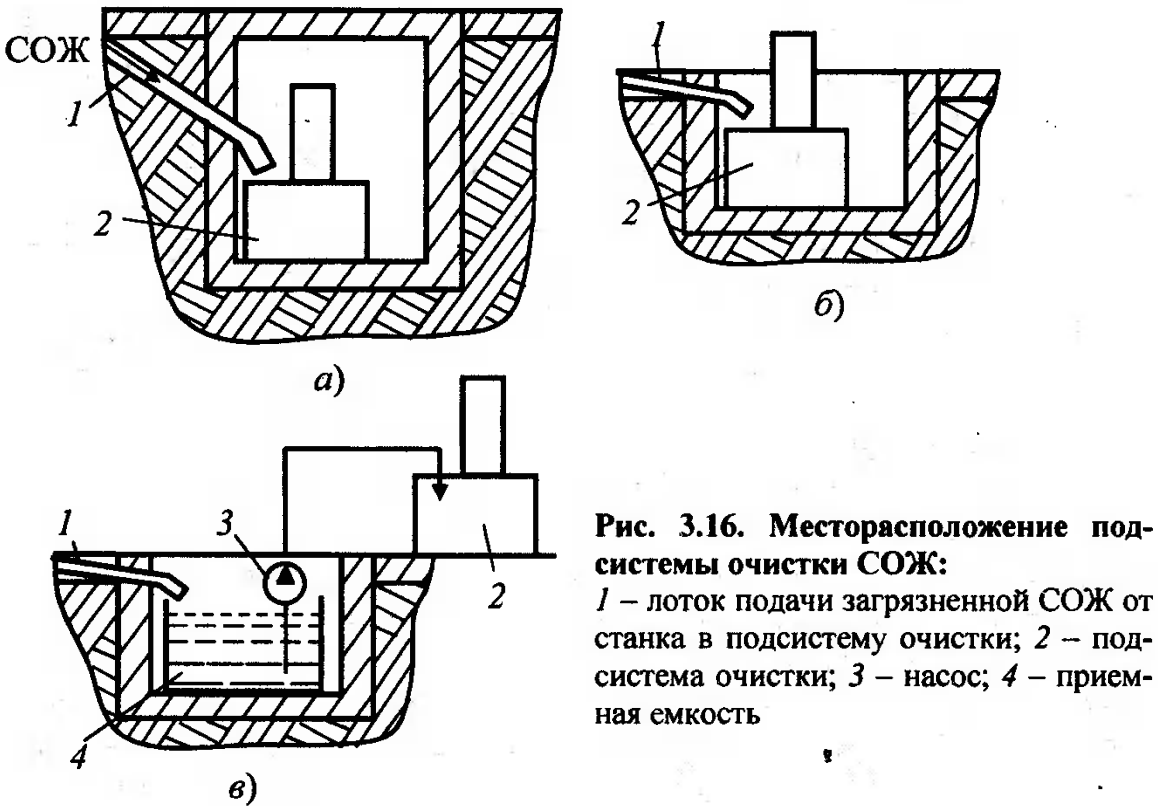


Рис. 3.15. Схема подсистемы очистки СОЖ с дополнительной очисткой части потока жидкости:
1 – оборудование 1-й группы; 2 – оборудование 2-й группы; 3, 4 – подсистемы очистки СОЖ



3.6. Примеры реализации принципов построения ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ в подсистеме очистки

Принципы построения СП СОЖ		Технические средства реализации
1		2
Общетехнические	Малая энергозатратность	Использование неполнопоточных контуров очистки и кассетных патронных магнитных сепараторов
	Гибкое адаптивное управление	Электронный модуль контроля текущего состояния СОЖ и управления системой очистки (см. п. 4.4)
	Функциональное структурное соответствие	Выбор типа очистителя в соответствии с типом шлама (табл. 3.5)
	Исключение слабого звена	Использование кассетного магнитного патронного сепаратора

Продолжение табл. 3.6

1		2
Общетехнические	Оптимизация размеров установки и ее расположения	Совмещение седиментационной, флотационной очистки и магнитной сепарации в одной емкости; удаление части шлама в транспортной подсистеме; многоконтурные подсистемы очистки; а. с. 2036691
	Оптимальное расположение всех элементов системы	
	Совмещение технологических элементов в пространстве	
Специализированные	Исключение фильтровальных материалов	А.с. 1785722. Ресурсосберегающие фильтры; флотаторы и магнитные сепараторы
	Исключение или минимальное использование биоцидов	Непрерывная очистка СОЖ от механических примесей и «инородных» масел
	Использование межвидовой конкуренции микроорганизмов в СОЖ	Периодическая аэрация (эжектор) и термообработка СОЖ (пастеризатор)
	Максимальная системная утилизация отходов	А. с. 1554409, 1545377; патенты РФ 2097166, 2083694; введение эколого-технологических и экологических модулей
	Предотвращение негативного воздействия вредных факторов	
	Минимизация времени нахождения шлама в СОЖ	Непрерывное извлечение шлама скребковыми конвейерами из емкостей СП СОЖ и ее транспортной подсистемы
	Организация замкнутых циклов использования СОЖ	Подсистема рециклизации СОЖ
	Системная экологизация вспомогательного производства по применению технологических жидкостей	Использование эколого-технологических и экологических модулей
	Обратимость всех процессов, протекающих в оборотной СОЖ	
		Подсистема восстановления СОЖ

3.3. ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ СОЖ ОТ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ

В настоящее время все острее становится проблема защиты СОЖ от микробиологического поражения, сопровождающегося разложением жидкостей, лимитирующим срок их функционирования и обуславливающим необходимость сброса отработанной СОЖ на рециклизацию или разложение [24, 45]. Изучение причин, вызывающих микробиологическое поражение СОЖ, позволит разработать эффективную технологию борьбы с ним и, тем самым, увеличить срок функционирования СОЖ, что является одной из основных задач настоящей работы.

Современные СОЖ содержат, как правило, целый комплекс компонентов, в том числе органических веществ, являющихся питательной средой для микрофлоры. Вследствие особенностей состава питательной среды водомасляные эмульсии и полусинтетические СОЖ преимущественно поражаются бактериальной микрофлорой, а синтетические СОЖ – плесневыми и дрожжевыми грибами. Этому способствует и то, что в присутствии большого количества бактерий грибки не развиваются. В отличие от водных СОЖ попадание микроорганизмов в масляную СОЖ не приводит к их диффузному распространению по всему объему жидкости, а очаги биопоражения располагаются на поверхности СОЖ и на стенках емкостей системы ее применения. Поэтому защита масляных СОЖ от биопоражения, как правило, не вызывает существенных затруднений.

В наибольшей степени микробиологическому поражению подвержены водомасляные эмульсии [124]. В связи с этим материал данного параграфа в основном посвящен разработке технологии защиты от микробиологического поражения эмульсионных СОЖ.

Видовой состав поражающих СОЖ микроорганизмов можно разделить на два типа: анаэробные – сульфатредуцирующие бактерии, которые делятся на два рода *Desulfomaculatum* (спорообразующие) и *Desulfovibrio* (не способные к спорообразованию); аэробные – бактерии рода *Pseudomonas*, *Bacterium*, *Mycobacterium*, грибы, дрожжи (*Nocardia*), серобактерии.

Для подавления микроорганизмов в СОЖ предложено довольно много методов – физических (ультрафиолетовое, электромагнитное и ионное облучение, термопастеризация, ультразвуковая обработка, озонирование), химических (биоцидная обработка), механических (принудительная циркуляция, фильтрование, центрифугирование, удаление «инородного» масла и пены).

Физические методы подавления микроорганизмов, кроме пастеризации, не обеспечивают стойкого эффекта при борьбе со спорообразующими бактериями (п. 3.4). Использование же пастеризации СОЖ в процессе ее функционирования затруднительно. Поэтому физические методы не нашли широкого практического применения.

Получившие в настоящее время наиболее широкое распространение химические методы подавления микроорганизмов благодаря использованию биоцидных и антимикробных препаратов (гексахлорофен, гротан, капотин, ортофенилфенолят натрия и др.) не всегда эффективны. С одной стороны, это связано с адаптацией микроорганизмов к применяемым препаратам, с другой – с потерей антимикробной активности последних за счет их химического, термического или биологического разрушения в процессе эксплуатации СОЖ. К тому же подбор биоцидов часто затруднен вследствие их избирательного действия на микроорганизмы, что, в свою очередь, связано с необходимостью разрабатывать биоциды для каждого конкретного состава СОЖ.

Очевидно, что для успешного предотвращения микробиологического поражения СОЖ целесообразно использовать межвидовой антагонизм аэробных и анаэробных микроорганизмов путем создания на разных этапах эксплуатации СОЖ условий, благоприятных для жизнедеятельности бактерий определенного вида и одновременно способствующих подавлению антагонистических бактерий. Например, при насыщении СОЖ кислородом воздуха (аэрации) путем подачи его через эжектор уменьшается число анаэробных бактерий при соответствующем росте числа аэробных микроорганизмов. Таким образом, периодически насыщая СОЖ воздухом, можно предотвращать рост численности анаэробов и общей численности бактерий.

Экологичны и достаточно эффективны перечисленные выше механические методы защиты СОЖ от микробиологического поражения. Их комплексное использование вместе с периодической аэрацией СОЖ позволит значительно продлить срок функционирования СОЖ и одновременно исключить применение биоцидов.

Для проверки высказанных предположений проведены экспериментальные исследования микробиологического поражения 3 %-ных эмульсий Укринол-1М и Автокат-78. Исследования проводили на круглошлифовальном станке 3Б151, оснащенном индивидуальной системой очистки СОЖ и эжектором для ее аэрации. Шлифовали образцы из стали 40Х, НРС 40...45. Провели три серии опытов: в первой (базовой) серии СОЖ не подвергали каким-либо специальным воздействиям (очистке, аэрации); во второй – проводили непрерывную очистку СОЖ от механиче-

ских примесей и «инородных» масел в установке на основе магнитного сепаратора и флотатора, а также осуществляли непрерывную аэрацию СОЖ путем эжектирования; в третьей серии опытов проводили непрерывную очистку СОЖ от механических примесей и «инородных» масел и ее периодическую аэрацию в течение двух часов с помощью эжектора с периодичностью, определяемой по результатам анализа проб СОЖ. Аэрацию проводили в случае превышения концентрации анаэробных бактерий в пробах СОЖ 10^5 клеток/мл.

Пробы жидкостей отбирали из емкостей СП СОЖ стерильными шприцами 2 раза в сутки. Для изучения динамики численности бактерий определяли: 1) общую численность микроорганизмов в СОЖ путем подсчета бактерий на мембранных фильтрах; 2) численность сапрофитных аэробных бактерий путем посева проб СОЖ методом десятикратных разведений на масс-пептонный агар; 3) численность анаэробных сульфатредуцирующих бактерий путем посева проб СОЖ методом десятикратных разведений на жидкую среду Постгейта «Б».

В первой серии опытов наблюдали увеличение численности анаэробных бактерий (рис. 3.17): их концентрация c_N в эмульсии Автокат-78 увеличилась с 10^4 до $7 \cdot 10^8$ клеток/мл в течение шести суток, а в эмульсии Укринол-1М – в течение десяти суток. Численность аэробных бактерий в обоих случаях сократилось до 10^3 клеток/мл, что связано с отмиранием облигатных аэробов, после чего в СОЖ остались лишь факультативные аэробы и бактерии рода *Bacillus*, способные образовывать споры и таким способом переживать неблагоприятные условия.

Во второй серии опытов наблюдали увеличение числа аэробных и сокращение числа анаэробных бактерий. В течение десяти суток концентрация бактерий в эмульсии Укринол-1М увеличилась до $2 \cdot 10^6$ клеток/мл, а в эмульсии Автокат-78 – до $8 \cdot 10^6$ клеток/мл.

В обеих сериях опытов наблюдали расслоение эмульсий, наступившее на шестые сутки для эмульсии Автокат-78 и на девятые сутки для Укринол-1М. Это объясняется тем, что микроорганизмы усваивают поверхностно-активные вещества, сохраняющие мелкодисперсную структуру масляной фазы эмульсии, что приводит к ее коалесценции. Этот эффект прогрессирует и быстро достигается момент, когда слой масла отделяется и всплывает на поверхность эмульсии. Быстрому расслоению эмульсии во второй серии опытов способствовал также сам процесс непрерывного эжектирования. Результаты исследований подтверждают антагонистический характер аэробных и анаэробных бактерий: увеличение численности одних сопровождается уменьшением численности других.

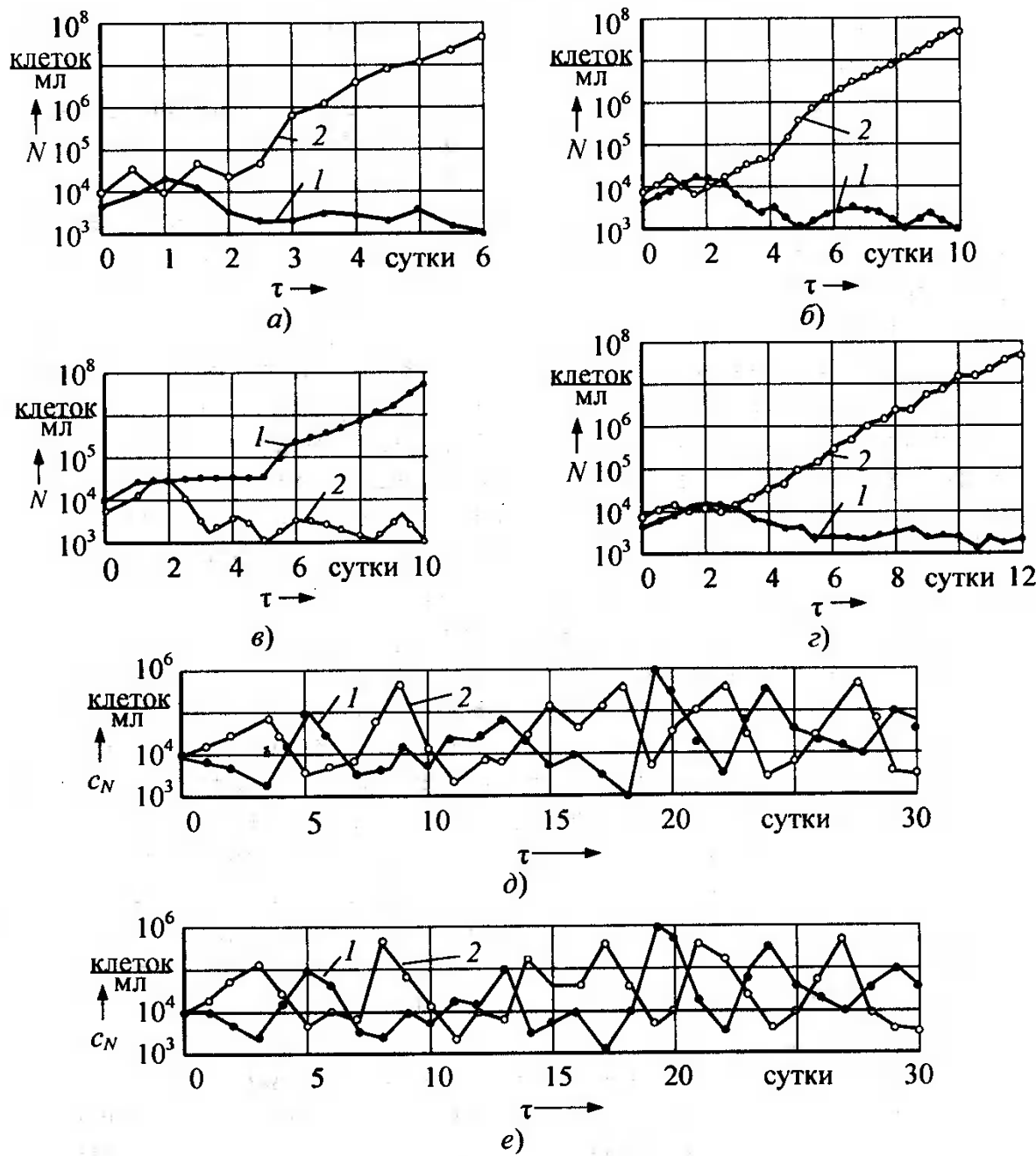


Рис. 3.17. Изменение численности аэробных (кривая 1) и анаэробных (кривая 2) бактерий в СОЖ Автокат-78 (а, в, д) и Укринол-1М (б, г, е) во времени при различных воздействиях на СОЖ: а, б – без специального воздействия на СОЖ; в, г – непрерывная очистка СОЖ от механических примесей и инородных масел и аэрация; д, е – непрерывная очистка СОЖ от механических примесей и инородных масел и периодическая аэрация СОЖ

Применение периодической аэрации СОЖ (см. рис. 3.17, д, е) позволило стабилизировать концентрацию аэробных и анаэробных бактерий в СОЖ в диапазоне от $5 \cdot 10^3$ до 10^6 клеток/мл и не привело к расслоению эмульсии в течение всего времени исследований (30 сут).

Результаты исследований свидетельствуют о возможности управления численностью бактерий в СОЖ и поддержания их концентрации в допустимых пределах – до 10^6 клеток/мл. Однако для определения момента проведения аэрации необходим постоянный мониторинг развития микроорганизмов в СОЖ.

Результаты выполненных исследований позволяют рекомендовать технологию защиты СОЖ от биологического поражения, включающую непрерывную механическую очистку СОЖ от механических примесей, «инородных» масел и пены и периодическую аэрацию СОЖ. Предупредительные меры по обеспечению стабильности СОЖ сводятся к следующему: специальная предварительная обработка воды, используемой для приготовления СОЖ, – умягчение, обеззараживание, очистка от механических примесей; периодическая очистка резервуаров СП СОЖ; поддержание рН СОЖ на уровне 9 – 10 (что позволяет в значительной степени замедлить развитие как аэробных, так и анаэробных микроорганизмов); исключение или стабилизация на минимальном (допустимом) уровне загрязнения СОЖ смазочными маслами и маслами из гидросистем; промывка станков горячей водой с дезинфицирующей добавкой.

Примеры реализации принципов построения ресурсосберегающей экологизированной СП СОЖ в подсистеме борьбы с микробиологическим поражением в установках серии «Вита» сведены в табл. 3.7.

3.7. Примеры реализации принципов построения ресурсосберегающей экологизированной СП СОЖ в подсистеме защиты от биопоражения

Принципы построения СП СОЖ		Способы и средства реализации
1		2
Общете- хнические	Малая энергозатрат- ность	Использование межвидовой конку- ренции микроорганизмов в СОЖ
	Гибкое адаптивное управление	Электронный модуль контроля со- стояния и управления подсистемой

Продолжение табл. 3.7

1		2
Общете- хнические	Оптимизация размеров установки и ее распо- ложения	Мероприятия по борьбе с микро- флорой реализуются в установках приготовления СОЖ и ее очистки
	Совмещение техноло- гических элементов в пространстве	
Специали- зированные	Исключение или мини- мальное использование биоцидов	Непрерывная очистка СОЖ от ме- ханических примесей и «инород- ных» масел, периодическая аэрация и термообработка СОЖ
	Периодическая аэрация СОЖ	

3.4. ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОЖ

Как указано в гл. 1, основными причинами деградации СОЖ, обслуживающих технологические процессы механической обработки, являются: накопление в СОЖ механических примесей и продуктов термического разложения масел; окисление масел в процессе работы; попадание в СОЖ масел, смазок и спецжидкостей из гидравлических систем технологического оборудования; изменение химического состава дисперсной фазы СОЖ под действием неблагоприятных внешних факторов; повышение содержания солей жесткости водной фазы; микробиологическое поражение СОЖ [84].

Основным из перечисленных выше факторов, определяющим срок функционирования СОЖ, является ее микробиологическое поражение. Характерные признаки микробиологического поражения СОЖ – изменение цвета, появление неприятного запаха и всплывшего масла. В этом случае СОЖ необходимо выводить из системы применения на регенерацию.

С экологической и экономической точек зрения наиболее целесообразна регенерация СОЖ без ее разложения на масляную и водную фазу в замкнутых (бессточных) оборотных системах [22, 103]. При этом значительно сокращается объем сточных вод и расход эмульсола.

В УлГТУ проведены экспериментальные исследования процессов, происходящих при нарастающем микробиологическом поражении и последующем восстановлении СОЖ.

Выбор эмульсионной жидкости в качестве объекта исследований в данном случае объясняется ее наибольшей подверженностью микробиологическому поражению и сложностью восстановления по сравнению с другими типами водных СОЖ. Так, например, технология восстановления синтетических СОЖ заключается лишь в тонкой очистке ее от механических примесей и «инородных» масел и последующей коррекции состава путем добавления необходимых компонентов.

Пробы 3 %-ной эмульсии Укринол-1М брали непосредственно из емкости централизованной СП СОЖ, обслуживающей автоматическую линию КМ – 029 в производстве УАЗ.

Как следует из рис. 3.18, цикл микробиологического поражения и восстановления СОЖ можно разбить на три этапа: первый этап (двое суток) – интенсивное нарастание числа бактериальных клеток N в единице объема (1 мл) СОЖ; второй этап (третьи – десятые сутки) – относительная стабильность количества микроорганизмов; третий этап (десятые – двенадцатые сутки) – пастеризация СОЖ и последующая стабилизация количества микроорганизмов. На первом этапе резко уменьшается относительное содержание кислорода c_{O_2} (вследствие выделения газов из СОЖ), одновременно с отстаиванием на вторые сутки происходит снижение порога коагуляции и расслоение СОЖ с выделением темного слоя на поверхности. Число рН уменьшается с 9,8 до 6,0 на восьмые – десятые сутки.

На десятые сутки провели пастеризацию СОЖ при $T = 130^\circ\text{C}$ в течение 10 мин с интенсивным ее перемешиванием и последующей выдержкой в течение 30 мин. Затем следовало быстрое охлаждение СОЖ до $T = 20^\circ\text{C}$. После этого пробы выдерживали в течение двух суток.

На третьем этапе наблюдалось резкое увеличение c_{O_2} , одновременно уменьшилось количество микроорганизмов в пробах до 10^4 кл/мл, относительный порог коагуляции увеличился до 60 %, а число рН достигло 9. В пробах появился тонкий слой осадка темно-серого цвета (пигментированные остатки оболочек микроорганизмов), темный слой на поверхности исчез. Результаты опытов свидетельствуют, во-первых, об инерционности и обратимости процесса микробиологического поражения, а во-вторых, о применимости исследованной технологии восстановления СОЖ для практических целей.

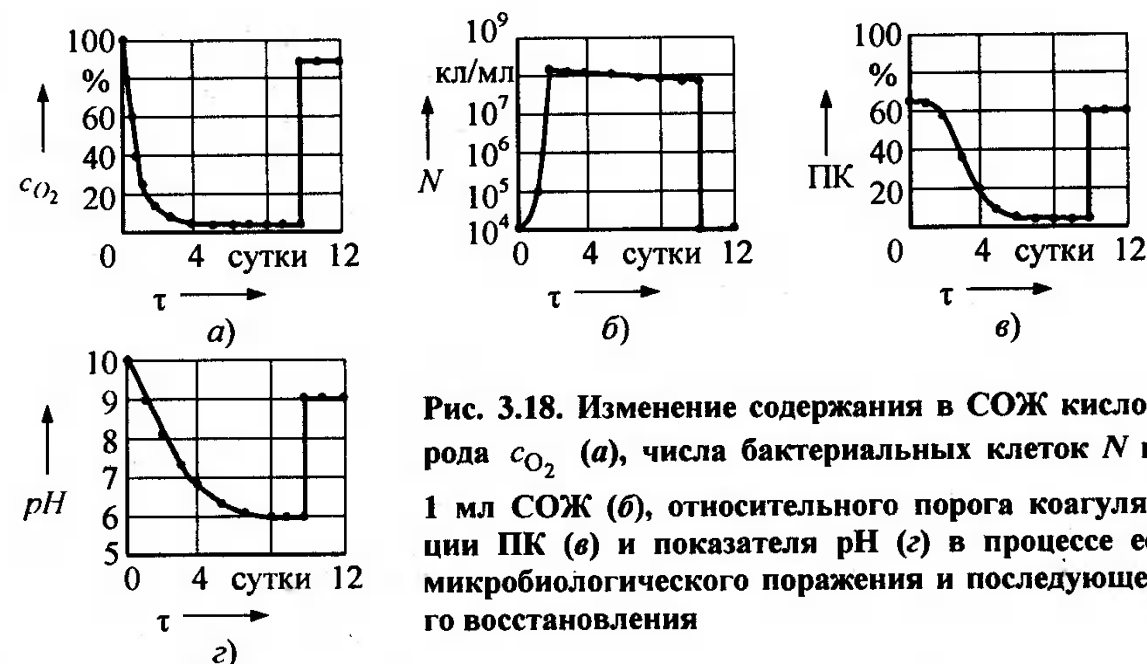


Рис. 3.18. Изменение содержания в СОЖ кислорода c_{O_2} (а), числа бактериальных клеток N в 1 мл СОЖ (б), относительного порога коагуляции ПК (в) и показателя рН (г) в процессе ее микробиологического поражения и последующего восстановления

Сравнительные микробиологические исследования эффективности различных методов обработки 3 %-ной эмульсии Укринол-1М показали, что пастеризация является наиболее эффективным способом борьбы с микроорганизмами (рис. 3.19, а): количество бактерий N сохраняется на уровне 10^3 клеток/мл в течение 6 сут после обработки СОЖ, тогда как ультразвуковое (рис. 3.19, б), ионизационное (рис. 3.19, в) и ультрафиолетовое (рис. 3.19, г) облучение не дают стойкого эффекта. Это объясняется тем, что в конце жизненного цикла бактерии образуют споры – репродуктивные клетки, характеризующиеся пониженным уровнем метаболизма и особой ультраструктурной организацией (экзоспоры и эндоспоры). Основная функция спор – репродукция и (или) сохранение бактерий в неблагоприятных условиях внешней среды. Споры бактерий, эндоспоры, – уникальные покоящиеся формы, которые формируются обычно по одной внутри «материнских» клеток (рис. 3.20). Они обладают специфическими структурами (белковыми покровами, пектидогликановым кортексом, сердцевинной) и содержат, в отличие от вегетативных клеток, дипикотиновую кислоту в виде Са-хелата, благодаря чему споры устойчивы к радиации, высушиванию, действию биоцидов и других неблагоприятных факторов. Множество слоев и оболочек споры надежно защищают нуклеоид – ДНК-содержащую зону клетки – от используемых для бактерицидной обработки СОЖ ультразвуковых, ультрафиолетовых и других видов излучений путем их гашения. После бактерицидной обработки спора попадает в восстановленную СОЖ, прорастает, давая начало новым вегетативным бактериальным клеткам.

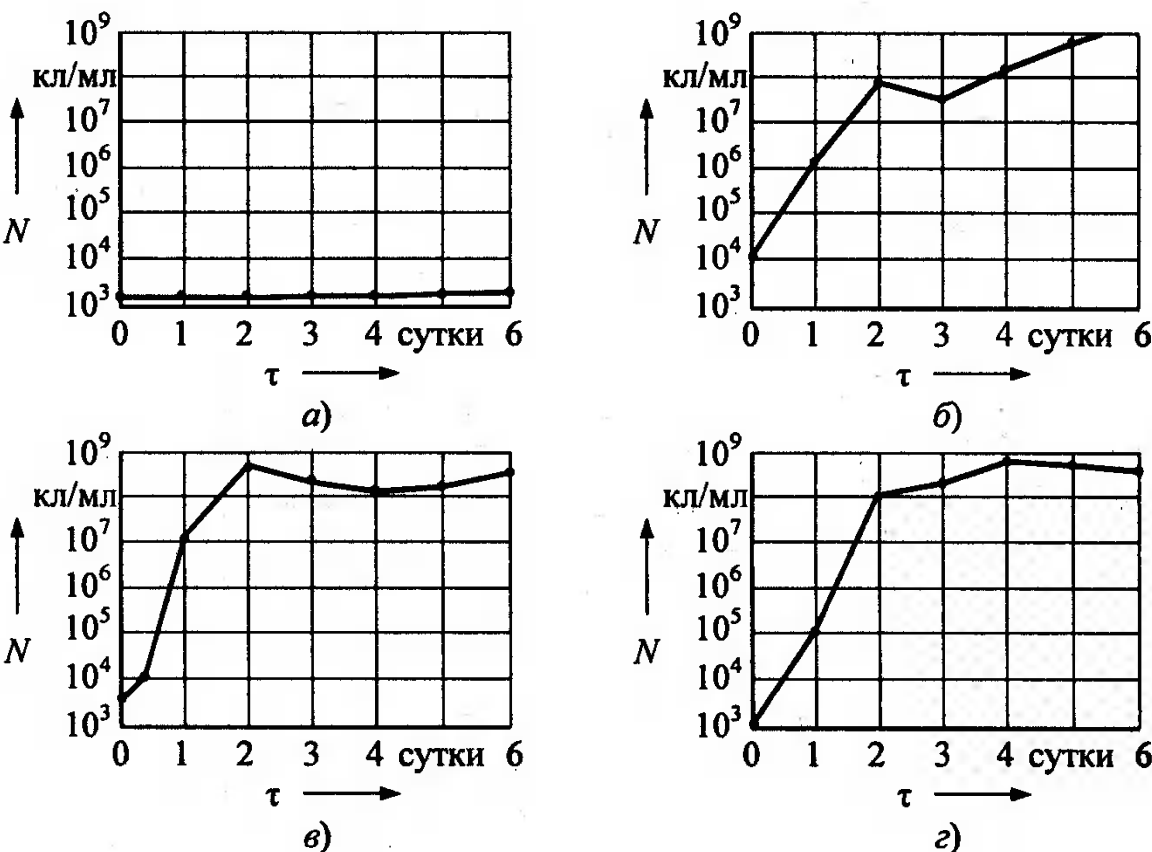


Рис. 3.19. Влияние различных физических методов обработки СОЖ на численность бактерий после восстановления

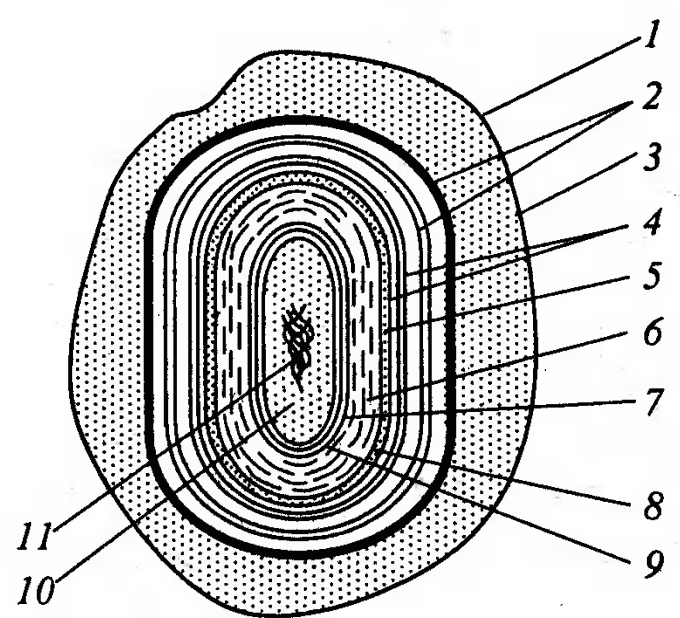


Рис. 3.20. Схема строения зрелой бактериальной эндоспоры:
1 – экоспорум; 2 – внешние слои оболочки; 3 – экоспориальная цитоплазма; 4 – внутренние слои оболочки; 5 – подпокровный слой цитоплазмы; 6 – кортекс; 7 – внутренняя мембрана; 8 – внешняя мембрана; 9 – зачаточный слой клеточной стенки; 10 – цитоплазма сердцевинки споры; 11 – нуклеоид

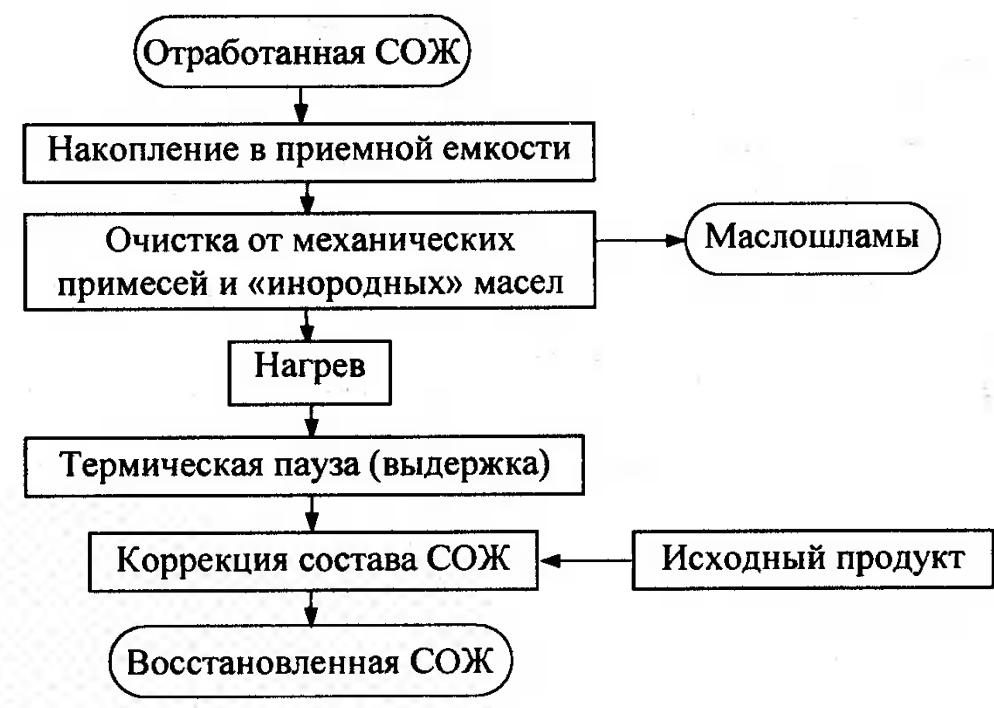


Рис. 3.21. Структурная схема технологического процесса восстановления отработанных водных СОЖ

На основании выполненных исследований предлагается следующая технология восстановления отработанной СОЖ (рис. 3.21): отработанная СОЖ накапливается в приемной емкости, откуда через эжектор, насыщающий ее воздухом, поступает во флотатор; во флотаторе из СОЖ удаляются «инородные» масла, продукты биологического разрушения, остаточные механические примеси, не удаленные в подсистеме очистки; далее СОЖ регенерируют путем термического воздействия на микрофлору. Восстановленная СОЖ накапливается в емкости и после коррекции состава возвращается в производство.

Простейшее решение бессточной индивидуальной системы применения СОЖ представлено схематично на рис. 3.22. СОЖ циркулирует по контуру «станок – модуль очистки». По достижении некоторого значения pH (наиболее удобного параметра для измерения) СОЖ в нерабочее время пропускают через модуль восстановления. Затем происходит коррекция состава СОЖ и возврат ее в контур «станок – модуль очистки».

Аналогично решается проблема восстановления СОЖ и в централизованных системах ее применения (рис. 3.23).

На рис. 3.24 показана принципиальная схема комплекса централизованных СП СОЖ с неполнопоточным периодическим восстановлением

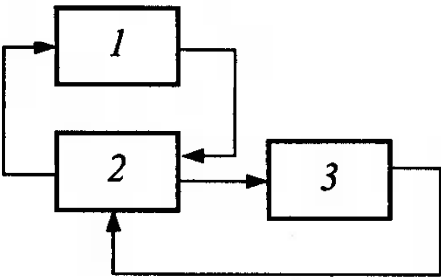


Рис. 3.22. Схема индивидуальной модульной бессточной СП СОЖ: 1 – станок; 2 – модуль очистки СОЖ; 3 – модуль восстановления СОЖ

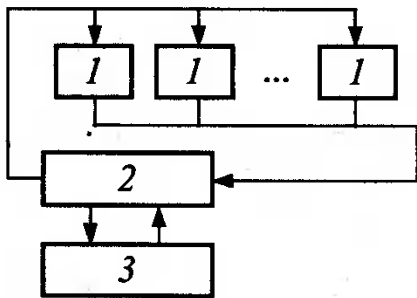


Рис. 3.23. Схема централизованной модульной бессточной СП СОЖ: 1 – станок; 2 – модуль очистки СОЖ; 3 – модуль восстановления СОЖ

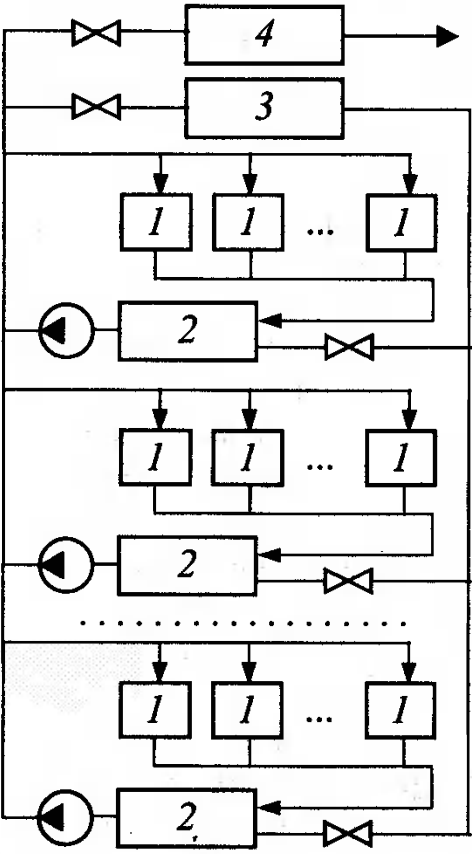


Рис. 3.24. Принципиальная схема комплекса централизованных СП СОЖ с неполнопоточной схемой восстановления: 1 – станок; 2, 3, 4 – модуль соответственно очистки, восстановления и разложения СОЖ

СОЖ. Предлагаемое решение учитывает факт неодновременного биопоражения СОЖ в различных СП и кратковременность ее восстановления. В случае бесперспективности восстановления СОЖ предусмотрено резервное решение – разложение СОЖ. Использование неполнопоточной непрерывной схемы восстановления СОЖ позволяет предотвратить развитие микрофлоры выше определенного порога, а значит эксплуатировать СОЖ без слива в сточные воды и замены, реализуя тем самым принципы замкнутости, экологичности и ресурсосбережения СП СОЖ. Схемотехнические решения установок восстановления СОЖ («Вита-В») представлены в гл. 5.

Реализация принципов и критериев построения ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ в предлагаемой подсистеме восстановления показана в табл. 3.8.

3.8. Примеры реализации принципов построения ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ в подсистеме восстановления СОЖ

Принципы построения СП СОЖ		Технические средства реализации
Общетеchnические	Малая энергозатратность	Использование реагентного разложения
	Гибкое адаптивное управление	Электронный модуль контроля состояния СОЖ и сброса ее на восстановление
	Функционально-структурное соответствие	Установка «Вита-В» (см. гл. 5)
	Оптимизация размеров установки и ее расположения	Установка «Вита-В» (см. гл. 5)
Специализированные	Максимальная системная утилизация отходов	Связь с модулями рекуперации
	Предотвращение негативных воздействий вредных факторов	Использование замкнутых (бессточных) циклов
	Системная экологизация вспомогательного производства использования технологических жидкостей	Непрерывная очистка СОЖ от механических примесей и «инопородных» масел, периодическая аэрация и термообработка СОЖ, максимальная системная утилизация отходов

3.5. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАМОВ

В условиях ухудшающейся экологической обстановки промышленных регионов, истощения сырьевой базы, постоянного роста производственных и транспортных затрат все более актуальными становятся проблемы промышленной утилизации металлосодержащих отходов предприятий машиностроения и черной металлургии, основными из которых являются шламы – многокомпонентные связанные системы (шлифовальные, обкатные, заточные, прокатные и др.).

Технология плавильного передела, хорошо зарекомендовавшая себя в промышленности для переработки металлосодержащих отходов в виде кускового лома и стружки, не пригодна для переработки большинства шламовых металлосодержащих отходов по причине отсутствия техноло-

гических решений и практических рекомендаций по подготовке этих отходов к переплаву. В результате этого отечественная промышленность ежегодно теряет сотни тысяч тонн металла.

Как известно, шлам представляет собой устойчивую тонкодисперсную систему, стабилизированную высокомолекулярными углеводородными соединениями. Степень окисленности металлической составляющей шлама, его структура, состав и содержание компонентов определяют технологические особенности утилизации. Выполненные исследования состава шлифовальных шламов АО «Чебоксарский автоагрегатный завод», ОАО «Северсталь», ОАО «НЛМК» и прокатных шламов ОАО «Северсталь», ОАО «НЛМК» выявили следующие характеристики шламов: дисперсность – 10...200 мкм; содержание нефтепродуктов – 4...23 %; содержание воды – 2...25 %; содержание абразива – 0...15 %; остальное – металл. В качестве примера в табл. 3.9 приведены составы шлифовальных шламов.

3.9. Исследованные шлифовальные шламы
(АО «Чебоксарский автоагрегатный завод»)

Цех	Материал заготовок	Шлифовальные круги	Состав СОЖ, масс. доля, %	Состав шлама, масс. доля, %
МЦ – 17	Стали 15ХМ, 50Г; 45ХН2МФА 350 т шлама в год	Электрокорунд белый, нормальный, хромотитанистый, керамическая и бакелитовая связка	Нитрит натрия – 0,2...0,3; метабо- рат натрия – 0,2...0,3; вода – остальное	Вода – 23,6; абразив + ме- ханические примеси – 1,4; металл – 75,0
МЦ – 16	Сталь 30Г 900 т шлама в год	Электрокорунд белый, нор- мальный, кера- мическая и ба- келитовая связ- ка	Сода кальциниро- ванная – 0,8...1,0; нитрит натрия – 0,2...0,3; вода – остальное	Вода – 8,9; абразив + ме- ханические примеси – 5,1; металл – 86,0
МСП – 1	Чугун СЧ20 1470 т шлама в год	Электрокорунд белый, нор- мальный, кера- мическая связка	Эмульсол НГЛ-205 – 4...5; сода кальциниро- ванная – 0,2...0,3; вода – остальное	Вода – 13,61; абразив + ме- ханические примеси – 4,9; металл – 81,49

Учитывая компонентный состав шламов, технология их подготовки к переплаву должна содержать операции удаления нефтепродуктов, обезвоживания, разделения абразивной и металлической составляющей и, наконец, связывания извлеченной металлической составляющей в брикеты. Для выявления наилучших методов и средств реализации этих опера- ций были проведены специальные исследования.

На первом этапе исследовали эффективность удаления нефтепро- дуктов из шлама методами его термической обработки и промывки рас- творителем.

Шлам из нефтепродуктов промывали в пульпе при интенсивном пе- ремешивании в течение 15...20 мин. По моющему эффекту исследован- ные органические растворители можно расположить в такой последова- тельности: ацетон, бензол, толуол, гексан. Оптимальное соотношение масс шлама и растворителя 1 : 2. После промывки шлам отделяли от жидкой фазы отстаиванием или центрифугированием. Отделенный рас- творитель вместе с растворенным в нем маслом использовали повторно. Установлена максимальная (без потери моющего эффекта) кратность использования растворителя – 4. Потери растворителя в каждом из цик- лов составляли 10...15 %. Промытый металлический шлам просушивали в термошкафу при температуре 100 °С.

Термическую обработку шлама проводили с использованием ста- ционарного режима (сушильный шкаф), а при моделировании псевдоки- пения дискретных частиц маслосодержащих шламов – во вращающейся прямоточной печи. Создание нейтральной либо восстановительной атмо- сферы не предусматривалось. Температурный интервал термической де- сорбции составляет 400...550 °С. Продолжительность процесса – от 0,1 до 0,5 ч (коррелирует с длиной барабанной вращающейся печи и часто- той ее вращения). Установлено, что увеличение частоты вращения печи от 0,5 до 1,5 мин⁻¹ приводит к уменьшению более чем в 2 раза продолжи- тельности процесса термодесорбции за счет ее интенсификации (основ- ная масса шлама находится во взвешенном состоянии). При этом оста- точное содержание нефтепродуктов в обработанном шламе уменьшается в 2 – 4 раза. Повышение температуры нагрева свыше 550 °С нецелесооб- разно из-за склонности шлама к возгоранию в процессе его загрузки в печь. Увеличение частоты вращения печи свыше 1,5 мин⁻¹ при макси- мальных температурах не приводит к интенсификации процесса термде- сорбции.

Анализ вышерассмотренных шламов после термодесорбции позво- ляет сделать вывод о практически полном отсутствии жидкой состав- ляющей (воды и масла) в обработанном шламе (вода – 0 %; масло – 0,1 %) (табл. 3.10).

3.10. Компоненты жидкой фазы шлама

Материал заготовок	Исходное содержание, %		Содержание после промывки, %		Содержание после термообработки, %	
	Масло	Вода	Масло	Вода	Масло	Вода
Чугун СЧ 20	4,0	4,0	0,4	0,1	0,1	0,0
Сталь 30Г	1,5	1,5	0,2	0,1	0,1	0,0
Сталь 15ХМ; 50Г; 45ХН2МФА	2,0	2,0	0,3	0,1	0,1	0,0

Метод, основанный на промывке шламов растворителями, как показали результаты исследований, менее эффективен, чем термообработка, ввиду потребности в большом объеме растворителей и необходимости их последующей регенерации, потребности в значительных производственных площадях и технологических мощностях. Этот метод сложно реализовать при переработке больших объемов шлама.

На втором этапе исследовали эффективность магнитной сепарации сухих шламов с целью их разделения на металлическую (магнитную) и абразивную составляющие. Исследования проводили на лабораторной установке, созданной на основе кассетного магнитного сепаратора (табл. 3.11).

На третьем этапе выбирали связующее для брикетов с учетом следующих технологических требований: отвердевание без нагрева при выдержке на воздухе; высокая прочность смеси; низкая хрупкость брикета; минимальная работа уплотнения при обеспечении требуемой прочности; легкое извлечение брикетов из пресс-форм.

3.11. Характеристика магнитной сепарации шлама

Материал заготовок	Масса шлама до магнитной сепарации m_o , кг (%)	Масса металлической составляющей m , кг (%)	Масса абразивной составляющей m_a , кг (%)
Чугун СЧ 20	0,1 (100)	0,0948 (94,8)	0,052 (5,2)
Сталь 30Г	0,1 (100)	0,0957 (95,7)	0,043 (4,3)
Сталь 15ХМ; 50Г; 45ХН2МФА	0,1 (100)	0,0987 (98,7)	0,013 (1,3)

В качестве жидкого связующего использовали среды, относящиеся к системе щелочных силикатов и не имеющие недостатков, присущих жидким самотвердеющим средствам на основе синтетических смол, – ухудшение экологической безопасности, высокая стоимость и др. [112]. Эксперименты проводили с использованием жидкого стекла, обладающего всеми свойствами коллоидных растворов (силикат натрия – $Na_2 \times nOSiO_2$, силикат кальция $Ca_2O \times n SiO_2$), учитывая его способность затвердевать на воздухе с образованием прочных структур.

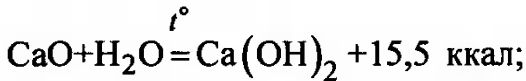
Сухие фракции шихты и жидкое связующее смешивали в лабораторном смесителе (бегуне) с насыпным рабочим объемом 0,02 м³.

Экспериментальные исследования подтвердили положение о том, что увеличение интенсивности процесса перемешивания не оказывает существенного влияния на прочность брикета. Тем самым установлена гомогенность шихты в широком диапазоне частот вращения бегуна. Установлено также, что увеличение продолжительности процесса смешивания жидких и твердых компонентов свыше 8...10 мин приводит к снижению механической прочности брикета, что, очевидно, объясняется тем, что в процессе перемешивания развиваются конкурирующие процессы твердения и непрерывного разрушения возникающей структуры.

Снижение массового содержания жидкого стекла на 1 % уменьшает работу извлечения брикета из пресс-форм в 2 раза. В связи с этим рекомендуется снижать содержание жидкого стекла до минимально возможного уровня, исходя из требуемых прочностных и технологических характеристик: 1,5...3,0 % жидкого натриевого стекла плотностью 1,45 г/см³.

Нельзя не отметить, что увеличение массовой доли жидкого стекла способствует росту хрупкости твердого брикета, так как аромные соединения имеют хрупкую аморфную структуру, а также увеличению времени и энергозатратности процесса сушки брикета после прессования.

Для разработки рациональной технологической схемы подготовки шлама к утилизации с достижением синергетического эффекта использовали кинетические закономерности химического обезвоживания металлосодержащих шламов [40]. Экспериментально установлено существенное влияние извести на уменьшение продолжительности и энергозатратности процесса выгонки воды из водного раствора жидкой связующей за счет химического обезвоживания:



при этом теплота, выделяемая в процессе взаимодействия фаз, идет на испарение влаги.

Для обеспечения химического обезвоживания в экспериментальных исследованиях использовали известковую пыль – 2 % (масс.), что соответствует потребному количеству теплоты, идущей на испарение влаги. Зафиксировано уменьшение продолжительности свободной сушки (твердения) материала брикетов в 4 раза.

Для назначения элементов режима брикетирования (давления прессования, времени перемешивания и массовой доли жидкого связующего), обеспечивающих заданное качество брикета, можно рекомендовать зависимости, приведенные в работе [40].

Выполненные исследования позволили разработать экологизированную ресурсосберегающую технологию переработки шлама.

Технологический процесс промышленной утилизации шламовых металлосодержащих отходов (рис. 3.25) включает в себя следующие основные операции: отстой шлама; сортировку и классификацию исходного шлама; термическую десорбцию; магнитную сепарацию; дозирование сухих твердых фракций смеси с жидкой связующей; смесеприготовление;



Рис. 3.25. Структурная схема технологического процесса переработки шлама

брикетирование; удаление (свободное) остаточной жидкой фазы из материала брикета на протяжении времени хранения на складе; переplав.

Исходный материал (шлам) после металлообработки поступает в отстойник (продолжительность отстоя 10 ч). Отслоенные свободные нефтепродукты и вода сливаются и поступают в соответствующие подсистемы рециклизации. Влажный шлам проходит первичную очистку (сепарацию) от крупных посторонних включений с помощью виброгрохота. Очищенный шлам транспортируется на установку термической десорбции, состоящую из тепловой станции и барабанной вращающейся печи. Продукты термической десорбции – сухая твердая фракция (металлический порошок и абразив), масло и вода. Сухая твердая фракция разделяется на металл и абразив методом магнитной сепарации. Металлический сухой порошок, известь и связующее подаются в смеситель, где производится интенсивное перемешивание смеси до образования однородной шихты. Шихта прессуется в брикеты, которые после естественной либо принудительной сушки поступают на переplав. Побочные продукты – масло, вода, абразив – направляются в соответствующие подсистемы рекуперации и рециклизации (см. рис. 3.1).

Схемотехнические решения установок, реализующих разработанную технологию, представлены в гл. 5.

Реализация принципов и критериев построения ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ в предлагаемой подсистеме переработки шламов показана в табл. 3.12.

3.12. Примеры реализации принципов построения ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ в подсистеме переработки шламов

Принципы построения СП СОЖ		Технические средства реализации
Общете- хнические	Функционально-структурное соответствие	Установка «Вита-Ш» (см. гл. 5); патент РФ № 2083694
	Оптимизация размеров установки и ее расположения	
Специализированные	Максимальная системная утилизация отходов	Связь с подсистемой очистки СОЖ (установка «Вита-С»)
	Предотвращение негативных воздействий вредных факторов	Использование замкнутых циклов
	Системная экологизация вспомогательного производства использования технологических жидкостей	Максимальная системная утилизация шламов (установки «Вита-С», «Вита-Ш»)

3.6. ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МАСЛА ИЗ ШЛАМОВ И ОТРАБОТАННОЙ СОЖ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ИХ РЕГЕНЕРАЦИИ

Анализ функционирования существующих на машиностроительных и металлургических предприятиях СП СОЖ показывает, что предприятия несут значительные потери дорогостоящих минеральных масел, связанные со сбросом на утилизацию шламов и отработанных СОЖ.

Предлагается эффективная технология извлечения из шлама и регенерации минеральных масел. Масло извлекается из шлама в модулях рекуперации масла и разложения отработанной СОЖ, а регенерация масел – в одноименном модуле (см. рис. 3.1). Кроме того, часть неэмульгированных минеральных масел эффективно удаляется из СОЖ в элементах подсистемы очистки. Так, установки серии «Вита-С» благодаря использованию процесса флотации и маслосъемных барабанов эффективно собирают с поверхности СОЖ всплывшие масла.

В модуле рекуперации шлам перемешивается в смесителе с добавлением реагентов, облегчающих первичную десорбцию шлама во флотаторе (рис. 3.26). В результате флотации масло извлекается из воды, а

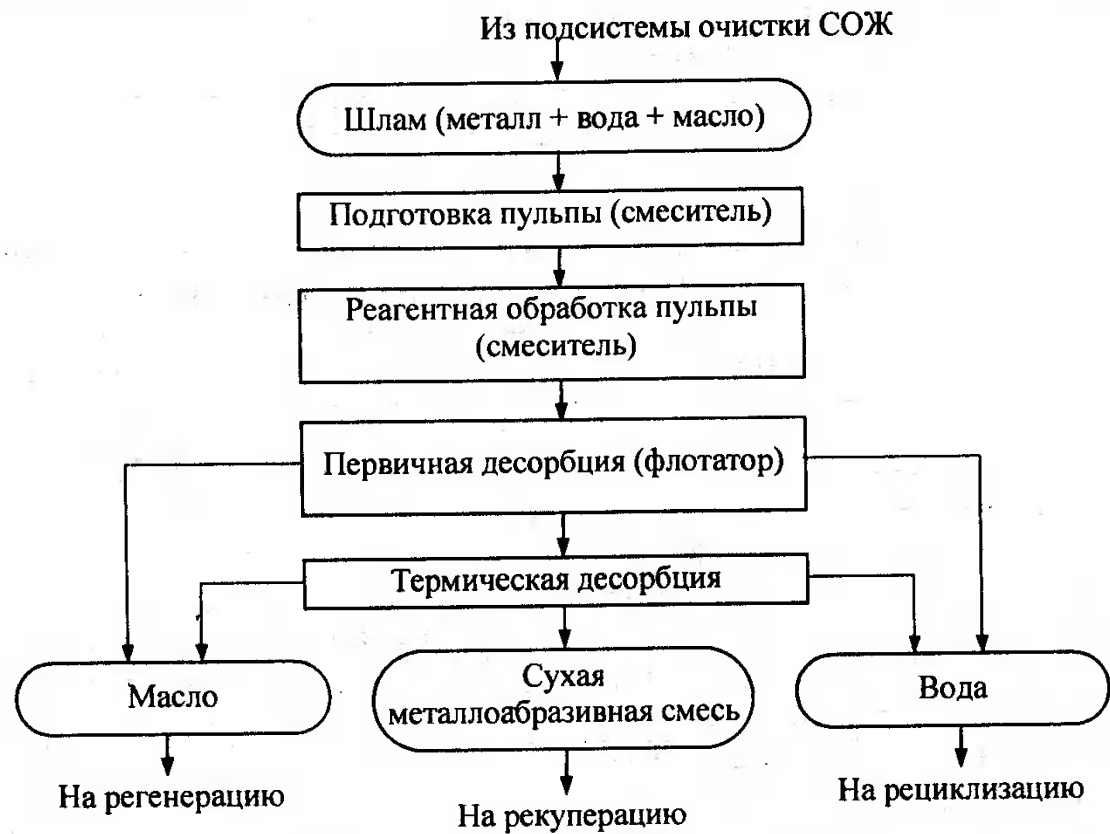


Рис. 3.26. Структурная схема технологического процесса извлечения масел из шламов

шлам поступает на операцию термодесорбции, где из него удаляются оставшиеся после флотации вода и масло, которые поступают в подсистемы соответственно рециклизации воды и регенерации масла, а затем возвращаются в СП СОЖ в виде исходных продуктов.

В модуле разложения отработанной СОЖ (установка «Вита-Р», см. гл. 5) масла извлекаются на операциях флотации и электролизного разложения (рис. 3.27). С целью интенсификации процесса разложения на составляющие ее фазы операции флотации СОЖ предшествует магнит-

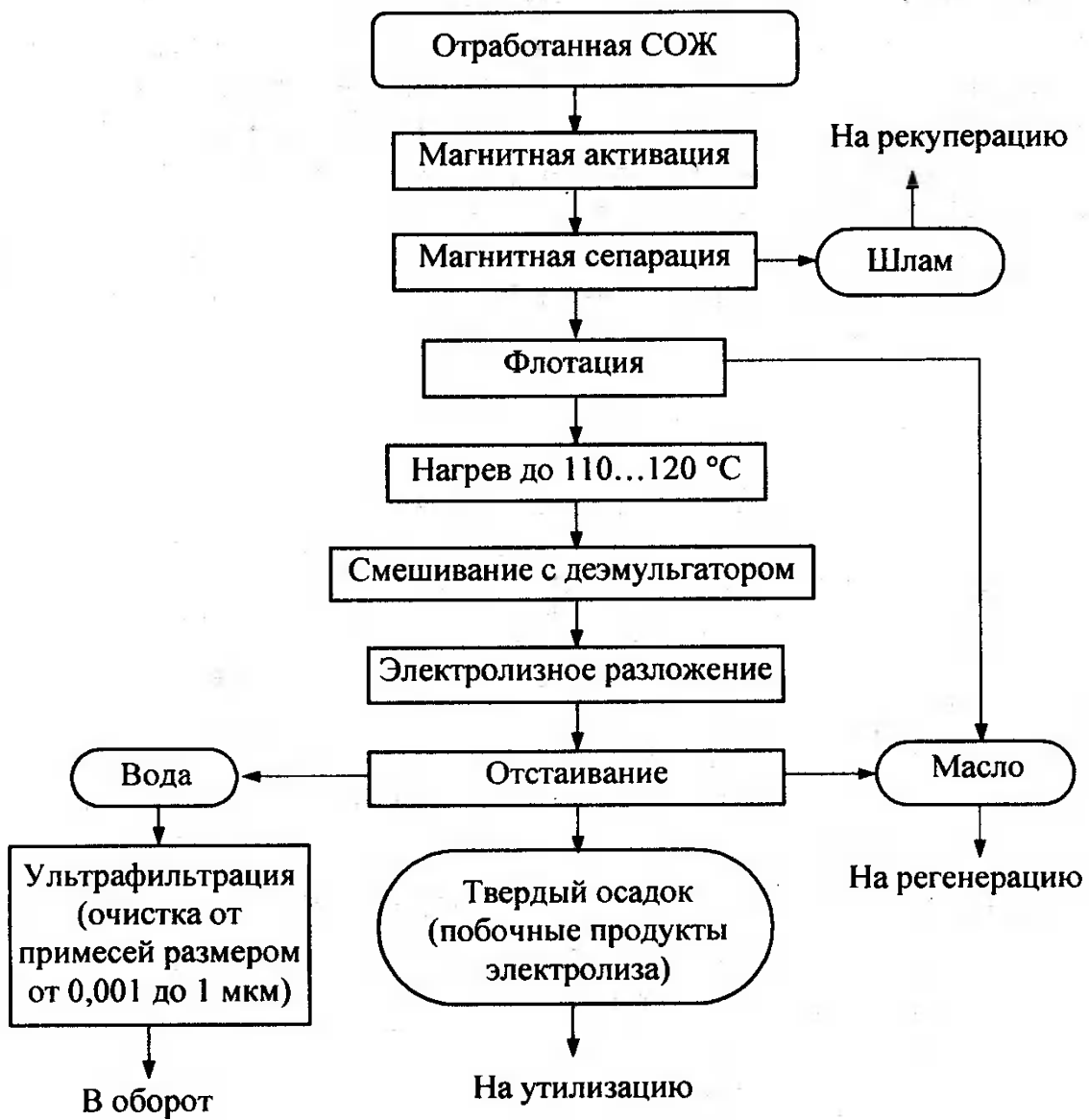


Рис. 3.27. Структурная схема технологического процесса разложения отработанной СОЖ

ная активация и сепарация ферромагнитных частиц шлама, а электролизному разложению – нагрев СОЖ до температуры 110...120 °С и смешивание ее с деэмульгатором.

Полученный в результате электролизного разложения твердый осадок утилизируется, вода после очистки используется для приготовления СОЖ, а масло направляется на регенерацию. Шлам, извлеченный из СОЖ, перерабатывается по технологии, описанной в п. 3.5.

Извлеченные из шламов и отработанной СОЖ масла подвергаются регенерации по следующей технологии (рис. 3.28): масло направляется в реактор, в котором нагревается до 110...120 °С и смешивается с адсорбентом; подготовленное в реакторе масло порциями подается в центрифугу, где происходит его сепарация (тонкая очистка); выделившийся шлам сбрасывается в специальную тару, а очищенное масло после газоотделения готово к дальнейшему использованию для нужд предприятия.

Схемотехнические решения установок регенерации минеральных масел – «Вита-М», реализующих описанную технологию, представлены в гл. 5.



Рис. 3.28. Структурная схема технологического процесса регенерации масел

Регенерация и возврат в производство для повторного использования масел, полученных из отработанных СОЖ, а также при очистке водоэмульсионных СОЖ, и выделенных при переработке маслосодержащих шламов, обеспечивает снижение затрат предприятий на минеральные масла на 35...60 % [16].

Реализация принципов и критериев построения ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ в предлагаемом модуле регенерации масел показана в табл. 3.13.

Таким образом, на основе представленных в первой главе принципов предложен ресурсосберегающий экологизированный технологический процесс обеспечения машиностроительных производств СОЖ и разработана общая структура СП СОЖ, реализующей этот процесс. Показана принципиальная возможность бессточной эксплуатации СОЖ путем управления интенсивностью накопления в СП СОЖ механических примесей, «инородных» масел, микрофлоры и солей.

3.13. Примеры реализации принципов построения ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ в модуле регенерации масел

Принципы построения СП СОЖ		Технические средства реализации
Общете- хнические	Функционально- структурное соответствие	Установка «Вита-М» (см. гл. 5); патент РФ № 2209781
	Оптимизация размеров ус- тановки и ее расположения	
Специали- зиро- ван- ные	Максимальная системная утилизация отходов	Связь с подсистемами очистки СОЖ (установка «Вита-С») и рекуперации масел из шламов (установка «Вита-Ш») и СОЖ (установка «Вита-Р»)
	Предотвращение негативно- го воздействия вредных факторов	Использование замкнутых циклов
	Системная экологизация вспомогательного произ- водства использования тех- нологических жидкостей	Максимальная системная ути- лизация масел (установки «Вита-С», «Вита-Р», «Вита-М»)

Экспериментально показано, что общие закономерности влияния загрязнения СОЖ модельными и реальными шламами на показатели процесса шлифования с окружной скоростью круга 35 и 50 м/с близки. При этом реальный шлам приводит к несколько меньшим изменениям показателей процесса шлифования. Тем самым установлено, что результаты и методику исследований влияния загрязнения СОЖ механическими примесями на эффективность шлифования, выполненных с модельными шламами (см. гл. 1), можно использовать для нормирования чистоты СОЖ, расчета очистителей и решения других практических задач, создавая при этом некоторый запас надежности.

- Предложены:
- высокоэффективные технологии очистки СОЖ в машиностроительных и металлургических производствах;
 - схемотехнические решения подсистемы очистки СОЖ многоступенчатой и многоконтурной компоновок;
 - технология защиты СОЖ от микробиологического поражения путем использования антагонистичности анаэробных и аэробных бактерий на основе периодической аэрации СОЖ и непрерывного удаления из нее механических примесей и «инородных» масел;
 - технология восстановления отработанных эмульсионных СОЖ без их разложения на масляную и водную фазы;
 - технологии утилизации отходов СП СОЖ путем рекуперации металла из шламов и последующей его переработки в брикеты для плавильного производства, а также рекуперации масла из шламов и отработанной СОЖ и последующей их регенерации.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И
СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ СОЖ**

4.1. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ОЧИСТИТЕЛИ

Как отмечено в гл. 3, для выбора рациональных размеров отстойников и режима течения в них жидкости необходимо исследовать кинетику осаждения механических примесей, в том числе с учетом их магнитной коагуляции.

Процесс осаждения механических примесей, взвешенных в жидкости, достаточно хорошо изучен [114, 121 – 123, 125, 129 и др.]. Несмотря на это, прогнозирование работы отстойников при их проектировании, в особенности при осаждении неоднородных взвесей, практикуется редко. Это объясняется сложностью математического описания процесса осаждения, зависящего от большого числа взаимодействующих факторов: концентрации механических примесей и показателей их осаждения, характера потока внутри отстойника и др. Использование математических моделей, основанных на единственном параметре (например, времени пребывания механических примесей в отстойнике), отражает только средние показатели работы отстойника и дает лишь качественное представление о процессе [115, 117, 118, 123, 130, 131]. Концепция вероятностного моделирования представляется более подходящей для общего описания процесса осаждения, так как она позволяет учесть колебание показателей функционирования отстойника [14, 99].

Так как влияние формы частицы на скорость осаждения несущественно, то для простоты математического описания частиц примем их форму сферической.

Пусть в емкости 1 (рис. 4.1) находится суспензия, содержащая N частиц твердой дисперсной фазы с распределением их по радиусу r и высоте h от дна емкости $P_0(r, h)$; тогда

$$\int\int_{\substack{0 \leq r < \infty \\ 0 \leq h \leq H}} P_0(r, h) dr dh = 1,$$

где H – уровень суспензии в емкости, м.

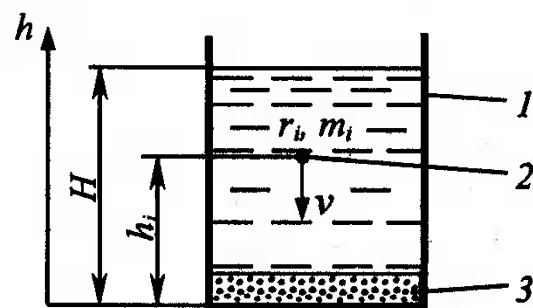


Рис. 4.1. Схема осаждения частиц твердой дисперсной фазы суспензии: 1 — емкость; 2 — твердая частица; 3 — осадок из твердых частиц

Общая масса частиц твердой дисперсной фазы суспензии

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho N \int_0^\infty \int_0^H r^3 P_0(r, h) dr dh,$$

где ρ — плотность частицы, кг/м³.

Скорость осаждения v частиц твердой фазы найдем, используя закон Стокса для сфер:

$$mg = 6\pi\eta rv, \quad (4.1)$$

где η — динамическая вязкость суспензии, Па·с.

Тогда

$$4/3 \pi r^3 \rho g = 6\pi\eta rv, \quad v = 2gpr^2/9\eta$$

или

$$v = \chi r^2,$$

где $\chi = 2g\rho/9\eta$ — коэффициент.

Рассмотрим распределение $P(r, h, \tau)$ частиц твердой дисперсной фазы в момент времени τ (рис. 4.2).

Так как скорость осаждения частиц равномерная, получим:

$$P(r, h, \tau) = \begin{cases} P_0(r, h + \chi r^2 \tau), & \text{если } h + \chi r^2 \tau < H; \\ 0, & \text{если } h + \chi r^2 \tau \geq H. \end{cases}$$

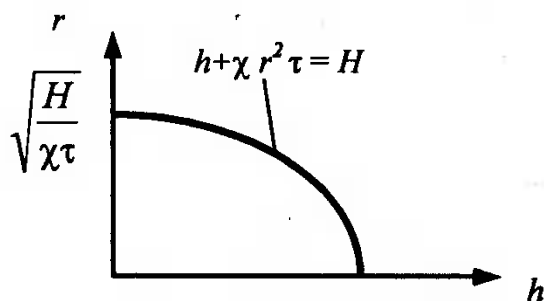


Рис. 4.2. Зависимость положения по высоте h в емкости частицы твердой фазы суспензии от ее радиуса r в момент времени $\tau \geq 0$

Подсчитаем массу частиц твердой фазы, осевших на дно емкости к моменту времени τ :

$$m_0(\tau) = m - \frac{4}{3} \pi \rho N \int_{h+\chi r^2 \tau}^H \int_0^\infty P_0(r, h + \chi r^2 \tau) dr dh. \quad (4.2)$$

Тогда отношение массы частиц твердой фазы, осевших на дно емкости к моменту времени τ (4.1), к общей массе частиц твердой фазы суспензии (4.2) (степень очистки) определяется из выражения

$$\varepsilon(\tau) = m_0(\tau)/m \quad (4.3)$$

или

$$\varepsilon(\tau) = 1 - \frac{1}{\int_0^\infty \int_0^H r^3 P_0(r, h) dr dh} \int_{h+\chi r^2 \tau}^H \int_0^\infty P_0(r, h + \chi r^2 \tau) dr dh. \quad (4.4)$$

Пусть $P_0(r, h) = P_0(r)$ не зависит от h (условие хорошего начального перемешивания суспензии); при этом

$$H \int_0^\infty P_0(r) dr = 1.$$

Тогда общая масса частиц

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho N \int_0^\infty r^3 H P_0(r) dr = \frac{4}{3} \pi \rho N H \alpha_3,$$

где α_3 — третий момент начального распределения.

Для распределения $P(r, h, \tau)$ получим

$$P(r, h, \tau) = \begin{cases} P_0(r), & \text{если } (h + \chi r^2 \tau) < H; \\ 0, & \text{если } (h + \chi r^2 \tau) \geq H. \end{cases} \quad (4.5)$$

Масса частиц $m_0(\tau)$, осевших на дно емкости к моменту времени τ :

$$m_0(\tau) = m - \frac{4}{3} \pi \rho N \int_{h+\chi r^2 \tau}^H \int_0^\infty r^3 P(r, h, \tau) dr dh =$$

$$= m - \frac{4}{3} \pi \rho N \int_0^{\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}} dr \int_0^{H - \chi r^2 \tau} r^3 P_0(r) dh = m - \frac{4}{3} \pi \rho N \int_0^{\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}} (H - \chi r^2 \tau) r^3 P_0(r) dr.$$

Тогда степень очистки

$$\varepsilon(\tau) = 1 - \frac{1}{\alpha_3} \int_0^{\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}} \left(1 - \frac{\chi \tau}{H} r^2\right) r^3 P_0(r) dr. \tag{4.6}$$

При $\tau \rightarrow 0$

$$\varepsilon(\tau) \rightarrow 1 - \frac{1}{\alpha_3} \int_0^\infty r^3 P_0(r) dr = 0.$$

Можно считать, что $\varepsilon(0) = 0$. Характер изменения функции $\varepsilon(\tau)$ изображен на рис. 4.3. Исследуем поведение функции $\varepsilon(\tau)$ в интервале $\tau \in (0, \infty)$.

Для этого подсчитаем $\dot{\varepsilon}(\tau)$:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(\tau) &= -\frac{1}{\alpha_3} \left(1 - \frac{\chi \tau}{H} \frac{H}{\chi \tau}\right) \left(\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}\right)^3 P_0\left(\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}\right) \sqrt{\frac{H}{\chi}} \left(-\frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{\sqrt{\tau}}\right)^3 + \\ &+ \frac{\chi}{H \alpha_3} \int_0^{\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}} r^5 P_0(r) dr = \frac{\chi}{H \alpha_3} \int_0^{\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}} r^5 P_0(r) dr; \\ \dot{\varepsilon}(0) &= \frac{\chi}{H \alpha_3} \int_0^\infty r^5 P_0(r) dr = \frac{\chi \alpha_5}{H \alpha_3}, \end{aligned}$$

где α_5 — пятый момент начального распределения.

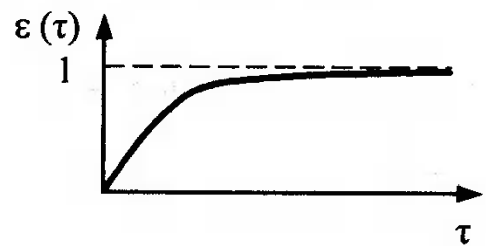


Рис. 4.3. Зависимость степени очистки ε от времени τ

Продифференцируем еще раз:

$$\begin{aligned} \ddot{\varepsilon}(\tau) &= \frac{\chi}{H \alpha_3} \left(\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}\right)^5 P_0\left(\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}\right) \sqrt{\frac{H}{\chi}} \left(-\frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{\sqrt{\tau}}\right)^3 = \\ &= -\frac{\chi}{2 H \alpha_3} \frac{H^3}{\chi^3} P_0\left(\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}\right) \frac{1}{\tau^4} \end{aligned}$$

или

$$\ddot{\varepsilon}(\tau) = -\frac{H^2}{2 \chi^2 \alpha_3} \tau^{-4} P_0\left(\sqrt{\frac{H}{\chi \tau}}\right),$$

$$\varepsilon(0) = 0, \quad \dot{\varepsilon}(0) = \chi \alpha_5 / H \alpha_3.$$

Для равномерного распределения

$$P_0(r) = \begin{cases} \frac{1}{H(b-a)}, & a \leq r \leq b; \\ 0, & r < a, \quad r > b, \end{cases}$$

где a, b — соответственно нижняя и верхняя границы диапазона размеров частиц механических примесей, м.

Тогда

$$\alpha_3 = \frac{1}{4H} \frac{b^4 - a^4}{b - a}; \quad \alpha_5 = \frac{1}{6H} \frac{b^6 - a^6}{b - a};$$

$$\dot{\varepsilon}(0) = \frac{2\chi}{3H} \frac{b^6 - a^6}{b^4 - a^4};$$

$$\tau_1 = \frac{H}{\chi b^2} < \tau_2 = \frac{H}{\chi a^2}.$$

Качественное поведение функций $\varepsilon(\tau)$, $\dot{\varepsilon}(\tau)$, $\ddot{\varepsilon}(\tau)$ в случае равномерного распределения частиц твердой дисперсной фазы изображено на рис. 4.4.

Математические модели (4.4), (4.6) позволяют определить массу механических примесей, удаленных из поступающих в отстойники стоков СОЖ, или массу механических примесей, поступающих на следующую ступень очистки СОЖ. Кроме того, с их помощью можно рассчитать размеры очистителя по заданной степени очистки и производительности.

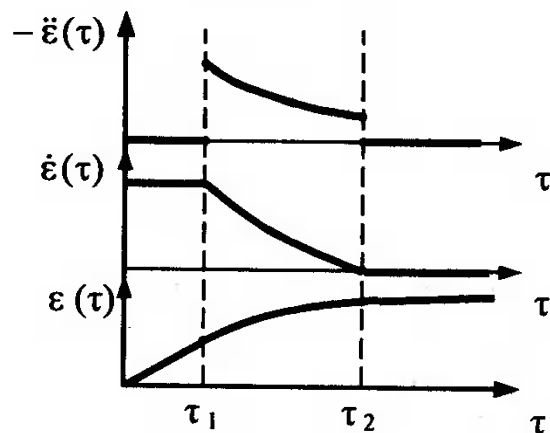


Рис. 4.4. Зависимость степени очистки ε , первой и второй ее производных от времени осаждения τ частиц твердой фазы

Как показывает практика разделения дисперсных систем, скорость осаждения (седиментации) дисперсной фазы определяется не только размером и удельным содержанием частиц, но и их взаимодействием между собой (аутогезией). В случае, когда дисперсная фаза состоит из парамагнитных и ферромагнитных частиц, взаимное притяжение частиц и интенсивность их осаждения можно усилить путем воздействия на суспензию магнитным полем [12, 62, 99 – 101]. Это объясняется магнитной коагуля-

цией частиц шлама с образованием агрегатов, значительно превышающих по своим размерам исходные частицы. Изучение агрегатов под микроскопом ($\times 200$) показало, что они имеют пористую рыхлую структуру, включающую незначительное количество частиц с диамагнитными свойствами.

Исследуем кинетику осаждения в магнитном поле полидисперсных суспензий в баке-отстойнике простейшей конструкции (рис. 4.5) при ламинарном режиме осаждения $Re < 1,85$, характерном для течения жидкости в таких устройствах [121].

Классифицируем образующиеся агрегаты частиц следующим образом: а) агрегат, образованный объединением двух исходных частиц (частиц 1-го порядка), рассматриваем как частицу 2-го порядка определенного размера и плотности; б) агрегат, образованный включением в частицу 2-го порядка исходной частицы, – как частицу 3-го порядка и т.д.

Тогда кинетику осаждения полидисперсной суспензии, обработанной в магнитном поле, можно выразить отрезком ряда:

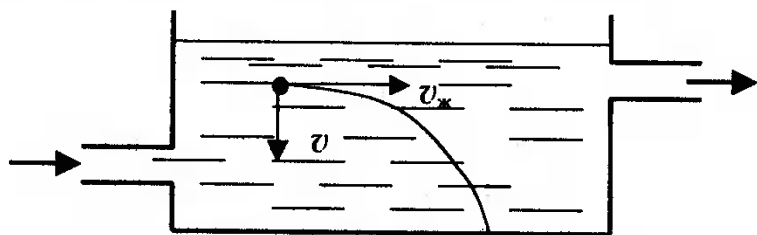


Рис. 4.5. Схема осаждения частиц шлама в баке-отстойнике

$$c_{от} = c_{1\tau} + c_{2\tau} + \dots + c_{n\tau}, \quad (4.7)$$

где $c_{1\tau}$, $c_{2\tau}$, ..., $c_{n\tau}$ – массовая концентрация частиц 1-го, 2-го, n -го порядков в момент времени τ , кг/м^3 .

Число членов ряда (4.7) при бесконечном увеличении аргумента τ стремится к конечному значению; при $\tau \rightarrow \infty$ шлам полностью выпадает из суспензии, а значит, $c_{от} \rightarrow 0$. Следовательно, ряд (4.7) сходится, а зависимость массовой концентрации $c_o(\tau)$ частиц в агрегатах можно изобразить кривой 2 (рис. 4.6). Согласно [79] для коллоидных растворов вероятность образования агрегатов из частиц высоких порядков ($n - 1$) пренебрежимо мала. Распространяя априорно данное положение на анализируемый процесс, можно изобразить $c_i(\tau)$ частиц различных порядков кривыми 3 – 5 (см. рис. 4.6). Нетрудно убедиться, что в рассматриваемом случае всегда имеет место процесс независимого осаждения некоторой части исходных частиц (кривая 3, рис. 4.6).

Тогда верно выражение

$$c'_{от} = c_{от} \left[1 - \frac{\Delta c_{от}}{c_{от}} \right], \quad (4.8)$$

где $\Delta c_{от}$ – массовая концентрация частиц шлама, ускоренно выпавших с магнитными агрегатами, кг/м^3 .

Зависимость $\Delta c_{от}$ имеет экстремальный монотонный характер (рис. 4.7).

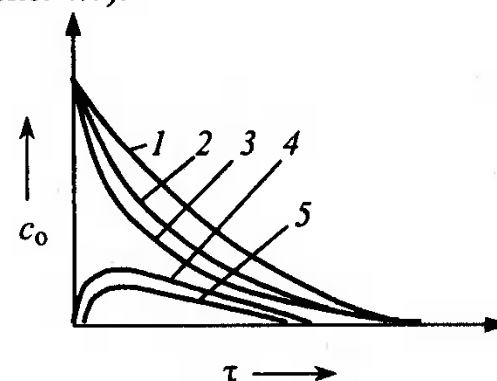


Рис. 4.6. Массовая концентрация осевших частиц полидисперсной суспензии: 1 – без магнитного воздействия; 2, 3, 4, 5 – в условиях магнитной коагуляции соответственно всех частиц, частиц 1-го, 2-го и 3-го порядка

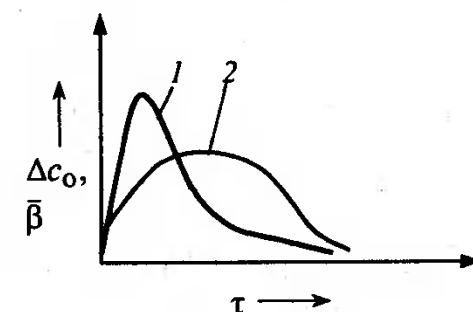


Рис. 4.7. Кинетика изменения массовой концентрации частиц шлама, ускоренно выпавших с агрегатами в осадок Δc_o (1), и числа магнитной коагуляции $\bar{\beta}$ (2)

Взаимодействие совокупности частиц различных размеров и формы с разными физико-химическими свойствами при магнитной коагуляции шлама позволяет адекватно оценивать введенный по аналогии с исследованиями в области адгезии [39] критерий – среднее число магнитной коагуляции

$$\bar{\beta} = c_a / c_{ш}, \quad (4.9)$$

где c_a , $c_{ш}$ – соответственно массовая концентрация частиц в агрегатах и шламе, кг/м³.

Кинетика магнитной коагуляции при осаждении или зависимость среднего числа магнитной коагуляции от времени осаждения, отражающая силы взаимодействия частиц при магнитной коагуляции, описывается выражением

$$\bar{\beta}_\tau = \Delta c_{от} / c_{от}. \quad (4.10)$$

С целью изучения влияния на процесс магнитной коагуляции различных факторов был реализован план многофакторного эксперимента типа 2⁴. Из многочисленных критериев оценки эффективности процесса магнитной коагуляции в качестве параметра оптимизации приняли максимальное среднее число магнитной коагуляции $\bar{\beta}_{max}$, определяемое как модальное значение $\bar{\beta}_\tau$. Выбор этого параметра обусловлен следующими соображениями: возможность его количественного измерения (точность измерения $\pm 1\%$); универсальность – $\bar{\beta}_{max}$ является функцией параметров, характеризующих шлам и условия его осаждения; определенный физический смысл, так как $\bar{\beta}_{max}$ характеризует силы взаимодействия между намагниченными частицами при седиментации.

Магнитную коагуляцию шлама исследовали фотоседиментационным способом на приборе ФЭК–56М, на крышке которого была установлена телескопическая электромешалка. Для приготовления суспензии использовали классифицированные «отмучиванием» порошки шлифовального шлама.

На основании априорной информации и результатов однофакторного эксперимента были отобраны основные факторы, определяющие взаимодействие частиц шлама при магнитной коагуляции, и выявлены области их определения (табл. 4.1). Диапазоны ограничений выбраны исходя из экспериментальных данных и соответствуют реальным условиям шлифования.

4.1. Уровни факторов и интервалы их варьирования в действительных значениях

Уровень фактора	Массовая концентрация шлама в СОЖ $c_{ш} (X_1)$, кг/м ³	Средний размер частиц шлама в СОЖ $\bar{d}_{ш} \cdot 10^5 (X_2)$, м	Массовая концентрация ферромагнетика в шламе $c_{ф} (X_3)$, кг/м ³	Напряженность магнитного поля $H_m \cdot 10^{-4} (X_4)$, А/м
Основной	0,7	3,2	0,89	1,25
Верхний	1,2	3,9	0,98	2,0
Нижний	0,2	2,5	0,8	0,5
Интервал варьирования	0,5	0,7	0,09	0,75

Загрязнение СОЖ пробами $c_{ш}$ производили весовым методом. Содержание ферромагнетиков в шламе определяли методом сухой магнитной сепарации и подсчитывали по выражению

$$c_{ф} = c_{фм} / c_{ш}, \quad (4.11)$$

где $c_{ш}$, $c_{фм}$ – массовая концентрация соответственно шлама и ферромагнетика в СОЖ, кг/м³.

Суспензию намагничивали с помощью магнитного аппарата МАЭ-4 [11].

Погрешности определения $c_{ш}$, $\bar{d}_{ш}$, $c_{ф}$, H_m не превышают 5 % номинала.

В результате эксперимента, расчета коэффициентов регрессии и проверки их значимости по критерию Стьюдента получили уравнение, описывающее зависимость $\bar{\beta}_{max}$ от перечисленных факторов:

$$\begin{aligned} \bar{\beta}_{max} = & 10,77 + 6,91X_1 + 0,41X_2 + 1,45X_3 + 6,98X_4 + 0,96X_1 \cdot X_3 + \\ & + 4,57X_1X_4 + 1,12X_3X_4 + 0,69X_1X_3X_4, \end{aligned} \quad (4.12)$$

где $X_1 - X_4$ – кодированные значения факторов, представленных в табл. 4.1 (нижним уровням факторов соответствует значение –1, а верхним +1).

Путем перехода от кодированных значений факторов к натуральным уравнение (4.12) привели к следующему виду:

$$\begin{aligned} \bar{\beta}_{\max} = & 2,3c_{\text{ш}} + 0,06\bar{d}_{\text{ш}} - 1,7c_{\text{ф}} - 1,2H_{\text{м}} - 4,1c_{\text{ш}}c_{\text{ф}} - 6,0c_{\text{ш}}H_{\text{м}} + \\ & + 2,3c_{\text{ф}}H_{\text{м}} + 20,4c_{\text{ш}}c_{\text{ф}}H_{\text{м}} - 0,12. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Проверка по критерию Фишера ($F_p = 6,5 > F_{кр} = 5,4$) показала адекватность полученной математической модели реальному процессу коагуляции.

Анализ уравнения регрессии (4.12) показывает, что по степени влияния на параметр $\bar{\beta}_{\max}$ варьируемые факторы ранжируются следующим образом: напряженность магнитного поля $H_{\text{м}}$, содержание ферромагнетика в шламе $c_{\text{ф}}$, размер частиц шлама $\bar{d}_{\text{ш}}$, содержание шлама в СОЖ $c_{\text{ш}}$. Так, при увеличении $H_{\text{м}}$ и $c_{\text{ф}}$ в 2 раза параметр $\bar{\beta}_{\max}$ увеличивается в среднем соответственно на 122 и 100 %, а при таком же изменении $\bar{d}_{\text{ш}}$ и $c_{\text{ш}}$ величина $\bar{\beta}_{\max}$ увеличивается в среднем соответственно на 94 и 80 % (табл. 4.2).

В уравнении (4.13) прослеживается эффект взаимодействия исследуемых факторов, причем значительное отличие коэффициентов при различных сочетаниях переменных свидетельствует о неодинаковом влиянии одного из факторов на максимальное среднее число магнитной коагуляции $\bar{\beta}_{\max}$ при различных сочетаниях других факторов. Так, при среднем диаметре частиц шлама $\bar{d}_{\text{ш}} = 25$ мкм, массовой концентрации шлама в СОЖ $c_{\text{ш}} = 0,2$ кг/м³ и феррочастиц в шламе $c_{\text{ф}} = 0,8$ кг/м³ величина $\bar{\beta}_{\max}$ изменяется с 0,98 до 4,94 (в 5 раз) при изменении H с $0,5 \cdot 10^{-4}$ до $2,0 \cdot 10^{-4}$ А/м. А при $\bar{d}_{\text{ш}} = 39$ мкм и тех же условиях $\bar{\beta}_{\max}$ изменяется с 1,80 до 5,76 (в 3,2 раза).

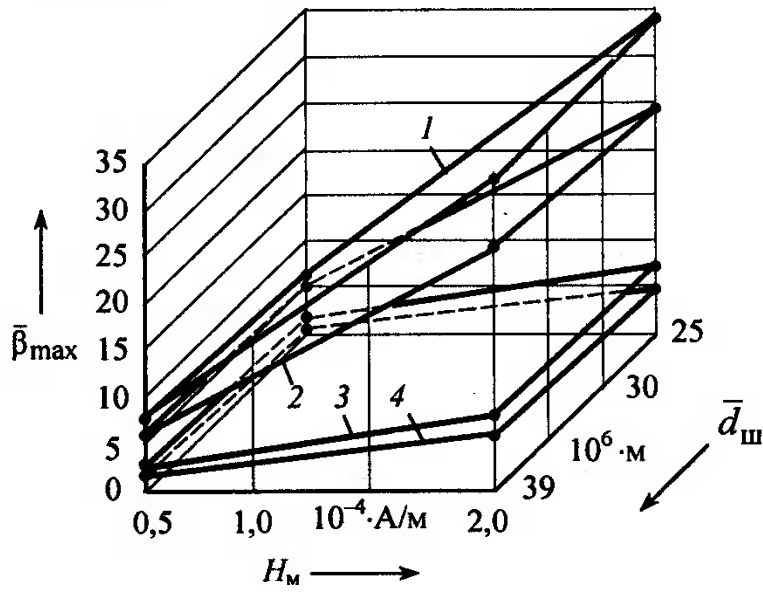
Математическую модель (4.13) можно использовать при разработке средств очистки СОЖ и оптимизации напряженности магнитного поля при магнитной коагуляции.

Ниже приведены исходные данные (табл. 4.3) и последовательность расчета габаритных размеров отстойника с учетом магнитной коагуляции частиц шлама.

4.2. Результаты полнофакторного экспериментального исследования

Массовая концентрация шлама в СОЖ $c_{\text{ш}}$, кг/м ³	Массовая концентрация ферромагнетика в шламе $c_{\text{ф}}$, кг/м ³	Средний размер частиц шлама в СОЖ $\bar{d}_{\text{ш}} \cdot 10^6$, м	Напряженность магнитного поля $H_{\text{м}} \cdot 10^{-4}$, А/м	Параметр $\bar{\beta}_{\max}$
0,2	0,8	25	0,5	0,98
			2,0	4,94
		39	0,5	1,80
			2,0	5,76
	0,98	25	0,5	1,10
			2,0	6,78
		39	0,5	1,92
			2,0	7,60
1,2	0,8	25	0,5	5,12
			2,0	24,60
		39	0,5	5,94
			2,0	25,42
	0,98	25	0,5	6,32
			2,0	33,04
		39	0,5	7,14
			2,0	33,86

Рис. 4.8. Влияние напряженности магнитного поля $H_{\text{м}}$ и среднего размера частиц шлама $\bar{d}_{\text{ш}}$ на максимальное среднее число магнитной коагуляции $\bar{\beta}_{\max}$:
1 – $c_{\text{ф}} = 0,98$ кг/м³; $c_{\text{ш}} = 1,2$ кг/м³; 2 – $c_{\text{ф}} = 0,80$ кг/м³; $c_{\text{ш}} = 1,2$ кг/м³; 3 – $c_{\text{ф}} = 0,98$ кг/м³; $c_{\text{ш}} = 0,2$ кг/м³; 4 – $c_{\text{ф}} = 0,80$ кг/м³; $c_{\text{ш}} = 0,2$ кг/м³



4.3. Исходные данные для расчета габаритных размеров отстойника

Наименование	Обозначение	Единица измерения
Остаточное содержание механических примесей в СОЖ	$c_{от}$	кг/м ³
Степень очистки	ε	%
Производительность подсистемы очистки СОЖ	Q_c	м ³ /с
Распределение частиц шлама в СОЖ	$P_0(r, h)$	—
Время отстаивания	τ	с
Плотность частиц шлама	ρ	кг/м ³
Динамическая вязкость СОЖ	η	Па·с

1. По зависимости (4.5) определяют распределение частиц шлама $P(r, h, \tau)$.
2. По зависимости (4.1) рассчитывают скорость v осаждения частиц шлама.
3. Для заданной степени очистки ε по зависимости (4.6) находят высоту H бака.
4. Определяют объемный расход $Q_{ш}$ осевшего шлама:
$$Q_{ш} = \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon \rho} c_{от} Q_c.$$
5. Определяют площадь S бака:
$$S = Q_{ш} / v.$$
6. По зависимости (4.10) определяют массовую концентрацию ускоренно выпавших частиц $\Delta c_{от}$.
7. Уточняют S с учетом магнитной коагуляции шлама:
$$S' = S \left(1 - \frac{\Delta c_{от}}{c_{от}} \right).$$
8. Длину и ширину бака определяют по найденной площади S' , исходя из планировки участка очистки СОЖ, конструктивных и эстетических соображений.

При исходных значениях (см. табл. 4.3) $\varepsilon = 0,6$; $\tau = 20$ мин; $Q_c = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м³/с; $c_{от} = 0,3$ кг/м³; $\rho = 7800$ кг/м³; $\eta = 2,8 \cdot 10^6$ Па·с (для 3 %-ной эмульсии Автокат-78) и нормальном распределении частиц шлама получили $H = 0,7$ м, $S = 2,1$ м².

На рис. 4.9 представлена рекомендуемая конструкция гравитационного очистителя, оснащенного скребковым конвейером (драгой) 3 с приводом 4 для удаления шлама и магнитным активатором, а в табл. 4.4 даны его технические характеристики в сопоставлении с традиционным гравитационным очистителем такого же объема. Такая конструкция позволяет увеличить тонкость и степень очистки соответственно в 2,5 и 1,8 раза и полностью механизировать процесс удаления шлама, а также осуществлять очистку емкости без слива СОЖ, что обеспечивает увеличение времени между залповыми сбросами до одного года и более при условии использования ее совместно с патронным магнитным сепаратором.

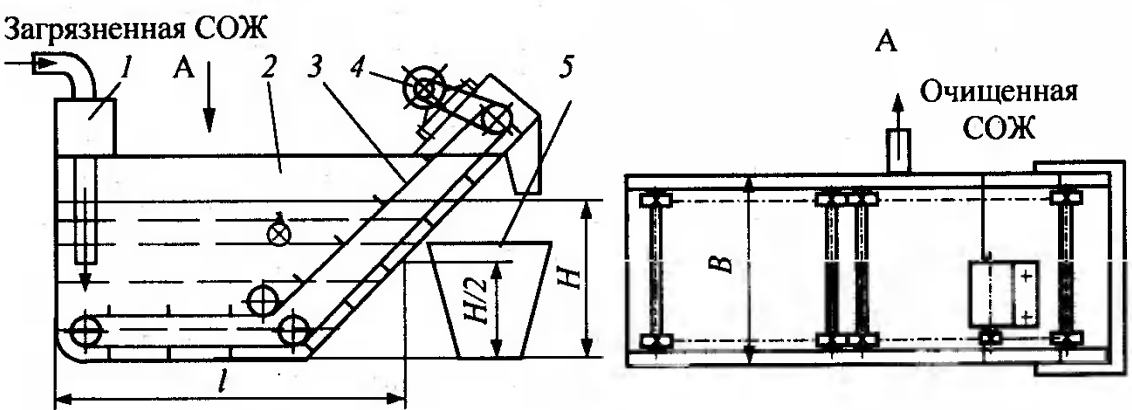


Рис. 4.9. Отстойник со скребковым конвейером и магнитной активацией СОЖ: 1 – магнитный активатор; 2 – бак; 3 – скребковый конвейер; 4 – электродвигатель; 5 – емкость для шлама; $S' = lB$

4.4. Техническая характеристика гравитационных очистителей

Показатель	Гравитационный очиститель	Гравитационный очиститель с предварительной магнитной активацией загрязненной СОЖ
Тонкость очистки d_{50} , мкм	100	40
Степень очистки, %	25... 35	50...60
Удельные капитальные затраты, руб/(м ³ /ч)	900...1000	950...1100
Потребляемая мощность, Вт·ч/м ³	15...20	17...22

Использование магнитных активаторов позволяет уменьшить габаритные размеры гравитационных очистителей при заданной степени и тонкости очистки СОЖ и соответственно металлоемкость и капитальные затраты до 1,5 раза.

Кроме того, исследованиями [11] установлено, что магнитная активация СОЖ обеспечивает улучшение качественных характеристик обработанных заготовок и возможность интенсификации режима обработки путем усиления адсорбционной активности СОЖ, вызванной изменением коэффициента поляризуемости молекул жидкости, числа ионов в единице объема адсорбционного слоя СОЖ на границе раздела фаз, его глубины, а также диэлектрической проницаемости жидкости.

4.2. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Одним из путей создания ресурсосберегающих СП СОЖ является использование в подсистеме очистки самоочищающихся фильтров [62] (см. гл. 3). Для оптимизации конструктивных параметров и назначения рационального режима эксплуатации самоочищающегося фильтра необходимо разработать математические модели фильтрования СОЖ, связывающие эти параметры с основными показателями технической характеристики фильтра – степенью и тонкостью очистки и производительностью.

Рассмотрим процесс фильтрования СОЖ через фильтровальное полотно и слой шлама, накапливающийся на его поверхности [62].

Объемный расход СОЖ через фильтр $Q_v(\tau)$ определяется выражением

$$\frac{dQ_v(\tau)}{dt} = v_{ж} \frac{d\bar{S}}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\eta(R_{ос} + R_{ф})}, \tag{4.14}$$

где $v_{ж}$ – скорость течения СОЖ через слой осадка, м/с; $\bar{S}$ – суммарная площадь пор, м²; τ – время фильтрования, с; Δp – разность давления на границах фильтровального полотна, Па; $R_{ос}$ – сопротивление слоя осадка, с/м³; $R_{ф}$ – сопротивление фильтровального полотна, с/м³.

Считаем $v_{ж} = const$, что справедливо в определенном диапазоне размеров пор, обеспечивающих ламинарное течение жидкости, и зависит только от изменения их общей площади [11].

Процесс структурирования осадка шлама во времени происходит следующим образом. На чистое фильтровальное полотно подают загрязненную СОЖ. Частицы шлама оседают на фильтровальном полотне. С течением времени слой осадка непрерывно растет, количество пор асимптотически увеличивается, а их размеры убывают (рис. 4.10, кривые 1 и 2). При этом площадь образующихся ячеек вторичного фильтровального слоя также является асимптотически убывающей функцией (см. рис. 4.10, кривая 3). Процесс фильтрования с образованием вторичного фильтровального слоя состоит из двух стадий. На первой стадии происходит интенсивное образование слоя осадка, что приводит к резкому увеличению степени очистки ϵ и снижению производительности процесса фильтрования. Вторая стадия характеризуется достаточной стабильностью фильтрования (изменение величин ϵ , $v_{ж}$, Q_v во времени незначительно) через уже сформировавшийся вторичный фильтровальный слой.

Определим степень очистки СОЖ по формуле

$$\epsilon = \frac{\lg(a_p/\bar{a})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_p + \lg^2 \sigma}}, \tag{4.15}$$

где $\bar{a}$, σ – параметры функции распределения частиц шлама в очищаемой СОЖ по размерам; a_p , σ_p – параметры распределения вероятности удаления частиц шлама (степени очистки) по их размерам для фильтрующего осадка.

Параметры a_p , σ_p являются функциями размера пор $a_{п}$ в слое шлама, который, в свою очередь, зависит от параметров $\bar{a}$ и σ , формы частиц шлама в фильтруемой СОЖ, структуры образующегося осадка,

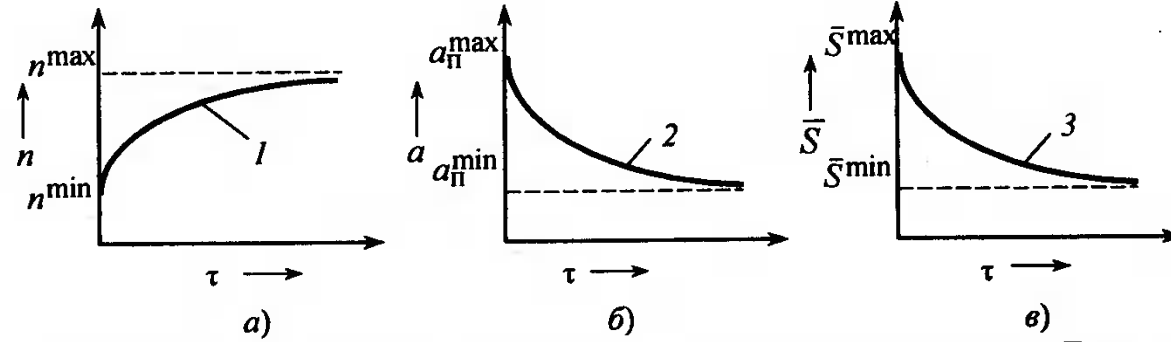


Рис. 4.10. Изменение количества n (а), размера $a_{п}$ (б) и площади пор $\bar{S}$ (в) во времени τ [62]

формы пор, сил адгезии частиц шлама. Так как a_{Π} зависит от времени $a_{\Pi} = a_{\Pi}(\tau)$, определим степень очистки как функцию времени $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$:

$$\varepsilon(\tau) = 1 - ae^{-\varsigma\tau}, \quad (4.16)$$

где ς – константа, полученная экспериментально; a – величина, характеризующая степень очистки ε_0 на чистом фильтровальном полотне: $\varepsilon_0 = 1 - a$.

Определим ς из условия неподвижности фильтровального полотна. При этом имеем ряд предполагаемых экспериментальных точек (ε_i, τ_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ (n – количество пор). Прологарифмировав левую и правую части уравнения (4.16), получим

$$\varsigma = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\ln\left(\frac{1-\varepsilon_i}{a_i}\right)}{\tau_i}. \quad (4.17)$$

Аналогичным образом определим производительность фильтрования во времени

$$Q_v(\tau) = ve^{-\lambda\tau}, \quad (4.18)$$

где v – параметр, характеризующий значения скорости и производительности фильтрования при чистом фильтровальном полотне; λ – экспериментальная константа.

Тогда

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\ln Q_{vi} - \ln v}{\tau_i}. \quad (4.19)$$

Известно, что ленточные фильтры имеют фильтровальные ванны различной формы (в продольном и поперечном сечениях), образующиеся либо вследствие провисания фильтровального полотна под массой осевшего на них шлама (цепная линия или парабола), либо с помощью конструктивных элементов фильтров, например, натяжных роликов (треугольная или трапециевидальная).

Определим значения средней степени очистки $\bar{\varepsilon}$ и производительности фильтра Q_v для продольного сечения фильтровальных ванн (для поперечного сечения расчет аналогичен).

Среднюю степень очистки фильтра определим из выражения

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{l} \int_0^l \varepsilon(S) dS, \quad (4.20)$$

где $l = \int_0^{x_0} \sqrt{1+f^{1/2}(x)} dx$ – длина полотна в продольном сечении фильтровальной ванны, м; $y = f(x)$ – уравнение, описывающее форму фильтровального полотна; S – координата элементарного участка фильтровального полотна ΔS , м; x_0 – длина фильтровальной ванны, м.

Математическая модель степени очистки $\bar{\varepsilon}$, с учетом зависимостей (4.16) и (4.20), примет вид

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}(\tau) = \frac{1}{l} \int_0^l \varepsilon(\tau_1(S)) dS; \\ \bar{\varepsilon}(\tau_1) = 1 - ae^{-\varsigma\tau}; \\ \tau_1 = \tau_1(S); \\ S = \int_{\tau-\tau_1}^{\tau} v(\psi) d\psi, \end{cases} \quad (4.21)$$

где ψ – переменная интегрирования.

Степень очистки $\bar{\varepsilon}$ при $v(\tau) = v_0 = \text{const}$, когда фильтровальное полотно движется с постоянной скоростью, определяется выражением

$$\bar{\varepsilon} = 1 - \frac{av_0}{\varsigma l} \left(1 - e^{-\frac{\varsigma l}{v_0}} \right). \quad (4.22)$$

При $v_0 \rightarrow 0$, $e^{-\frac{\varsigma l}{v_0}} \rightarrow 0$ средняя степень очистки

$$\bar{\varepsilon} = 1 - \frac{av_0}{\varsigma l} + o(v_0),$$

где $o(v_0)$ – величина, бесконечно малая по сравнению с v_0 .

При этом $\lim_{v_0 \rightarrow 0} \bar{\varepsilon}(\tau) = 1$, т.е. вероятность удаления шлама из СОЖ стремится к единице.

При больших значениях v_0 разложим $e^{-\varsigma l/v_0}$ в ряд Тейлора:

$$\bar{\varepsilon} \approx (1-a) + \frac{a}{l} \left(\frac{\varsigma l}{v_0} \right).$$

В этом случае на поверхности фильтровального полотна не успевает образоваться значительный слой осадка шлама, значение $\bar{\varepsilon}$ стремится к величине $(1-a)$, характеризующей процесс фильтрования на чистом фильтровальном полотне.

Скорость v_0 найдем графически. Обозначим $z = \varsigma l/v_0$ и, подставив его в уравнение (4.22), найдем решение уравнения (4.22) как точку пересечения z^* графиков функций $f_1(z) = e^{-z}$ и $f_2(z) = 1 + z(\bar{\varepsilon} - 1)/a$ (рис. 4.11).

Тогда скорость движения фильтровального полотна

$$v_0 = \varsigma l / z^*. \quad (4.23)$$

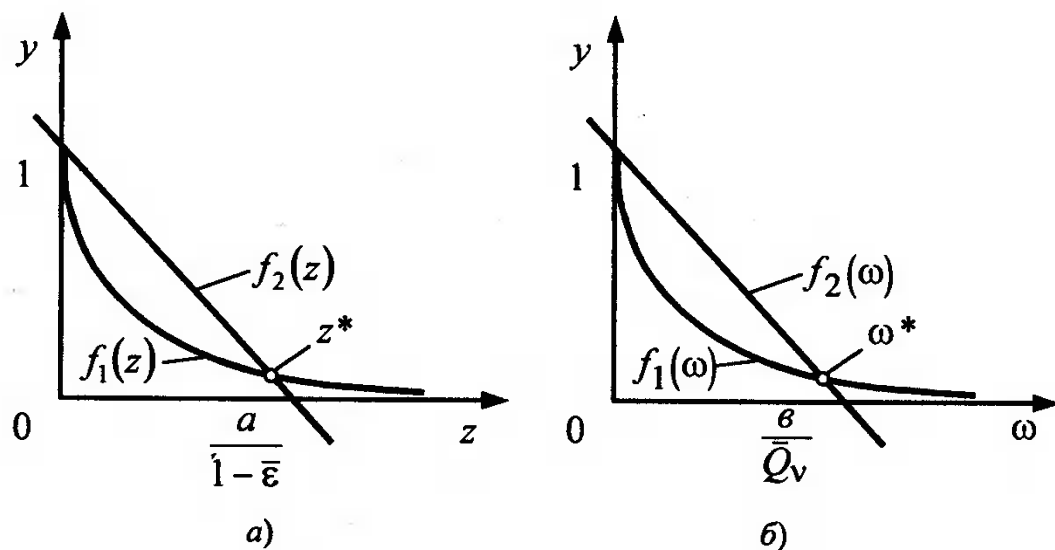


Рис. 4.11. Графический метод определения скорости v_0 движения фильтровального полотна по заданным значениям средней степени очистки $\bar{\varepsilon}$ (а) и средней производительности $\bar{Q}_v$ (б) [62]

Аналогичным образом определим среднюю производительность участка фильтровального полотна $\bar{Q}_v$ с элементарной площадью при постоянной скорости движения полотна v_0 :

$$\bar{Q}_v = \frac{1}{l} \int_0^l Q_v(s) ds. \quad (4.24)$$

Подставив в (4.23) зависимость (4.18), с учетом (4.21) и $\omega = l\lambda/v_0$, получим

$$\bar{Q}_v = \frac{\varepsilon}{\omega} (1 - e^{-\omega}). \quad (4.25)$$

При малых v_0 ($e^{-\omega} \ll 1$) значение $\bar{Q}_v$ стремится к нулю вследствие образования значительного по толщине слоя осадка:

$$\bar{Q}_v = \frac{\varepsilon}{\omega} + \dots = \frac{\varepsilon v_0}{\lambda l} + \dots$$

При больших скоростях v_0 значение $\bar{Q}_v$ стремится к величине ε , характеризующей производительность фильтра при чистом фильтровальном полотне:

$$\bar{Q}_v = \varepsilon - \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\lambda l}{v_0} + \dots \right).$$

Искомое значение ω^* найдем графически, как координату точки пересечения функций $f_1(\omega) = e^{-\omega}$ и $f_2(\omega) = 1 - (\bar{Q}_v / \varepsilon) / \omega$ (см. рис. 4.13). Соответствующее значение скорости

$$v_0 = \lambda l / \omega^*. \quad (4.26)$$

Значения средней степени очистки $\bar{\varepsilon}$ и производительности фильтра $\bar{Q}_v$ зависят не отдельно от l и v_0 , но от их отношения l/v_0 . Поэтому, если необходимо поддерживать значения $\bar{\varepsilon}$ и $\bar{Q}_v$ на заданном уровне, следует сохранять постоянство заданного значения l/v_0 , при этом абсолютные значения l и v_0 могут быть какими угодно (в разумных пределах).

Математические модели (4.22) и (4.26) позволяют проводить расчет ленточных фильтров путем решения задач анализа и синтеза. Первая задача сводится к определению множества сочетаний значений l и v_0 при заданных значениях ε , ζ и a . Задача синтеза сводится к подбору характеристики фильтровального полотна a при заданных значениях v_0 , l , ε и ζ .

Для решения поставленных задач построим номограмму определения величины z . Решив уравнение (4.22) методом Ньютона [32] для различных сочетаний a и ε , получим множество соответствующих им значений $\{z_1, \dots, z_n\}$. Прямая, проходящая через точки с координатами $(0; 1)$ и $(\bar{Q}_v, \bar{\varepsilon})$, характеризует множество сочетаний a и ε , для которых z является величиной постоянной. Получив значение z^* , можно по уравнению (4.23) найти множество величин l/v_0 для каждой пары выбранных a и ε . Отложив найденные значения z на вертикальной оси совместно с координатной сеткой $\varepsilon - a$, получим интересующую нас номограмму (рис. 4.12).

Используя экспериментальную зависимость $\varepsilon_i(\tau_i)$, по уравнению (4.17) найдем константу ζ , характеризующую процесс фильтрования СОЖ во времени; выберем фильтровальное полотно, характеризующееся величиной a , и зададим необходимую степень очистки $\bar{\varepsilon}$; найдем на

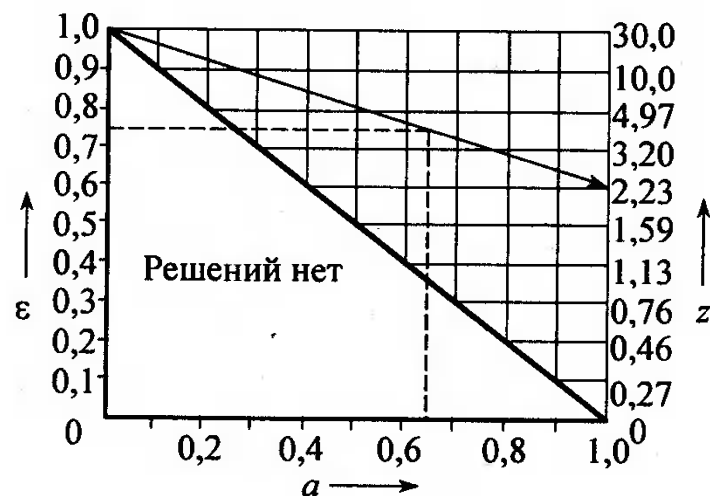


Рис. 4.12. Номограмма для определения величины z [62]

рис. 4.12 точку пересечения a и ε (например, $a = 0,65$; $\varepsilon = 0,75$); проведем через точки с координатами $(0; 1)$, $(0,65; 0,75)$ прямую и найдем на оси $0z$ значение $z^* = 2,35$; подставив его в уравнение (4.23), найдем для конкретного значения ζ множество сочетаний величин l и v_0 , обеспечивающих заданную степень очистки $\varepsilon = 0,75$.

Решение задачи синтеза состоит в следующем. Решив уравнение (4.23), найдем для заданных значений ε , v_0 , ζ единственное значение z^* . Проведем через точки $(0; 1)$ и $(0; z^*)$ прямую. Тогда заданному значению $\bar{\varepsilon}$ на этой прямой будет соответствовать единственное значение a . Однако для полученных величин a и $\bar{\varepsilon}$ заданные значения l и v_0 не являются единственными, а лишь частным решением уравнения (4.22) (см. задачу анализа).

Номограмма (см. рис. 4.12) имеет область, где нет решений уравнения (4.22). Это объясняется тем, что на фильтровальном полотне с характеристикой a нельзя получить степень очистки менее чем $\bar{\varepsilon} = 1 - a$, что соответствует началу процесса фильтрования, а вследствие образования осадка с течением времени величина $\bar{\varepsilon}$ будет больше величины $(1 - a)$.

Таким образом, полученные математические модели (4.22), (4.25) процесса фильтрования СОЖ в ленточных фильтрах позволяют при известных значениях ζ и a (получаемых экспериментально) рассчитать для заданных значений степени очистки ε и производительности Q_v габаритные размеры фильтра, скорость движения фильтровального полотна, выбрать фильтровальный материал.

Значительные капитальные и эксплуатационные издержки на подсистемы очистки СОЖ, в которых используют ленточные фильтры, непосредственная зависимость работы технологического оборудования от эффективности работы подсистемы очистки, трудности исправления ошибок, допущенных при проектировании подсистемы очистки СОЖ, оправдывают необходимость проведения экспериментальных исследований на стадии проектирования ленточных фильтров.

С целью выявления эффективности удаления шлама в самоочищающихся фильтровальных установках для очистки СОЖ предпринято специальное исследование и разработана математическая модель грануляции шлама на поверхности полотна, позволяющая определить условия, необходимые для протекания процесса грануляции, а также подобрать оптимальные режимы работы устройства удаления шлама с поверхности полотна.

Экспериментально доказано [62], что осевший на поверхность фильтровального полотна шлам может гранулироваться при воздействии на него рабочего тела, например, капроновой щетки. Процесс грануляции шлама происходит следующим образом (рис. 4.13). Щетка 1, двигаясь возвратно-поступательно вдоль фильтровального полотна, внедряется на определенную глубину в слой осевшего на полотно 3 шлама 2 (см. рис.

4.13, а) и сдвигает поверхностные слои шлама. В результате отдельные стружки сцепляются между собой и, прокатываясь по поверхности осадка, образуют гранулы шлама 5 длиной примерно 2...3 мм (см. рис. 4.13, б). Двигаясь в обратном направлении, щетка 1 завершает процесс грануляции оставшегося осадка шлама 4, одновременно происходит укрупнение гранул 5 шлама в гранулы 6 длиной 3 – 5 мм (см. рис. 4.13, в). Дальнейшие возвратно-поступательные движения щетки позволяют укрупнять гранулы 5 и 6 до гранул 7 длиной более 3 мм (см. рис. 4.13, г). В результате на полотне 3 будет находиться уже не слой шлама 2, а определенное число достаточно больших гранул, которые нетрудно удалить с поверхности полотна тем или иным способом. Процесс грануляции протекает особенно эффективно при наличии в СОЖ масляной составляющей и при массовой доле металлической стружки в шламе более 60 %.

Предположим, что рабочее тело, осуществляющее грануляцию шлама, выполнено в виде пластины, каждая точка которой представляет собой элементарный гранулятор. При этом элементарные грануляторы расположены на пластине рядами. На выходе из каждого элементарного гранулятора имеются как образовавшиеся гранулы (числом n_m), так и негранулированные частицы (4.23). Предположим также, что вероятность образования сложных агрегатов порядка n_m мала. Тогда гранулы будут образовываться из двух частиц на первом элементарном грануляторе, из четырех – на втором, из восьми – на третьем и т.д. (рис. 4.14).

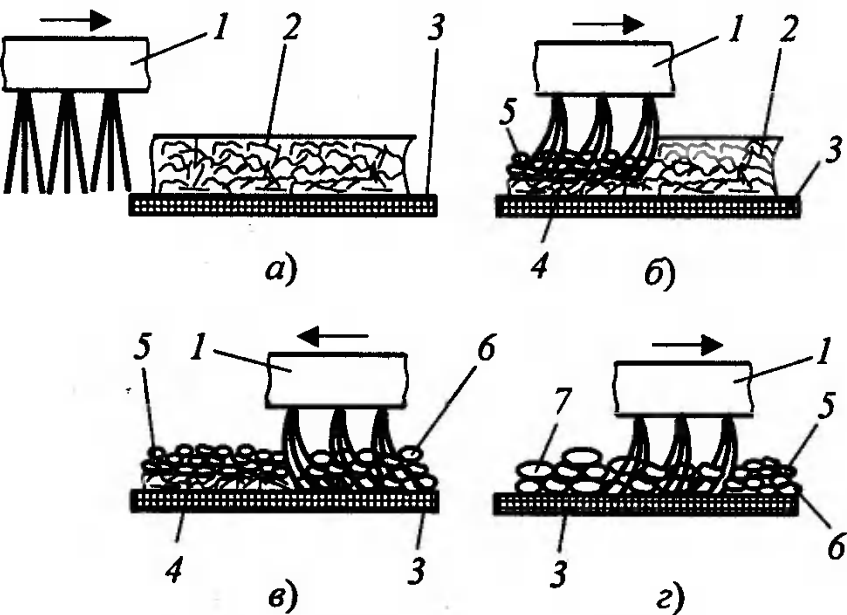


Рис. 4.13. Схема процесса грануляции шлама [62]

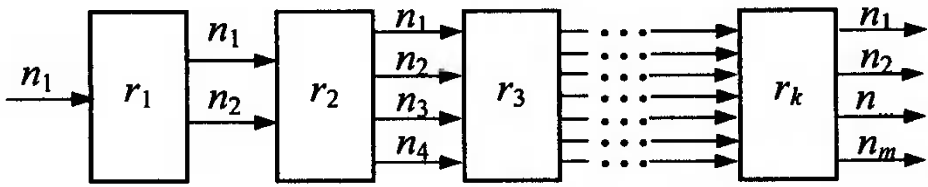


Рис. 4.14. Структурная схема процесса грануляции шлама [62]

Рассмотрим отдельно взятый элементарный гранулятор и применим для него уравнение кинетики коагуляции М.Ф. Смолуховского

$$-\frac{dn}{d\tau_k} = Kn^2, \tag{4.27}$$

где K – константа скорости коагуляции, учитывающая силы взаимодействия между частицами; n – число частиц в единице объема, шт/м³; τ_k – время коагуляции, с.

Это обосновывается тем, что процесс грануляции стружки аналогичен процессу коагуляции, наблюдаемому в коллоидных системах. При этом, если коагуляция происходит в результате силового взаимодействия между частицами, грануляция является следствием сложной формы стружек. Поэтому при математическом описании процесса грануляции можно использовать уравнения кинетики коагуляции после их уточнения в связи с особенностями процесса грануляции.

Константу скорости коагуляции K заменим на коэффициент скорости грануляции α_r^2 . В процессе грануляции, в отличие от коллоидного раствора, число первоначальных частиц изменяется. Поэтому в уравнение введем еще один член β_r^2 , который характеризует скорость подачи частиц осевшего шлама в зону грануляции.

Уравнение (4.27) примет вид

$$\frac{dn}{d\tau_r} = -\alpha_r^2 n^2 + \beta_r^2, \tag{4.28}$$

где τ_r – время грануляции, с.

После интегрирования получим:

$$\int_0^n \frac{dn}{n^2 (\beta_r/\alpha_r)^2} = -\alpha_r^2 \int d\tau_r;$$

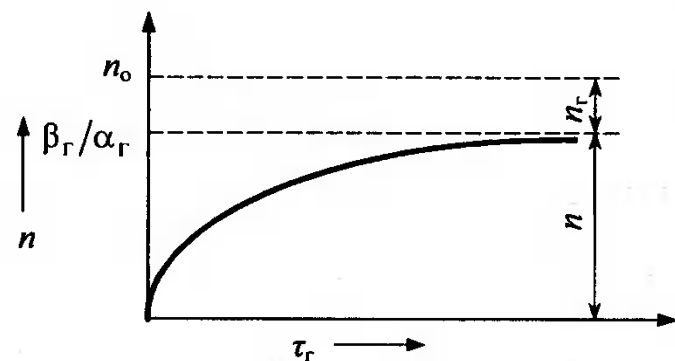


Рис. 4.15. Зависимость числа частиц и гранул шлама n от времени гранулирования τ_r [62]

$$\frac{1}{2\alpha_r\beta_r} \ln \left| \frac{\alpha_r n + \beta_r}{\alpha_r n - \beta_r} \right| = \tau_r;$$

$$\frac{1}{2\alpha_r\beta_r} \operatorname{arctg} \frac{\alpha_r n}{\beta_r} = \tau_r;$$

$$n(\tau) = \frac{\beta_r}{\alpha_r} \operatorname{th}(\alpha_r \beta_r \tau_r).$$

(4.29)

Графическая интерпретация уравнения (4.29) представлена на рис. 4.15, из которого следует, что количество одиночных частиц уменьшается на некоторую величину n_r , которая определяет количество сгранулированных частиц на поверхности фильтровального полотна.

Таким образом, можно получить степень грануляции шлама ε_r и оценить тем самым эффективность работы механизма грануляции, осуществляющего этот процесс:

$$\varepsilon_r = \frac{n_0 - n_r}{n_0}, \quad (4.30)$$

где n_0 — число единичных частиц шлама; n_r — число сгранулированных частиц шлама.

Ранее предполагали, что элементарные грануляторы расположены на рабочем теле, гранулирующем шлам рядами. Если регенерируемое фильтровальное полотно движется в направлении расположения рядов (от первого ряда ко второму и т.д. к последующему), то для каждого последующего ряда грануляторов число отдельных частиц будет уменьшаться в α_r/β_r раз. При этом количество отдельных частиц, составляющих осадок шлама, в процессе грануляции убывает, приближаясь к некоторому значению (рис. 4.16), характеризующему число частиц, которые по каким-либо причинам (например, вследствие своей сферической формы) не могут сцепляться друг с другом. Количество образовавшихся гранул зависит от того, какое число частиц может «сцепиться» друг с другом. А это, в свою очередь, зависит от условий механической обработки заготовки, которые определяют форму и размеры стружек, их сцепляемость друг с другом.

Модель (4.29) применима, если известен коэффициент грануляции α_r , характеризующий скорость грануляции при фиксированных значениях загрязненности СОЖ, скорости движения и марки фильтровального полотна, типа СОЖ, размеров зоны фильтрования и т.д. Разработка методик определения α_r , β_r , n_0 , n_r позволит достаточно строго описать процесс грануляции шлифовального шлама.

Экспериментальные исследования процесса грануляции шлама, осевшего на поверхности фильтровального полотна, провели на специально спроектированной и изготовленной установке. В качестве фильтровального полотна использовали капроновую ткань для сит с размером ячеек 50×90, 150×150, 200×200, 400×400, 600×600 мкм. Загрязненную СОЖ на фильтровальное полотно подавали с круглошлифовального станка 3Б151, на котором обрабатывали заготовки из стали 45, HRC 40...45 кругом характеристики 24A25НСМ17К5. Рабочая скорость круга составляла 35 м/с; скорость врезной подачи круга — 0,4; 0,6; 0,9 мм/мин, а окружная скорость заготовки — 25 м/мин. В качестве СОЖ использовали 5 %-ную эмульсию Укринол-1 и 5 %-ный раствор продукта Аквопол-1.

Эффективность процесса грануляции оценивали следующими показателями: количество образовавшихся гранул α ; скорость врезной подачи круга v_s ; площадь ячейки фильтровального полотна $S_{я}$.

Установлено, что количество образовавшихся гранул α зависит от площади ячейки фильтровального полотна $S_{я}$ (рис. 4.17). Значение α при фильтровании СОЖ Укринол-1 несколько больше, чем при фильтровании СОЖ Аквопол-1. Это, вероятно, объясняется большим процентным содержанием в эмульсионной СОЖ Укринол-1 масляной фазы, чем в полусинтетической СОЖ Аквопол-1.

Изменение скорости врезной подачи v_s приводит к изменению формы и размеров стружек, изменению интенсивности износа шлифовального круга, а следовательно, и процентного содержания абразивных частиц в шламе. Поэтому изменение v_s с 0,6 до 0,9 м/мин приводит к колебаниям значений α в пределах 50...60 % для СОЖ Аквопол-1 и 20...50 %

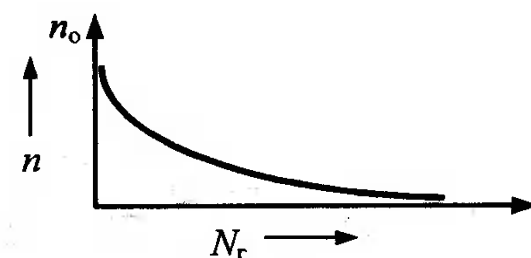


Рис. 4.16. Зависимость количества отдельных частиц шлама n на элементарном грануляторе от его номера N_r [62]

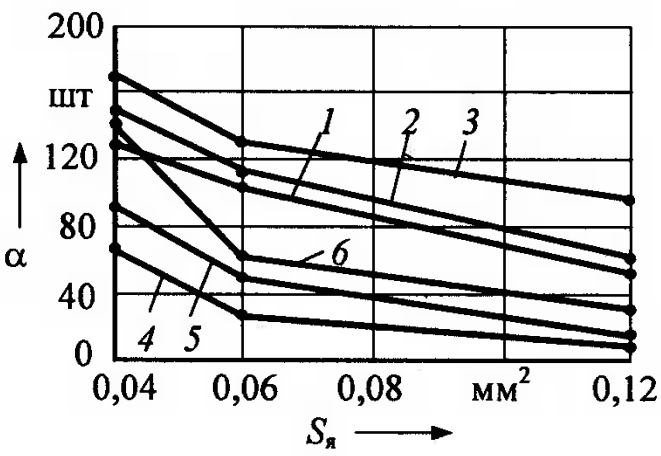


Рис. 4.17. Зависимость количества образовавшихся гранул α от площади ячейки фильтровального полотна $S_{я}$ [62]:
1, 2, 3 – СОЖ Укринол-1; 4, 5, 6 – СОЖ Аквопол-1; 1, 4 – $v_s = 0,4$ мм/мин; 2, 5 – $v_s = 0,6$ мм/мин; 3, 6 – $v_s = 0,9$ мм/мин

ствляющего удаление шлифовального шлама с фильтровального полотна при различных условиях шлифования.

Примеры схмотехнических решений самоочищающихся фильтров, созданных в УлГТУ на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований,* представлены на рис. 4.18. Фильтровальное полотно выполнено в виде бесконечного замкнутого контура 3. Загрязненную СОЖ можно подавать как с внутренней (рис. 4.18, а), так и с внешней поверхности фильтровального полотна 3 (рис. 4.18, б) через распределитель грязевой емкости 2. Уплотненный слой шлама с поверхности загрязненного фильтровального полотна снимается либо скребком и вращающейся щеткой (см. рис. 4.18, б), либо щеткой, совершающей возвратно-поступательные движения (см. рис. 4.18, а). Удаленный шлам сбрасывается в емкость для отходов 5. Очищенная фильтрованием СОЖ поступает в бак-приемник 4.

Одним из радикальных средств уменьшения расхода фильтровальных материалов являются ленточные фильтры, оснащенные устройствами для магнитной активации загрязненной СОЖ. При осаждении намагниченных частиц шлама на поверхность фильтровального полотна эти

* См. авторские свидетельства на изобретения N 1263302, 1430065, 1477448, 1503859, 1510877 (СССР), 1733051, 1755929, 1762966, 1769920, 1785722 (РФ).

частицы образуют неплотную ажурную структуру [11]. В результате расход СОЖ через систему «фильтровальное полотно – слой осадка» стабилизируется во времени, что позволяет в 5 раз увеличить предельную толщину слоя осадка и сократить расход фильтровального полотна (см. табл. 4.5).

Барабанные вакуумные самоочищающиеся фильтры для очистки СОЖ содержат емкость 2 для загрязненной жидкости, вертикально установленные фильтровальные барабаны (рис. 4.19, а) или стакан (рис.

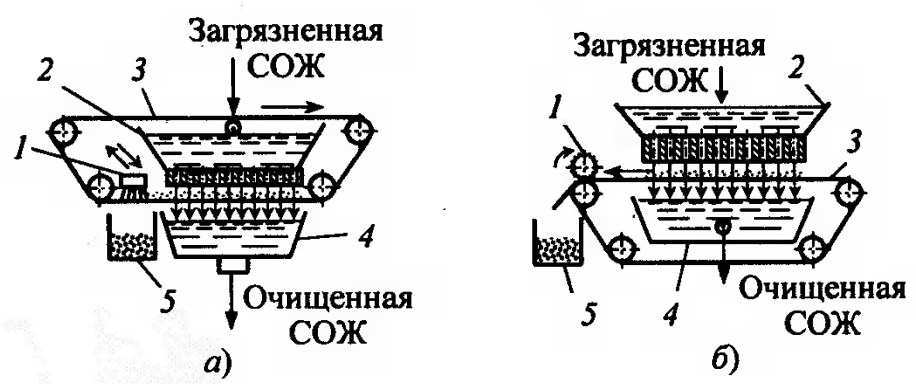


Рис. 4.18. Схемы ленточных безнапорных фильтров:
1 – механизм удаления шлама с поверхности фильтровального полотна; 2, 4 – соответственно грязевая и чистовая емкости для СОЖ; 3 – фильтровальное полотно; 5 – емкость для отходов; а, б – подача СОЖ соответственно с внутренней и наружной поверхности фильтровального полотна

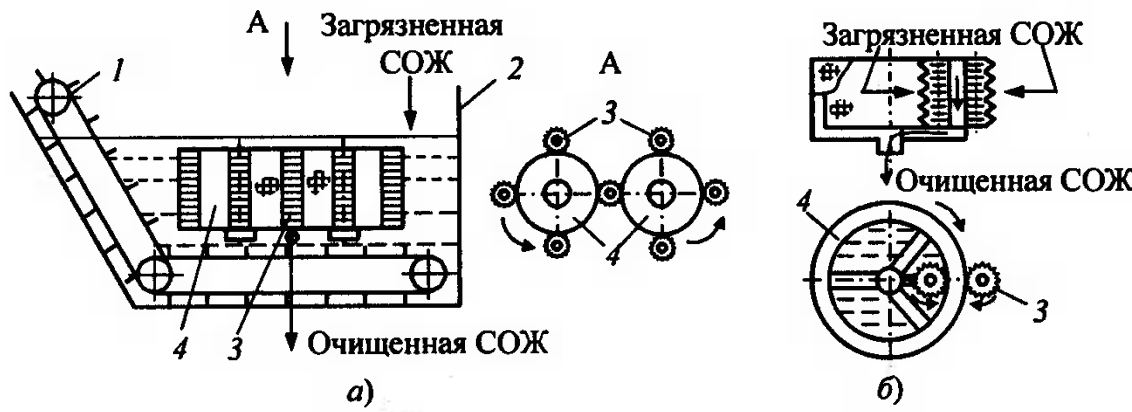


Рис. 4.19. Схемы вакуумных фильтров для очистки СОЖ от механических примесей:
а – фильтрующий элемент в виде двух вращающихся фильтровальных барабанов и неподвижно закрепленных щеток; б – фильтрующий элемент в виде вращающегося стакана с наружной и внутренней поверхностями фильтрации и вращающимися вокруг своей оси щетками

4.19, б). В первом случае вращаются фильтровальные барабаны, тогда как неподвижными остаются щетки 3. Во втором – вращается как сам стакан, так и щетки.

В процессе работы самоочищающегося вакуумного фильтра (рис. 4.19, б) загрязненная СОЖ прокачивается вакуумным насосом через наружную и внутреннюю фильтровальные поверхности стакана в полость между его стенками, откуда подается к технологическому оборудованию (станкам). При вращении фильтровального стакана механические примеси удаляются с внутренней и наружной его поверхностей вращающимися щетками 3. Гранулированные механические примеси осаждаются под действием силы тяжести на дно емкости вакуумного фильтра и удаляются скребковым конвейером 1. При работе фильтра по схеме (рис. 4.19, а) механические примеси осаждаются только на внешней поверхности барабана 4 и удаляются щетками 3.

Сопоставление технических характеристик фильтров различных конструкций дано в табл. 4.5, из которой следует, что разработанные в УлГТУ конструкции самоочищающихся фильтров и фильтров с магнитной активацией СОЖ выгодно отличаются от аналогов (см., например, [119, 120]) по показателю удельного расхода фильтровальных материалов.

Из всех конструкций-аналогов ленточные фильтры-транспортёры отличаются наиболее простой конструкцией, наименьшими потребляемой мощностью и капитальными затратами. Область их применения наиболее широка. В то же время тонкость и степень очистки СОЖ в них относительно невысоки, а удельный расход фильтровального материала наибольший (см. табл. 4.5).

По сравнению с фильтрами-транспортёрами вакуумные фильтры обеспечивают лучшую тонкость (15 мкм) и степень очистки (до 98 %) при меньшем на 50...70 % удельном расходе фильтровального материала. Однако капитальные затраты на них в 4 – 5,5 раза выше, а потребляемая мощность больше на порядок ввиду потребности в мощных насосах и герметичной системе трубопроводов. Область применения вакуумных фильтров ограничена очисткой только водных СОЖ.

Предложенное соискателем совмещение очистки СОЖ в гравитационных ленточных фильтрах с магнитной активацией загрязненной жидкости обеспечивает существенное (до 5,7 раза) сокращение удельного расхода фильтровальных материалов при лучшей тонкости очистки и незначительном увеличении капитальных затрат. Естественно, указанные эффекты достигаются при очистке СОЖ только от ферромагнитных механических примесей.

4.5. Техническая характеристика фильтров

Показатель	Самоочищающиеся (в числителе – ленточные, см. рис. 4.18; в знаменателе – вакуумные, см. рис. 4.19)	Гравитационные ленточные с магнитной активацией загрязненной СОЖ	Существующие аналоги	
			Фильтры-транспортёры ленточные	Вакуумные ленточные
Тонкость очистки d_{50} , мкм	25/15	5	25	15
Степень очистки, %	90/98	98	90	98
Предельная толщина слоя осадка, мм	—	10...18	2...3	2...5
Удельный расход фильтровальных материалов (бумаги), г/м ³	0	30...35	150...170	100...110
Удельные капитальные затраты, руб/(м ³ /ч)	$\frac{1250...1600}{1500...2000}$	1250...1600	1200...1500	6000...7500
Потребляемая мощность, Вт·ч/м ³	$\frac{9...11}{80...100}$	9...10	8...10	80...100

Разработанные конструкции самоочищающихся ленточных и вакуумных фильтров (см. рис. 4.18 и 4.19), обеспечивая степень и тонкость очистки СОЖ, не уступающие аналогам, позволяют исключить расход фильтровальных материалов. Самоочищающиеся фильтры особенно эффективны при условии хорошего удаления шлама с поверхности фильтровального полотна.

Вакуумные фильтры описанной конструкции успешно функционируют в СП СОЖ основного производства ОАО «Мотордеталь» (г. Кострома) и ОАО «Волжские моторы» (г. Ульяновск). Вакуумный фильтр для очистки СОЖ (рис. 4.20) состоит из емкости 1 сварной конструкции, в которой расположен барабан-фильтр 2, скребковый конвейер для удаления шлама 3.

Вакуумный фильтр работает следующим образом. Загрязненная СОЖ поступает от металлорежущего оборудования в промежуточный бак 9, из которого помпой 7 перекачивается в емкость установки для очистки СОЖ. В емкости в горизонтальном положении располагается бара-

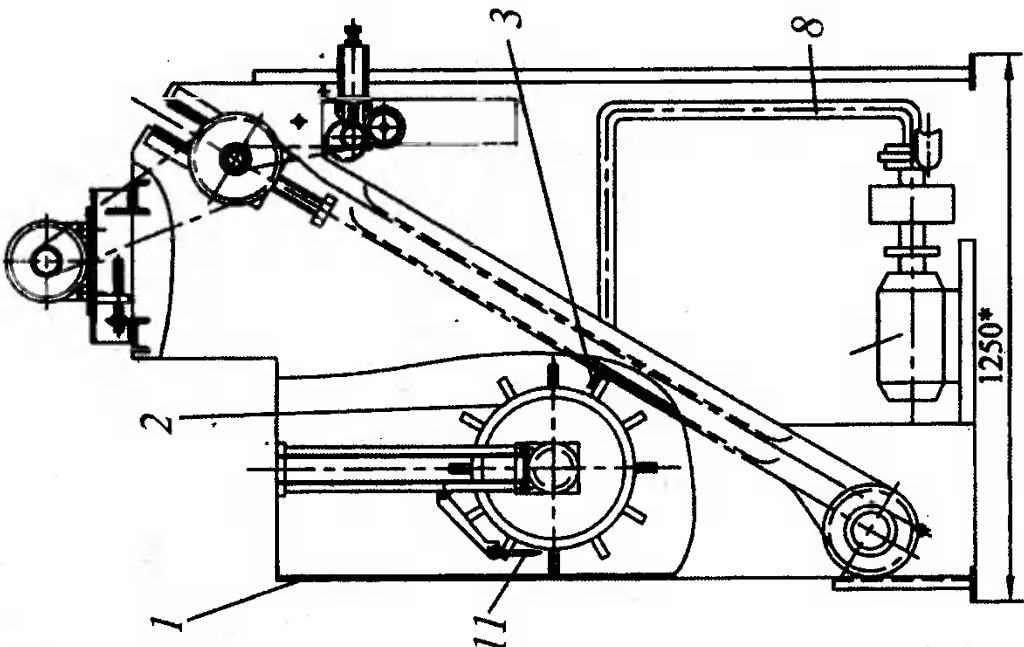
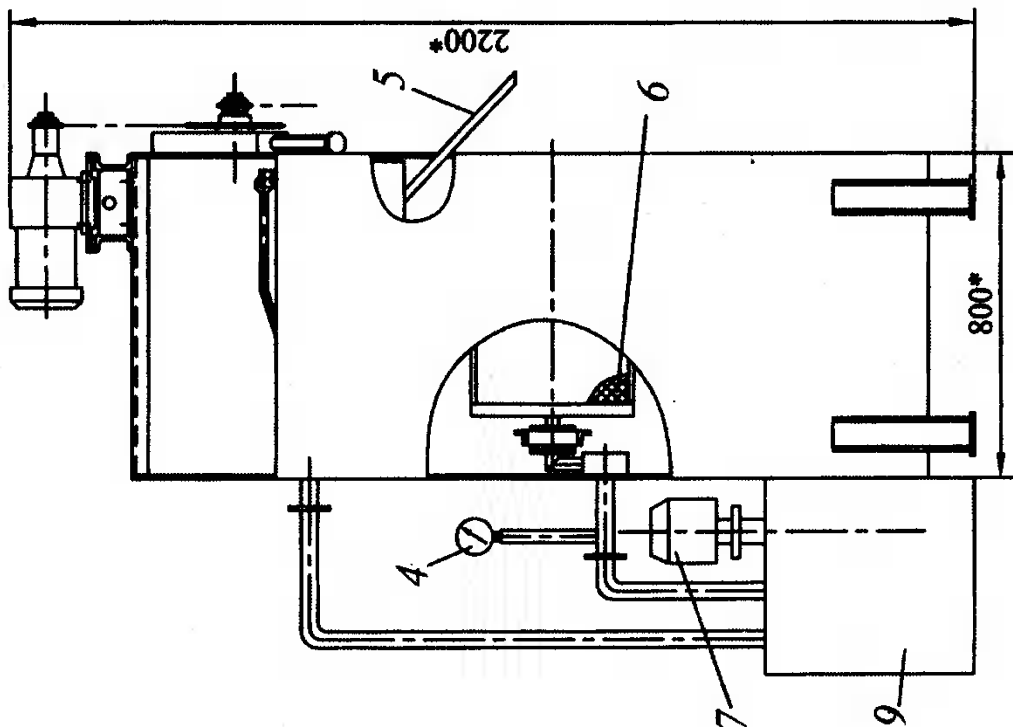


Рис. 4.20. Общий вид вакуумного фильтра в СП СОЖ ОАО «Мотордеталь» (г. Кострома)

бан-фильтр 2, полностью погруженный в жидкость. Фильтрующим элементом барабана является капроновая ткань 6 для сит с размерами ячейки 100×100 мкм или 270×270 мкм, а также определенной толщины слой шлама (намывной слой), осаждающийся на сетке при работе установки. Толщина намывного слоя регулируется путем установки ножа 11, срезающего излишний слой шлама. Оптимальная высота слоя, определенная экспериментально, составляет 5...6 мм.

Барабан-фильтр периодически поворачивается скребками конвейера 3, служащего для удаления из емкости выпадающего в осадок шлама.

Центробежный насос 10 создает в погруженном в жидкость барабане-фильтре разрежение, необходимое для обеспечения фильтрования с заданной производительностью при оптимальной толщине намывного слоя. Величина разрежения контролируется вакуумметром 4.

Вакуумный фильтр имеет механизм удаления шлама, вращение шнека которого осуществляется от привода конвейера установки. Проходящий через механизм шлам обезвоживается и по лотку 5 сбрасывается в тару (не показана), а жидкость по трубопроводу 8 подается на станки.

4.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СЕПАРАТОРЫ

Для создания достоверной математической модели очистки СОЖ от механических примесей в магнитных полях необходимо, прежде всего, выявить значимые факторы и их влияние на этот процесс.

В результате исследовательских работ [20, 23, 82, 106], выполненных на кафедре «Технология машиностроения» УлГТУ, было установлено, что основными факторами, влияющими на эффективность очистки СОЖ в электромагнитных сепараторах (ЭМС) являются:

- 1) степень заполнения зоны очистки СОЖ (полное и неполное заполнение);
- 2) конструктивное исполнение и параметры зоны очистки магнитной системы ЭМС (шаг зубьев А, мм; ширина Б и высота В канала, мм; угол при вершине зуба γ , °; величина затупления Д и высота Е зуба, мм (рис. 4.21));
- 3) длительность работы ЭМС в режиме очистки τ , мин;
- 4) режимы сепарации СОЖ в ЭМС (напряженность магнитного поля H , кА/м; скорость движения СОЖ v , м/с);
- 5) свойства СОЖ и шлама (вязкость СОЖ η , Па·с; магнитная восприимчивость частиц шлама χ ; концентрация шлама в СОЖ до очистки

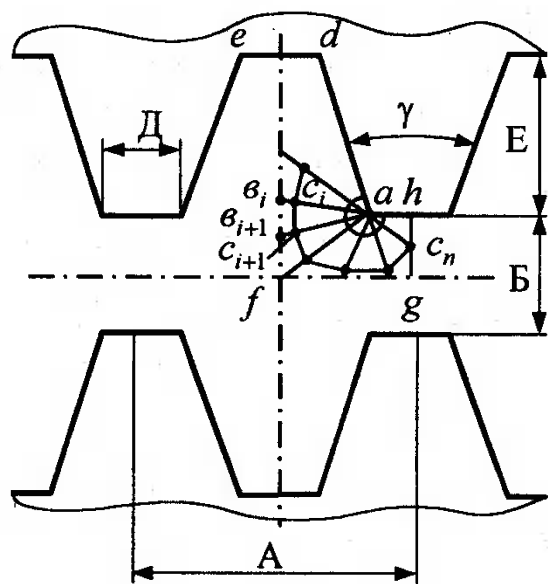


Рис. 4.21. Схема к определению площади S зоны очистки в ЭМС

$c_{и}$, кг/м³; содержание ферромагнетика в шламе $c_{ф}$, кг/м³; средний диаметр ферромагнитных частиц шлама d , мкм).

По результатам экспериментальных исследований разработана математическая модель качества очистки СОЖ от механических примесей в ЭМС, включающая все перечисленные выше факторы, влияющие на эффективность очистки.

Степень очистки ε СОЖ в ЭМС найдем из отношения

$$\varepsilon = S / S_{a d e f g h}, \quad (4.31)$$

где $S_{a d e f g h}$ — площадь пропускного сечения канала с учетом его симметрии, м²; S — зона в площади $S_{a d e f g h}$, в которой частицы задерживаются ЭМС, м² (см. рис. 4.21);

$$S_{a d e f g h} = 0,25AB + 0,5E \left(A - D - E \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right). \quad (4.32)$$

Для определения S площадь $S_{a d e f g h}$ разделим лучами, проходящими из точки 0 через каждые 5 градусов, на ряд элементарных участков (см. рис. 4.21). На каждом полученном отрезке (например, av_i) в результате расчета на ЭВМ траектории движения частиц в различных точках этих отрезков найдем точку (например c_i), являющуюся границей зоны S на отрезке. Далее вычислим площади полученных таким образом элементарных треугольников и величину S как сумму площадей всех треугольников:

$$S = 0,5 \sin 5^\circ \sum_{i=1}^{n-1} (ac_i)(ac_{i+1}). \quad (4.33)$$

Для определения траектории движения ферромагнитных частиц в канале ЭМС (рис. 4.22) составим и решим уравнение их движения

$$m \vec{r}'' = \vec{F}_M + \vec{F}_c, \quad (4.34)$$

где m — масса частицы шлама, кг; $\vec{r}''$ — ускорение частицы шлама, м/с² ($\vec{r} = \{x, y, z\}$ — вектор положения частицы в канале сепаратора); $\vec{F}_M$ — магнитная сила, Н; $\vec{F}_c$ — сила сопротивления, Н.

Силы $\vec{F}_M$ и $\vec{F}_c$ определим по известным выражениям [62]:

$$\vec{F}_M = \mu_0 \chi w \vec{H} \nabla \vec{H}; \quad (4.35)$$

$$\vec{F}_c = 3\pi\eta d \vec{r}', \quad (4.36)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, Гн/м; w — объем частицы, м³; $\vec{r}'$ — скорость движения частицы, м/с; $\vec{H}$ — вектор напряженности магнитного поля, А/м; $\nabla \vec{H}$ — градиент вектора напряженности магнитного поля, А/м.

Для упрощения математической модели использовали общепринятые допущения: считали, что частицы шлама имеют шарообразную форму и не взаимодействуют между собой; учитывали только силы, оказывающие заметное влияние на динамику электромагнитной сепарации.

Для определения $\vec{F}_M$ в любых точках канала необходимо знать напряженность $\vec{H}$ поля в канале, т.е. в двухмерном магнитном поле по осям X и Y , так как неоднородности поля по оси Z нет. $\vec{H}(x, y)$ выражается через скалярный магнитный потенциал

$$\vec{H}(x, y) = -\nabla \varphi(x, y), \quad (4.37)$$

причем функция $\varphi(x, y)$ удовлетворяет уравнению Лапласа. Граничное значение $\varphi_0(x, y)$ на поверхности канала ЭМС найдем из выражения

$$\varphi_0 = JN,$$

где J — сила тока в электромагнитных катушках ЭМС, А; N — число витков катушки.

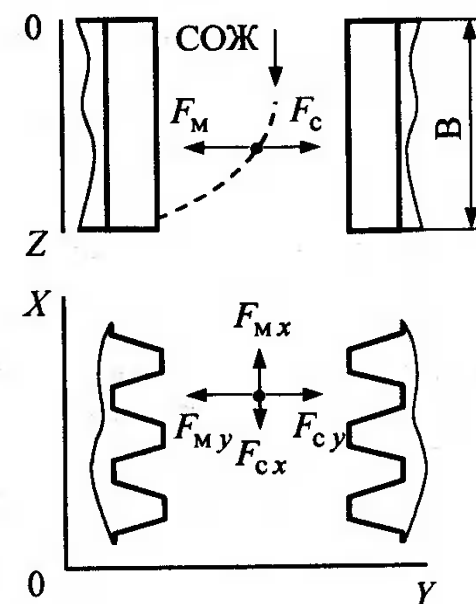


Рис. 4.22. Расчетная схема сил, действующих на ферромагнитную частицу в зоне очистки ЭМС

Следовательно, определение $\bar{H}(x, y)$ сводится к задаче Дирихле:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0; \quad \varphi(x, y)|_{\Gamma} = \varphi_0, \quad (4.38)$$

где Γ – простой замкнутый контур, ограничивающий пропускное сечение канала ЭМС.

Существующие методы расчета не обеспечивают достаточно точного решения уравнений (4.38), так как они основаны на допущениях, которые исключают из рассмотрения конкретную конфигурацию полюсов. Поэтому уравнение (4.38) решим вариационным методом Ритца. Скалярный магнитный потенциал представим в виде

$$\varphi(x, y) = \varphi_0(x, y) + \sum_{i=0}^n c_i \varphi_i(x, y), \quad (4.39)$$

где $\{\varphi_i(x, y), i = 0, 1, \dots, n\}$ – система координатных функций, причем

$$\varphi_0(x, y)|_{\Gamma} = \varphi_0, \quad \varphi_i(x, y)|_{\Gamma} = 0, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n).$$

Для наилучшей сходимости метода функции $\varphi_0(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ представим в виде

$$\varphi(x, y) = \varphi_0[1 - \omega(x, y)];$$

$$\varphi(x, y) = \varphi_0[1 - \omega(x, y) + c_1 x \Omega(x, y) + c_2 y \Omega(x, y)], \quad (4.40)$$

где

$$\omega(x, y) = \begin{cases} \beta(y - E) \operatorname{arctg} \frac{kx - y}{0,5B - y}, & x \leq 0; \\ \beta(y - E) \operatorname{arctg} \frac{y}{y - 0,5B}, & x > 0; \end{cases}$$

$$\Omega(x, y) = \begin{cases} (y - E)(y - 0,5B)(y - kx), & x \leq 0; \\ y(y - E)(y - 0,5B), & x > 0; \end{cases}$$

$$k = \operatorname{tg}(90^\circ + 0,5\gamma); \quad \beta = 2/[\pi(E - 0,5B)].$$

Для поиска коэффициентов c_1 и c_2 решим систему уравнений Ритца:

$$\begin{cases} [U_1, U_1]c_1 + [U_1, U_2]c_2 = -[U_0, U_1]; \\ [U_1, U_2]c_1 + [U_2, U_2]c_2 = -[U_0, U_2], \end{cases} \quad (4.41)$$

где $U_0 = 1 - \omega(x, y)$; $U_1 = x\Omega(x, y)$; $U_2 = y\Omega(x, y)$.

Решение системы уравнений Ритца относительно c_1 и c_2 представлено в работах [20, 23]. После решения системы (4.41) определим напряженность $\bar{H}(x, y)$ в (4.37) и магнитную силу $\bar{F}_m(x, y)$, а затем и степень очистки СОЖ от ферромагнитных частиц шлама (рис. 4.23).

Доказана адекватность всех разработанных математических моделей реальному процессу очистки СОЖ в ЭМС: расхождение между полученными расчетными и экспериментальными значениями ε и τ_n не превышает 15...20 %, а коэффициенты парной регрессии, вычисленные по методике корреляционно-регрессионного анализа, не меньше 0,9 [32].

В результате теоретико-экспериментальных исследований выявлены оптимальные конструктивные параметры зоны очистки и режимы сепарации СОЖ в ЭМС. При полном заполнении зоны очистки СОЖ опти-

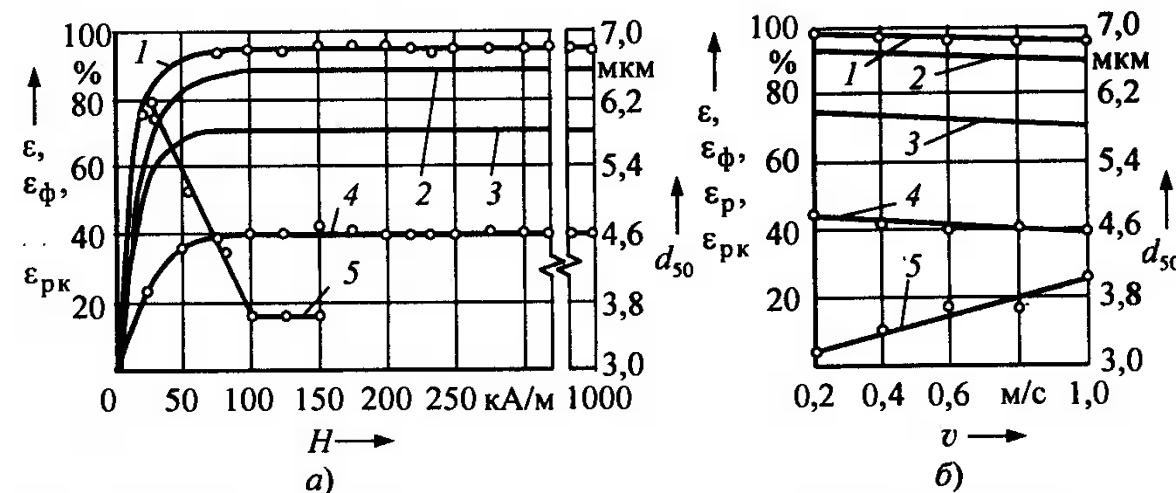


Рис. 4.23. Зависимости степени очистки ε (общая), ε_ϕ (по ферромагнетику), ε_p (расчетная), ε_{pk} (расчетная скорректированная, $\varepsilon_{pk} = 1,25 \varepsilon_p$) и толщины очистки d_{50} от напряженности H магнитного поля (а) и скорости v движения СОЖ (б):

$A = 15$ мм; $B = 10$ мм; $B = 100$ мм; $D = 4$ мм; $E = 6$ мм; $\gamma = 60^\circ$; $v = 0,8$ м/с (а); $H = 200$ кА/м (б); СОЖ – водопроводная вода; шлам их стали 40Х9С2 ($c_\phi = 40$ %, $d = 10$ мкм, $c_n = 1$ г/л); 1, 2, 3, 4, 5 – соответственно ε_ϕ , ε_{pk} , ε_p , ε , d_{50}

мальными параметрами являются: $A = 15...30$ мм; $B = 0,67A$ мм; $B \geq 200$ мм; $\gamma = 45^\circ$; $D = (0,15...0,2)A$ мм; $E = 0,33A$ мм. Для реализации неполного заполнения зоны очистки СОЖ параметр B следует увеличить до $(2...3)A$, а остальные параметры оставить без изменения. Толщина потока СОЖ в каналах не должна превышать $0,33A$. Оптимальные режимы сепарации: $H = 80...100$ кА/м; $v = 0,8...1$ м/с.

Непрерывное накопление шлама в зоне очистки ЭМС в процессе его работы приводит к перекрытию зоны очистки и снижению производительности Q очистки СОЖ. В связи с периодическим характером работы ЭМС представляет интерес выявление максимального времени τ_n непрерывной работы ЭМС в режиме очистки, которое определяется максимально допустимой Q . Зависимость $Q(\tau)$, необходимую для определения τ_n , определяли в результате последовательных расчетов для ряда одинаковых интервалов времени τ_i (в пределах которых Q изменяется незначительно):

$$S_{\text{ш}i} = Q_i - \rho_{\text{ш}} \tau_i \epsilon / (B \rho_{\text{ш}}); \tag{4.42}$$

$$Q_i = V \left(S - \sum_{i=1}^i S_{\text{ш}i} \right), \tag{4.43}$$

где $\rho_{\text{ш}}$ – плотность шлама в магнитном поле, кг/м³; $S_{\text{ш}i}$ – площадь, занимаемая в пропускном сечении зоны очистки шламом, задержанным в течение интервала времени τ_i , м².

При неполном заполнении зоны очистки СОЖ Q не изменяется до тех пор, пока в зоне очистки есть пространство, не занятое СОЖ и шламом. Поэтому

$$\tau_n = (S - Q/V) B \rho_{\text{ш}} / (Q c_{\text{ш}} \epsilon). \tag{4.44}$$

Таким образом, выражения (4.42) и (4.43) образуют математическую модель τ_n при полном заполнении зоны очистки СОЖ, а выражение (4.44) – при неполном.

Как показывает производственный опыт [82], в связи с неизбежным в процессе функционирования СП СОЖ повышением и колебаниями концентрации механических примесей в загрязненной СОЖ $c_{\text{ш}}$, возрастает также концентрация примесей в очищенной СОЖ c_0 (при постоянной степени очистки ϵ). Это, естественно, приводит к ухудшению качест-

венных показателей изготавливаемой продукции. Поэтому необходимо, чтобы ϵ изменялась в соответствии с изменениями $c_{\text{ш}}$ таким образом, чтобы стабилизировать на требуемом уровне величину c_0 . Это представляется возможным, если в очистителе посредством регулирования того или иного конструктивного или режимного фактора изменять степень очистки ϵ .

После определения оптимальных конструктивных параметров каналов ЭМС и режимов сепарации СОЖ необходимо определить количество каналов n_k , длину каналов $Ж$, выполнить расчет магнитной системы ЭМС (рис. 4.24) и вычислить длительность непрерывной работы сепаратора в режиме очистки.

Назначив из конструктивных соображений длину каналов $Ж$ (см. рис. 4.24), с учетом заданных размеров A , B , D , E и угла при вершине зуба γ , рассчитали площадь S_k (м²) эффективного сечения одного канала, число каналов n_k :

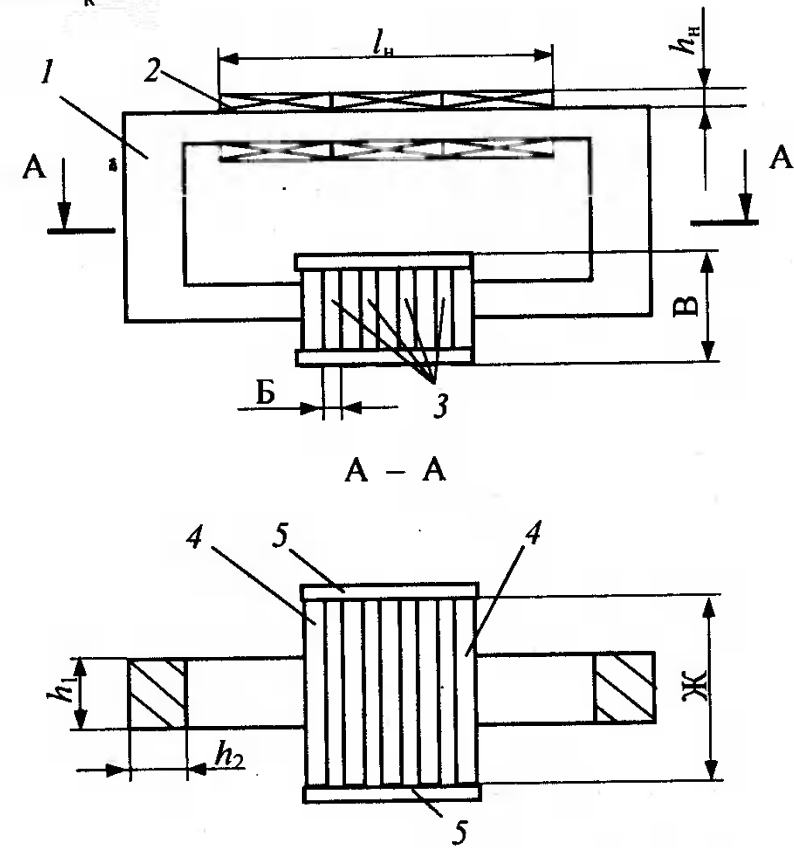


Рис. 4.24. Схема магнитной системы ЭМС:
1 – магнитопровод; 2 – электромагнитная катушка; 3 – каналы; 4 – полюсы;
5 – магнитопроводящие пластины

$$n_k = \frac{Q}{v S_k}.$$

Если число n_k получится дробным, его округляют до ближайшего большего целого и пересчитывают величины S_k и J .

При полном и неполном заполнении каналов СОЖ необходимо по возможности уменьшать число каналов n_k за счет увеличения их длины J , так как при этом снижается мощность ЭМС (см. зависимости (4.51) – (4.58)). Оптимальное сочетание числа n_k и длины каналов J , обеспечивающее равномерное распределение потока СОЖ по зоне очистки и минимально возможную мощность ЭМС, получим в результате нескольких последовательных расчетных операций.

Расчет магнитной системы проводят в указанной ниже последовательности.

1. Магнитная индукция B_k , Тл, в каналах зоны очистки

$$B_k = \mu_0 H. \quad (4.45)$$

2. Магнитный поток Φ_k , Вб, в каналах зоны очистки

$$\Phi_k = B_k S_{\Pi}, \quad (4.46)$$

где S_{Π} – площадь полюсов и пластин, м² ($S_{\Pi} = ВЖ$, см рис. 4.24).

3. Полный магнитный поток Φ_{Π} , Вб

$$\Phi_{\Pi} = 1,3 \Phi_k, \quad (4.47)$$

где 1,3 – коэффициент, учитывающий потери магнитного потока.

4. Магнитное сопротивление R_M , Гн⁻¹, зоны очистки

$$R_M = B n_k / (\mu_0 S_{\Pi}). \quad (4.48)$$

5. Полная магнитодвижущая сила F_{Π} (А)

$$F_{\Pi} = \Phi_{\Pi} R_M. \quad (4.49)$$

6. Площадь магнитопровода S_M (м²)

$$S_M = \Phi_{\Pi} / B_M, \quad (4.50)$$

где B_M – магнитная индукция в магнитопроводе, Тл.

7. Сила постоянного тока J (А) в электромагнитных катушках сепаратора

$$J = \pi i d_{\text{пр}}^2 / 4, \quad (4.51)$$

где i – допустимая по нагреву плотность тока, А/мм²; $d_{\text{пр}}$ – диаметр провода, мм.

8. Общее число витков в катушке

$$N = F_{\Pi} / J. \quad (4.52)$$

9. Размеры поперечного сечения катушек, мм²

$$h_{\text{н}} l_{\text{н}} = N d_{\text{пр}} (d_{\text{пр}} + \sigma / m) / k_y, \quad (4.53)$$

где $h_{\text{н}}$ – высота намотки, мм (см. рис. 4.24); $l_{\text{н}}$ – длина намотки, мм (см. рис. 4.24); k_y – коэффициент укладки, зависящий от диаметра провода и формы катушки; σ – толщина прокладочной бумаги, мм; m – число слоев провода между двумя бумажными прокладками.

Из двух величин $h_{\text{н}}$ и $l_{\text{н}}$ одной задаются, а вторую вычисляют.

10. Средняя длина витка в катушках, мм

$$L_{\text{ср}} = (\Pi + 4h_{\text{н}}) - k_{\text{упл}} h_{\text{н}}, \quad (4.54)$$

где Π – внутренний периметр прямоугольной катушки, мм; $k_{\text{упл}}$ – коэффициент, учитывающий уплотнение катушки на углах.

11. Общая длина провода, мм

$$L_{\text{пр}} = L_{\text{ср}} N. \quad (4.55)$$

12. Общее омическое сопротивление катушек, Ом

$$R_{\text{ом}} = 4 L_{\text{пр}} \rho_{20} [1 + 0,004(T - 20)] / (\pi d_{\text{пр}}^2), \quad (4.56)$$

где ρ_{20} – удельное омическое сопротивление материала провода при температуре 20 °С, Ом·мм²/м; T – допустимая температура нагрева катушек, °С.

13. Общее напряжение на катушках, В:

$$U = J R_{\text{ом}}. \quad (4.57)$$

14. Общая мощность катушек, Вт:

$$W = U J. \quad (4.58)$$

15. Уравнение теплового баланса электромагнитных катушек:

$$U J \leq k_T (S_H + \eta_T S_{вн}) (T - T_0), \quad (4.59)$$

где S_H – площадь наружных поверхностей катушек без учета торцевых поверхностей, см^2 ; $S_{вн}$ – площадь внутренних поверхностей катушек, см^2 ; k_T – коэффициент теплоотдачи, представляющий собой количество теплоты, отдаваемой с 1 см^2 поверхности тела в 1 с при разности температур между поверхностью и окружающей средой в 1°C , $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; η_T – коэффициент, характеризующий эффективность теплоотдачи с внутренней поверхности катушек; T_0 – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

Если правая часть неравенства (4.59) будет меньше левой, следует увеличить величины S_H и $S_{вн}$, что достигается увеличением l_H ; после этого вновь проверяют уравнение (4.59).

На основе теоретико-экспериментальных исследований процесса очистки СОЖ в ЭМС, выполненных на кафедре «Технология машиностроения» УлГТУ, была разработана установка для очистки СОЖ на основе щелевого ЭМС (рис. 4.25).

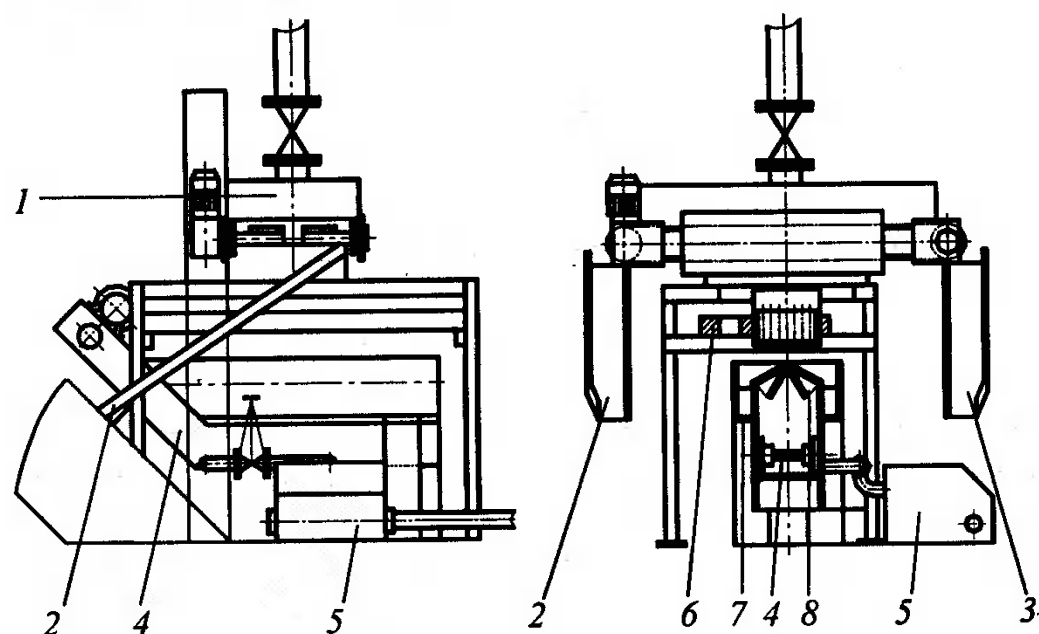


Рис. 4.25. Установка для очистки СОЖ на основе ЭМС

ЭМС 6 установлен на металлической раме. Над сепаратором смонтирован фильтр грубой очистки 1 с лотками для удаления шлама 2 и 3. Под сепаратором находится корпус 7 с распределителем 8, предназначенным для организации процесса разгрузки ЭМС от шлама. В нижней части корпуса 7 находится конвейер 4 для удаления шлама. Установка для очистки СОЖ монтировалась на емкости в централизованной подсистеме очистки СОЖ в основном производстве Ульяновского автомобильного завода и 23 ГПЗ (г. Вологда).

Цикл работы ЭМС организован следующим образом. В процессе очистки СОЖ от ферромагнитных частиц лепестки распределителя 8 раскрыты; в результате СОЖ, очищенная в каналах магнитопроводящей системы ЭМС 6, направляется в наружные полости корпуса 7; затем отстоянная в них СОЖ пропускается через барабанный магнитный сепаратор 5. При разгрузке ЭМС от шлама электромагнитная катушка магнитопроводящей системы кратковременно (на $1 - 2 \text{ с}$) обесточивается, при этом лепестки распределителя 8 закрываются, направляя потоки СОЖ со шламом, удаленным из всех каналов зоны очистки ЭМС, во внутреннюю полость корпуса 7. Шлам из внутренней полости корпуса удаляется конвейером 4. Объем неочищенной СОЖ, проходящей за время обесточивания электромагнитной катушки, относительно невелик, и поэтому не составляет больших затруднений очистить его с помощью барабанного магнитного сепаратора 5 серии СМ.

Промышленные испытания ЭМС позволили выявить наиболее рациональную область его применения – очистка СОЖ от тонких ферромагнитных примесей с невысокой их концентрацией (не более $0,5 \text{ г/л}$). При этом, во избежание значительного увеличения капитальных затрат на изготовление ЭМС, целесообразно их использовать в подсистемах очистки СОЖ с небольшой производительностью.

Техническая характеристика ЭМС сопоставлена с характеристиками других разработанных в УлГТУ магнитных сепараторов и серийно выпускаемых барабанных магнитных сепараторов (БМС) в следующем параграфе (см. табл. 4.7).

4.4. ПАТРОННЫЕ МАГНИТНЫЕ СЕПАРАТОРЫ

Для создания патронного магнитного сепаратора (ПМС) с высокоэффективной очисткой СОЖ от ферромагнитных примесей необходимо оптимизировать конструктивные параметры его магнитной системы. Так как сепарация феррочастиц в ПМС является сложным процессом, то решить эту задачу с наименьшими затратами можно путем рационального

сочетания экспериментальных исследований и математического моделирования процесса патронной магнитной сепарации [13, 17, 19, 62, 74]. Это позволит перейти от требуемого качества и производительности очистки СОЖ к оптимизации режимов сепарации и конструктивных параметров ПМС [13].

Исследования проводили в два этапа. На первом этапе экспериментально исследовали влияние формы магнитных элементов феррита бария магнитно-твердого (рис. 4.26) патронного ПМС на степень очистки СОЖ. Цель первого этапа исследований – выявить наиболее значимые размеры и оптимальную форму магнитных элементов. Одновременно на первом этапе исследовали распределение магнитной индукции [17] в пространстве между двумя магнитными патронами – эту информацию использовали в качестве исходных данных при оптимизации размеров магнитных элементов.

На втором этапе разрабатывали (с учетом результатов первого этапа) математическую модель ПМС и проводили оптимизацию его конструктивных параметров.

Основными измеряемыми характеристиками на первом этапе исследований служили составляющие магнитной индукции B по трем координатам X, Y, Z . В исследованиях использовали установку с преобразователем (датчиком) Холла типа ПХЭ 605817Б со следующими характеристиками: размеры рабочей зоны $1 \times 0,25$ мм; магнитная чувствительность 95 мкВ/мТл; номинальный управляющий ток – 100 мА. В качестве источника питания постоянного тока использовали прибор типа Б5-46, работающий в режиме стабилизации тока при $I = 40$ мА. Холловскую разность потенциалов измеряли высокоомным ламповым вольтметром типа В2-3. Для градуировки прибора использовали измеритель магнитной индукции Ш1-1 с точностью измерений до 0,1 %.

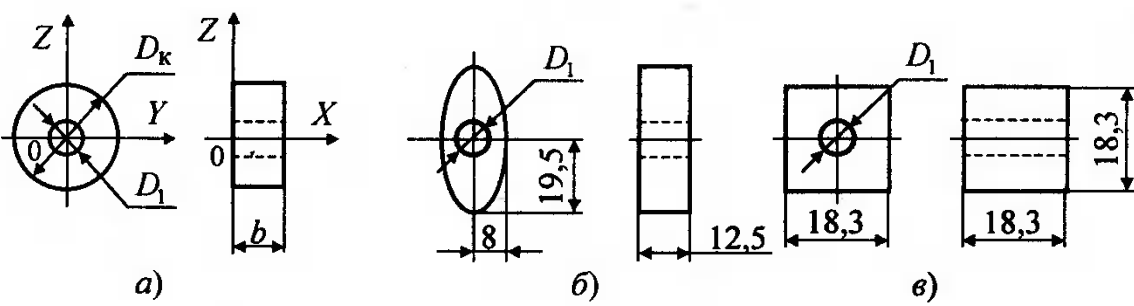


Рис. 4.26. Магнитные элементы из феррита бария магнитно-твердого (ГОСТ 24063–80):
а, б, в – соответственно круглая, эллиптическая и призматическая формы магнита

Доминирующая роль (рис. 4.27) из трех составляющих магнитной индукции принадлежит B_z (кривые 1 – 4), которая определяет величину ponderomotorной силы, притягивающей частицы к поверхности патронов; второй по значимости является B_x (кривые 5 – 7). Объединение одиночных магнитных элементов в магнитный патрон приводит к перераспределению магнитной индукции в пространстве. Кривые 2 – 4 $B_z(x)$ для патронов из двух и четырех магнитных элементов расположены выше кривой 1 для одиночного магнитного элемента. Аналогично расположены зависимости B_x – кривые $B_x(x)$ 6, 7 лежат выше кривой 5.

Наличие прокладки между магнитными элементами приводит к увеличению B_z и B_x за счет концентрации магнитной индукции B в области прокладок.

Кривые 3 и 7 (B_z и B_x), полученные для патронов из двух элементов с прокладкой, расположены выше кривых соответственно 2 и 6 – для патронов из двух элементов без прокладок. В то же время при наличии прокладок увеличение числа магнитных элементов с двух до четырех не сказалось ощутимо на величине индукции. Кривые 3 и 4 для патронов из двух и четырех элементов с прокладками практически неразличимы.

Взаимодействие двух патронов практически не сказывается на величине магнитной индукции на поверхности магнитных патронов. При сопоставлении величин B_z и B_x (рис. 4.28, а и б) отчетливо видно их малое различие. Однако при удалении от поверхности магнитное поле перераспределяется, и величины магнитной индукции на одинаковом расстоянии от поверхности патронов для одиночного патрона и системы из двух патронов начинают различаться.

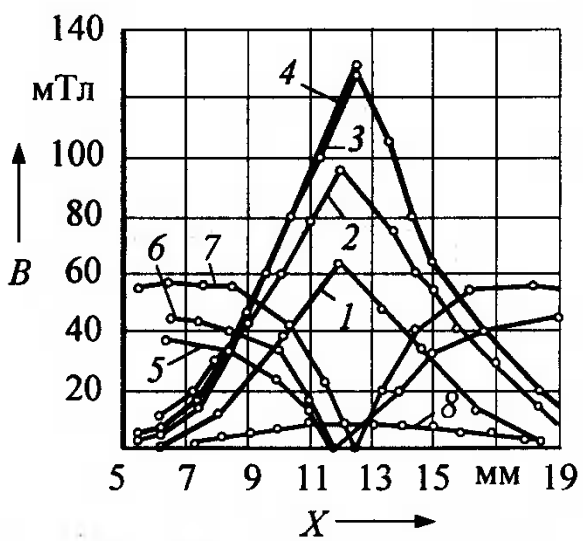


Рис. 4.27. Составляющие магнитной индукции по длине патрона ($D_k = 25$ мм; $D_1 = 7$ мм; $b = 12,5$ мм; $m = 50,8$ г; материал – феррит бария 6БИ240, ГОСТ 24063–80) [17]:
1 – 4 – для B_z ; 5 – 7 – для B_x ; 8 – для B_y ;
1, 5 – для одиночного магнитного элемента; 2, 6 – для патрона из двух магнитных элементов без прокладки; 3, 7 – для патрона из двух магнитных элементов с прокладкой; 4 – для патрона из четырех магнитных элементов с прокладкой

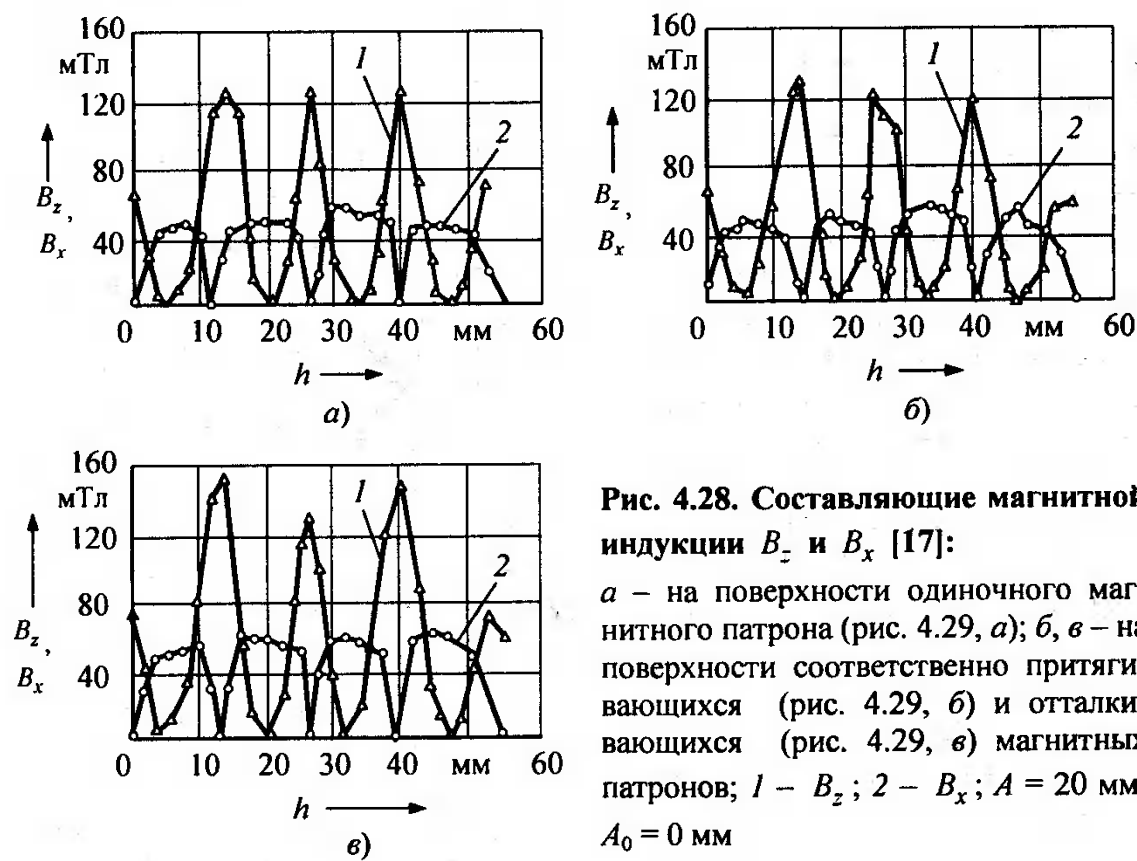


Рис. 4.28. Составляющие магнитной индукции B_z и B_x [17]:
а – на поверхности одиночного магнитного патрона (рис. 4.29, а); б, в – на поверхности соответственно притягивающихся (рис. 4.29, б) и отталкивающихся (рис. 4.29, в) магнитных патронов; 1 – B_z ; 2 – B_x ; $A = 20$ мм; $A_0 = 0$ мм

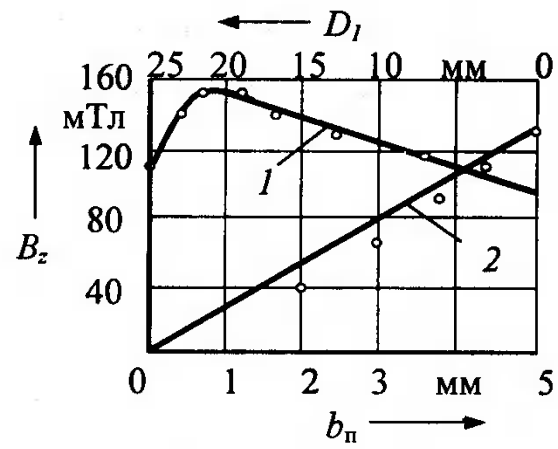
При смене знака взаимодействия магнитных патронов с отталкивания на притяжение на поверхности патронов наблюдается небольшое увеличение значений величин B_z и B_x (см. рис. 4.28, б и в), разница не превышает 20 %. Увеличение объясняется перераспределением магнитной энергии в зазоре. При уменьшении зазора между патронами до 10 мм наблюдается «вытягивание» магнитных полей взаимодействующих патронов навстречу друг другу и увеличение B_z на 20...25 %, а при уменьшении зазора до 5 мм B_z увеличивается на 75 %.

Составляющая магнитной индукции B_z достигает оптимума при толщине прокладки 1 мм (рис. 4.30) и линейно уменьшается в диапазоне изменения b_n от 1 до 5 мм (в 5 раз) с $B_z = 155$ мТл до 98 мТл (в 1,58 раза). При увеличении диаметра отверстия в магнитном элементе, при прочих равных условиях, наблюдалось увеличение величины B_z , что свидетельствует о преимуществе магнитных элементов дисковой формы перед кольцевой. Пример конструктивной реализации магнитных патронов с дисковой формой магнитных элементов представлен на рис. 4.31.



Рис. 4.29. Схемы магнитного патрона (а) и взаимного расположения отталкивающихся (б) и притягивающихся (в) патронов

Рис. 4.30. Зависимости составляющей магнитной индукции B_z от диаметра D_1 магнитных колец и толщины ферромагнитной прокладки b_n :
1 – $B_z(b_n)$; 2 – $B_z(D_1)$;
 $D_k = 25$ мм, $b_n = 12,5$ мм



Исследования магнитных элементов различной формы показали (см. рис. 4.31), что эллиптические элементы (рис. 4.31, в, г) обеспечивают большее значение величины B_z (на 10...15 %) по сравнению с кольцевыми (рис. 4.31, а, б). В свою очередь призматические элементы уступают по эффективности кольцевым элементам (рис. 4.31, д, е). Во избежание трудностей технологического и конструктивного плана, возникающих при проектировании магнитной системы ПМС из эллиптических элементов, наиболее целесообразно использовать кольцевую и дисковую формы магнитных элементов.

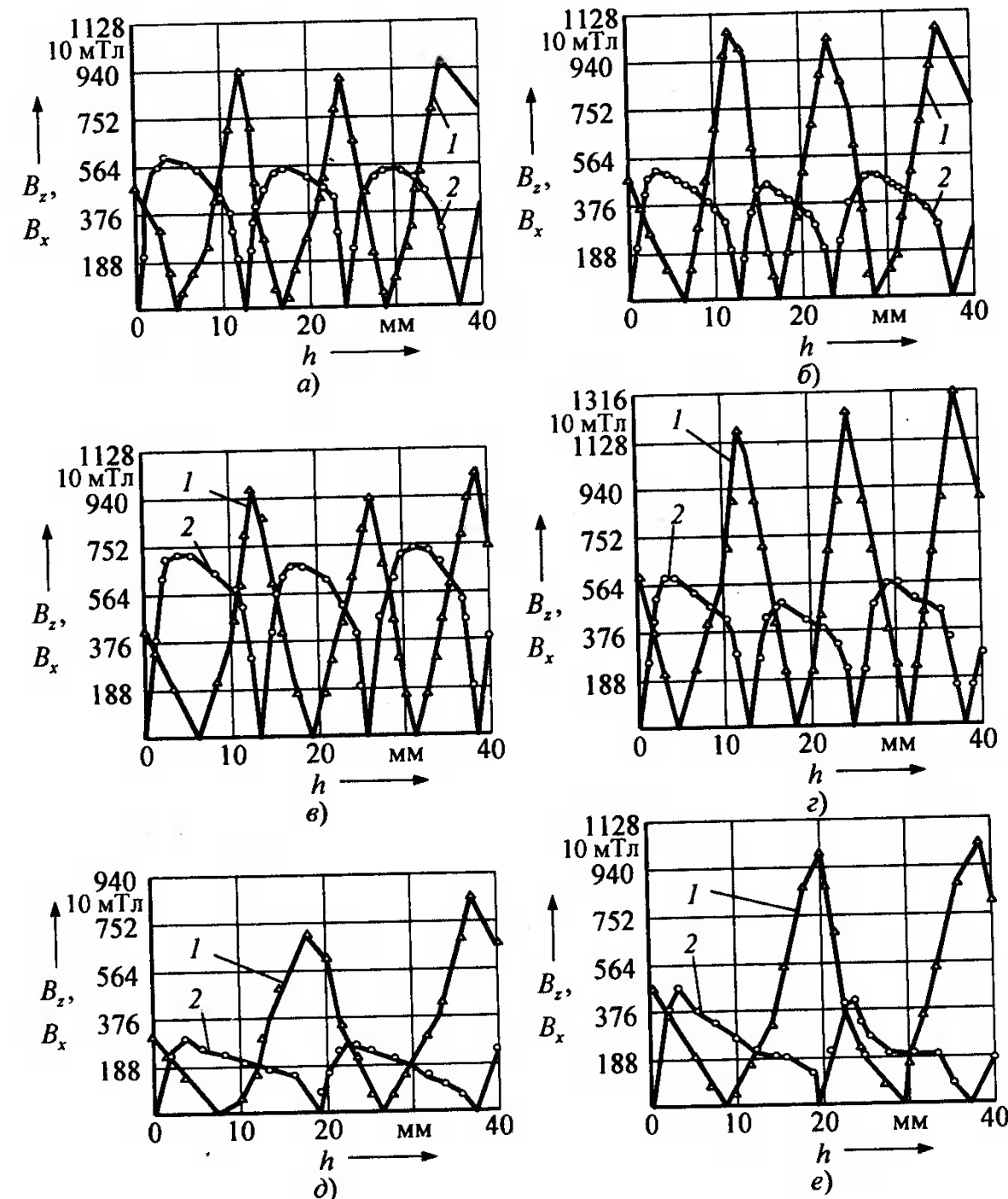


Рис. 4.31. Изменение составляющих магнитной индукции B_z и B_x на поверхности одиночного магнитного патрона из четырех кольцевых (а, б), эллиптических (в, г) и призматических магнитных элементов с прокладками толщиной 1,2 мм [17]:
а, в, д – патроны отталкиваются; б, г, е – патроны притягиваются

При моделировании магнитного сепаратора на втором этапе исследований ферромагнитные частицы будем рассматривать как материальные точки, так как размеры механических примесей значительно меньше размеров магнитной системы сепаратора.

Пусть в момент времени τ частица находится в точке $M(x, y)$ (рис. 4.32). За время $\Delta\tau$ частица сместится в точку $M_1(x + \Delta x, y + \Delta y)$. Вектор перемещения феррочастицы

$$\vec{r}(\tau) = \vec{r}_1(\tau) + \vec{r}_2(\tau) - \vec{r}_0,$$

где $\vec{r}_1(\tau)$ – вектор перемещения частицы вдоль линии тока жидкости, м;
 $\vec{r}_2(\tau)$ – вектор перемещения частицы под действием магнитной силы, м;
 $\vec{r}_0 = \vec{r}(0)$ – вектор начального положения частицы, м.

Тогда

$$\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_2. \quad (4.60)$$

Разделив все члены уравнения (4.60) на $\Delta\tau$ и перейдя к пределу при $\Delta\tau \rightarrow 0$, получим

$$\frac{d\vec{r}}{d\tau} = \frac{d\vec{r}_1}{d\tau} + \frac{d\vec{r}_2}{d\tau}, \quad (4.61)$$

причем

$$\frac{d\vec{r}_1}{d\tau} = \left\{ \frac{dx_1}{d\tau}, \frac{dy_1}{d\tau} \right\} = \{v_x, v_y\}, \quad (4.62)$$

где v_x, v_y – проекции вектора скорости жидкости.

В магнитогидродинамическом поле движение частицы подчиняется второму закону динамики:

$$m \frac{d^2 \vec{r}_2}{d\tau^2} = \vec{F}_m + \vec{F}_c, \quad (4.63)$$

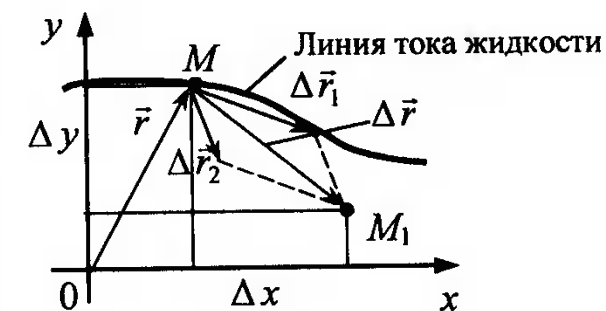


Рис. 4.32. К расчету траектории движения ферромагнитной частицы

где m – масса феррочастицы, кг; $\vec{F}_M$ – вектор силы притяжения феррочастицы в магнитном поле, Н; $\vec{F}_c$ – вектор силы сопротивления движению феррочастицы, Н.

Силу $\vec{F}_M$ вычислим так же, как в [62], а $\vec{F}_c$ – по формуле Буссинеска для неустановившегося движения, т.е. когда $\vec{v}_2 = \vec{v}_2(\tau)$:

$$\vec{F}_M = \frac{1}{2} \mu_0 \chi V_{\Phi} \text{grad} |\vec{H}|^2; \quad (4.64)$$

$$\vec{F}_c = -6\pi\eta R \vec{v}_2 - \frac{4}{3} \pi \rho R^3 \vec{v}_2' - 6\pi\eta R \times \left[\frac{R\sqrt{\rho}}{\sqrt{\pi\eta}} \int_0^t \frac{\vec{v}_2'(\tau) d\tau_1}{\sqrt{\tau-\tau_1}} - 2R^2 \sqrt{\frac{\pi\eta\rho}{\tau}} \vec{v}_2(0) \right], \quad (4.65)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; χ – магнитная восприимчивость феррочастицы; V_{Φ} – объем феррочастицы, м³; $|\vec{H}|$ – напряженность магнитного поля, А/м; R – радиус феррочастицы, м; ρ – плотность СОЖ, кг/м³; $\vec{v}_2 = d\vec{r}_2/d\tau$ – вектор скорости перемещения феррочастицы под действием магнитного поля, м/с; τ – время движения феррочастицы в магнитном поле сепаратора, с; τ_1 – переменная интегрирования, с.

Первое слагаемое в зависимости (4.65) представляет собой формулу Стокса при стационарном обтекании, второе – учитывает присоединенную массу жидкости.

Магнитная восприимчивость χ зависит от $|\vec{H}|$ и R следующим образом

$$\chi = \begin{cases} \frac{2 \cdot 10^3 R |\vec{H}|}{3} & \text{при } 0 \leq |\vec{H}| \leq 3 \cdot 10^4; \\ \frac{2 \cdot 10^3 R}{7} (10^5 - |\vec{H}|) & \text{при } 3 \cdot 10^4 \leq |\vec{H}| \leq 10^5; \\ 0 & \text{при } |\vec{H}| \geq 10^5. \end{cases} \quad (4.66)$$

В скалярной форме уравнение движения частицы под влиянием действующих на нее сил примет следующий вид:

$$\begin{cases} x_1' = v_x(x, y); \\ y_1' = v_y(x, y); \\ \left(m_0 + \frac{4}{3} \pi \rho R^3 \right) x_2'' = F_{M_x}(x, y) - 6\pi\eta R x_2' - 6\pi\eta R \times \\ \times \left[\frac{R\sqrt{\rho}}{\sqrt{\pi\eta}} \int_0^t \frac{x_2''(\tau) d\tau_1}{\sqrt{\tau-\tau_1}} - 2R^2 \sqrt{\frac{\pi\eta\rho}{\tau}} x_2'(0) \right]; \\ \left(m + \frac{4}{3} \pi \rho R^3 \right) y_2'' = F_{M_y}(x, y) - 6\pi\eta R y_2' - 6\pi\eta R \times \\ \times \left[\frac{R\sqrt{\rho}}{\sqrt{\pi\eta}} \int_0^t \frac{y_2''(\tau_1) d\tau_1}{\sqrt{\tau-\tau_1}} - 2R^2 \sqrt{\frac{\pi\eta\rho}{\tau}} y_2'(0) \right]; \\ x = x_1 + x_2 - x_0; \\ y = y_1 + y_2 - y_0. \end{cases} \quad (4.67)$$

В случае когда рабочими элементами магнитного сепаратора являются стержни круглого сечения, проекции вектора скорости жидкости $v_x(x, y)$, $v_y(x, y)$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \frac{v_x}{v_{\infty}} &= 1 - \alpha(\tilde{x}, \tilde{y}) \left(\cos 2\pi \tilde{y} \operatorname{ch} 2\pi \tilde{x} - \cos \frac{2\pi\lambda}{l} \right); \\ \frac{v_y}{v_{\infty}} &= -\alpha(\tilde{x}, \tilde{y}) \sin 2\pi \tilde{y} \operatorname{sh} 2\pi \tilde{x}; \end{aligned} \quad (4.68)$$

$$\alpha(\tilde{x}, \tilde{y}) = \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi}{l} - \cos \frac{2\pi\lambda}{l}}{\left(\cos 2\pi \tilde{y} \operatorname{ch} 2\pi \tilde{x} - \cos \frac{2\pi\lambda}{l} \right)^2 + \left(\sin 2\pi \tilde{y} \operatorname{sh} 2\pi \tilde{x} \right)^2},$$

где $\tilde{x} = x/L$, $\tilde{y} = y/L$ – безразмерные декартовы координаты; λ и $l = L/R$ – безразмерные параметры; L – расстояние между центрами магнитных стержней радиуса R , м; v_{∞} – скорость невозмущенного потока, м/с.

Составляющие магнитного поля в этом случае найдем по зависимостям:

$$F_{mx} = \frac{1}{2} \mu_0 \chi V_\Phi \frac{\partial |\vec{H}|^2}{\partial x}; \quad F_{my} = \frac{1}{2} \mu_0 \chi V_\Phi \frac{\partial |\vec{H}|^2}{\partial y};$$

$$|\vec{H}|^2 = \left(\frac{2\pi\phi_0}{Lv_\infty K'(\kappa)} \right)^2 \times$$

$$\times \left[\frac{v_x^2 + v_y^2}{\left[4\kappa^2 - 2(1-\kappa^4) \cos 2v \cdot \operatorname{ch} 2u + (1-\kappa^2)^2 (\operatorname{ch}^2 2u + \cos^2 2v) \right]^{1/2}} \right],$$

где $K'(\kappa) = \int_1^{1/\kappa} \frac{d\tau}{\sqrt{(\tau^2-1)(1-\kappa^2\tau^2)}}; \quad \kappa = \operatorname{th} u(\tilde{x} = e^{-1}, \tilde{y} = 0);$

$$v = v(\tilde{x}, \tilde{y}) = \pi\tilde{y} + \frac{m}{4\pi} \ln \frac{\operatorname{ch} 2\pi\tilde{x} - \cos 2\pi(\tilde{y} - \lambda/l)}{\operatorname{ch} 2\pi\tilde{x} - \cos 2\pi(\tilde{y} + \lambda/l)};$$

$$u = u(\tilde{x}, \tilde{y}) = \pi\tilde{x} + \frac{m}{2\pi} \arg \left\{ \cos \frac{2\pi\lambda}{l} \operatorname{ch} 2\pi\tilde{x} - \cos 2\pi\tilde{y} + i \sin \frac{2\pi\lambda}{l} \operatorname{sh} 2\pi\tilde{x} \right\};$$

$$m = 2\pi \frac{\operatorname{sh}^2 \frac{\pi}{l} + \sin^2 \frac{\pi\lambda}{l}}{\sin \frac{2\pi\lambda}{l}},$$

где ϕ_0 – потенциал магнитного поля на поверхности патрона.

Численное решение системы обыкновенных интегро-дифференциальных уравнений шестого порядка (4.67), приведенных к нормальной форме, выполнили на ЭВМ методом Эйлера-Коши по специально разработанной программе. На ее базе для наблюдения за движением феррочастицы в рабочей зоне ПМС на экране дисплея была разработана программа визуализации процесса очистки СОЖ [17, 104], позволяющая вести активный контроль за процессом расчета

$$\phi_0 = |\vec{H}| A/2, \quad (4.69)$$

где A – расстояние между магнитными элементами (патронами), м.

Поскольку ε – характеристика интегральная, а математически можно описать лишь траекторию движения частицы заданного диаметра d_3 под влиянием всех действующих на нее в зоне очистки сил, то рассчитать ε можно на основе расчета траектории движения частицы.

Траектория движения частицы представляет собой геометрическое место точек, через которые последовательно проходит частица. Каждая точка имеет определенные координаты x и y . Расчет по математической модели проведем с заданием интервала времени Δt . Когда в процессе расчета координаты частицы x и y примут значения, принадлежащие поверхности магнитного элемента, это будет означать, что частица извлечена из СОЖ и притянута к поверхности элемента. На печать или на экран дисплея выводится сообщение «Частица отфильтрована», и расчет прекращается.

Начальную координату частицы x подберем из условия отсутствия искажения траектории в данной точке, которое неизбежно появится при приближении частицы к патронам (рис. 4.33), путем предварительного численного эксперимента с обязательной визуализацией движения частицы. Чем ближе будет располагаться начальная точка к поверхности элемента (патрона), тем меньше потребуется времени на расчет. Конечную координату частицы x подобрали также на основе численного эксперимента.

Если координаты частицы x и y , получаемые в процессе расчета, во всем принятом диапазоне $(-x, +x)$ будут отличны от координат точек поверхности магнитного элемента, то появляется сообщение «Частица проскочила ловушку».

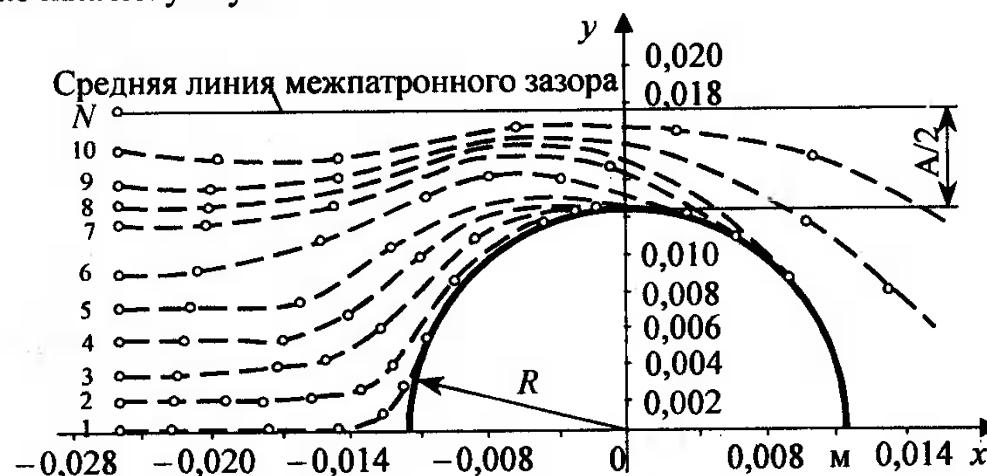


Рис. 4.33. Схема к расчету степени очистки СОЖ по числу частиц: x, y – координаты частицы; 1, 2, 3, ..., N – начальные точки траектории частицы; R – радиус магнитного элемента

Чтобы найти степень очистки СОЖ ϵ от частиц диаметром d_3 по их числу (в процентах), необходимо выполнить ряд последовательных расчетов. Одиночную частицу помещают сначала в точку 1 (см. рис. 4.33), затем поочередно в точки 2, 3, ..., N , каждый раз рассчитывая ее траекторию. При этом в исходных данных изменяют лишь один параметр — координату y : его увеличивают для каждого нового расчета на определенную величину (чем она меньше, тем точнее будет значение ϵ) от 0 (точка 1) до $y_N \approx R + (A/2)$ (точка N).

Значение ϵ найдем из соотношения

$$\epsilon = \frac{y_i}{y_N} \cdot 100 \%, \quad (4.70)$$

где y_i — максимальное значение координаты i -й начальной точки траектории задержанной частицы (при y_{i+1} частица уже проскакивает), $1 \leq i \leq N$; y_N — значение координаты N -й начальной точки траектории частицы, $y_N \approx R + (A/2)$.

Следует отметить, что по мере увеличения y увеличивается и вероятность проскакивания частиц.

Для получения зависимости $\epsilon(d_3)$ описанную выше процедуру нахождения ϵ повторим для нескольких значений d_3 , задаваемых на основе анализа гранулометрического состава исследуемого шлама.

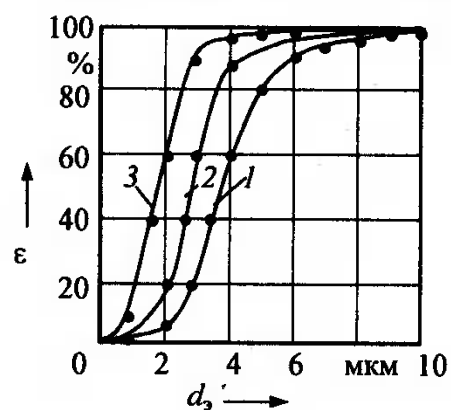


Рис. 4.34. Зависимость степени очистки СОЖ ϵ от диаметра ферромагнитных частиц шлама d_3 : 1, 2, 3 — соответственно при $\phi = 207, 657, 432$ А; $v = 0,01$ м/с; СОЖ — 5 %-ная эмульсия Автокат-78

Некоторые из полученных зависимостей $\epsilon(d_3)$ в качестве примера приведены на рис. 4.34.

Как следует из рис. 4.34, в магнитном поле с потенциалом $\phi_0 = 657$ А при $v = 0,01$ м/с степень очистки ϵ ферромагнитных частиц диаметром $d_3 = 2$ мкм составляет 51 %. При увеличении диаметра частиц до 4 мкм ϵ увеличивается до 90 %, а при $d_3 = 6$ мкм $\epsilon \approx 100$ %. Тонкость очистки СОЖ d_{50} при $\phi_0 = 657$ А составила 1,8 мкм (последовательность определения d_{50} показана на рис. 4.34).

Если потенциал поля $\phi_0 = 207$ А, то частицы диаметром $d_3 = 2$ мкм отделяются с $\epsilon = 8$ %, при $d_3 = 4$ мкм $\epsilon = 60$ %; ϵ достигает 100 % при $d_3 = 7,5$ мкм. В этом случае $d_{50} = 3,7$ мкм.

Скорость частицы, как следует из рис. 4.35, существенно влияет на ϵ : например, при увеличении v с 0,2 до 2 м/с ϵ снижается с 99 до 40 %.

Задавая различные значения v_∞ , т.е. v (их получали в процессе расчета траектории по формулам (4.70) как промежуточный результат, в виде составляющих v_x и v_y), построим зависимости $\epsilon(d_3)$, соответствующие значениям v .

Чтобы перейти от степени очистки ϵ , показывающей относительное количество феррочастиц, удаленных при очистке, и полученной по зависимости (4.70), к характеристике ϵ_1 , показывающей массовую долю удаленных феррочастиц, можно воспользоваться аналитическим [62] или графическим методом. В наших исследованиях использовали графический метод Алландера (Allander) [113] как более простой, наглядный и не требующий громоздких расчетов. В качестве исходных данных при этом достаточно иметь две характеристики: распределение частиц по размерам $F(d_3)$ или $q(d_3)$ (рис. 4.36) и зависимость $\epsilon(d_3)$.

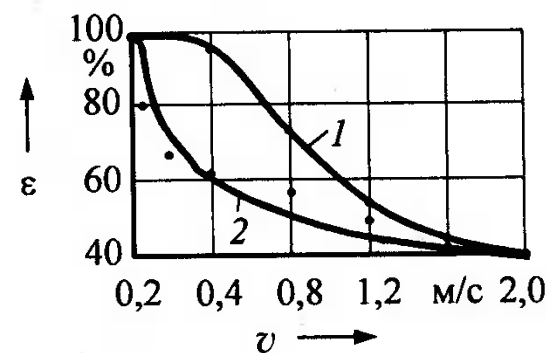


Рис. 4.35. Зависимость степени очистки СОЖ ϵ от скорости движения ферромагнитной частицы v : 1 — расчетная зависимость при $d_3 = 20$ мкм; $\phi = 207$ А; 2 — экспериментальная зависимость, полученная при гравитационной очистке при $d_3 = 25,4$ мкм, $c_{ш} = 1$ кг/м³, СОЖ — 5 %-ная эмульсия Автокат-78

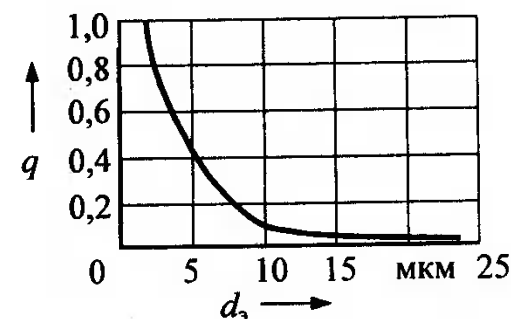


Рис. 4.36. Зависимость накопленной частоты шлама q от эквивалентного диаметра частиц шлама d_3

На рис. 4.37 показан пример нахождения $\bar{\epsilon}$ с использованием метода Алландера. Из точки F опускают перпендикуляр FB к AD до точки E так, что $|BE| = |BD|$. Затем строят точку C так, что $|AC| = |AE|$. Из точки C восстанавливают перпендикуляр GC к AD так, что $|CG| = |BF|$. Через точки A и G проводят прямую до пересечения в точке H с перпендикуляром к AD , восстановленным в точке D . Ордината точки H и есть искомое значение $\bar{\epsilon} \cong 79,2\%$ данного очистителя.

Аналогичные построения для $v = 0,03; 0,055; 0,09; 0,1$ м/с дали соответствующие значения $\bar{\epsilon} - 69,3; 62,4; 56,5; 54,6\%$ (см. рис. 4.38). Таким образом, была построена кривая 2 (рис. 4.38) степени очистки СОЖ.

Экспериментальные значения ϵ_3 при тех же скоростях частиц (от 0,01 до 0,1 м/с) составили соответственно 97,5; 87,3; 78,6; 71,5; 69,4 % (см. рис. 4.38).

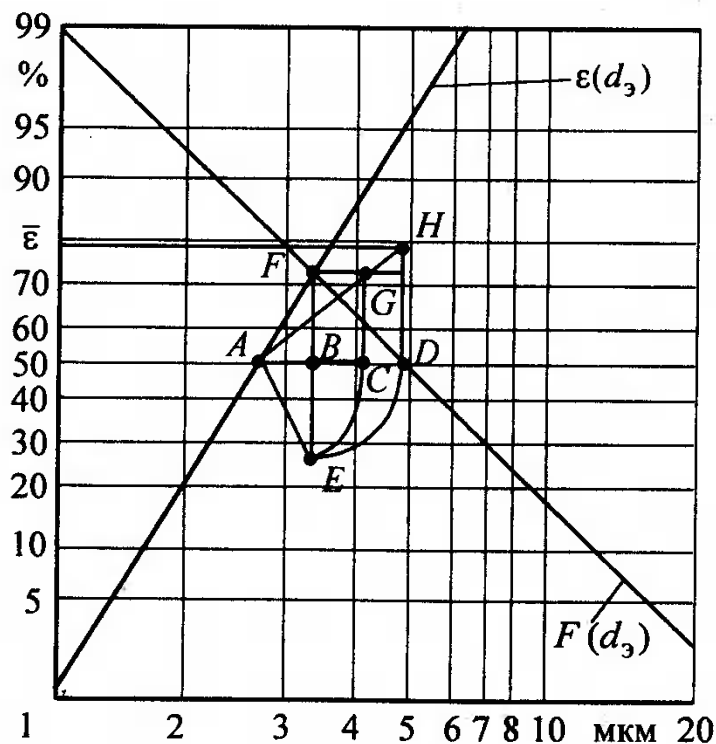


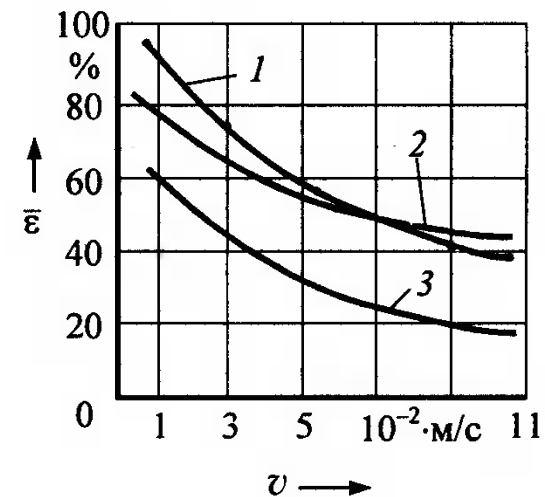
Рис. 4.37. Схема к определению расчетной степени очистки СОЖ ϵ_1 методом Алландера:

$\epsilon(d_3)$ – зависимость степени очистки СОЖ от размера частиц d_3 ;

$F(d_3)$ – распределение частиц шлама по размерам. Условия – по рис. 4.29 и 4.31

Рис. 4.38. Влияние скорости движения СОЖ v на степень ее очистки $\bar{\epsilon}$ [62]:

1, 2, 3 – соответственно расчетное $\bar{\epsilon}$ (по зависимости (2.60)), расчетное $\bar{\epsilon}_1$ и экспериментальное $\bar{\epsilon}_3$ значение степени очистки. СОЖ – 5 %-ная эмульсия Автокат-78. Патроны состоят из кольцевых элементов (диаметр 25 мм, толщина 12,5 мм) и прокладок (диаметр 25 мм, толщина 1,2 мм). Шлам – порошок карбонильного железа марки Р10 ПЖВ 2.160.26 ГОСТ 5849–86 ($d_3 = 4$ мкм)



Расхождение между расчетными $\bar{\epsilon}$ и фактическими (экспериментальными) ϵ_3 значениями степени очистки составляет в среднем 16,5 %. Это свидетельствует о приемлемой точности математической модели (4.67). Критерий Фишера, равный $F_p = 4,59$, больше критического $F_{кр} = 4,08$, что доказывает адекватность модели (4.67) степени очистки СОЖ реальному процессу очистки СОЖ в магнитном поле сепаратора.

Основные результаты экспериментальных исследований были статистически обработаны по методике корреляционно-регрессионного анализа на ЭВМ и сведены в табл. 4.6. Установлено, что полученные математические модели (см. табл. 4.6) имеют тесные корреляционные связи (коэффициент парной корреляции $R = 0,93 \dots 0,99$), а поэтому адекватны.

Дисперсионный анализ математической модели (4.67) показал ее адекватность реальному процессу сепарации феррочастиц в ПМС. При проверке адекватности использовали значения степени очистки СОЖ ϵ_1 , характеризующие массовую долю феррочастиц, удаляемых из шлама (кривая 2 на рис. 4.38).

Разработанная математическая модель (4.67) процесса очистки СОЖ от ферромагнитных частиц механических примесей описывает гидродинамическое и магнитное поля ПМС, патроны которого составлены из кольцевых или дисковых магнитных элементов, а также движение частицы в магнитогидродинамическом поле с учетом действующих на нее сил тока жидкости и сопротивления последней движению частиц. Модель позволяет рассчитать степень очистки СОЖ в ПМС в зависимости от

4.6. Результаты обработки экспериментальных (ε_3) и расчетных (ε) данных по методике корреляционно-регрессионного анализа

Параметры	Степень очистки	
	ε_3	ε
Число параллельных опытов n_0	3	3
Расчетный критерий Стьюдента t_p	41,06	8,54
Расчетный критерий Фишера F_p	1685,79	72,96
Коэффициент парной корреляции R_n	0,999	0,980
Коэффициент регрессии R^2	99,82	96,05
Стандартная ошибка оценки m_1	$8,43 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-4}$
Математическая модель	$\varepsilon_3 = 1/(9,94 \cdot 10^{-3} + 0,0450 v)$	$\varepsilon = 1/(0,0104 + 0,0464 v)$

размера ферромагнитных частиц механических примесей, потенциала магнитного поля на поверхностях магнитных патронов и скорости движения СОЖ в рабочих зазорах магнитной системы ПМС. Модель обеспечивает возможность подбора параметров магнитной системы сепаратора и ее элементов – диаметра магнитных колец и их ширины, толщины прокладок и их количества, расстояния между патронами и взаимного расположения патронов, которые обеспечивают требуемую степень очистки при заданных свойствах СОЖ и механических примесей.*

Ниже приведена рекомендуемая последовательность расчета ПМС.

1. Исходя из состава СОЖ, заданных степени и тонкости очистки, а также напряженности магнитного поля H , проводят моделирование прохождения частиц шлама через магнитную систему сепаратора и расчет фактической степени очистки по выражению (4.70). Моделирование проводят для различных значений скорости потока v из диапазона 0,01...0,1 м/с, начиная с минимального. Находят максимально возможное значение v , обеспечивающее заданную степень очистки.

* См. авторские свидетельства на изобретения РФ N 1755929, 2004980, 2027473 и патенты N 2096340, 2097107, 2097166, 2106179, 2109548, 2109576, 2119374.

2. Если заданная степень очистки не обеспечивается при минимальном значении скорости потока ($v = 0,01$ м/с), следует увеличить диаметр магнитного элемента (и соответственно H) и повторить п. 1.

3. По найденному в п. 1 значению v и заданной производительности сепаратора определяют площадь его проходного (эффективного) сечения

$$S_3 = Q_c / v.$$

4. Находят расстояние A между патронами

$$A = \frac{S_3}{(b + b_n) n_1 n_2},$$

где b , b_n – соответственно высота магнитного элемента и прокладки; n_1 – число магнитных элементов в патроне; n_2 – число патронов в проходном сечении сепаратора.

Конструктивно назначают n_1 и n_2 , учитывая требования к размерам сепаратора.

Очевидно, что эффективность очистки СОЖ определяется временем нахождения магнитного патрона в СОЖ, поэтому была разработана последовательность расчета рационального значения этого важнейшего параметра для ЦМС и КМС.

В результате непрерывного перемещения магнитного патрона по траектории, заданной конструкцией ЦМС (см. рис. 4.40), происходит постепенное нарастание слоя шлама на поверхности патрона. Расчет ЦМС сводится к определению скорости движения цепи с магнитными патронами $v_{ц}$:

$$v_{ц} = L_{ц} / \tau, \quad (4.71)$$

где $L_{ц}$ – длина цепи, м; τ – время одного оборота цепи, с.

Увеличение τ лимитируется производительностью ЦМС. Чем больше скорость движения СОЖ при прочих равных условиях, тем быстрее отлагается на поверхности патронов осадок, шунтирующий магнитное поле, и толщина его слоя ограничена.

Предельное время отложения слоя осадка

$$[\tau] = [m_{ос}] / m_{\tau}, \quad (4.72)$$

где $[m_{ос}]$ – предельная масса осадка на поверхности патрона, кг; m_{τ} – скорость накопления осадка, кг/ч.

$[m_{oc}]$ определяется из выражения

$$[m_{oc}] = \rho_{oc} \pi D_{п} L_{п} K_3 K_{\phi} [h], \quad (4.73)$$

где $D_{п}$ и $L_{п}$ – диаметр и рабочая длина патрона, м; ρ_{oc} – плотность осадка, кг/м³; K_3 – коэффициент заполнения осадком поверхности магнитного патрона; K_{ϕ} – коэффициент, оценивающий содержание магнитной компоненты в осадке; $[h]$ – предельная толщина слоя осадка, м.

Скорость m_{τ} накопления слоя осадка:

$$m_{\tau} = c_{\phi} S_{\text{м}} \frac{Q_v}{S_c}, \quad (4.74)$$

где $S_{\text{м}} = S_1 - S_{п}$ – эффективное сечение расчетного модуля, м²; $S_c = S_{\text{м}} m$ – эффективное сечение сепаратора, м²; m – число модулей; Q_v – производительность сепаратора, м³/ч.

После соответствующих подстановок получим

$$v_{ц} = \frac{L_{ц} c_{\phi} S_1 Q_v}{\rho_{oc} \pi D_{п} L_{п} K_3 K_{\phi} [h] S_c}. \quad (4.75)$$

Выражение (4.71) позволяет определить скорость движения цепи при заданном $[\tau]$ через величину $[h]$.

Однако можно решить и обратную задачу: при заданной величине $v_{ц}$ определить время τ . В случае $\tau < [\tau]$ можно рекомендовать прерывистое движение цепи.

Время остановки равно

$$\Delta\tau = [\tau] - \tau. \quad (4.76)$$

Например, при следующих исходных данных: $L_{ц} = 9$ м; $c_{\phi} = 0,2$ кг/м³;

$S_1 = 10,15 \cdot 10^{-2}$ м²; $Q_v = 50$ м³/ч; $\rho_{oc} = 7800$ кг/м³; $D_{п} = 0,035$ м; $L_{п} = 0,2$ м; $K_3 = 0,8$; $K_{\phi} = 0,3$; $[h] = 0,005$ м; $S_c = 0,6$ м² расчет дает:

$$v_{ц} = \frac{9 \cdot 0,2 \cdot 0,15 \cdot 10^{-2} \cdot 50}{980 \cdot 3,14 \cdot 0,035 \cdot 0,2 \cdot 0,8 \cdot 0,3 \cdot 0,005 \cdot 0,6} = 0,13 \text{ м/мин.}$$

Расчет КМС в основном сводится к определению времени непрерывной работы и площади поперечного (по отношению к потоку СОЖ) сечения сепаратора, которое определяет все его основные параметры: стоимость, размеры, энергопотребление, массу и др.

Площадь сечения сепаратора определяется из выражения

$$S = \frac{Q_v}{3600 v K_3}, \quad (4.77)$$

где v – скорость движения СОЖ в рабочем зазоре: $v = 0,003 \dots 0,010$ м/с рекомендуется для эффективной очистки СОЖ в КМС; K_3 – коэффициент эффективного сечения.

При однорядном расположении патронов в кассете $K_3 = A / (d_{п} + A)$. Для $d_{п} = 32$ мм и $A = 28$ мм $K_3 = 0,47$. Тогда при $Q_v = 1000$ м³/ч и $v = 0,01$ м/с

$$S = 1000 / 0,01 \cdot 0,47 \cdot 3600 = 59,1 \text{ м}^2.$$

Соответственно для качественной очистки жидкости необходим сепаратор с огромной площадью поперечного сечения. Для уменьшения габаритных размеров сепараторов рекомендуется свертывание эффективного сечения, которое возможно при двухрядном расположении патронов в кассете. При этом $K_3 = 0,94$ ($d_{п} = 32$ мм; $A = 28$ мм), что приведет к уменьшению площади поперечного сечения сепаратора в 2 раза. Многорядная (n рядов) параллельная компоновка кассет в сепараторе позволит также в n раз уменьшить площадь поперечного сечения установки.

Для нашего примера ($K_3 = 0,94$ и $n = 4$) получим

$$S = 1000 / 0,01 \cdot 0,94 \cdot 3600 \cdot 4 = 7,4 \text{ м}^2.$$

Например, при $\rho_{oc} = 980$ кг/м³; $D_{п} = 0,035$ м; $L_{п} = 2,2$ м; $K_3 = 0,8$; $K_{\phi} = 0,3$; $[h] = 0,005$ м; $v = 18$ м/ч; $S_{\text{м}} = 2,2 \cdot 0,028 = 0,0616$ м²; $n_{\text{м}} = 260$ шт.

$$[\tau] = \frac{\rho_{oc} \pi D_{п} L_{п} K_3 K_{\phi} [h] n_{\text{м}}}{c_{\phi} S_{\text{м}} Q_v n_{\text{м}} v} = \frac{980 \cdot 3,14 \cdot 0,035 \cdot 2,2 \cdot 0,8 \cdot 0,1 \cdot 0,005}{0,2 \cdot 0,0616 \cdot 1000 \cdot 240 \cdot 18} = 0,43 \text{ ч.}$$

Это расчетное значение $[\tau]$ соответствует практическому опыту.

Как показали исследования (рис. 4.39), степень очистки СОЖ в КМС в течение времени $[t] = 1,0 \dots 1,2$ ч практически не изменяется. При этом в зоне очистки идет стабильное накопление шлама, масса $m_{ш}$ которого увеличивается прямо пропорционально длительности τ работы сепаратора. По мере накопления шлама на магнитных патронах КМС уменьшается проходное сечение магнитной решетки сепаратора и, как следствие, уменьшается производительность Q_v . Так, при непрерывной работе КМС в течение 2 ч производительность Q_v уменьшается с 1,5 до 0,8 м³/ч, а степень очистки СОЖ ϵ снижается с 96 до 67 % вследствие шунтирования магнитного поля шламом, налившим на поверхность патронов.

Количественное расхождение между расчетными и экспериментальными данными по степени очистки СОЖ (см. рис. 4.39, кривые соответственно 1 и 4), по-видимому, объясняется высокой погрешностью измерения потенциала ϕ_0 магнитного поля на поверхности патрона. Качественно же расчетная и экспериментальная зависимости идентичны.

Таким образом, разработана математическая модель очистки СОЖ в магнитных полях, позволяющая рассчитать силы, действующие на ферромагнитные частицы, траекторию и скорость движения ферромагнитной частицы, напряженность магнитного поля в любой его точке и скорость движения жидкости в области магнитных патронов. На основании полученных зависимостей выявлены рациональные конструктивно-технологические параметры магнитной системы сепаратора и разработан ряд конструкций ПМС.

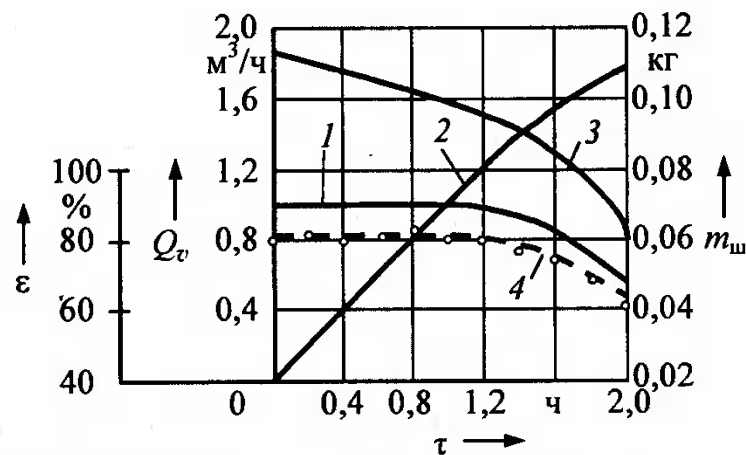


Рис. 4.39. Расчетные зависимости степени очистки ϵ (1), массы шлама $m_{ш}$ (2), задержанного одним патроном, и производительности Q_v (3) от длительности τ работы КМС и экспериментальная зависимость степени очистки ϵ (4)

По характеру движения патронов ПМС можно разделить на сепараторы с непрерывным (ЦМС) и периодическим (КМС) движением.

Основными особенностями разработанных конструкций ЦМС является форма цепного полотна (рис. 4.40) и организация потоков СОЖ в нем — вдоль или поперек магнитных патронов.

ЦМС петле- и Г-образной формы целесообразно использовать в условиях, где существуют ограничения по площади, занимаемой установкой очистки СОЖ, а также при невозможности организации подвальной инфраструктуры использования других устройств очистки СОЖ (рис. 4.41). В последнем случае ЦМС не только очищает СОЖ от ферромагнитных примесей, но и транспортирует шлам из подвала на уровень первого этажа для последующего его удаления.

Принцип работы ЦМС заключается в следующем. Загрязненная механическими примесями СОЖ подается через систему магнитных патронов (см. рис. 4.40), размещенных на цепи на определенном расстоянии друг от друга и шарнирно закрепленных на ней. Цепи приводятся в движение приводом 4. Проходя вдоль магнитных патронов, СОЖ очищается от феррочастиц и подается на технологическое оборудование, а патроны, выходя из СОЖ, очищаются от шлама упругими разъемными скребками, которые при ходе в одну сторону охватывают патроны, а при обратном ходе раскрываются. Шлам с патронов падает в скребковый конвейер и удаляется в емкость для шлама.

Для увеличения производительности ЦМС до 100 м³/ч и более была разработана многорядная («зигзагообразная») конструкция сепаратора (см. рис. 4.40, б, в). Однако недостатком таких сепараторов явилось значительное число подвижных соединений и, как следствие, уменьшение их эксплуатационной надежности и увеличение стоимости.

Общим недостатком ЦМС является расположение в каждый данный момент времени части патронов вне потока СОЖ. Между тем до 60 % стоимости ЦМС приходится на магнитные элементы, и при 40 % неработающих патронов нерациональная доля капитальных вложений составляет 24 %. Кардинальным, принципиальным решением, обеспечивающим существенное повышение надежности ПМС и резкое снижение капитальных затрат, явилось полное исключение цепей из конструкции ПМС. Эта идея была реализована в конструкции кассетного магнитного сепаратора (КМС).

КМС (рис. 4.42) размещен на корпусе 1, представляющем собой бак прямоугольной формы, имеющий сверху платформу 3 из сортового проката. Для подвода СОЖ на одной из стенок расположен лоток 2. На стойке 9, расположенной на балках платформы, закреплены прямолинейные

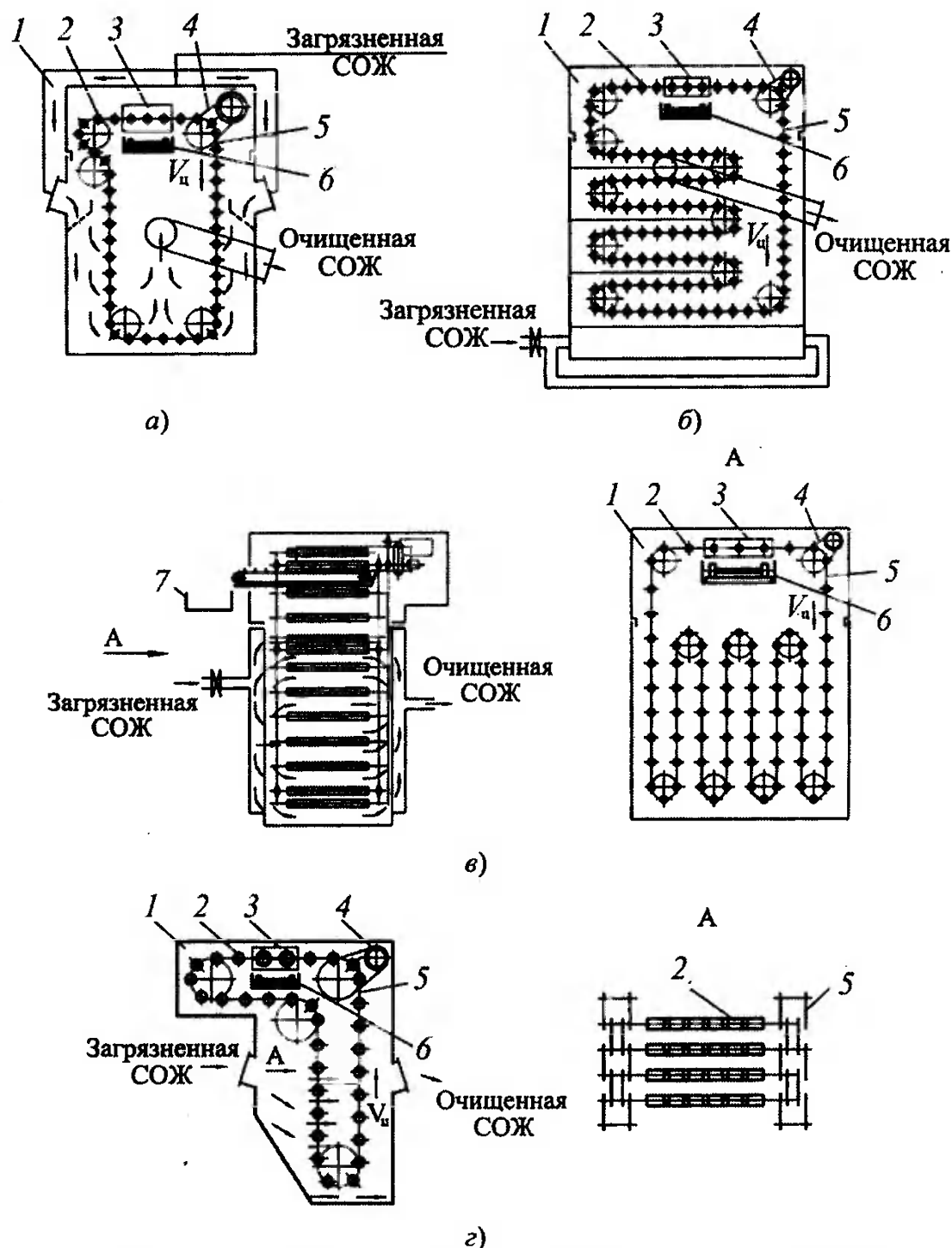


Рис. 4.40. Схемы ЦМС с петлеобразной (а), зигзагообразной (б, в), Г-образной (з) формами цепного полотна:

Г-образной (з) формами цепного полотна:

1 – бак-корпус; 2 – магнитные патроны; 3 – шламосъемник; 4 – привод магнитной системы и шламосъемника; 5 – несущая цепь; 6 – скребковый конвейер для удаления шлама; 7 – емкость для шлама

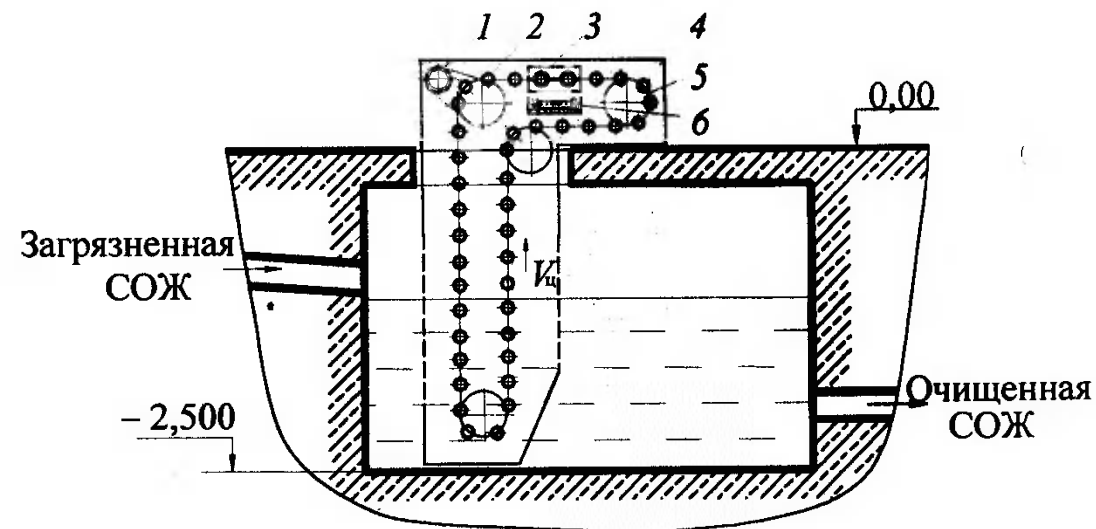


Рис. 4.41. Схема размещения Г-образного ЦМС:

1 – привод магнитной системы и шламосъемника; 2 – магнитные патроны; 3 – шламосъемник; 4 – корпус; 5 – несущая цепь; 6 – скребковый конвейер для удаления шлама

направляющие качения, на каретках 5 и 8 которых размещены траверсы 11 и 12. На верхнюю траверсу навешиваются кассеты 7 из магнитных патронов 6, а на нижнюю траверсу – шламосъемники 13. Каретки снабжены гидроцилиндром 17, нижняя крышка которого шарнирно закреплена на корпусе, а верхняя шарнирно присоединена к траверсе шламосъемника. Для фиксации каретки траверсы кассет в нерабочем положении предусмотрен зацеп 10. Для отвода очищенной СОЖ предусмотрены сливные лотки 16, а для удаления шлама, снимаемого с патронов, – скребковые конвейеры 14, приводимые в движение электроприводом и перемещаемые в пространстве гидроцилиндром 4. Лоток 16 позволяет удалить шлам из КМС.

КМС работает следующим образом. Очищаемая СОЖ подводится к корпусу 1 через лоток 2. Кассеты 7 вместе со шламосъемниками 13 размещаются в нижнем положении. СОЖ, проходя через магнитные патроны 6, очищается, а на поверхности патронов остается слой осадка шлама, состоящий из феррочастиц, масла, продуктов разложения СОЖ и небольшого количества самой СОЖ. При достижении заданной толщины слоя осадка или по истечении определенного промежутка времени нижняя камера гидроцилиндра соединяется с напорной линией гидростанции. Шток гидроцилиндра перемещается в верхнее положение вместе с траверсой 12 шламосъемника 13. Каретки 5 шламосъемника в свою очередь толкают каретку 8 кассет 7 патронов 6. В верхнем положении в паз ка-

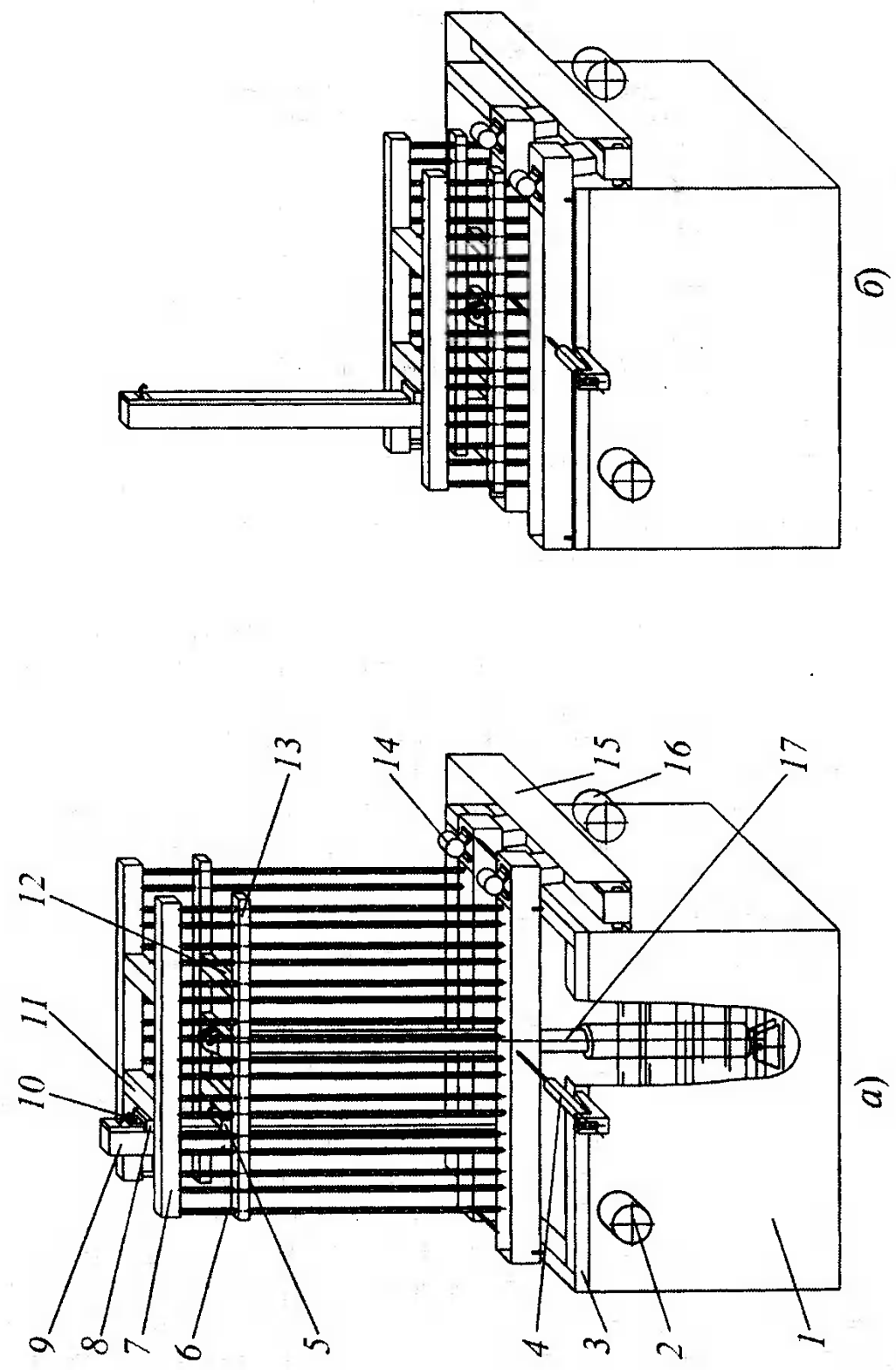


Рис. 4.42. Одноступенчатый двукассетный патронный магнитный сепаратор:
А – положение разгрузки; б – рабочее положение

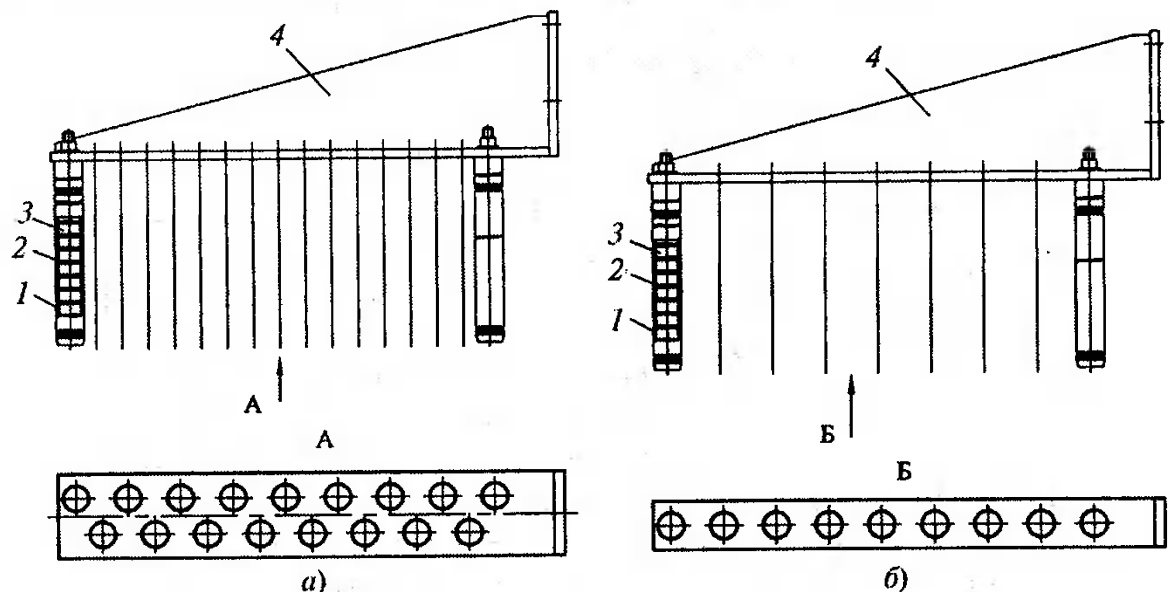


Рис. 4.43. Схемы расположения магнитных патронов в кассете КМС:
а – однорядная; б – многорядная; 1 – гильза латунная; 2 – магнитопроводящие шайбы; 3 – магнитный элемент; 4 – траверса

ретки 8 входит зацеп 10, производящий одновременно расцепление кареток 5 и 8. Каретка 8 под собственным весом опускается на зацеп 10. Шламосьемники при ходе вниз, с помощью размещенных в них плавающих манжет, очищают магнитные патроны от слоя осадка. При расположении кассет в верхнем положении гидроцилиндр 4 перемещает скребковые конвейеры по направляющим в положение «под патронами кассет». Шлам с патронов сбрасывается в скребковый конвейер 14, из которого удаляется скребками в лоток 15. После съема шлама с патронов гидроцилиндр перемещает каретку 8 в верхнее положение, где происходит сцепление траверс 11 и 12. После этого основной гидроцилиндр перемещает обе траверсы в нижнее рабочее положение.

Патрон (рис. 4.43) состоит из латунной гильзы 1, заполненной магнитными элементами 3 с магнитопроводящими шайбами 2 между ними. Верхний и нижний концы патронов заделаны наконечниками.

Разработанные КМС отличаются друг от друга следующими основными конструктивными признаками: расположением магнитных патронов в кассете, которое может быть однорядным или многорядным (в шахматном порядке) (см. рис. 4.43); количеством кассет – одно и многокассетные (рис. 4.44); количеством стоек – одностоечные и двухстоечные (см. рис. 4.44); расположением транспортного устройства для удаления шлама – над уровнем СОЖ (для плохо коагулирующихся шламов, например, прокатных) и на дне емкости с СОЖ (для хорошо коагулирующихся шламов, например, шлифовальных) (рис. 4.45).

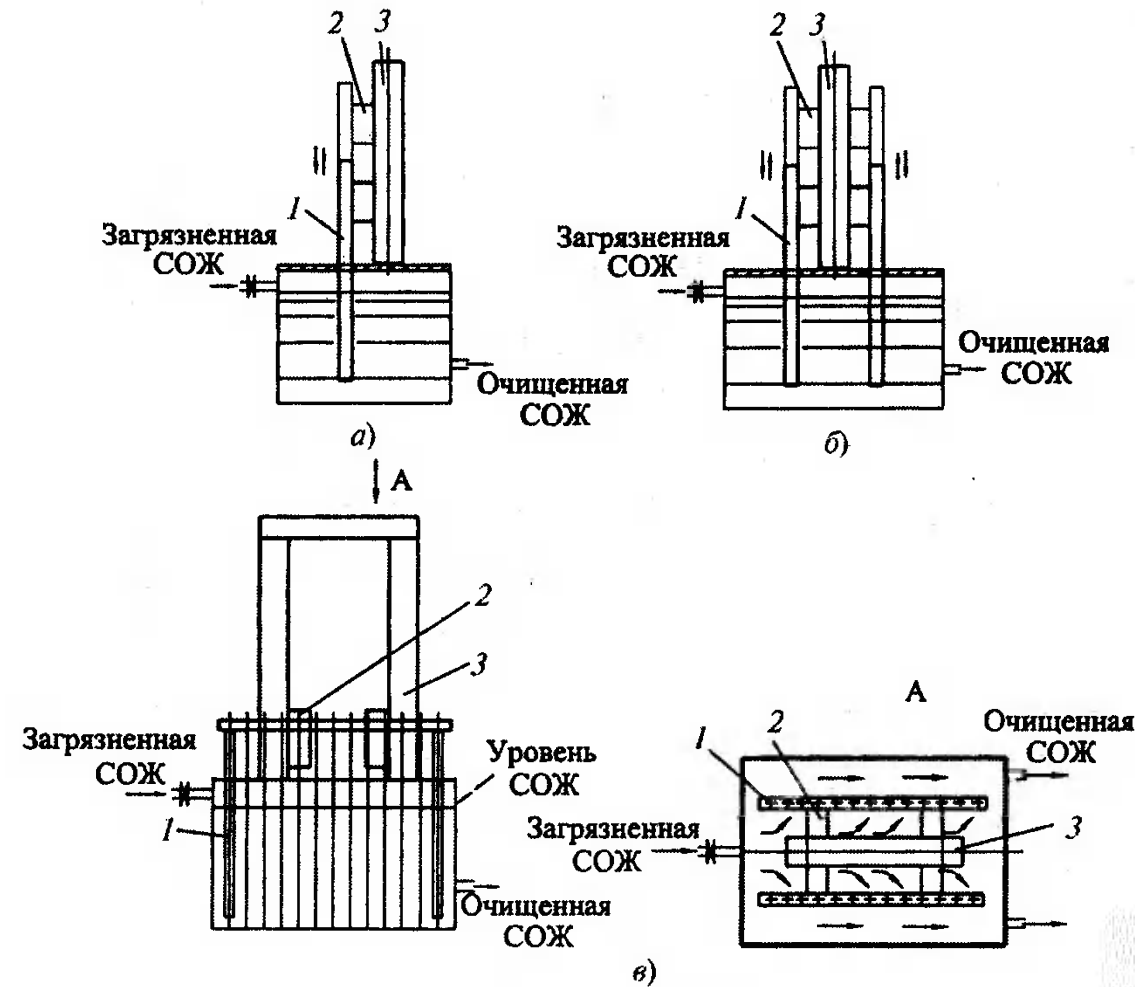


Рис. 4.44. Схемы КМС:

а – одностоечный однокассетный; б – одностоечный двухкассетный; в – двухстоечный двухкассетный; 1 – магнитный патрон; 2 – каретка; 3 – стойка

Для организации гибкого управления циклом очистки (разгрузки) магнитных патронов КМС от шлама предназначен модуль шламового реле (рис. 4.46), представляющий собой систему активного контроля толщины шлама на патронах. Данная система благодаря согласованию цикла разгрузки КМС с интенсивностью загрязнения СОЖ позволяет избежать чрезмерного накопления шлама на патронах и ухудшения качества очистки СОЖ, а также необоснованно частых разгрузок КМС, приводящих к преждевременному его износу.

В модуле шламового реле (см. рис. 4.46) осуществляется измерение частоты расстройки LC-контура под воздействием налипшего на магнитных патронах шлама. LC-контур образуется датчиком, представляющим собой катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником и магнитным патроном КМС. Датчик устанавливается на расстоянии 8 – 10 мм

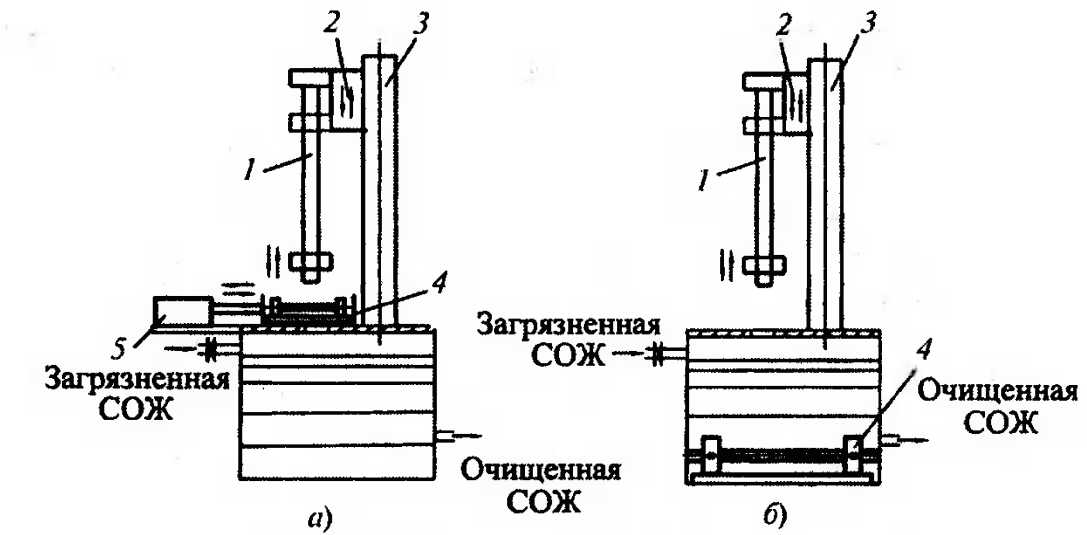


Рис. 4.45. Схемы удаления шлама из КМС:

а, б – конвейер соответственно вне и в СОЖ; 1 – магнитный патрон; 2 – каретка; 3 – стойка; 4 – скребковый конвейер; 5 – гидроцилиндр

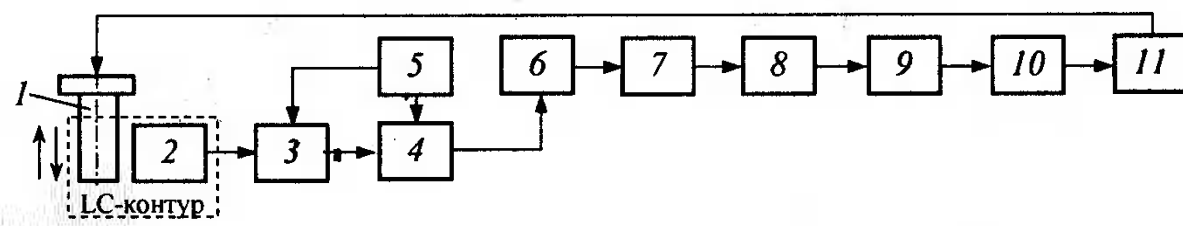


Рис. 4.46. Функциональная схема модуля шламового реле:

1 – магнитный патрон КМС; 2 – датчик; 3 – генератор прямоугольных импульсов с делителем частоты; 4 – измерительный генератор прямоугольных импульсов; 5 – опорный генератор прямоугольных импульсов; 6 – цифроаналоговый преобразователь; 7 – устройство выделения разности двух близких частот с детектированием нулевой разности; 8 – преобразователь частота – напряжение; 9 – пороговое устройство; 10 – преобразователь напряжения +12 В в напряжение минус 12 В для питания операционных усилителей; 11 – силовое устройство управления (гидростанция)

от магнитного патрона. После каждого цикла очистки патронов производится автоматическая настройка опорного генератора прямоугольных импульсов на нулевую разность относительно частоты генератора выносного датчика. По мере нарастания слоя шлама на магнитных патронах частота измерительного генератора уменьшается, разность частот опорного и измерительного генераторов ΔF возрастает. Напряжение на выходе преобразователя частота – напряжение увеличивается. При достижении порогового напряжения, задаваемого потенциометром, включаются электродвигатели гидростанции и начинается цикл очистки патронов КМС.

Мультипликативные схемы размещения КМС представлены на рис. 4.47. Выбор схемы зависит от конкретной ситуации. Все они пред-

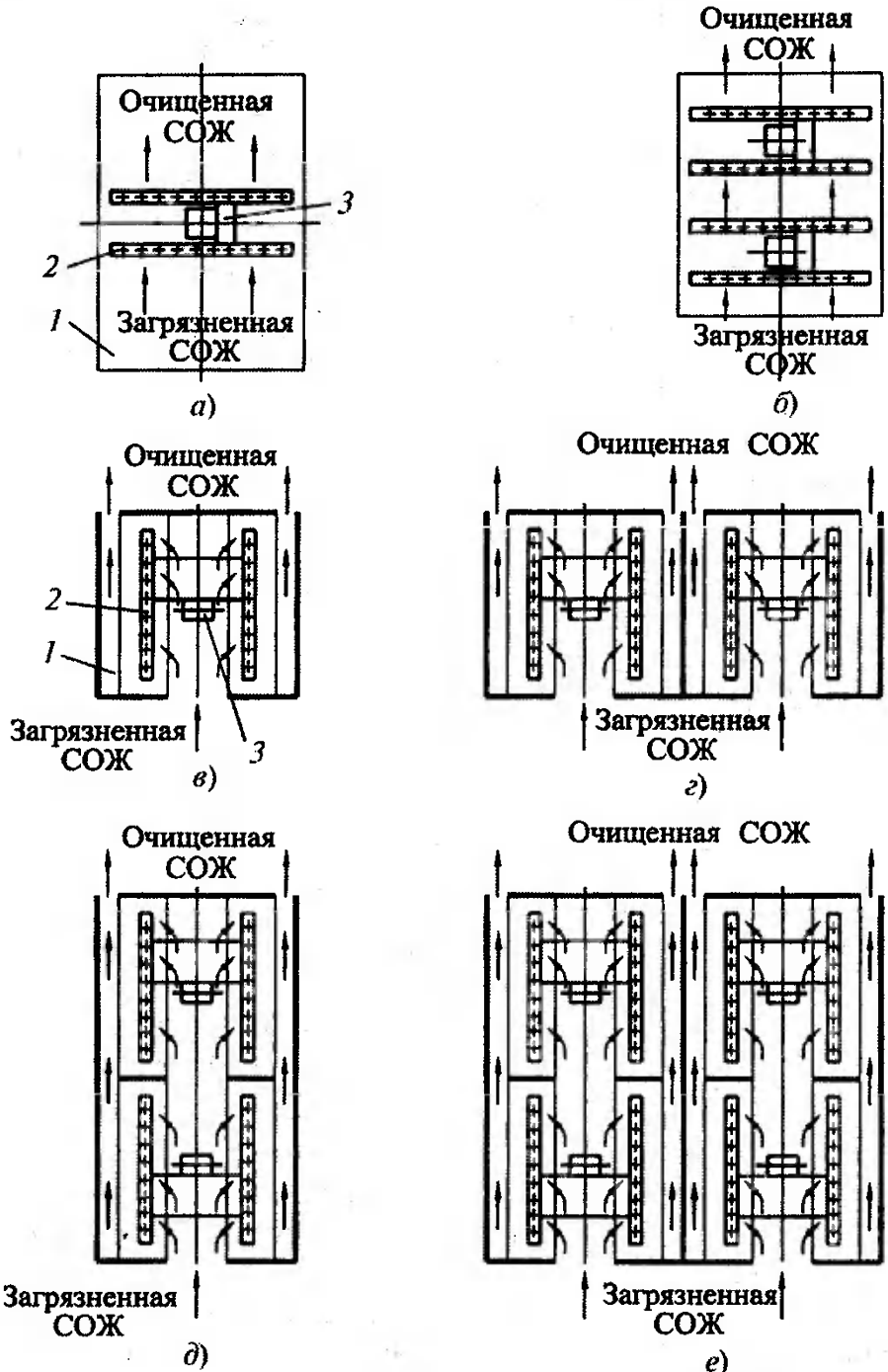


Рис. 4.47. Схемы компоновок установок для очистки СОЖ на основе КМС: а – поперечная однорядная; б – поперечная двухрядная; в – продольная однорядная; г – параллельная продольная двухрядная; д – последовательная однорядная; е – параллельно-последовательная двухрядная

назначены для рационального использования емкостей существующих СП СОЖ и нацелены на обеспечение необходимой производительности при заданной скорости движения СОЖ.

Технические характеристики всех разработанных конструкций магнитных сепараторов сопоставлены с характеристикой серийно выпускаемого барабанного магнитного сепаратора (БМС) в табл. 4.7.

Из анализа данных табл. 4.7 следует, что серийно выпускаемые БМС, являясь самыми дешевыми, одновременно обеспечивают наихудшие тонкость и степень очистки. При этом вследствие конструктивных особенностей (малого эффективного сечения) БМС не обеспечивают качественной высокопроизводительной очистки СОЖ, а удельные капитальные затраты на очистку 1 м³/ч СОЖ в БМС самые высокие.

Разработанные конструкции ЭМС, ЦМС и КМС по сравнению с БМС обеспечивают лучшие степень и тонкость очистки. При этом эволюция конструкций сепараторов от ЭМС до КМС сопровождалась увеличением их надежности, максимальной производительности и сокращением потребляемой мощности и удельных капитальных затрат на очистку 1 м³/ч СОЖ. В результате в КМС по сравнению с БМС удалось сократить удельные капитальные затраты в 5,5 раза.

4.7. Техническая характеристика сепараторов

Показатель	ЭМС	ЦМС	КМС	БМС
Тонкость очистки d_{50} , мкм	5...7	3...5	1...3	20...75
Степень очистки ϵ , %	95...98	95...98	95...98	80... 90
Шламоёмкость, кг/м²	7...10	2...3	2...3	–
Потребляемая мощность, Вт·ч/м³	20	15	2	30
Среднее число отказов за год эксплуатации	17	15	1	5
Максимальная производительность установки $Q_{v\max}$ (при условии окупаемости за год)	16	900	20000	18
Капитальные затраты K на установку производительностью $Q_{v\max}$, тыс. руб	350	750	10000	50
Удельные капитальные затраты, $K/Q_{v\max}$, руб/(м³/ч)	2190	830	500	2750

Результаты опытно-промышленных испытаний установок на основе КМС и исследования их технологической эффективности представлены в следующей главе.

Таким образом, в результате выполненных аналитических и экспериментальных исследований разработаны:

математическая модель (4.6) процесса седиментации механических примесей в отстойниках, предназначенная для расчета степени очистки СОЖ в зависимости от времени седиментации и выбора рациональных размеров отстойников;

регрессионная модель (4.13) влияния напряженности магнитного поля, содержания ферромагнетика и среднего размера частиц механических примесей на процесс магнитной коагуляции, использованная для расчета очистителей;

математическая модель (4.22), (4.25) фильтрования СОЖ в ресурсосберегающих самоочищающихся фильтрах, позволяющая определить габаритные размеры фильтра, скорость движения фильтровального полотна и выбрать фильтровальный материал;

математическая модель (4.31) – (4.37) для расчета степени очистки СОЖ и основных конструктивных параметров магнитной системы ЭМС;

математическая модель (4.60) – (4.70) очистки СОЖ в магнитных полях, позволяющая определить рациональные конструктивные параметры зоны очистки ПМС (размеры патронов, расстояние между ними);

методики расчета гравитационных очистителей, фильтров и магнитных сепараторов и их схемотехнические решения;

новые конструкции гравитационных очистителей, самоочищающихся фильтров и магнитных сепараторов.

Использование магнитных активаторов при гравитационной очистке СОЖ позволяет уменьшить габаритные размеры очистителей при обеспечении заданной степени и тонкости очистки СОЖ и соответственно их металлоемкость и капитальные затраты в 1,5 раза, в несколько раз сократить удельный расход фильтровальных материалов.

Новые конструкции магнитных сепараторов обеспечивают в 5 раз меньшие удельные капитальные затраты на очистку 1 м³/ч СОЖ при улучшении степени и тонкости очистки.

НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

5.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для реализации описанного в п. 3.1 ресурсосберегающего экологизированного технологического процесса применения СОЖ при металлообработке (см. рис. 3.1) в УлГТУ разработан комплекс установок для очистки СОЖ, восстановления и разложения отработанных СОЖ, переработки масел и металлов, извлекаемых из СОЖ и шламов. Все перечисленные установки, получившие впоследствии общее название «Вита», выполнены в виде отдельных модулей (подсистем), предназначенных для выполнения только одной функции (исключение, как будет показано ниже, составляет многофункциональная установка «Вита-С») и эксплуатации как в автономном режиме, так и совместно с другими модулями.

Модульная организация установок «Вита» обеспечивает, с одной стороны, возможность наиболее эффективной модернизации существующих на предприятиях СП СОЖ, а с другой, – доступность для предприятий ресурсосберегающего экологизированного технологического процесса применения СОЖ, описанного в гл. 3. Очевидно, полностью реализовать этот технологический процесс и соответственно минимизировать отходы СП СОЖ можно только при условии использования всего комплекса установок. Однако, как показывает практика, большинство предприятий ограничено в финансовых возможностях и не может приобрести весь комплекс установок сразу. В этом случае рекомендуется на начальном этапе ограничиться установкой «Вита-С», реализовав тем самым часть технологического процесса применения СОЖ (см. рис. 3.1), заключающуюся в поддержании высоких функциональных свойств СОЖ путем качественной ее очистки от механических примесей и «инородных» масел. Обеспечиваемая при этом экономия средств за счет увеличения срока функционирования СОЖ позволит предприятию последовательно приобретать модули для восстановления отработанных СОЖ, утилизации извлекаемых из них масел и шламов и т.д. и все более полно реализовывать ресурсосберегающую технологию применения СОЖ.

В последующих параграфах дано описание установок серии «Вита» и примеры их использования в системах применения СОЖ машиностроительных и металлургических предприятий.

5.2. УСТАНОВКА «ВИТА-С»

Установки «Вита-С» по существу представляют собой систему применения СОЖ, которая может работать автономно, обеспечивая циркуляцию жидкости в замкнутом цикле и осуществляя при этом важнейшие функции любой СП СОЖ – аккумуляцию свежей или очищенной СОЖ, подачу СОЖ к технологическому оборудованию (металлорежущим станкам, автоматическим линиям, прокатным станам и др.), аккумуляцию загрязненной СОЖ, очистку ее от механических примесей и посторонних масел. Установки «Вита-С» можно также использовать в составе сложных СП СОЖ, осуществляющих и остальные функции ресурсосберегающей экологизированной СП СОЖ (см. рис. 3.1) – восстановление отработанной СОЖ (установка «Вита-В», п. 5.3), разложение отработанной СОЖ («Вита-Р», п. 5.4), переработку шлама («Вита-Ш», п. 5.6), регенерацию масел («Вита-М», п. 5.5). Эффективным вариантом компоновки высокорасходных СП СОЖ является и двухконтурная неполнопоточная схема (см. п. 2.3 и 3.2), включающая использование двух установок «Вита-С» различной производительности. В первом контуре высокопроизводительной установкой осуществляется относительно «грубая» очистка СОЖ, во втором – периодическая или непрерывная тонкая очистка низкопроизводительной (неполнопоточной) установкой. Такой вариант компоновки СП СОЖ реализован, например, для обслуживания шлифовального участка цеха № 31 ОАО «АвтоВАЗ» (г. Тольятти) и описан ниже.

Решение об оптимальном для данного предприятия уровне сложности, а значит, и составе СП СОЖ принимается в зависимости от экономических возможностей, технологических и организационно-технических особенностей конкретного производства и перспектив его развития с учетом необходимости обеспечения требований к экологической чистоте окружающей среды.

УлГТУ выпускает установки «Вита-С» производительностью до 1500 м³/ч. В табл. 5.1 в качестве примера приведены технические характеристики четырех установок. В установках «Вита-С» реализованы флотационный, гравитационный и магнитный методы очистки СОЖ (рис. 5.1, 5.2).

Обеспечиваемое установками «Вита-С» (см. табл. 5.1) высокое качество очистки водных СОЖ позволяет увеличить срок их функциониро-

вания, повысить стойкость режущего инструмента, улучшить качество обработанных поверхностей заготовок, повысить надежность и работоспособность насосного оборудования, удлинить цикл межремонтных осмотров и уменьшить затраты на ремонт оборудования.

5.1. Технические характеристики установок «Вита-С»

Показатель	Установка			
	«Вита-С-12»	«Вита-С-250»	«Вита-С-500»	«Вита-С-1500»
Производительность, м³/ч	12	250	500	1500
Степень очистки СОЖ, %:				
от механических примесей, не менее	99			
от «инородных» масел, не менее	90			
Тонкость очистки, мкм	3...5			
Объем бака для СОЖ, м³	3,1	60	120	350
Габаритные размеры, мм:				
длина	3165	12000	12000	20000
ширина	1465	3600	7200	6000
высота	2130	3400	3400	5000
Номинальная мощность, кВт	4,3	12,5*	15,6*	18,3*
Масса (без СОЖ), кг	1230	12000	25000	40000
Срок функционирования СОЖ, мес., не менее	6			

* Мощность напорных насосов не учитывали.

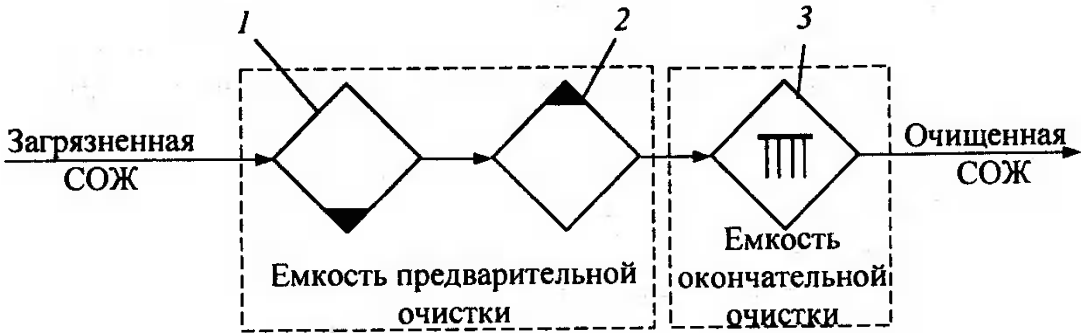


Рис. 5.1. Структурная схема подсистемы «Вита-С» для очистки СОЖ:
1 – гравитационный очиститель; 2 – флотатор;
3 – кассетный магнитный сепаратор

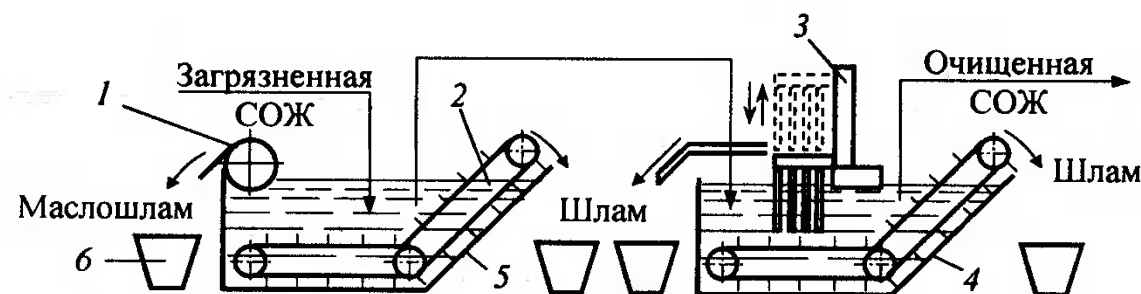


Рис. 5.2. Схема подсистемы «Вита-С» для очистки СОЖ:

1 – маслосъемный барабан; 2 – скребковый конвейер; 3 – кассетный магнитный сепаратор; 4, 5 – емкости соответственно для окончательной и предварительной очистки СОЖ; 6 – емкость для шлама

Установка «Вита-С» работает следующим образом. Загрязненная СОЖ с технологического оборудования подается на магнитный активатор, из которого сливается по лотку 6 самотеком в емкость предварительной очистки, где осуществляется флотационная и седиментационная очистка СОЖ от «инородных» масел и механических примесей (рис. 5.3). Эффект флотации создается за счет части СОЖ, насыщенной воздухом в эжекторе 4 и подаваемой в емкость окончательной очистки через гаситель потока 12. Пузырьки воздуха, поднимаясь к поверхности жидкости, увлекают за собой мелкие частицы загрязнений («инородные» масла и механические примеси), образуя на поверхности пену. Крупные частицы шлама (стружка и продукты износа инструмента) оседают на дно емкости и удаляются скребками конвейера 10 в тару для шлама. Пена потоком жидкости перемещается в рабочую зону маслосъемного барабана 16, который приводится во вращение от привода 15, состоящего из волнового мотор-редуктора и цепной передачи, закрытой защитным кожухом. Барабан выставляется по высоте при помощи набора компенсаторных пластин таким образом, чтобы он был погружен в СОЖ не более чем на 1 см. Масляная пленка захватывается поверхностью вращающегося барабана, с которой затем снимается при помощи ножа 17, и по лотку стекает в бак для масла 1. По мере накопления масла в баке, оно откачивается электронасосом на регенерацию в установку «Вита-М».

Из емкости предварительной очистки СОЖ перетекает в емкость окончательной очистки через переливной карман, расположенный за маслосъемным барабаном, при этом масляная пленка удерживается в зоне действия барабана специальной перегородкой. В емкости для окончательной очистки СОЖ проходит через кассетный магнитный сепаратор 2, где очищается от ферромагнитных примесей.

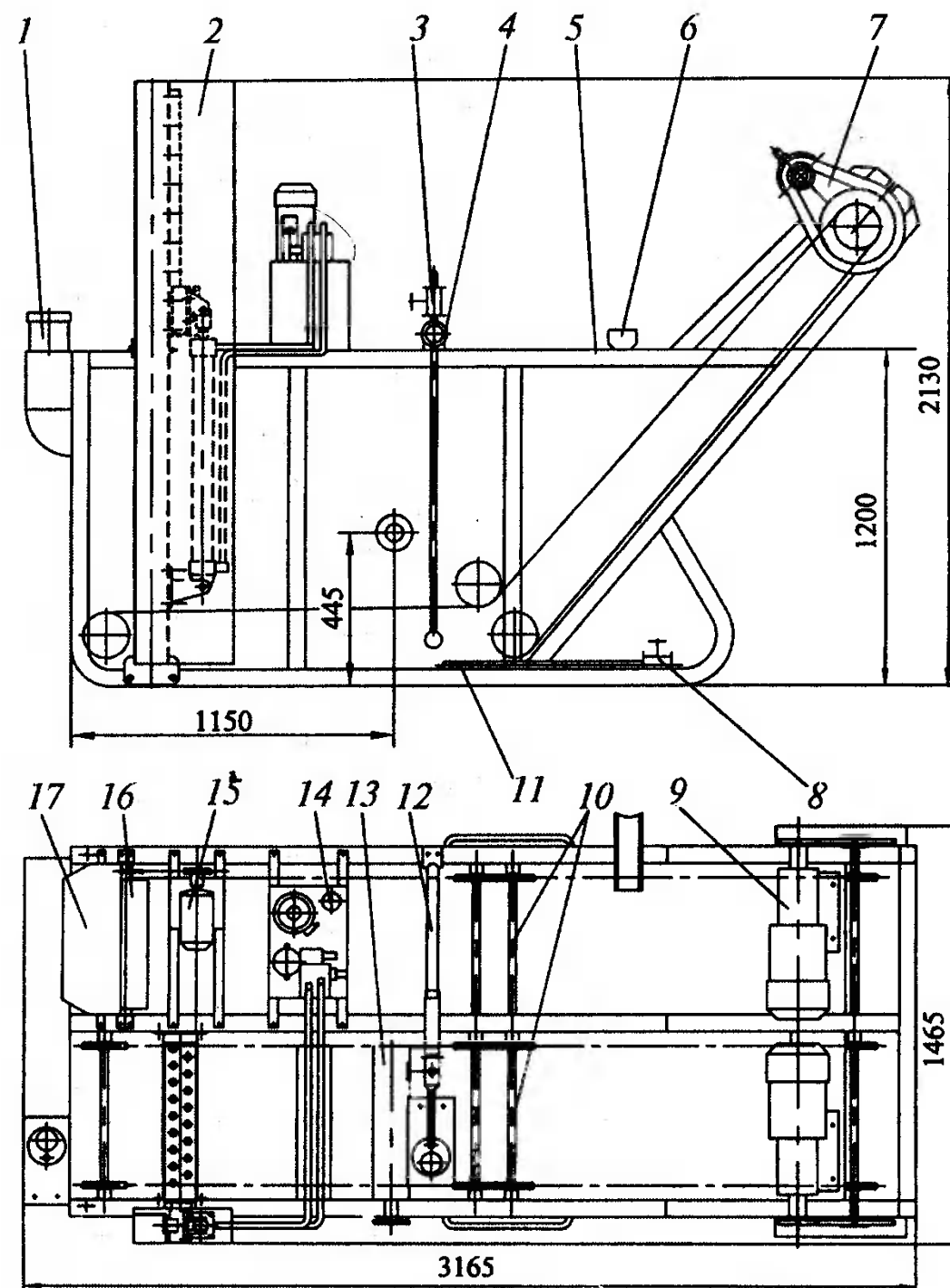


Рис. 5.3. Общий вид установки «Вита-С-12» для очистки СОЖ:

1 – бак для масла; 2 – кассетный магнитный сепаратор; 3 – вентиль; 4 – эжектор; 5 – корпус; 6 – лоток для слива загрязненной СОЖ; 7 – привод скребковых конвейеров; 8 – кран; 9 – мотор-редуктор; 10 – скребковый конвейер; 11 – труба; 12 – гаситель потока; 13 – забор очищенной СОЖ; 14 – гидростанция; 15 – привод маслосъемного барабана; 16 – маслосъемный барабан; 17 – нож

Конвейер 10 состоит из мотор-редуктора 9, приводного вала, трех отклоняющих валов и цепи со скребками. Вращение приводному валу передается от мотор-редуктора 9 через цепную передачу, натяжение которой осуществляется смещением мотор-редуктора. Натяжение конвейерной цепи осуществляется при помощи двух натяжных устройств, закрепленных на корпусе установки и связанных с ползунами приводного вала, который защищен от перегрузок срезным пальцем, установленным в приводной звездочке.

Базовый вариант установки дополнительно комплектуется необходимым насосным оборудованием, транспортной подсистемой для подачи и сбора СОЖ с технологического оборудования и электронным модулем, обеспечивающим автоматический режим работы подсистемы. Насосное оборудование рассматриваемой установки «Вита-С-12» (см. рис. 5.3) состоит из трех электронасосов, выполняющих следующие функции: П-32М (32 л/мин) – перекачка СОЖ из емкости для окончательной очистки в емкость для предварительной очистки через эжектор 4; П-125 МС (125 л/мин) – гидросмыв стружки и шлама со сливного лотка 6; П-200 МС (200 л/мин) – подача СОЖ на станок. Оснащение подсистем серии «Вита-С» указанным дополнительным оборудованием позволяет использовать их в качестве самостоятельных систем применения СОЖ (см. ниже примеры использования подсистем «Вита-С» в цехах Ульяновского и Волжского автомобильных заводов).

Отработанная СОЖ сливается из установки через два сливных патрубка, к которым присоединены трубы 11 и краны 8. При необходимости, предварительно СОЖ откачивается из емкостей при помощи автоцистерны или погружного насоса.

Входящий в состав установки «Вита-С» кассетный магнитный сепаратор (рис. 5.4) состоит из стойки 5, линейного подшипника с кареткой 4, гидроцилиндра 1, блока магнитных патронов 3, шламосьемника 2. Стойка сепаратора крепится к корпусу установки четырьмя болтами. Вертикальное перемещение блока патронов осуществляется гидроцилиндром по линейному подшипнику, установленному на стойке. Каретка этого подшипника связана с блоком патронов и гидроцилиндром при помощи кронштейна 6. Масло в гидроцилиндр подается гидростанцией 14 (см. рис. 5.3), установленной над грязевой емкостью. Шламосьемник неподвижно закреплен на корпусе установки под блоком магнитных патронов.

При перемещении блока магнитных патронов вверх накопившийся шлам счищается с патронов специальными резиновыми манжетами, установленными в шламосьемнике 2 (см. рис. 5.4), и сбрасывается в емкость с СОЖ. После этого шлам в виде коагулированных хлопьев выпа-

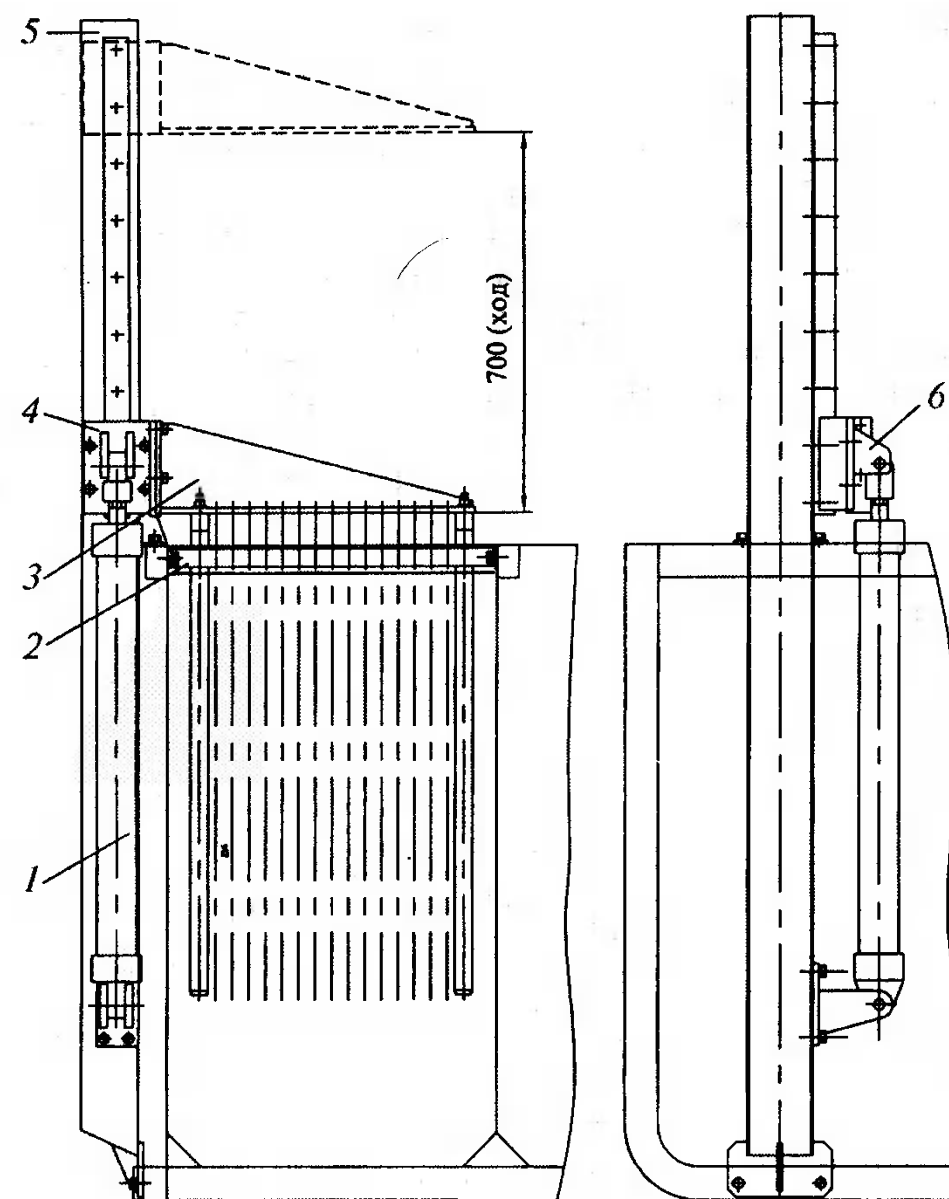


Рис. 5.4. Общий вид кассетного магнитного сепаратора к установке «Вита-С-12»

дает в осадок и выносится скребковым конвейером 4 в тару для шлама. Чтобы при осаждении шлам не попадал в заборные патрубки насосной установки, за магнитным сепаратором установлена перегородка. Для ограничения хода блока магнитных патронов сепаратора на стойке 1 установлены два герконовых конечных выключателя. Регулировка этих выключателей осуществляется так, чтобы при их срабатывании поршень в гидроцилиндре не доходил как в верхнем, так и в нижнем положении на 1 – 3 мм до упора.

В зависимости от свойств шлама кассетные магнитные сепараторы комплектуются различными устройствами для удаления шлама с магнитных патронов. Для удаления хорошо коагулирующихся шламов, например, шлифовального, эффективна описанная выше схема разгрузки шлама с магнитных патронов в емкость с СОЖ.

Для очистки магнитных патронов от шлама, не склонного к коагуляции, например, прокатного, разработана конструкция устройства удаления шлама с магнитных патронов в лоток для шлама (рис. 5.5, 5.6). Цикл разгрузки магнитных патронов в этом случае следующий. С помощью гидроцилиндра 13 шламосьемник 4 и траверса 3 с магнитными патронами 12 перемещается в верхнее положение. С помощью гидроцилиндра 8 (см. рис. 5.5) под магнитные патроны подводится скребковый кон-

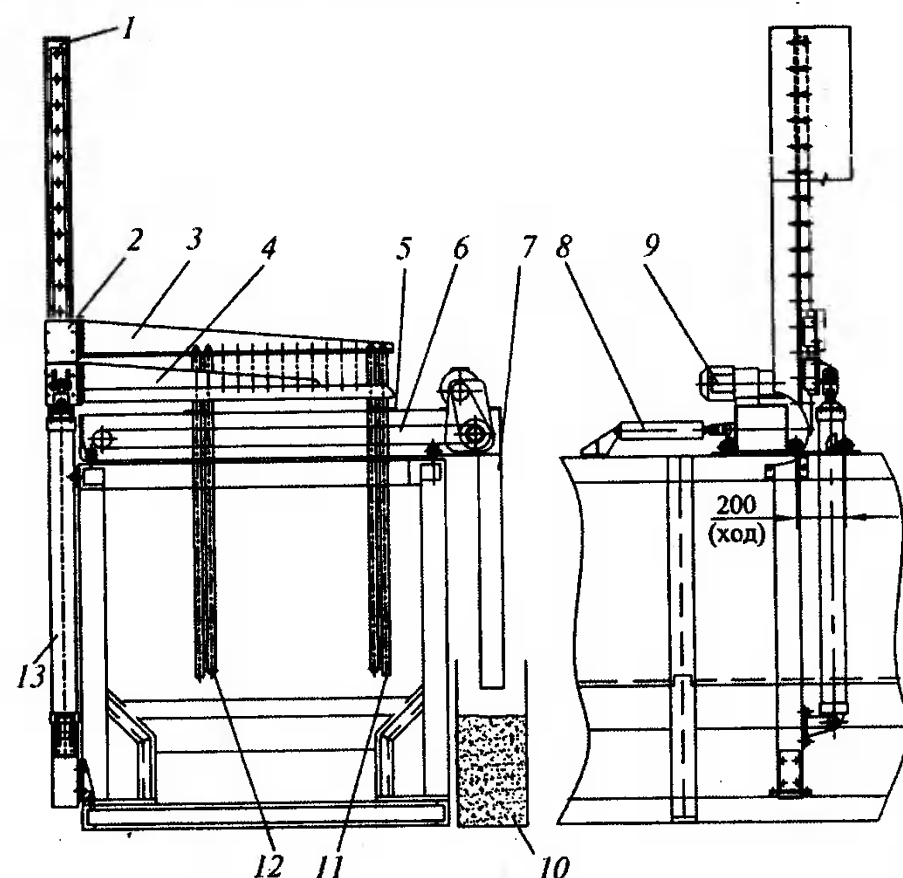


Рис. 5.5. Общий вид кассетного магнитного сепаратора установки «Вита-С-150» с устройством для удаления шлама с магнитных патронов в лоток в рабочем положении:

1 – стойка с направляющей для линейного подшипника; 2 – линейный подшипник с кареткой; 3 – траверса; 4 – шламосьемник; 5 – опорная пластина; 6 – скребковый конвейер; 7 – лоток; 8, 13 – гидроцилиндры; 9 – привод скребкового конвейера; 10 – емкость для шлама; 11 – упор; 12 – магнитный патрон

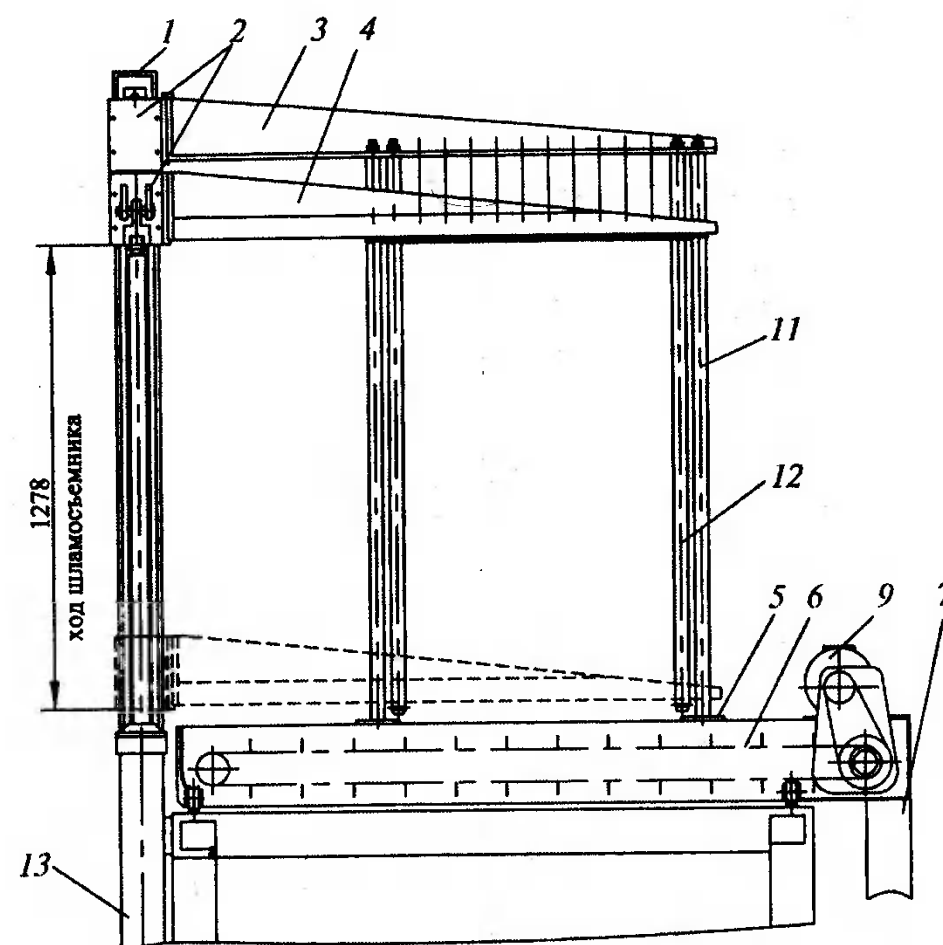


Рис. 5.6. Устройство для удаления шлама с магнитных патронов кассетного магнитного сепаратора установки «Вита-С-150» в лоток в разгрузочном положении: обозначения см. к рис. 5.5

вейер 6, на корпусе которого установлены опорные пластины 5. При обратном ходе штока гидроцилиндра 13 упоры 11 траверсы 3 фиксируются на опорных пластинах 5, фиксируя при этом траверсу 3, а шламосьемник 4 перемещается в нижнее положение, снимая шлам с магнитных патронов 12 в скребковый конвейер 6. Из конвейера 6 шлам по лотку 7 транспортируется в тару 10 для шлама. После очистки патронов шламосьемник перемещается в верхнее положение. Гидроцилиндром 8 конвейер отводится в сторону, и магнитные патроны опускаются в СОЖ. Цикл разгрузки магнитных патронов полностью автоматизирован.

Рекомендуемое размещение установки «Вита-С» в прямке, позволяющее использовать безнапорные системы слива СОЖ с технологического оборудования, показано на рис. 5.7.

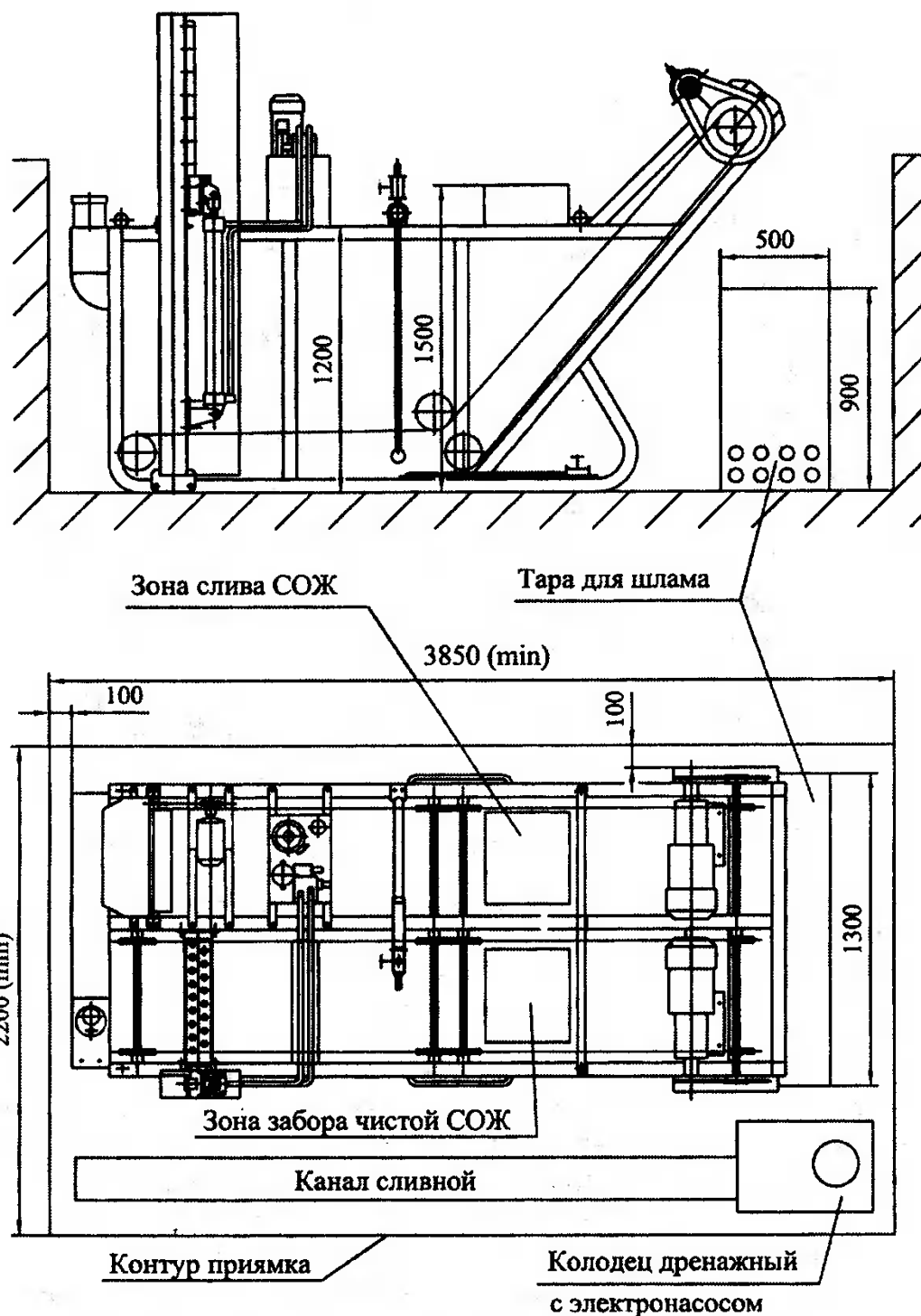


Рис. 5.7. Размещение установки «Вита-С» в приямке

Установка «Вита-С» может работать в трех режимах: наладочном, рабочего и выходного дня. Управление режимами работы обеспечивается средствами автоматики, размещенными в шкафу управления.

Наладочный режим работы необходим при пуске в эксплуатацию и отладке установки «Вита-С». При этом режиме управление всеми двигателями установки осуществляется вручную с пульта управления, а управление гидроцилиндром – кнопками гидрораспределителя на гидростанции.

В режиме рабочего дня эжектор, маслоъемный барабан и скребковый конвейер в емкости окончательной очистки (см. рис. 5.3) включаются с периодичностью восемь часов на один час, а скребковый конвейер в емкости предварительной очистки работает непрерывно. Магнитные патроны очищаются от шлама, когда толщина слоя шлама на них достигнет определенной величины, задаваемой и контролируемой с помощью модуля шламового реле, представляющего собой систему активного контроля (см. п. 4.4).

В режиме выходного дня функционируют только насос (П-32М производительностью 32 л/мин), осуществляющий перекачку СОЖ из емкости окончательной очистки в емкость предварительной очистки через эжектор. Это позволяет избежать застоя СОЖ, приводящего к интенсивному развитию в ней микрофлоры и сокращению срока ее функционирования.

Наличие режимов рабочего и выходного дня позволяет достаточно эффективно использовать установки «Вита-С» и в качестве бессточной СП моющих растворов для промывки СП СОЖ. Существующая практика применения моющих растворов предполагает их одноразовое использование, поскольку интервал времени между промывками достаточно велик, и за время хранения моющий раствор становится непригодным для дальнейшего использования. Хранение моющего раствора в установке «Вита-С», функционирующей в режиме выходного дня, не приводит к ухудшению его эксплуатационных свойств в течение длительного времени, что позволяет использовать моющий раствор многократно. Одна из установок «Вита-С», внедренных в СП СОЖ ОАО «Северсталь» (г. Череповец), используется для хранения и многократного использования моющего раствора.

Новые технические решения, реализованные в установках «Вита-С», защищены восемью авторскими свидетельствами, двумя патентами на изобретения и одним свидетельством на полезную модель*.

Информация о внедрении установок «Вита-С» за три года представлена в табл. 5.2.

* См. авторские свидетельства на изобретения N 1151266, 1155434, 1346413 (СССР), 1755929, 1769920, 1785722, 2004980, 2027473 (РФ), патенты РФ № 2119374, 2128627 и свидетельство на полезную модель № 18494.

5.2. Использование в промышленности установок «Вита-С»

Предприятие, город	Вид механической обработки	Год	Число установок, шт.	Производительность установок, м³/ч
ОАО «Северсталь», г. Череповец	Холодная прокатка	1999	2	500
		1999	2	500
		2000	2	150
		2000	2	200
		2001	1	200
ОАО «Ново-Липецкий металлургический комбинат», г. Липецк	Шлифование	2000	3	12
		2000	1	50
	Холодная прокатка	2001	1	1400
ОАО «Ижорский трубный завод», г. Колпино	Шлифование	2001	4	25
ОАО «Чебоксарский агрегатный завод», г. Чебоксары	Шлифование	2001	1	160
ОАО «Уралмаш», г. Екатеринбург	Шлифование	2001	1	15
ОАО «Московский подшипник», г. Москва	Шлифование	2001	1	140
ОАО «АвтоВАЗ», г. Тольятти	Шлифование	2001	1	360

На рис. 5.8 представлен общий вид ресурсосберегающей СП СОЖ на основе установки «Вита-С», используемой на автоматической линии обработки заготовок ведомого зубчатого колеса главной передачи заднего моста в механосборочном корпусе № 2 ОАО «Ульяновский автомобильный завод». По желанию заказчика система была дополнительно укомплектована модулями приготовления СОЖ и промывки системы моющим раствором.

Приготовление СОЖ осуществляется в эжекторе 1, в который подают воду через блок ультрафиолетовой обработки 2 и эмульсол из емкости 8 пневмонасосом 7. Приготовленная СОЖ по трубопроводу поступает в гидродинамический диспергатор 5, а затем в чистовой отсек емкости 10.

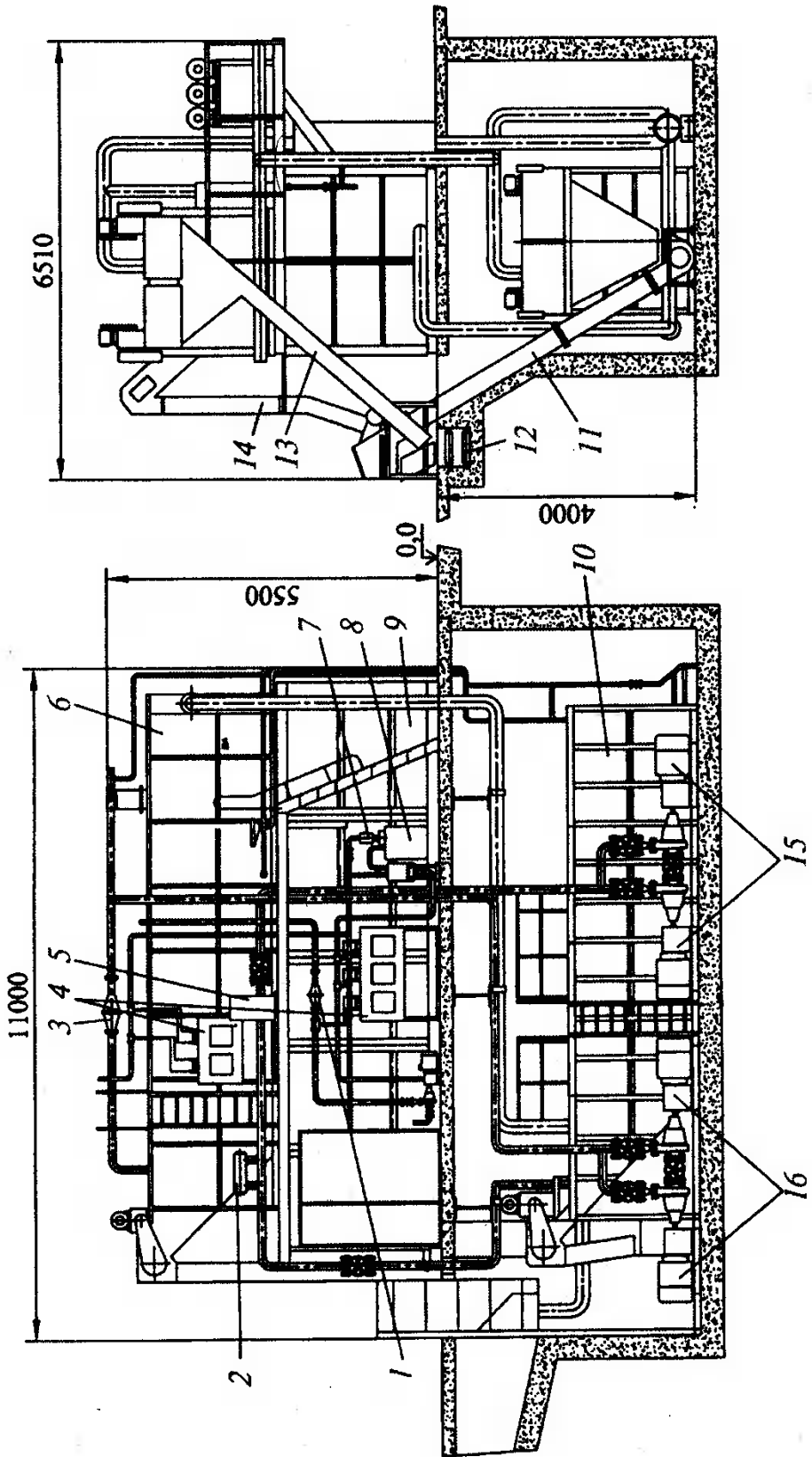


Рис. 5.8. Общий вид СП СОЖ в механосборочном корпусе № 2 ОАО «Ульяновский автомобильный завод»: 1, 3 – эжектор; 2 – блок ультрафиолетовой обработки воды; 4 – эжекторная панель; 5 – гидродинамический диспергатор; 6 – флотатор; 7 – пневмонасос; 8 – емкость для эмульсола; 9 – емкость для моющего раствора; 10 – спаренная емкость; 11, 12 – скребковый конвейер; 13, 14 – лоток; 15, 16 – центробежные насосы

При заполнении последней до критического уровня датчик подает сигнал на отключение насосов подачи воды и эмульсола. Расход воды контролируется по дифманометру (на рис. 5.8 не показан).

Загрязненная механическими примесями СОЖ со станков по лоткам стекает в приемный отсек емкости 10. Примеси осаждаются на ее дно, а затем выносятся драгой на конвейер 11 и далее на цеховой конвейер 12. Из приемной емкости СОЖ насосом 15 подается по трубопроводу через эжектор 3 во флотатор 6 установки «Вита-С». В эжекторе 3 СОЖ насыщается сжатым воздухом. Расход СОЖ и сжатого воздуха регулируется по дифманометрам, установленным на эжекторе. Сжатый воздух подается в эжектор 3 одновременно с включением насоса 15. Во флотаторе пузырьки воздуха, находящиеся в СОЖ, всплывают на поверхность, захватывая частицы механических и жидкостных примесей. На поверхности жидкости образуется пена, которая удаляется вращающимся барабаном в специальный отсек флотатора 6, где отстаивается. Отстоявшаяся СОЖ самотеком направляется в чистовой отсек емкости 10 на доочистку, а примеси (механические и жидкостные) удаляются конвейером в лоток 14 и далее в специальную емкость. Во флотаторе происходит также отстаивание СОЖ. Осевшие механические примеси удаляются скребковым конвейером в лоток 13 и затем на цеховой конвейер 12.

В чистовом отсеке емкости 10 установлен кассетный магнитный сепаратор, осуществляющий окончательную очистку СОЖ. Далее СОЖ насосом 16 подается на станки.

Емкости 9 и 10 расположены друг под другом на разных уровнях. Это позволило существенно уменьшить площадь, занимаемую установкой.

При утрате технологических свойств СОЖ (на основании результатов лабораторного анализа) подается команда на слив отработанной СОЖ и промывку системы. Отличие режима промывки от рабочего заключается в том, что на эжектор 1 не подается воздух. Емкость 9 для моющего раствора заполняется водой. Моющее средство загружается в емкость 9 через люк. Приготовление моющего раствора осуществляется барботированием. Перед заполнением системы применения СОЖ моющий раствор подогревается паром. При необходимости моющий раствор можно не подавать на станки, как это предусмотрено в режиме очистки. СОЖ и моющий раствор сливаются из СП по дренажному трубопроводу (на рис. 5.8 не показан). При многократном использовании моющего раствора предусмотрено его хранение в емкости 9.

Особо следует отметить новое решение транспортной подсистемы СП СОЖ на основе скребковых конвейеров (рис. 5.9, а), реализованное в новой СП СОЖ и заменившее транспортную подсистему на основе гид-

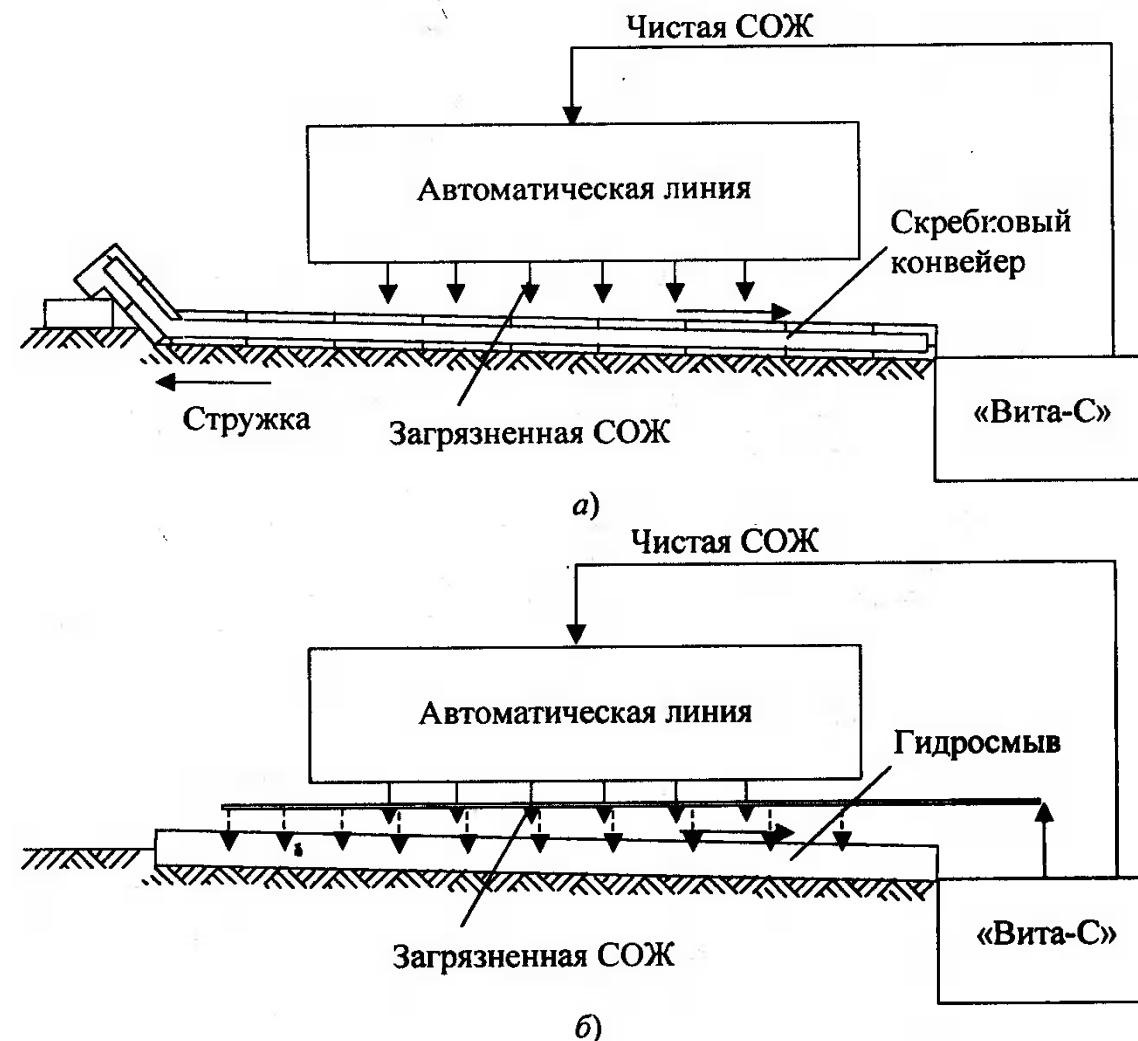


Рис. 5.9. Схема транспортной подсистемы СП СОЖ

росмыва (рис. 5.9, б). Эта замена обеспечила извлечение основной массы механических примесей из СОЖ уже во время ее транспортирования к подсистеме очистки и позволила в 1,5 раза сократить производительность СП СОЖ, ее энерго- и материалоемкость, а также вдвое увеличить срок функционирования СОЖ за счет минимизации времени ее контакта со стружкой.

Другой вариант СП СОЖ на основе двух установок «Вита-С», реализующих соответственно полнопоточную грубую и неполнопоточную тонкую очистку СОЖ (3 %-ная эмульсия Велс-1М; концентрация механических примесей в загрязненной СОЖ 1 г/л, минеральных масел — 150 мг/л), показан на рис. 5.10. Эта система размещена в подвальном помещении механосборочного производства (цех № 31, шлифовальный участок) ОАО «АвтоВАЗ» (г. Тольятти) взамен действовавшей ранее фильтровальной установки фирмы Zack.

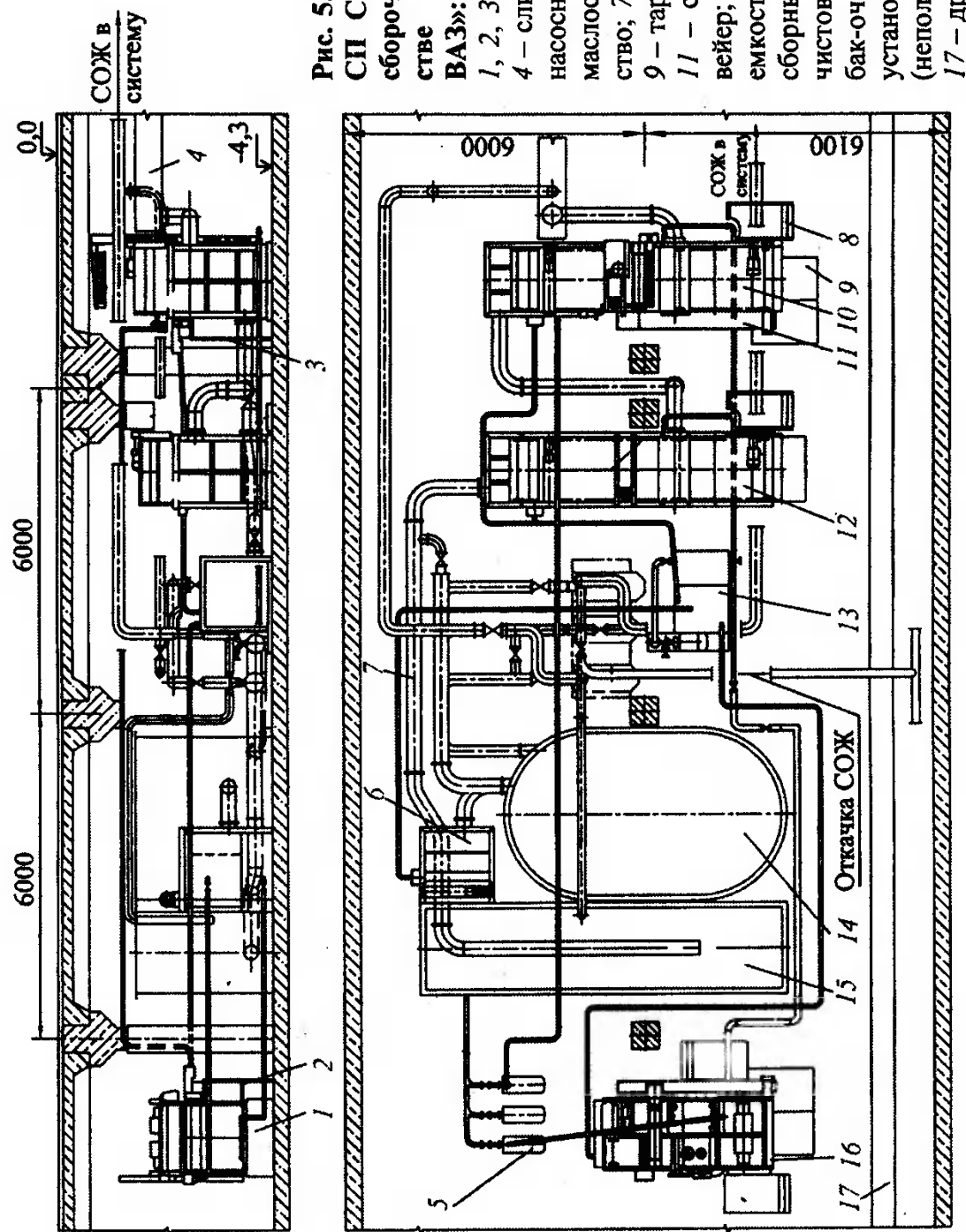


Рис. 5.10. Общий вид СП СОЖ в механо-сборочном производстве ОАО «АвтоВАЗ»:
 1, 2, 3, 8 – подставка;
 4 – сливной лоток; 5 – насосная станция; 6 – маслоъемное устройство; 7 – трубопровод; 9 – тара; 10 – емкость; 11 – скребковый конвейер; 12 – модуль-емкость; 13 – масло-сборный бак; 14 – чистовой бак; 15 – бак-очиститель; 16 – установка «Вита-С-8» (неполнопоточная); 17 – дренажный канал

Система функционирует следующим образом. Загрязненная СОЖ по существующей цеховой системе (по лоткам) поступает через приемный распределитель в емкость 10 объемом $7,7 \text{ м}^3$ установки «Вита-С-180» для полнопоточной очистки. Эта установка является первой ступенью очистки, через которую пропускается весь поток загрязненной СОЖ, поступающей с шлифовального участка.

Очищенная СОЖ из установки «Вита-С-180» поступает в модуль-емкость 12 объемом $7,7 \text{ м}^3$, снабженный скребковым конвейером, периодически удаляющим шламовый осадок в емкость для шлама. Из установки 12 СОЖ самотеком поступает в емкость 15. С целью дополнительного удаления возможных следов масла эта емкость снабжена маслоъемной установкой. Из емкости 15 чистая СОЖ переливается в емкость 14, откуда имеющимися насосами подается на шлифовальный участок. Эта емкость компенсирует объем жидкости, циркулирующей в системе, вследствие чего ее уровень в емкости непостоянен.

Установка «Вита-С-8» 16 емкостью $2,9 \text{ м}^3$ предназначена для периодической тонкой неполнопоточной очистки СОЖ. С этой целью часть циркулирующей в системе жидкости забирается из емкости чистой СОЖ и направляется в установку 16, где осуществляется ее тонкая очистка от накапливающихся микрочастиц размером до 10 мкм .

В режиме выходного дня осуществляется периодическая (3 – 4 раза в сутки) кратковременная (до 1 ч) циркуляция жидкости в системе без подачи ее на технологическое оборудование. Это обеспечивает, как было показано в гл. 3, не только дополнительную очистку СОЖ, но и препятствует интенсивному развитию бактерий. Очищенная СОЖ насосным агрегатом подается в цеховую систему подачи СОЖ к станкам.

Масло в маслосборном баке 13, оборудованном насосной установкой, уравнимером и контрольными кранами, отстаивается и откачивается затем насосом в автоцистерну, транспортирующую его на регенерацию. При заполнении бака подается сигнал на пульт управления установкой, по получению которого оператор должен принять меры для откачивания масла в автоцистерну. Маслоъемные барабаны отключаются до момента освобождения бака.

В режиме выходного дня эмульсия насосом из бака 14 чистой СОЖ подается в установку для полнопоточной очистки СОЖ через специальный смеситель – эжектор. Образующаяся смесь СОЖ и сжатого воздуха интенсифицирует процессы аэрации и флотации. Во всех случаях работы эжектора активной струей является эмульсия. Установка 16 также снабжена смесителем-эжектором, в который СОЖ подается насосом.

Описанная выше СП СОЖ заменила систему известной фирмы Zack, построенную на основе ленточных фильтров, в которой СОЖ фильтруется через фильтровальное полотно «Паратекс-А». На обслуживаемом этими системами участке шлифуют заготовки деталей автомобилей из легированных сталей с подачей поливом 4,5 %-ной полусинтетической СОЖ «Велс-1М».

В качестве критериев сравнительной оценки двух указанных систем использовали следующие показатели: концентрация СОЖ, %; массовая концентрация механических примесей в СОЖ, г/л; масс. доля «инородного» масла c_m , %; водородный показатель, pH; коррозионная агрессивность СОЖ, балл; срок функционирования СОЖ, мес.

Результаты длительных (в течение 11 мес. 2002 г.) опытно-промышленных испытаний СП СОЖ на основе установки «Вита-С-180» представлены в табл. 5.3 и на рис. 5.11.

Прежде всего обращает на себя внимание высокое качество очистки СОЖ, обеспечиваемое новой СП СОЖ, и столь же высокая стабильность этого важнейшего показателя. Действительно, за все время весьма длительных наблюдений массовая концентрация механических примесей в очищенной СОЖ c_0 колебалась в очень узком диапазоне – от 0,085 до 0,096 г/л, тогда как ГОСТ Р 50558–93 устанавливает этот показатель для

5.3. Результаты опытно-промышленных испытаний СП СОЖ в производстве ОАО «АвтоВАЗ» (участок шлифовальных станков)

Место забора проб СОЖ		Концентрация СОЖ, %	Концентрация механических примесей, г/л	Масс. доля «инородного» масла, %	Водородный показатель pH
На входе в установку	Диапазон значений	3,7...6,2	0,534...0,589	0,3...4,2	9,15...9,60
	Среднее значение	4,8	0,557	1,83	9,25
На выходе из установки	Диапазон значений	3,7...6,2	0,085...0,096	0,3...3,9	9,20...9,60
	Среднее значение	4,8	0,090	1,57	9,27

Примечание. Во всех случаях показатели «коррозионная агрессивность» и «содержание микроорганизмов» – 0 баллов.

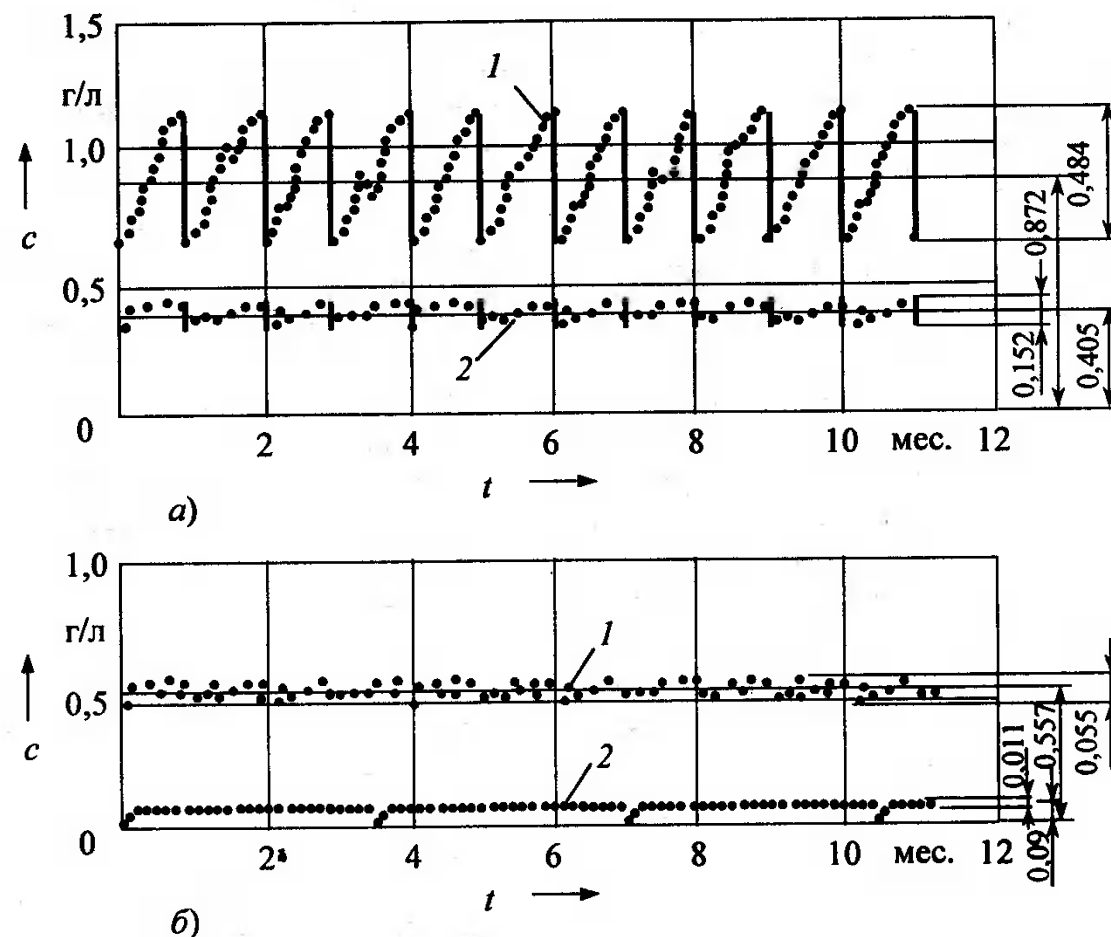


Рис. 5.11. Динамика изменения концентраций механических примесей в СОЖ «Велс-1М» при шлифовании:

а, б – СП СОЖ на основе установок соответственно «Zack» и «Вита-С-180»; 1, 2 – пробы СОЖ взяты соответственно на входе и выходе из установки; утолщенные вертикальные линии соответствуют залповому сбросу отработанной СОЖ

круглого наружного предварительного шлифования 0,4 г/л, а для окончательного – 0,1 г/л. Согласно ГОСТ Р 50815–95, концентрация механических примесей менее 0,1 г/л вообще не сказывается на шероховатости поверхности, шлифованной периферией круга. Обеспечиваемые новой системой показатели чистоты СОЖ намного превышают аналогичные показатели, обеспечиваемые СП СОЖ фирмы Zack (см. рис. 5. 11).

Одновременно с существенным улучшением чистоты СОЖ улучшены и другие показатели: уменьшилось содержание в СОЖ «инородных» масел, стабилизирован на допуске водородный показатель pH, не наблюдалась коррозионная агрессивность СОЖ и ее биопоражение.

Расход водной СОЖ «Велс-1М» снизился в 2 раза, а моющего раствора в 5 раз. Капитальные вложения, которые потребовались бы на замену изношенного фильтра «Zack», составили бы 9,0 млн. руб., тогда как для приобретения и внедрения в производство установки «Вита-С-180» потребовалось 3,5 млн. руб.

И, наконец, интегральный показатель технического уровня новой СП СОЖ – срок функционирования СОЖ без замены увеличился с одного месяца до 3,5 мес. (см. рис. 5.11). Соответственно в этой же пропорции уменьшился сброс СОЖ на разложение.

Исследования технологической эффективности установок «Вита-С» проводили и в условиях производства холоднокатаного листа в ОАО «Северсталь» (г. Череповец). Анализ априорной информации показал, что при холодной прокатке условия работы подсистемы очистки СОЖ наиболее тяжелые вследствие малого размера частиц прокатного шлама (как правило, от 1 до 10 мкм), попадающего в СОЖ со стана.

Некоторые результаты исследования динамики изменения концентрации механических примесей в СОЖ (3 %-ная эмульсия «Квакерол-671») в связи с внедрением установки «Вита-С», предоставленные лабораторией маслоэмульсионного отделения производства холоднокатаного листа ОАО «Северсталь», показаны на рис. 5.12.

Как следует из рис. 5.12, интенсивность накопления механических примесей в СОЖ уменьшилась за счет более тонкой ее очистки. При этом предельная концентрация c механических примесей уменьшилась после внедрения установки «Вита-С» с 280 до 80 мг/л, что позволило увеличить срок функционирования СОЖ с двух недель до одного года.

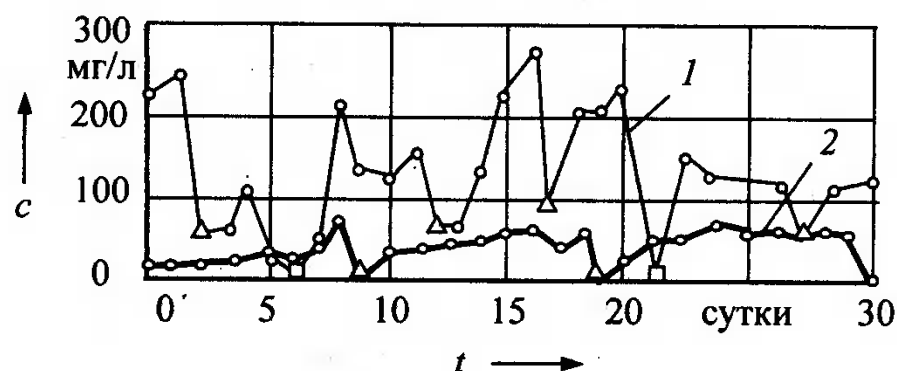


Рис. 5.12. Изменение концентрации c механических примесей в очищенной СОЖ:

1, 2 – соответственно до и после внедрения установки «Вита-С»;
Δ – долив СОЖ; □ – полный сброс СОЖ

Результаты обработки данных по отсортровке проката по параметру «грязь» за период с 1.01.99 по 1.01.00 показали, что с увеличением загрязненности СОЖ отсортровка проката B_r монотонно увеличивается (рис. 5.13). Установки серии «Вита-С» позволили не только увеличить срок функционирования СОЖ, но и уменьшить в 1,7 раза отсортровку проката (рис. 5.14). Эти данные использовали при расчете экономической эффективности установок «Вита-С».

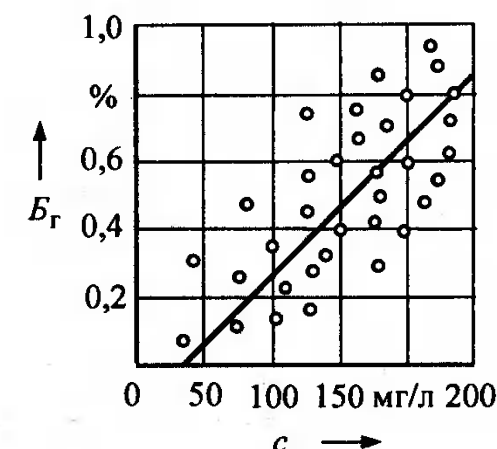


Рис. 5.13. Влияние концентрации c механических примесей в СОЖ на относительную отсортровку проката по параметру «грязь» B_r

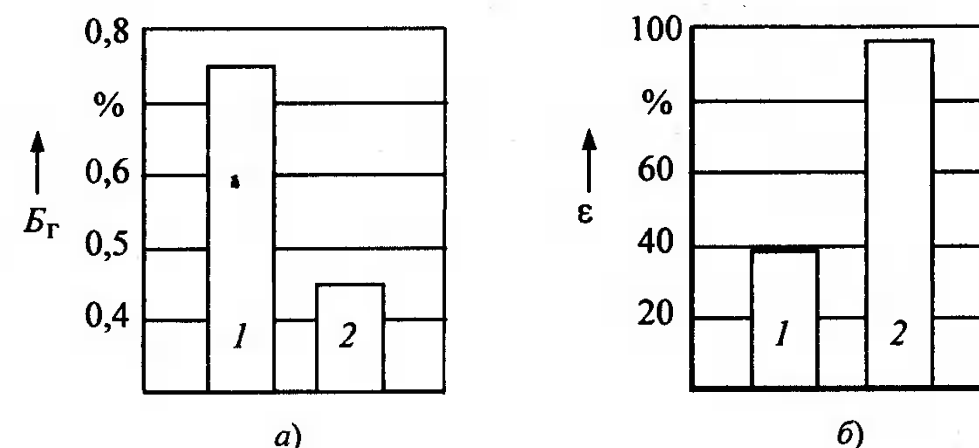


Рис. 5.14. Отсортровка проката по параметру «грязь» (а) и степень очистки СОЖ (б) в СП, обслуживающей стан холодной прокатки ОАО «Северсталь»:

1, 2 – соответственно до и после внедрения установки «Вита-С»

5.3. УСТАНОВКА «ВИТА-В» ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОЖ

Установки «Вита-В» предназначены для восстановления (регенерации) биопораженных СОЖ и реализуют технологический процесс, описанный в п. 3.4 (рис. 5.15). В табл. 5.4 представлена техническая характеристика установок «Вита-В-20», действующих в системах применения СОЖ на АО «Контактор» (г. Ульяновск) и АО «Автодетальсервис» (г. Ульяновск), а на рис. 5.16 показан общий вид последней.

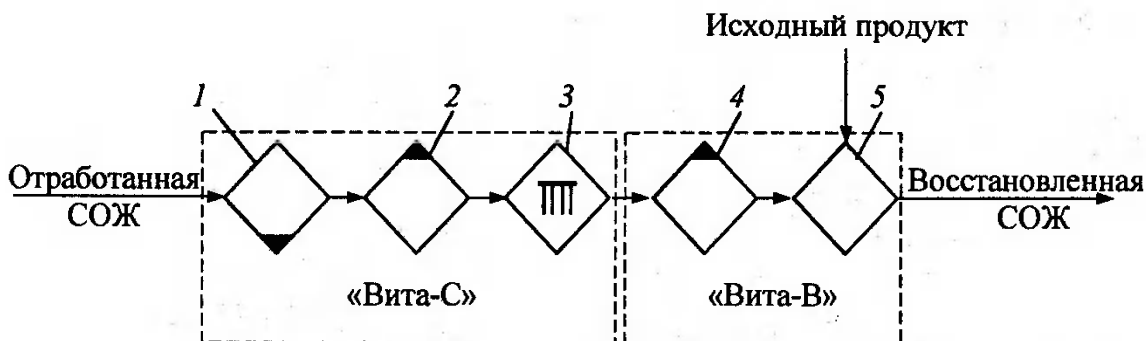


Рис. 5.15. Структурная схема технологического процесса восстановления СОЖ в установках «Вита-С» и «Вита-В»:
1 – отстойник; 2 – флотатор; 3 – кассетный магнитный сепаратор;
4 – пастеризатор; 5 – корректор состава СОЖ

5.4. Техническая характеристика установки «Вита-В-20»

Показатель	Числовое значение
Производительность, м³/ч	20
Расход пара на тонну СОЖ, кг	300
Относительный срок функционирования восстановленной СОЖ, %*	90...95
Себестоимость восстановления одной тонны СОЖ, руб.	100...200
Габаритные размеры, мм**:	
длина	3545
ширина	1465
высота	1650
Номинальная мощность, кВт	100
Масса (без СОЖ), кг	1180

* Выражен в процентах от срока функционирования свежеприготовленной СОЖ.
** Без установки «Вита-С».

В установку «Вита-В» (рис. 5.17) поступает СОЖ, очищенная от механических примесей, «инородных» масел и пены в установке «Вита-С». Очищенная СОЖ накапливается в емкости 1, из которой 6 м³ жидкости насосом 2 подаются в пастеризатор 3. Время пастеризации составляет 10 мин. При достижении температуры 125 °С порция нагретой СОЖ сливается в емкость 4, где охлаждается. После заполнения емкости 4 чистой

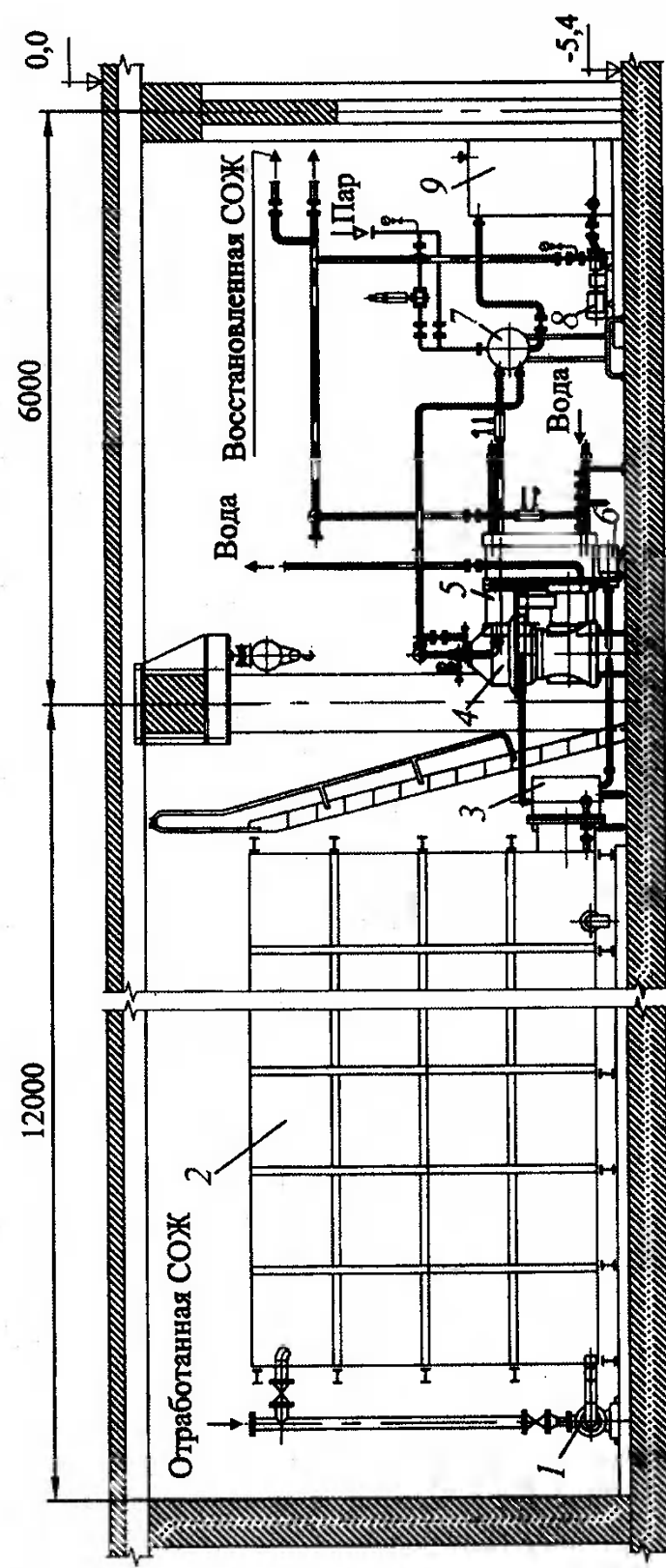


Рис. 5.16. Общий вид установки «Вита-В» для восстановления отработанной СОЖ:
1 – насос 100-80-160; 2 – бак-накопитель; 3 – уравниватель; 4 – центробежный сепаратор; 5 – пластинчатый теплообменник; 6 – насос 36-1ц2, 8-20; 7 – трубчатый пастеризатор; 8 – насос К50-32-125; 9 – бак для конденсата



Применение установки «Вита-В» в производстве АО «Автодеталь-сервис» (г. Ульяновск) для восстановления отработанной 5 %-ной эмульсии Автокат Ф-78 и последующего ее возврата в производство обеспечило увеличение срока функционирования СОЖ почти вдвое. При этом за период с 1999 по 2001 гг. восстановлено более 600 т СОЖ, а среднегодовой экономический эффект составил более 4,6 млн руб.

нологии, изложенной в предыдущем параграфе.

1, 2 – соответственно седиментационная и флотационная очистка СОЖ;
3 – магнитная очистка; 4 – электролизное разложение СОЖ; 5 – флотация масла;
6 – блок ультрафильтрации воды

* См. патент РФ N 2208047.

В табл. 5.5 представлена техническая характеристика установки «Вита-Р-10» для разложения СОЖ, действующей на АО «Автодетальсервис» (г. Ульяновск), а на рис. 5.19 – ее общий вид.

5.5. Техническая характеристика установки «Вита-Р-10»

Показатель	Числовое значение
Производительность, м ³ /ч	10
Расход материальных ресурсов для разложения одной тонны СОЖ:	
пара, кг	250
раствора деэмульгатора ДОР-22, кг/м ³	4
Габаритные размеры, мм:	
длина	6000
ширина	3500
высота	3000
Номинальная мощность, кВт	85
Масса (без СОЖ), кг	8000

Установка «Вита-Р» (рис. 5.20) функционирует следующим образом. Отработанная СОЖ после очистки в установке «Вита-С» накапливается в емкости 1. Затем жидкость смешивается с раствором деэмульгатора ДОР-22 в эжекторе 3 и насосом 8 подается в эжектор 9, где в результате насыщения паром нагревается до температуры 110...120 °С. Контроль расхода раствора деэмульгатора осуществляется расходомером 7. Полученная смесь направляется в электролизер 10 для разложения, после которого сбрасывается в отстойник 12. Всплывшее в отстойнике масло с помощью вращающегося барабана 11 поступает в периодически разгружаемый лоток 19. Отстоявшаяся вода собирается в емкости 16 и после очистки в блоке ультрафильтрации 14, представляющем собой мембранный фильтр, возвращается в оборот. Осевшие в отстойнике 12 частицы механических примесей с помощью скребкового конвейера удаляются в тару для шлама 13.

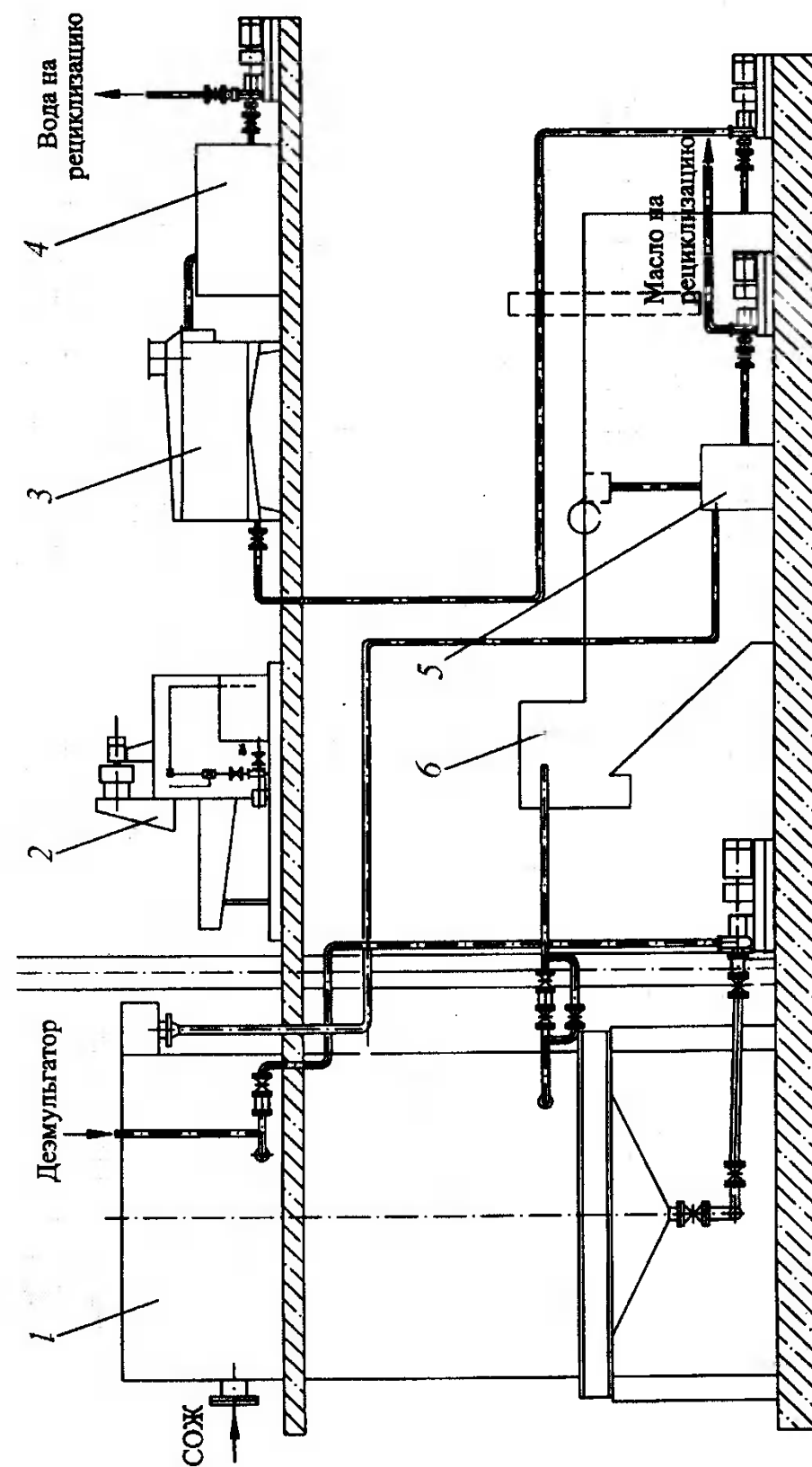


Рис. 5.19. Общий вид установки «Вита-Р» для разложения СОЖ:

1 – приемный бак; 2 – моечная машина; 3 – электролизер; 4 – бак-отстойник; 5 – бак для сбора масла; 6 – установка «Вита-С»

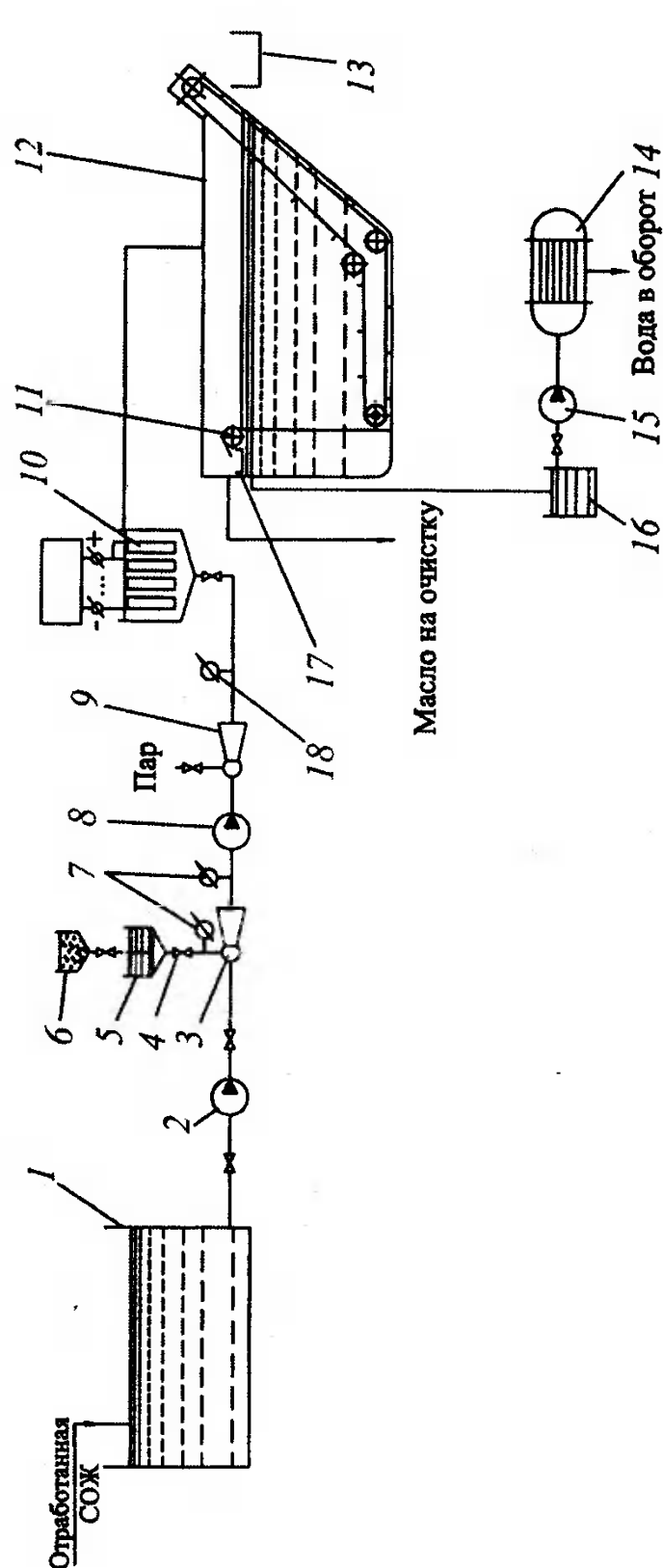


Рис. 5.20. Схема установки «Вита-Р» для разложения отработанной СОЖ:

1 – емкость для отработанной СОЖ; 2, 8, 15 – насосы; 3, 9 – эжекторы; 4 – запорная арматура; 5 – емкость для раствора дезмульгатора; 6 – дозатор; 7 – расходомер; 10 – электролизер; 11 – масляный барабан; 12 – отстойник; 13 – тара для шлама; 14 – блок ультрафильтрации; 16 – емкость для воды; 17 – лоток; 18 – термометр

5.5. УСТАНОВКА «ВИТА-М» ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ МАСЛА

Установка «Вита-М» предназначена для регенерации отработанных минеральных масел с целью их возврата для вторичного использования (рис. 5.21).

В табл. 5.6 представлена техническая характеристика установок для регенерации отработанных масел, действующих в системах применения СОЖ на АО «Контактор» (г. Ульяновск) и АО «Автодетальсервис» (г. Ульяновск), а на рис. 5.22 показан общий вид последней.

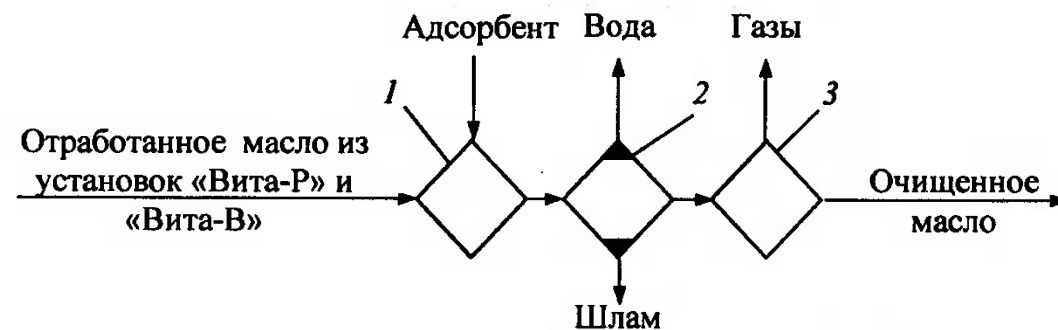


Рис. 5.21. Структурная схема установки «Вита-М» для регенерации отработанных масел:
1 – реактор; 2 – центрифуга; 3 – газоотделитель

5.6. Техническая характеристика установки «Вита-М-100»

Показатель	Числовое значение
Производительность, т/год	100
Содержание в очищенном масле, г/л: механических примесей воды	Следы Следы
Расход материальных ресурсов для регенерации одной тонны масла, кг:	
пара	300
реагента (при исходном содержании воды в масле 20 %)	25
Габаритные размеры, мм:	
длина	6000
ширина	3500
высота	3000
Номинальная мощность, кВт	4,2
Масса, кг	8000

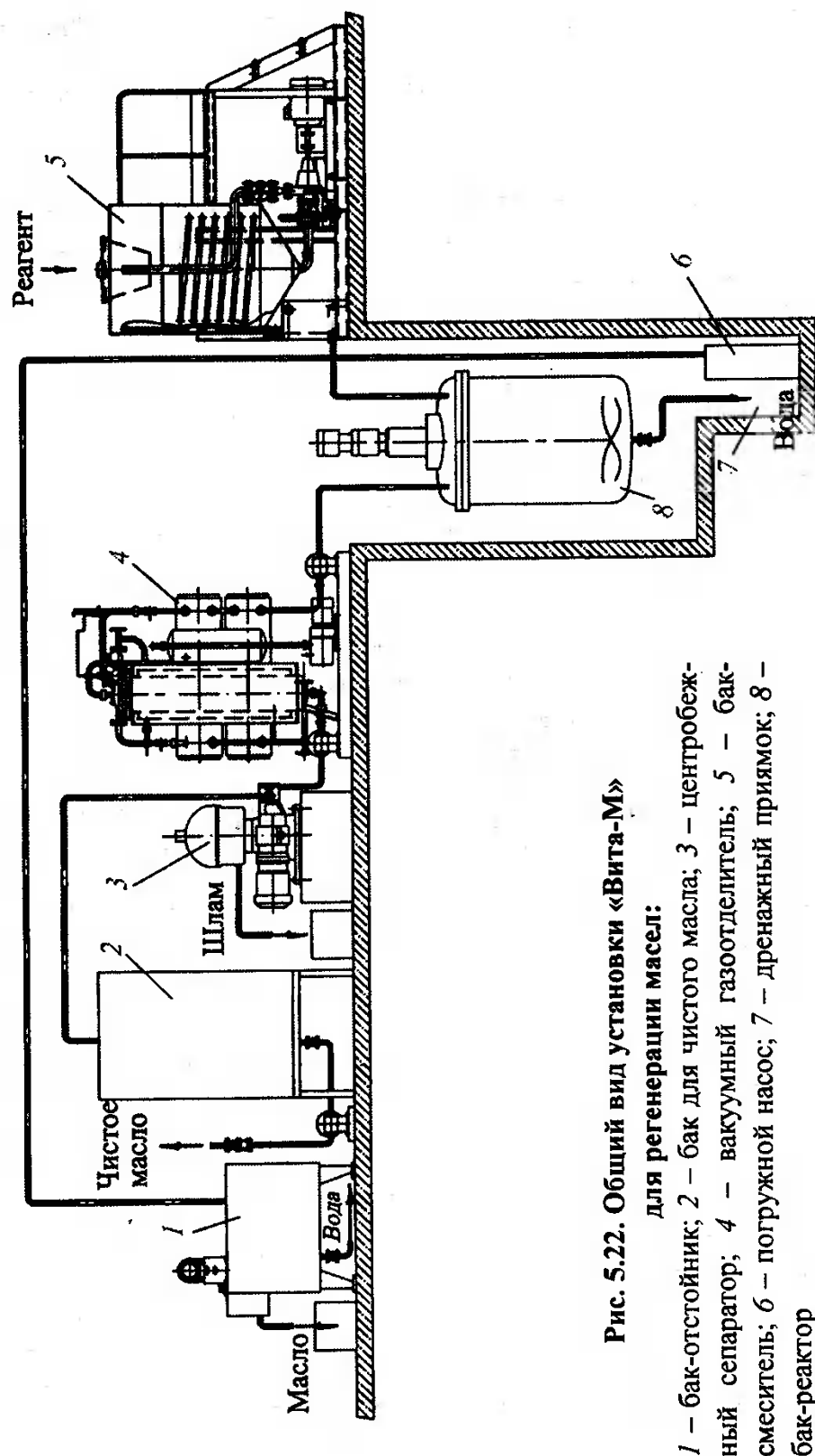


Рис. 5.22. Общий вид установки «Вита-М» для регенерации масел:

1 – бак-отстойник; 2 – бак для чистого масла; 3 – центробежный сепаратор; 4 – вакуумный газоотделитель; 5 – бак-смеситель; 6 – погружной насос; 7 – дренажный приемок; 8 – бак-реактор

Установка работает следующим образом. Отработанное масло из установок «Вита-Р» и «Вита-В» сбрасывается в емкость 1 (рис. 5.23), где отстаивается от механических примесей, которые с помощью скребкового конвейера 2 выносятся из емкости 1 и сбрасываются в тару 4. Выделившаяся в результате отстоя вода периодически по трубопроводу 3 направляется в емкость 5, а затем после рециклизации возвращается в оборот. С помощью насоса 24 масло по трубопроводу 23 перекачивается в реактор 21, где его нагревают и с помощью мешалки 20 смешивают с адсорбентом, подаваемым дозатором 19, питаемым из емкости 18. Выделившаяся в процессе перемешивания вода сбрасывается из реактора 21 по трубопроводу 22 в емкость 5. Подготовленное в реакторе 21 масло насосом 17 порциями подается в центрифугу 7, где происходит его сепарация. Выделившийся шлам сбрасывается в тару 8, вода по трубопроводу 6 сливается в емкость 5, а очищенное масло по трубопроводу 9 направляется в емкость 10. Из емкости 10 насосом 11 по трубопроводу 16 масло порциями закачивается в устройство газоотделения 14, где происходит откачка выделившегося из масла газа с помощью компрессора 15. После газоотделения очищенное масло по трубопроводу 13 сливается в емкость 12.

Новые технические решения, использованные в установках «Вита-М», защищены патентом на изобретение*.

Установка «Вита-М» позволяет возвращать в производство более 90 % ранее утилизируемых масел. Тем самым достигается уменьшение затрат предприятий на смазочные материалы и снижается негативное воздействие на окружающую среду.

5.6. УСТАНОВКА «ВИТА-Ш» ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАМА

Установка «Вита-Ш» (рис. 5.24, 5.25) представляет собой механизированную систему переработки шлама, предназначенную для утилизации шламовых продуктов, полученных в результате абразивной обработки стальных заготовок, а также при прокатке сталей [21, 62].

Шлам поступает в приемный бункер 17 (рис. 5.26). Содержавшиеся в шламе СОЖ и масло сливаются сначала в шламособорник 19, а затем в приемный бак 20. Частично обезвоженный шлам сбрасывается на конвейер 22 и транспортируется в барабанный вращающийся сушильный агрегат 11.

* См. патент РФ N 2209781.

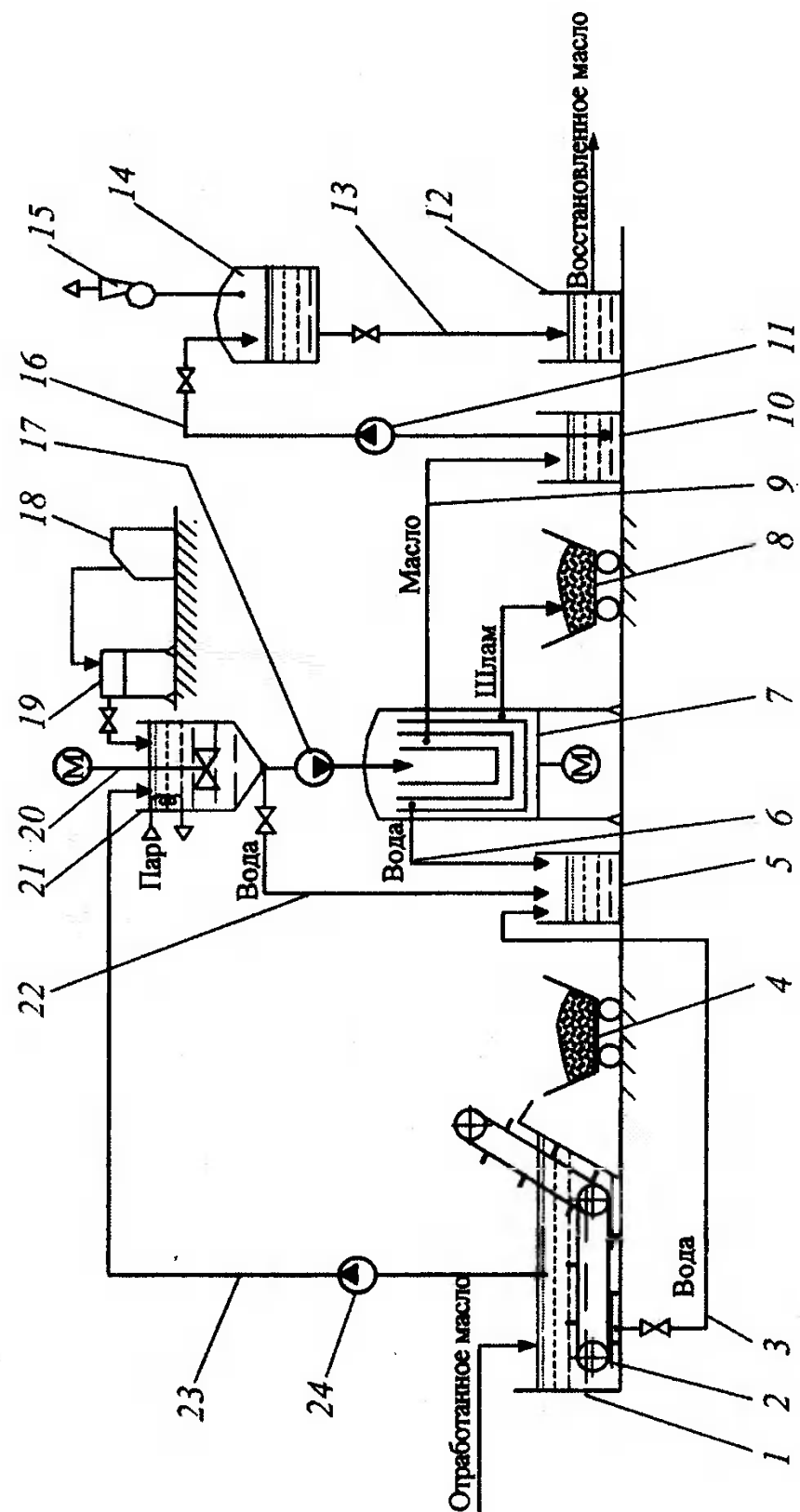


Рис. 5.23. Схема установки «Вита-М» для регенерации отработанных масел

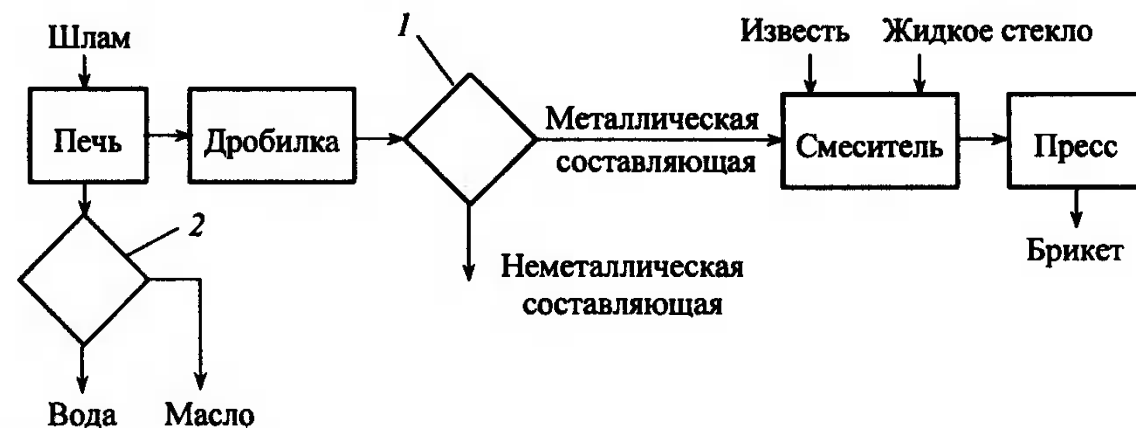


Рис. 5.24. Структурная схема установки «Вита-Ш» для переработки шлама:
1 – магнитный сепаратор; 2 – отстойник

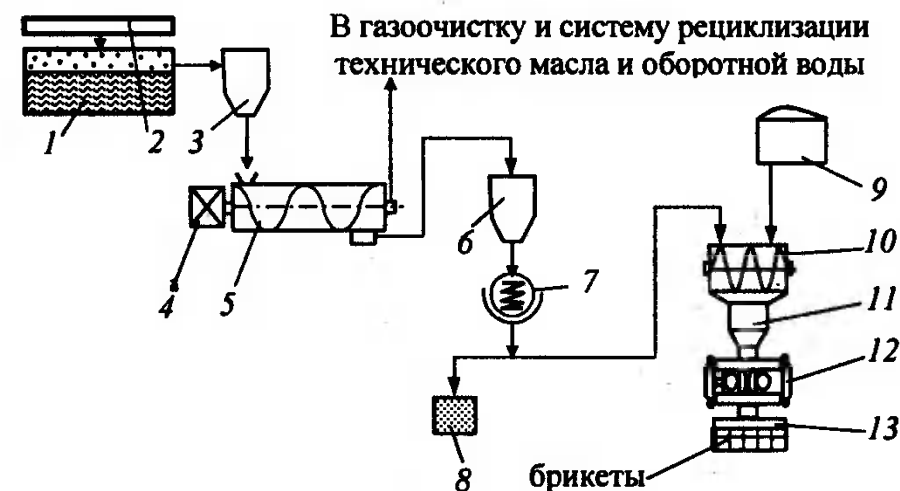


Рис. 5.25. Технологическая схема установки «Вита-Ш» для переработки шлама:
1 – отстойник шлама; 2 – виброгрохот; 3, 6, 9, 11 – бункер-дозатор;
4 – тепловая станция; 5 – барабанная вращающаяся печь;
7 – магнитный сепаратор; 8, 13 – контейнер; 10 – смеситель; 12 – пресс

Сушка шлама осуществляется с использованием природного газа, сгорающего в топке 12. Высушенный шлам из барабана переваливается в валковую дробилку, где размельчается до заданных размеров. Полученная однородная порошковая масса сбрасывается на скребковый конвейер 27, корпус которого охлаждается водопроводной водой. Остывшая порошковая масса конвейером 27 транспортируется в магнитный сепаратор 29, оснащенный демагнитизатором. Немагнитная составляющая шлама из сепаратора отправляется в тару 28, а магнитная составляющая – в ковшовый элеватор 4. Из элеватора металлический порошок сбрасывается в

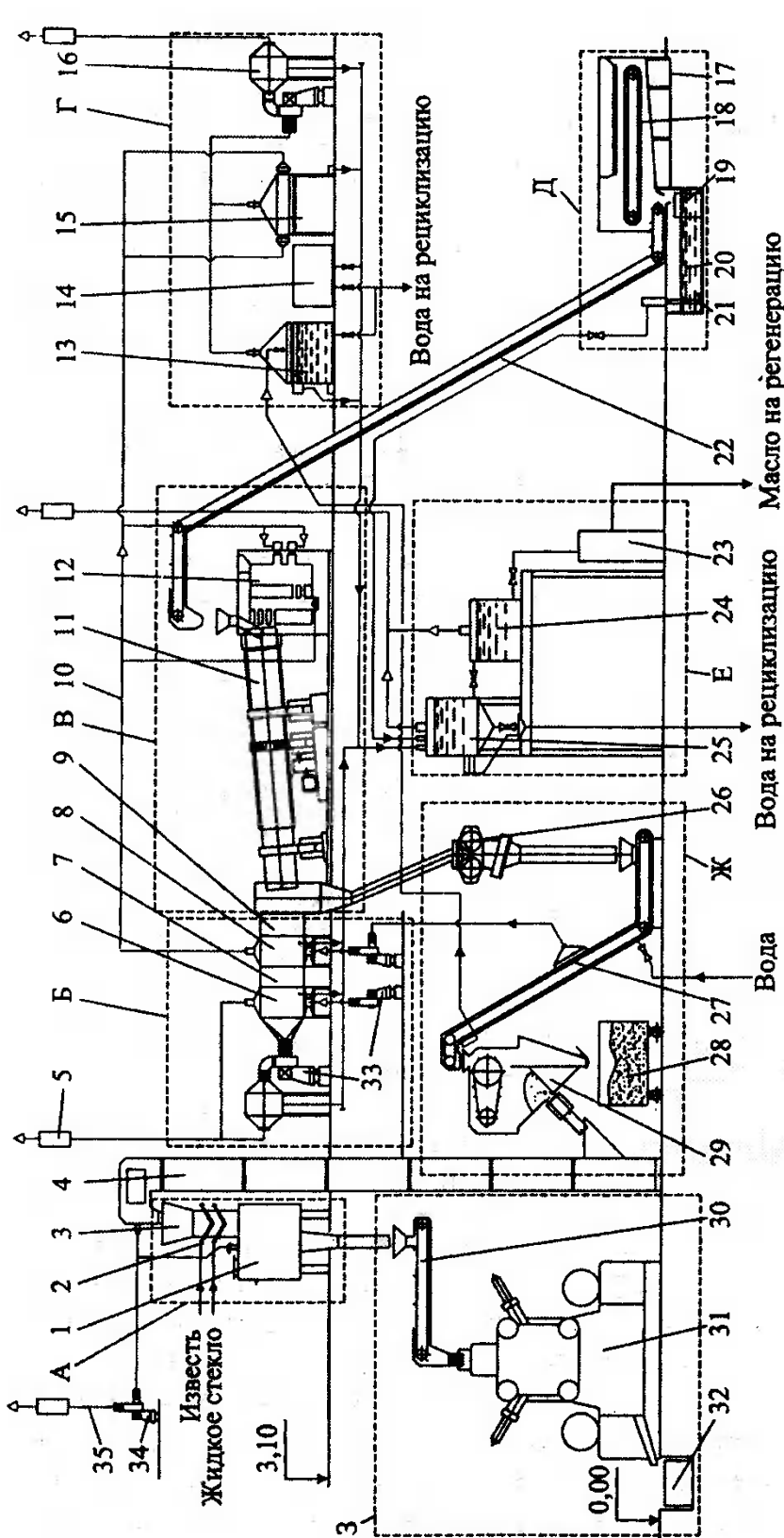


Рис. 5.26. Схема установки «Вита-Ш» для переработки шлама:
 1 – бункер с бегунами-смесителями; 2 – дозатор; 3 – бункер-накопитель; 4 – вертикальный ковшовый элеватор;
 5 – электрофилтры; 6, 8 – рекуператор-охладитель; 7, 9 – соединительная секция; 10, 34 – система воздухопроводов;
 11 – сушильный барабанный агрегат; 12 – топка; 13 – ванна для промывки кассет электрофилтров; 14 – ванна для
 стока воды; 15 – стол для обдува и сушки кассет; 16, 33, 34 – вентиляционный агрегат; 17 – приемный бункер; 18, 22,
 27, 30 – скребковый конвейер; 19 – шламосборник; 20 – приемный бак; 21 – насос; 23 – емкость для масла; 24, 25 –
 бак для отстоя масла; 26 – валковая дробилка; 28 – тара для немагнитного шлама; 29 – магнитный сепаратор с демаг-
 нитизатором; 31 – брикетировочный пресс; 32 – бункер для брикетов; А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З – участки соответственно
 подготовки шлама для брикетирования, очистки газов, сушки шлама, регенерации кассет электрофилтров, приема
 шлама, сброса воды и масла, промывки и охлаждения шлама, брикетирования

накопительный бункер 3, а затем в дозатор 2. После дозатора шлам порциями направляется в бункер 1, куда также порциями добавляют гашеную известь и жидкое стекло. В бункере 1 компоненты перемешиваются бегунами-смесителями до получения однородной смеси. Полученную смесь сваливают на скребковый конвейер 30, который транспортирует ее в пресс 31 для брикетирования. Полученные брикеты складывают в бункере 32.

Для очистки горячих газов в системе предусмотрены рекуператоры-охладители 6, 8 и электрофилтры 5. Выделявшееся в процессе очистки газов масло по трубопроводу сливается в бак 25 для отстоя масла и в бак 24 для очистки воды, а очищенный горячий воздух по воздухопроводу подается в топку 12 и на стол 15 для обдува и сушки кассет электрофилтров. Отстоявшееся в баке 24 масло поступает в бак 25, из которого периодически откачивается на регенерацию.

Для обеспечения стабильной работы в системе предусмотрен участок подготовки (мойки и сушки) кассет (фильтров). В ванну 13 для промывки кассет подается горячая вода, которая проходит через скребковый конвейер 27. Участок комплектуется ванной 14 для стока воды с кассет, а также столом 15 для их обдува и сушки. Выделяющиеся в процессе промывки и сушки газы по воздухопроводу с помощью вентилятора 16 откачиваются и подаются в электрофилтр. Загрязненная масляными отходами вода с участка подготовки фильтров направляется на регенерацию.

В установках «Вита-С» использованы разработки, защищенные патентами на изобретения*.

Техническая характеристика установки «Вита-Ш-500», размещенной на Саратовском подшипниковом заводе, представлена в табл. 5.7. Установка обеспечила ежегодный возврат в производство до 400 т стали ШХ15.

5.7. Техническая характеристика установки «Вита-Ш-500»

Показатель	Числовое значение
1	2
Производительность, т/год	До 500
Размер цилиндрического брикета, $D \times B$, мм	120×30

* См. патенты РФ N 2109548, 2109576.

Продолжение табл. 5.7

1	2
Масса брикета, кг	2
Остаточное содержание в брикете, %:	
масла, не более	1
воды, не более	1
Удельный расход материальных ресурсов на переработку 1 м ³ шлама:	
электроэнергии, кВт · ч/м ³	250
технической воды, м ³	4
природного газа (метана), м ³	80
воздуха, кг	60
стекла натриевого жидкого (ГОСТ 13078–81; модуль $M = 2,5...3,0$, плотность $1,45 - 1,52 \text{ г/см}^3$), кг	16
известки негашеной быстрогасящейся сухой (ГОСТ 9179 – 77; сорт 1, 2; содержание СаО 80...90 %), кг	20
Температура, °С:	
в топке	600...950
в сушильном барабане	200...300
в рекуператорах	100...200
в электрофильтрах	80...100
Продолжительность сушки брикетов в естественных условиях (при $t = 20 \text{ °С}$ и относительной влажности воздуха 60 %), ч	16...24
Усилие пресса, Н	$6,3 \cdot 10^4$
Габаритные размеры, мм:	
длина	1800
ширина	1800
высота	7200
Номинальная мощность, кВт	135
Масса, кг	54000

5.7. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ЭКОЛОГИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ НА ОСНОВЕ УСТАНОВОК «ВИТА»

На рис. 5.27 представлена схема СП СОЖ на основе установок «Вита-С», «Вита-В» и «Вита-М», обслуживающей комплекс металлорежущих станков, расположенных на трех этажах цеха № 1 АОЗТ «Контактор» (г. Ульяновск).

В режиме циркуляции СОЖ (рабочий режим) система работает следующим образом. Электронасосом 4 очищенная СОЖ подается в напорные магистрали 1-го, 2-го и 3-го этажей. С напорными и сливными магистралями соединены гидроблоки станков (см. на рис. 5.27 схему 3-го этажа), содержащие три крана 10, которые обеспечивают заполнение резервуара 12 СОЖ, слив и подачу СОЖ в рабочие зоны станков. Заполнение резервуара 12 производится насосом 4 в течение 5 – 7 мин. Избыток СОЖ, преодолевая сопротивление предохранительного клапана 9, поступает в гидробак 8. Электронасос 4 отключается по сигналу датчика уровня СОЖ в гидробаке 8. Из гидробака 8 СОЖ движется в двух направлениях: 1) по сливной магистрали СОЖ поступает в установку 16 для очистки. Дросселем-вентилем 13 обеспечивается необходимая степень очистки СОЖ за счет изменения ее расхода через установку 16; 2) СОЖ, открывая обратные клапаны 5, поступает в напорные магистрали соответствующих этажей, что обеспечивает возможность заполнения резервуаров 12 при отключенном электронасосе 4. Подача СОЖ в рабочие зоны станков обеспечивается электронасосом 11.

В установке 16 загрязненная механическими примесями и посторонними маслами СОЖ с помощью сепаратора, вакуум-фильтра, флотатора и маслоъемного барабана очищается и переливом поступает в гидробак-аккумулятор 1 для очищенной СОЖ. При заполнении гидробака-аккумулятора 1 датчик 2 подает сигнал на включение электронасоса 4 и цикл повторяется.

Периодически отработанная СОЖ восстанавливается в установке «Вита-В». Для этого отработанная СОЖ из резервуаров 12 станков сливается при переводе гидроблоков станков в режим слива. Электронасосом 11 производится подача СОЖ в сливные магистрали, откуда она поступает на очистители установки 16 «Вита-С». Одновременный слив СОЖ со всех станков производится при полностью открытом дросселе-вентиле 5 в течение 2 мин. Принцип работы установки «Вита-В» описан в п. 5.3. После восстановления отработанная СОЖ возвращается в гидробак-аккумулятор 1. При недостаточном объеме СОЖ в системе включа-

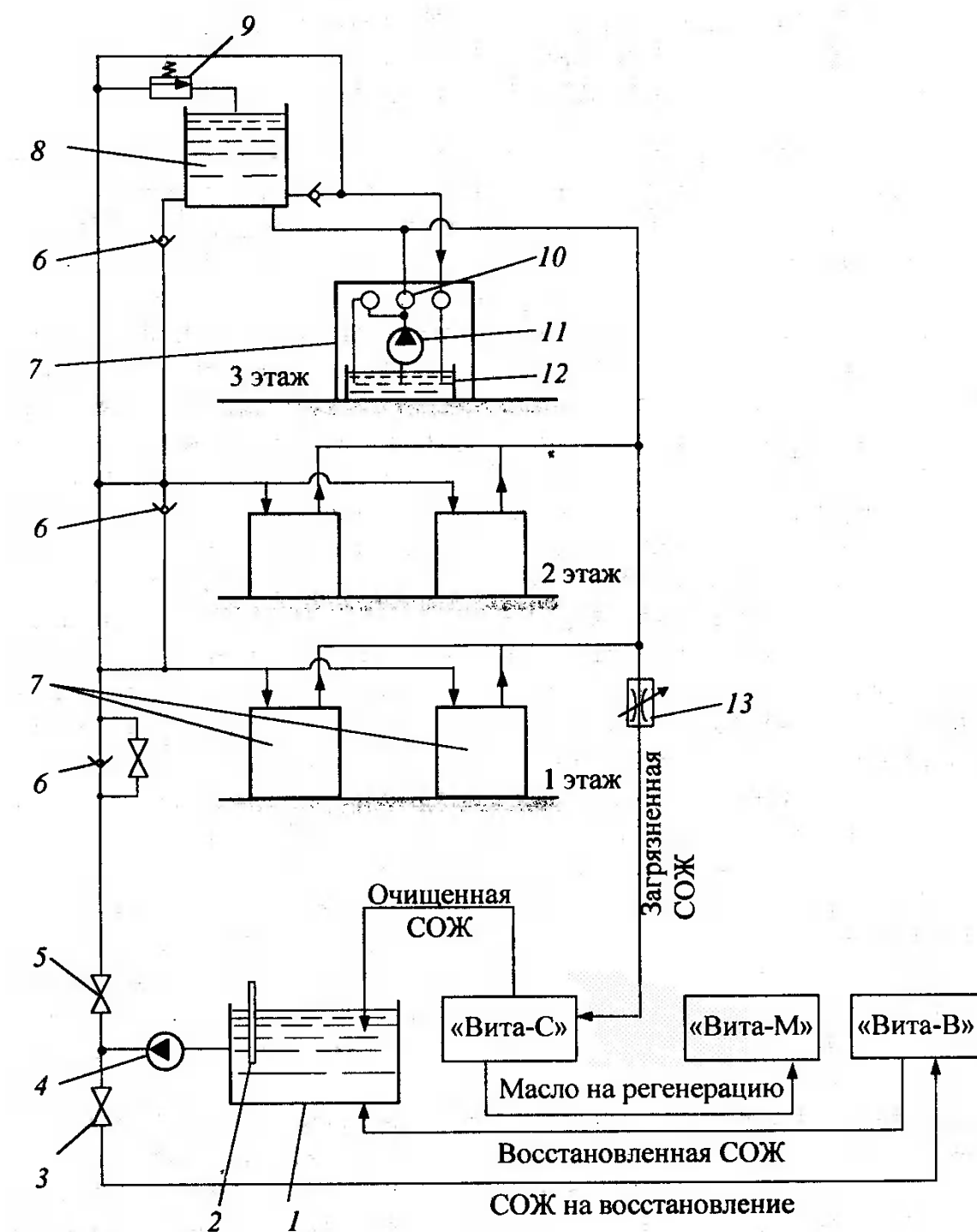


Рис. 5.27. Схема СП СОЖ в цехе № 1 АОЗТ «Контатор»:
1 – гидробак-аккумулятор; 2 – датчик уровня; 3, 5 – вентиль; 4 – насос; 6 – обратный клапан; 7 – станок; 8 – гидробак; 9 – предохранительный клапан; 10 – кран; 11 – насос станка для подачи СОЖ в рабочую зону; 12 – емкость для СОЖ; 13 – дроссель

ется электронасос подачи свежеприготовленной СОЖ, которая прекращается автоматически при заполнении системы по сигналам управления от датчика уровня 2.

Извлекаемые в установке «Вита-С» инородные масла по мере накопления регенерируются в установке «Вита-М», которая описана в п. 5.5, и возвращаются в оборот предприятия.

Реализованная на АОЗТ «Контатор» СП СОЖ позволила минимизировать отходы отработанной СОЖ и продуктов ее переработки путем организации предельно замкнутого цикла оборота СОЖ в системе.

5.8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ

Разработанные и изготовленные в УлГТУ средства ресурсосберегающего экологизированного обеспечения металлообрабатывающих производств СОЖ успешно эксплуатируются на 28 машиностроительных и металлургических предприятиях России, в том числе на ОАО «Волжский автомобильный завод» (г. Гольягти), «Уралмаш» (г. Екатеринбург), «Ульяновский автомобильный завод», «Чебоксарский агрегатный завод», «Северсталь» (г. Нереповец), «Новолипецкий металлургический комбинат» (г. Липецк), «Магнитогорский калибровочный завод» и др.

Общий объем продаж ресурсосберегающих технологий и средств обеспечения промышленных производств СОЖ за последние 10 лет составил около 9 млн у. е. Промышленная реализация новых технологий и оборудования обеспечила возврат в оборот более 12000 м³ СОЖ, ликвидацию сброса промышленных стоков после утилизации СОЖ в количестве 225000 м³, уменьшение водозабора на 228000 м³, ликвидацию размещения на свалках 25000 т шламов, загрязненных компонентами СОЖ и смазочными маслами.

Технико-экономическую эффективность новых технологий и техники применения СОЖ оценивали путем сопоставления с эффективностью СП СОЖ, действующих в производстве, используя при этом комплекс показателей, характеризующих качество и производительность обработки, стойкость режущего инструмента и срок функционирования СОЖ [63, 69]. Источниками технико-экономической эффективности служили:

- 1) повышение производительности обработки путем интенсификации режима обработки при обеспечении заданного качества изделий;
- 2) улучшение качества изделий при неизменном режиме обработки;
- 3) увеличение периода стойкости инструмента;

4) увеличение срока функционирования СОЖ, что обеспечивает:
 уменьшение затрат на приобретение исходных продуктов для приготовления СОЖ;
 уменьшение затрат на приготовление СОЖ;
 уменьшение затрат на утилизацию отработанных СОЖ и отчислений на природопользование;
 экономию затрат предприятия на приобретение сырья и материалов благодаря возврату в производство минеральных масел и металла, извлеченных из отработанных СОЖ и шламов.

Наряду с повышением экономической эффективности производства новые технологии и оборудование для применения СОЖ должны обеспечить повышение его экологической чистоты. Экологическая нагрузка на окружающую среду оценивается массой вредных веществ, сбрасываемых со стоками отработанных жидкостей и продуктов их разложения. Годовой экологический ущерб, наносимый окружающей среде залповыми сбросами отработанных СОЖ и продуктов их разложения, определяется выражением

$$Y_r = V n_c \sum_{i=1}^m (1 - \varepsilon_i) c_{vi} K_{pi}, \quad (5.1)$$

где V – объем СОЖ в системе, м^3 ; n_c – количество сбросов отработанной СОЖ в год; m – число загрязняющих веществ в стоках; ε_i – степень удаления i -го загрязняющего вещества из СОЖ в устройствах СП СОЖ, доли единицы; c_{vi} – концентрация i -го загрязняющего вещества в стоках, $\text{кг}/\text{м}^3$; K_{pi} – переводной коэффициент, оценивающий воздействие i -го загрязняющего вещества на окружающую среду с учетом экологической ситуации в регионе.

Коэффициент K_{pi} определяется единицей измерения анализируемого показателя ущерба (например, экономического – рублями), отнесенной к массе вредных веществ в стоках СОЖ (кг). При этом пока отсутствуют надежные методики оценки экологического ущерба во всех его аспектах. Достаточно полно (в теоретическом плане) изучен только экономический ущерб от загрязнения окружающей среды («эколого-экономический» ущерб), для расчета которого разработаны и некоторые практические подходы [61].

Из зависимости (5.1) следует, что при постоянных значениях ε_i , c_{vi} и K_{pi} экологический ущерб Y_r напрямую определяется числом сбросов n_c отработанной СОЖ:

$$n_c = 365/t_3, \quad (5.2)$$

где t_3 – срок функционирования СОЖ, сутки, – наработка на отказ системы применения СОЖ (при отказе СП производится полная замена СОЖ).

Таким образом, как с производственно-экономических, так и с экологических позиций, важной задачей является увеличение срока функционирования СОЖ. Как было показано в предыдущей главе, использование установок «Вита» в СП СОЖ на машиностроительных и металлургических предприятиях позволяет многократно увеличить срок функционирования СОЖ и соответственно сократить объем ее потребления.

Методика расчета экономической эффективности технологий и оборудования для применения СОЖ с учетом перечисленных источников эффективности, а также с учетом экономической оценки на основе зависимостей (5.1) и (5.2) экологического воздействия СП СОЖ на окружающую среду (размер платы за сброс отработанной СОЖ, размещение отходов, выбросы в атмосферу), приведена в табл. 5.8. Поскольку, как было показано в гл. 1, важным показателем ресурсосберегающих экологизированных СП СОЖ является доступность, т.е. такой уровень капитальных затрат на эти системы, при котором большинство предприятий способно их приобрести, в качестве критерия экономической эффективности новых технологий и техники применения СОЖ использован также срок их окупаемости.

Авторы разработанных в УлГТУ и представленных в настоящей книге разработок удостоены премии Правительства Российской Федерации 2003 г. в области науки и техники. Международное признание получили: экологизированная ресурсосберегающая технология применения СОЖ – диплом и серебряная медаль Международного Салона изобретений «Конкурс Лепин», г. Париж, 2001 г., диплом II степени Российского агентства по патентам и товарным знакам; магнитный сепаратор для очистки СОЖ – диплом и золотая медаль международной промышленной выставки «Эврика – 2000», г. Брюссель, 2000 г., специальный приз Австрийского общества изобретателей, 2000 г., специальный приз, диплом и золотая медаль Международного Салона изобретений «Конкурс Лепин», г. Париж, 2001 г.; технология и техника утилизации промышленных стоков – диплом и серебряная медаль международной промышленной выставки «Эврика – 2000», г. Брюссель, 2000 г.; технология и техника переработки металлодержащих шламов – диплом и золотая медаль международной промышленной выставки «Эврика – 2000», г. Брюссель, 2001 г.

5.8. Зависимости для расчета экономической эффективности техники применения СОЖ

Наименование показателя, расчетные зависимости	1	2 Параметры, входящие в расчетную зависимость
Годовые затраты на СОЖ, руб./год: $C_{\text{СОЖ}}^6 = C_{\text{и}}^6 + C_{\text{пр}}^6;$ $C_{\text{СОЖ}}^{\text{н}} = C_{\text{и}}^{\text{н}} + C_{\text{пр}}^{\text{н}}$		$C_{\text{и}}^6, C_{\text{и}}^{\text{н}}$ – годовые затраты на приобретение исходных продуктов для приготовления СОЖ соответственно по базовому и новому вариантам, руб./год; $C_{\text{пр}}^6, C_{\text{пр}}^{\text{н}}$ – годовые затраты на приготовление СОЖ соответственно по базовому и новому вариантам, руб./год
Годовые затраты на исходные продукты, руб./год: $C_{\text{и}}^6 = \Pi_{\text{и}} \Pi Q_{\text{и}}^6 K_{\text{и}}^6 \text{ или}$ $C_{\text{и}}^6 = \Pi_{\text{и}} c Q_{\text{СОЖ}}^6 K_{\text{и}}^6;$ $C_{\text{и}}^{\text{н}} = \Pi_{\text{и}} \Pi Q_{\text{и}}^{\text{н}} K_{\text{и}}^{\text{н}} \text{ или}$ $C_{\text{и}}^{\text{н}} = \Pi_{\text{и}} c Q_{\text{СОЖ}}^{\text{н}} K_{\text{и}}^{\text{н}}$		$\Pi_{\text{и}}$ – стоимость исходного продукта для приготовления СОЖ, руб./т; c – массовая концентрация исходного продукта в СОЖ; Π – годовой выпуск продукции, т/год; $Q_{\text{и}}^6, Q_{\text{и}}^{\text{н}}$ – удельный расход исходного продукта на тонну продукции соответственно по базовому и новому вариантам, т/т; $Q_{\text{СОЖ}}^6, Q_{\text{СОЖ}}^{\text{н}}$ – годовой расход СОЖ соответственно по базовому и новому вариантам, т/год; $K_{\text{и}}^6, K_{\text{и}}^{\text{н}}$ – коэффициенты накладных расходов, учитывающие расходы на хранение, транспортирование исходного продукта, приготовление СОЖ, заработную плату рабочих соответственно по базовому и новому вариантам
Годовая экономия исходного продукта для приготовления СОЖ $\Delta_{\text{и}} = C_{\text{и}}^6 - C_{\text{и}}^{\text{н}}$, руб./год		
Годовые затраты на приготовление СОЖ, руб./год: $C_{\text{пр}}^6 = C_{\text{в}} \text{Пр}^6 K_{\text{в}}^6; C_{\text{пр}}^{\text{н}} = C_{\text{в}} \text{Пр}^{\text{н}} K_{\text{в}}^{\text{н}}$		$C_{\text{в}}$ – стоимость воды, руб./кг; $\text{Пр}^6, \text{Пр}^{\text{н}}$ – удельный расход воды на тонну продукции соответственно по базовому и новому вариантам, кг/т

Годовая экономия на приготовлении СОЖ $\Delta_{\text{пр}} = C_{\text{пр}}^6 - C_{\text{пр}}^{\text{н}}$, руб./год	
Годовые затраты на эксплуатацию СП СОЖ, руб./год*: $C_{\text{з}}^6, \text{н} = C_{\text{а}}^6, \text{н} + C_{\text{р}}^6, \text{н} + C_{\text{п}}^6, \text{н} + C_{\text{эл}}^6, \text{н} + C_{\text{рм}}^6, \text{н}$	$C_{\text{а}}^6, \text{н}, C_{\text{р}}^6, \text{н}, C_{\text{эл}}^6, \text{н}, C_{\text{п}}^6, \text{н}, C_{\text{рм}}^6, \text{н}$ – соответственно затраты на амортизационные отчисления, текущий ремонт, электроэнергию, содержание производственных площадей, заработную плату рабочих, фильтрующие и расходные материалы, руб./год
Годовые затраты на амортизационные отчисления, руб./год: $C_{\text{а}}^6, \text{н} = K^6, \text{н} N_{\text{а}}^6, \text{н}$	$K^6, \text{н}, N_{\text{а}}^6, \text{н}$ – соответственно капитальные вложения, руб., и норма амортизационных отчислений, год ⁻¹
Годовые затраты на текущий ремонт, руб./год: $C_{\text{р}}^6, \text{н} = C_{\text{мч}}^6, \text{н} R_{\text{мч}}^6, \text{н} + C_{\text{эл}}^6, \text{н} R_{\text{эл}}^6, \text{н}$	$C_{\text{мч}}^6, \text{н}, C_{\text{эл}}^6, \text{н}$ – годовые затраты на единицу ремонтосложности соответственно механической и электрической части, руб./год; $R_{\text{мч}}^6, \text{н}, R_{\text{эл}}^6, \text{н}$ – ремонтосложность соответственно механической и электрической части, ед.
Годовые затраты на электроэнергию, руб./год: $C_{\text{эл}}^6, \text{н} = \sum_{i=1}^n N_i^6, \text{н} \Phi_{\text{д}}^6, \text{н} K_{\text{вр}}^6, \text{н} K_{\text{н}}^6, \text{н} \Pi_{\text{эл}}^6, \text{н} / \eta_i^6, \text{н}$	n – число электродвигателей; $N_i^6, \text{н}$ – установленная мощность электродвигателей, кВт; $\Phi_{\text{д}}^6, \text{н}$ – годовой фонд времени работы СП СОЖ, ч/год; $K_{\text{вр}}^6, \text{н}, K_{\text{н}}^6, \text{н}$ – коэффициент соответственно использования электродвигателей по времени и по мощности; $K_{\text{н}}^6, \text{н}$ – коэффициент, учитывающий потери электроэнергии в сетях; $\Pi_{\text{эл}}^6, \text{н}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб./(кВт·ч); $\eta_i^6, \text{н}$ – коэффициент полезного действия электродвигателей, доли единицы

1	2
Годовые затраты на содержание производственных площадей, руб./год: $C_{пл}^{б,н} = C_0 S_{п}^{б,н} K_{пр}$	C_0 – затраты на содержание 1 м ² производственной площади, руб./м ² ·год; $S_{п}^{б,н}$ – площадь, занимаемая СП СОЖ, м ² ; $K_{пр}$ – коэффициент, учитывающий проходы и проезды
Годовые затраты на заработную плату рабочих, руб./год: $C_{зп}^{б,н} = 3_{вр}^{б,н} \Pi_{чс}^{б,н} k^{б,н}$	$3_{вр}^{б,н}$ – годовые затраты времени на обслуживание СП СОЖ, ч/год; $\Pi_{чс}^{б,н}$ – средняя часовая тарифная ставка рабочего, руб./ч; $k^{б,н}$ – число рабочих
Годовые затраты на расходные материалы (газ, пар, фильтроматериалы и т.п.), руб./год: $C_{рм}^{б,н} = \sum_{i=1}^{n_{рм}} Q_{рм\ i}^{б,н} \Pi_{рм\ i}^{б,н}$	$Q_{рм}^{б,н}$ – годовое потребление расходного материала i -го наименования, усл. ед./год; $\Pi_{рм\ i}^{б,н}$ – стоимость усл. ед. i -го наименования расходного материала, руб./усл. ед.; $n_{рм}$ – номенклатура расходного материала
Годовая экономия на эксплуатации СП СОЖ $\Delta_3 = C_3^б - C_3^н$, руб./год	
Годовые затраты на утилизацию СОЖ, руб./год: $C_y^{б,н} = \Pi_y^{б,н} V$	$\Pi_y^{б,н}$ – затраты на утилизацию 1 м ³ отработанной СОЖ, руб./м ³ ; V – годовой объем утилизируемой СОЖ, м ³ /год
Годовая экономия от сокращения затрат на утилизацию СОЖ $\Delta_y = C_y^б - C_y^н$, руб./год	
Годовые затраты на восстановление СОЖ, руб./год: $C_{вс}^{б,н} = \Pi_{вс}^{б,н} V_{в}$	$\Pi_{вс}^{б,н}$ – затраты на восстановление 1 м ³ отработанной СОЖ, руб./м ³ ; $V_{в}$ – годовой объем восстанавливаемой СОЖ, м ³ /год
Годовая экономия от сокращения затрат на восстановление СОЖ $\Delta_{в} = C_{в}^б - C_{в}^н$, руб./год	
Годовая экономия, связанная с возвратом отработанных масел, руб./год: $\Delta_{м} = V_{м}^н (\Pi_{м}^н - C_{м}^н) - V_{м}^б (\Pi_{м}^б - C_{м}^б)$	$\Pi_{м}^{б,н}$ – стоимость минеральных масел, руб./м ³ ; $C_{м}^{б,н}$ – себестоимость регенерации минеральных масел, руб./м ³ ; $V_{м}^{б,н}$ – годовой объем регенерируемых минеральных масел, м ³ /год
Годовая экономия, связанная с возвратом металла, извлеченного из шлама, руб./год: $\Delta_{мт} = M_{мт}^н (\Pi_{мт}^н - C_{мт}^н) - M_{мт}^б (\Pi_{мт}^б - C_{мт}^б)$	$\Pi_{мт}^{б,н}$ – стоимость металла, руб./т; $C_{мт}^{б,н}$ – себестоимость извлечения металла из шлама и переработки его в брикеты, руб./т; $M_{мт}^{б,н}$ – производительность извлечения металла из шлама и переработки его в брикеты, т/год
Годовая экономия, связанная с уменьшением отбавки (отсортровки) готовой продукции, руб./год: $\Delta_6 = (\Pi_{гп} - \Pi_{гпо}) (O^н - O^б) \Pi / 100$	$\Pi_{гп}$, $\Pi_{гпо}$ – цена единицы готовой продукции соответственно нормального качества и отбракованной (отсортированной), руб.; $O^{б,н}$ – процент брака (отсортровки) готовой продукции, год ⁻¹
Годовая экономия затрат, связанных с функционированием технологического оборудования:	$C_{то}^{б,н}$ – затраты, связанные с функционированием технологического оборудования, руб./год; q_1 – норматив цеховой себестоимости одного часа работы технологического оборудования, руб./ч; q_2 – норматив дополнительных затрат, обусловленных капитальными вложениями,

2

1

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{то}} &= C_{\text{то}}^6 - C_{\text{то}}^{\text{н}} = \\ &= \Pi(q_1 + q_2)(n_{\text{ст}}^6 t_{\text{шт}}^6 - n_{\text{ст}}^{\text{н}} t_{\text{шт}}^{\text{н}}) + \mathcal{E}_{\text{ин}} \end{aligned}$$

Годовая экономия затрат на инструмент, руб./год:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{ин}} &= C_{\text{ин}}^6 - C_{\text{ин}}^{\text{н}} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_{\text{ин}}} \left[\frac{N_i (\Pi_{\text{ин}i} + C_{\text{см}i})}{(n_i^6 T_{\text{ин}i}^6 - n_i^{\text{н}} T_{\text{ин}i}^{\text{н}})} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{N_i \Pi_{\text{ин}i}}{(T_{\text{ин}i}^6 - T_{\text{ин}i}^{\text{н}})} \right] \end{aligned}$$

Плата за сбросы отработанной СОЖ в природные водоемы, руб./год:
в пределах допустимых концентраций (ПДК)

$$\begin{aligned} C_{\text{сб}}^{\text{б,н}} &= K_1 \sum_{i=1}^m H_{1i} M_{1i}; \\ &\text{при превышении ПДК} \\ C_{\text{сб}}^{\text{б,н}} &= K_1 \sum_{i=1}^m L_{1i} (M_{1i} - M_{\text{ли}}) \end{aligned}$$

Годовая экономия от сокращения сбросов в поверхностные водные объекты, $\mathcal{E}_{\text{сб}} = C_{\text{сб}}^6 - C_{\text{сб}}^{\text{н}}$, руб./год

Плата за размещение отходов (шлама, отработанного масла) СП СОЖ в пределах нормативов, руб./год:
 $C_{\text{ро}}^{\text{б,н}} = K_2 H_2 M_2$

Годовая экономия от сокращения количества размещаемых отходов, $\mathcal{E}_{\text{ро}} = C_{\text{ро}}^6 - C_{\text{ро}}^{\text{н}}$, руб./год

Плата за выбросы загрязняющих веществ из СП СОЖ в атмосферу, руб./год:
в пределах допустимых нормативов $C_{\text{вб}}^{\text{б,н}} = K_3 \sum_{i=1}^m H_{3i} M_{3i}$;

руб./ч; $n_{\text{ст}}^{\text{б,н}}$ – число единиц технологического оборудования; $t_{\text{шт}}^{\text{б,н}}$ – суммарное штучное время обработки одной детали, ч; $\mathcal{E}_{\text{ин}}$ – годовая экономия затрат на инструмент, руб./год

$C_{\text{ин}}^{\text{б,н}}$ – затраты на инструмент, руб./год; N_i – число инструментов i -го наименования (например, шлифовальных кругов, правящих инструментов, валков прокатного стана и т.д.), эксплуатируемых на технологическом оборудовании, обслуживаемом СП СОЖ; $\Pi_{\text{ин}i}$ – стоимость инструмента i -го наименования, руб.; $C_{\text{см}i}$ – затраты на смену инструмента i -го наименования, руб.; $T_{\text{ин}i}^{\text{б,н}}$ – период стойкости инструмента i -го наименования, лет; $\Pi_{\text{ин}i}$ – затраты на восстановление работоспособности инструмента i -го наименования (правку шлифовальных кругов, заточку режущего инструмента, перешлифовку валков прокатного стана), руб.; $n_i^{\text{б,н}}$ – ресурс инструмента i -го наименования, выраженный допустимым числом восстановлений его работоспособности; $n_{\text{ин}}$ – число наименований инструментов

K_1 – коэффициент экологической ситуации экологической значимости поверхностного водного объекта в регионе; m – количество загрязняющих веществ в стоках; H_{1i} – базовый норматив платы за сбросы 1 т i -го загрязняющего вещества, руб./т; M_{1i} – фактический сброс i -го загрязняющего вещества, т/год; L_{1i} – норматив платы за

сбросы 1 т i -го загрязняющего вещества при превышении ПДК, руб./т; $M_{\text{ли}}$ – лимит сброса i -го загрязняющего вещества, т/год

K_2 – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости почв в регионе; H_2 – базовый норматив платы за размещение 1 т отходов (в зависимости от класса токсичности), руб./т; M_2 – фактическое количество размещаемых отходов, т/год

K_3 – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости атмосферы в регионе; m – количество загрязняющих веществ в выбросах; H_{3i} – базовый норматив за выброс 1 т i -го загрязняющего вещества, руб./т; M_{3i} – фактический выброс i -го загрязняющего вещества, т/год; L_{2i} – норматив платы за выброс 1 т i -го загрязняющего вещества, руб./т; $M_{\text{ли}}$ – лимит выброса i -го загрязняющего вещества, т/год

Продолжение табл. 5.8

1	2
при превышении допустимых нормативов	
$C_{вб}^{б,н} = K_3 \sum_{i=1}^m \Pi_{2i} (M_{3i} - M_{ли})$	
Годовая экономия от сокращения выбросов в атмосферу $\mathcal{E}_{вб} = C_{в}^б - C_{в}^н$, руб./год	
Общая годовая экономия по всем статьям затрат $\mathcal{E} = \mathcal{E}_н + \mathcal{E}_{пр} + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_у + \mathcal{E}_в + \mathcal{E}_{мт} + \mathcal{E}_6 + \mathcal{E}_{то} + \mathcal{E}_{об} + \mathcal{E}_{ро} + \mathcal{E}_{вб}$, руб./год	
Срок окупаемости, лет $T = K/\mathcal{E}$	K – капитальные вложения, руб.
Годовая экономическая эффективность $E = \mathcal{E}/K$	

* В целях большей компактности таблицы здесь и далее приведены «обобщенные» зависимости (одна зависимость для базового (верхний индекс «б») и нового (индекс «н») вариантов).

** Под усл. ед. в зависимости от вида расходного материала понимается m^2 ; m^3 ; Гкал и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под общ. ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Аскинази А.Е. СОЖ и методы обеспечения экологической безопасности при механической обработке / А.Е. Аскинази, М.Б. Гатовский, Б.И. Черпаков // СТИН. – 1998. – № 10. – С. 34 – 39.
3. Ашурова А.А. Разработка новых биоцидов для защиты смазочно-охлаждающих жидкостей от биопоражений / А.А. Ашурова, К.И. Садыхов, М.Т. Аббасова // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. – Волжский инж.-стр. ин-т, 1999. – С. 207 – 208.
4. Багдасаров А.С. Экология и эффективное направление утилизации промышленных отходов // Материалы и технология XXI века: Сборник. Ч. III. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2001. – С. 87 – 88.
5. Белов М.А. Повышение качества шлифованных деталей из коррозионно-стойких сталей путем рационального применения технологических жидкостей: Дис. ... канд. техн. наук: Ульяновский политехн. ин-т. 1986. – 236 с.
6. Бердичевский Е.Г. Малоотходная технология применения СОЖ в металлообработке. – М.: НИИмаш, 1981. – 64 с.
7. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
8. Богданов В.В. Влияние механических примесей, содержащихся в СОЖ, на процессы абразивной обработки заготовок // Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах обработки заготовок резанием. – УлГТУ, 1996. – С. 63 – 70.
9. Богданов В.В. Повышение эффективности операций шлифования путем ресурсосберегающего обеспечения чистоты технологических жидкостей. Дис. кан. техн. наук: Ульяновский политехн. ин-т. 1981. – 383 с.
10. Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. – Тбилиси: Сабчото Сакартвело, 1984. – 240 с.
11. Бульжев Е.М. Исследование возможности повышения эффективности обработки деталей шлифованием путем наложения магнитного поля на СОЖ, загрязненную механическими примесями: Дис. ... кан. техн. наук: Ульяновский политехн. ин-т. 1979. – 311 с.
12. Бульжев Е.М. К вопросу оптимизации режимов работы аппаратов для магнитной обработки СОЖ, загрязненных механическими примесями при шлифовании // Физико-химическая механика процессов трения. Ивановский госуд. ун-т, 1977. – С. 63 – 65.
13. Бульжев Е.М. Кассетные магнитные сепараторы для очистки смазочно-охлаждающих жидкостей // Вестник машиностроения. – 2001. – № 9. – С. 24 – 28.
14. Бульжев Е.М. Кинетика седиментации механических примесей, содержащихся в СОЖ // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1977. – № 2. – С. 177 – 181.
15. Бульжев Е.М. Опыт создания и эксплуатации централизованных систем очистки моющих растворов и СОЖ на машиностроительных и автомобильных производствах // Инженерно-техническое обеспечение АПР и машинно-технологических станций в условиях реформы развития. Орловский политехн. ин-т, 2000. – С. 69 – 71.
16. Бульжев Е.М. Система экологизированного ресурсосберегающего применения смазочно-охлаждающих жидкостей «Вита-С» // Вестник УлГТУ. 2002. – № 1. – С. 49 – 53.

17. Булыжев Е.М. Экспериментальное исследование кассетных магнитных сепараторов / Е.М. Булыжев, В.П. Афанасьев, А.Р. Троций // Вестник УлГТУ. 2002. – № 1. – С. 113 – 118.
18. Булыжев Е.М. Моделирование процесса тонкого шлифования в терминах «алгебра прямых» / Е.М. Булыжев, А.Ю. Богданов, А.С. Андреев // Математическое моделирование в научных исследованиях. – Ставропольский госуд. ун-т, 2000. – С. 175 – 178.
19. Булыжев Е.М. Расчет магнитного и гидродинамического полей в магнитном сепараторе / Е.М. Булыжев, П.А. Вельмисов, Ю.А. Решетников // Вопросы теории и проектирования электрических машин. – Ульяновский политехн. ин-т, 1989. – С. 40 – 44.
20. Булыжев Е.М. Расчет магнитных сепараторов / Е.М. Булыжев, О.М. Ким, П.А. Вельмисов // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Саратовский госуд. ун-т, 1986. – С. 80 – 86.
21. Булыжев Е.М. Экологически безопасные технологии промышленного рециклинга техногенных отходов производства черной металлургии / Е.М. Булыжев, В.Н. Кокорин, Ю.Н. Берлет // Сборник НТК «Экологические проблемы и пути их решения в XXI веке: образование, наука, техника». СПб. госуд. ун-т, 2000. – С. 41 – 42.
22. Булыжев Е.М. Ресурсосберегающее применение технологических жидкостей в машиностроении / Е.М. Булыжев, В.Г. Ромашкин // Вестник машиностроения. – 1998. – № 2. – С. 26 – 30.
23. Булыжев Е.М. Математическая модель электромагнитного сепаратора / Е.М. Булыжев, В.Е. Сазанов, О.М. Ким // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 1. – С. 35 – 39.
24. Ваганов В.К. Проблемы микробиологического поражения СОЖ в процессе эксплуатации / В.К. Ваганов, М.А. Кузнецова, Т.А. Кошкина // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. – Волжский инж.- стр. ин-т, 2001. – С. 226 – 228.
25. Воробьев С.А. Особенности влияния нефтяных загрязнений на биоценозы и человека / С.А. Воробьев, В.В. Новиков // Экономика природопользования и природоохраны: Сборник. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2001. – С. 111 – 113.
26. Гирусов Э.В. Экология и экономика природопользования / Э.В. Гирусов, С.Н. Бобылев, А.Л. Новоселов. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 455 с.
27. Годлевский В.А. Повышение эффективности и качества обработки материалов резанием путем управления смазочным действием СОТС: Дис. докт. техн. наук: Ивановский госуд. ун-т. 1995. – 556 с.
28. Горшков Г.М. Повышение эффективности операций шлифования путем совершенствования методов и средств приготовления эмульсионных СОЖ: Дис. кан. техн. наук: Ульяновский политехн. ин-т. 1993. – 197 с.
29. ГОСТ Р 50558–93. Промышленная чистота. Жидкости смазочно-охлаждающие. Общие технические требования.
30. ГОСТ Р 50815–95. Промышленная чистота. Жидкости смазочно-охлаждающие. Требования к чистоте СОЖ на операциях круглого наружного и плоского шлифования периферией круга.
31. Гульнов Е.П. Исследование механизма взаимодействия твердых частиц, содержащихся в СОЖ, с рабочей поверхностью шлифовального круга и поверхностью шлифуемой детали: Дис. кан. техн. наук: Ульяновский политехн. ин-т. 1979. – 270 с.
32. Демидович Л.Д. Основы вычислительной математики / Л.Д. Демидович, И.А. Марон. – М.: Наука, 1972. – 664 с.
33. Джафаров А.А. Защита смазочно-охлаждающих жидкостей от биопоражения / А.А. Джафаров, К.И. Садыхов, М.А. Гаджиева // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. – Волжский инж.-стр. ин-т, 1998. – С. 190 – 191.

34. Евсеев А.Н. Система автоматизированного контроля состояния СОЖ / А.Н. Евсеев, А.Р. Гисметулин, А.Л. Семенов // Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах обработки заготовок резанием. – УлГТУ, 1996. – С. 70 – 75.
35. Ефимов В.В. Модель процесса шлифования с применением СОЖ. – Саратовский госуд. ун-т, 1992. – 132 с.
36. Ефимов В.В. Научные основы повышения технологической эффективности СОЖ на операциях шлифования: Дис. докт. техн. наук: Ульяновский политехн. ин-т. 1985. – 472 с.
37. Замятина И.Е. Принципы и перспективы применения экологических методов природопользования / И.Е. Замятина, В.А. Никольская, А.Н. Бобровников // Экономика природопользования и природоохранные мероприятия. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2001. – С. 85 – 88.
38. Зеленев Э.Н. Разработка экологической стратегии предприятия / Э.Н. Зеленев, Е.А. Резчиков // Производство. Технология. Экология. ПРОТЭК-2001: Труды международной научно-практической конференции. Т. I. – МГТУ «Станкин», 2001. – С. 188 – 191.
39. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 432 с.
40. Ибраев И.К. Обезвоживание конверторных шламов отходами известкового производства / И.К. Ибраев, С.Н. Клушин // Труды III конгресса сталеплавыльщиков. – М.: Металлургия, 1995. – С. 56 – 60.
41. Исследование влияния параметров состояния СОЖ на физические и технологические показатели процесса шлифования / Е.М. Булыжев, В.Н. Агафонов, М.А. Белов, В.С. Шабалин // Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах обработки заготовок резанием. УлГТУ, 1996. – С. 39 – 43.
42. Карев Е.А. Шлифование с применением СОЖ, водная фаза которых получена при разложении отработанных СОЖ // Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах обработки резанием. УлГТУ, 1996. – С. 51 – 55.
43. Карев Е.А. Пути повышения эффективности регенерации и утилизации отработанных СОЖ при абразивно-алмазной обработке заготовок / Е.А. Карев, А.П. Куликов, В.Ю. Кочетков // Совершенствование процессов абразивно-алмазной обработки и упрочняющей обработки в машиностроении. Пермский ГТУ, 1998. – С. 107 – 115.
44. Карев Е.А. Исследование возможности использования продуктов, полученных после разложения отработанных СОЖ, в замкнутом цикле на операциях круглого наружного шлифования / Е.А. Карев, А.Г. Михайлов, И.Н. Тулисов // Производство. Технология. Экология. ПРОТЭК-2001: МГТУ «Станкин», 2000. – С. 171.
45. Качан В.И. Повышение устойчивости смазочно-охлаждающих жидкостей к микробному поражению // Станки и инструмент. – 1987. – № 6. – С. 95 – 96.
46. Качан В.И. Влияние внешних факторов на процесс разрушения водосмешиваемых СОЖ / В.И. Качан, Ю.С. Дубровский, Г.Н. Чугай // Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах обработки резанием. – Ульяновский политехн. ин-т, 1990. – С. 69 – 75.
47. Качан В.И. Роль сульфатредуцирующих бактерий в биоповреждениях СОТС / В.И. Качан, В.В. Степанюк, Е.В. Литвин // Смазочно-охлаждающие средства для механической обработки металлов. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1988. – С. 171 – 180.
48. Киселев Е.С. Повышение эффективности правки кругов и шлифования заготовок путем рационального применения смазочно-охлаждающих жидкостей: Дис. докт. техн. наук: Ульяновский политехн. ин-т. 1997. – 500 с.
49. Клауч Д.Н. Повышение экологической безопасности путем применения новых рациональных составов СОТС при обработке металлов / Д.Н. Клауч, М.Е. Кушева // Производство. Технология. Экология. ПРОТЭК-2001. МГТУ «Станкин», 2000. – С. 171.

50. Клауч Д.Н. Применение новых конструкций режущего инструмента и смазочно-охлаждающих сред в энергомашиностроении / Д.Н. Клауч, М.Е. Куцева. – М.: Энергомашиностроение, 1986. – 124 с.
51. Клушин М.И. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.
52. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР. – 1941. – Том XXXI. – № 2. – С. 99 – 101.
53. Коробочка А.Н. Очистка технологических сред при обработке металлов резанием / А.Н. Коробочка, А.М. Тихонцов, Е.А. Брылев. – Воронежский госуд. ун-т, 1992. – 127 с.
54. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч. 1. Состояние рабочей поверхности инструмента. / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: СГУ, 1987. – 161 с.
55. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч. 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: СГУ, 1989. – 161 с.
56. Костюк В.И. Очистка сточных вод машиностроительных предприятий / В.И. Костюк, Г.С. Карнаух. – Киев: Техника, 1990. – 120 с.
57. Котляров Г.Г. Влияние эффективности очистки СОЖ на обработку металлов резанием / Г.Г. Котляров, В.Е. Зайцев // Вестник машиностроения. – 1974. – № 8. – С. 70 – 71.
58. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.
59. Латышев В.Н. Повышение эффективности СОЖ. – М.: Машиностроение, 1985. – 64 с.
60. Магнитные сепараторы для очистки смазочно-охлаждающих жидкостей. Проспект фирмы «Montanus» // Выставка «Металлообработка-84». Москва, 1984. – 8 с.
61. Мазур И.И. Инженерная экология. / И.И. Мазур, О.И. Молдаванов, В.Н. Шишов // Т. 1, 2. – М.: Высшая школа, 1996.
62. Математическое моделирование и исследование технологии и техники применения смазочно-охлаждающих жидкостей в машиностроении и металлургии / Е.М. Булыжев, А.Ю. Богданов, В.В. Богданов, П.А. Вельмисов, П.К. Маценко. Под общ. ред. Е.М. Булыжева. – УлГТУ, 2001. – 126 с.
63. Методика экономической оценки эффективности технологических процессов на основе единых критериев / Л.В. Худобин, Г.Р. Муслина, Е.М. Булыжев, М.А. Белов // Вестник машиностроения. – 1995. – № 6. – С. 42 – 45.
64. Митрофанов М.В. Принципы создания энерго- и ресурсосберегающих технологий / М.В. Митрофанов, В.П. Щукин // Материалы и технология XXI века. Ч. III. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2001. – С. 136 – 138.
65. Морозова Л.П. Влияние «инородного» масла на свойства эмульсионных СОЖ / Л.П. Морозова, А.К. Маскаев, Е.В. Лебедев // Химия и технология топлива и масел. – 1978. – № 9. – С. 30 – 32.
66. Оборудование для очистки и приготовления СОЖ. – Курган: КЭКТИ, 1981. – 72 с.
67. Оборудование для эксплуатации смазочно-охлаждающих жидкостей: Альбом-каталог типовых проектов 160.312.71-87. – Горький: ВНИИТСМ, 1987. – 53 с.
68. Обшивалкин М.Ю. Повышение эффективности систем очистки СОЖ технологических линий механической обработки заготовок на основе применения системы универсальных технологических критериев: Дис. кан. техн. наук: Ульяновский политех. ин-т. 1996. – 100 с.

69. Определение экономической эффективности от внедрения новых смазочно-охлаждающих жидкостей для обработки резанием: Межотраслевые методические рекомендации. – М.: Миннефтехимпром СССР, 1989. – 34 с.
70. Повышение эффективности шлифовальных операций путем совершенствования техники применения СОЖ. Методические рекомендации / Под ред. Л.В. Худобина. – М.: НИИМаш, 1984. – 76 с.
71. Полянский Ю.В. Индивидуальные, групповые и централизованные системы очистки и стабилизации свойств СОЖ для операций абразивно-алмазной обработки // Теория трения, смазки и обрабатываемости металлов. – Чебоксары: Чувашский госуд. ун-т, 1980. – № 6. – С. 11 – 20.
72. Полянский Ю.В. Основы выбора и построения систем очистки СОЖ при абразивно-алмазной обработке // Вестник машиностроения. – 1981. – № 2. – С. 64 – 68.
73. Полянский Ю.В. Повышение эффективности операций шлифования путем стабилизации свойств СОЖ: Дис. док. техн. наук: Ульяновский политех. ин-т. 1982. – 419 с.
74. Полянский Ю.В. Пути повышения эффективности процессов сепарации СОЖ при шлифовании / Ю.В. Полянский, Е.М. Булыжев, Е.А. Карев // Вестник машиностроения. – 1975. – № 10. – С. 69 – 72.
75. Полянский Ю.В. Диагностика и управление надежностью смазочно-охлаждающих жидкостей на операциях механообработки / Ю.В. Полянский, А.Н. Евсеев, А.Р. Гисметулин. – УлГТУ, 2000. – 230 с.
76. Полянский Ю.В. Методы оценки качества очистки СОЖ / Ю.В. Полянский, Е.А. Карев, Е.М. Булыжев // Станки и инструмент. – 1976. – № 10. – С. 30 – 32.
77. Полянский Ю.В. Влияние СОЖ на шероховатость шлифованной поверхности при шлифовании / Ю.В. Полянский, И.Л. Худобин // Вестник машиностроения. – 1979. – № 3. – С. 51 – 52.
78. Применение СОЖ при обработке резанием (опыт АвтоВАЗ им. 50-летия СССР). – М.: НИИМаш, 1975. – 87 с.
79. Равич-Щербо М.И. Физическая и коллоидная химия / М.И. Равич-Щербо, В.В. Новиков. – М.: Высшая школа, 1975. – 255 с.
80. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
81. Садыхов К.И. Смазочно-охлаждающие жидкости при алмазно-абразивной обработке металлов / К.И. Садыхов, М.А. Гольдблом, Н.С. Керимов. – Баку: ЭЛМ, 1986. – 352 с.
82. Сазанов В.Е. Стабилизация качества шлифованных деталей и производительности обработки путем очистки СОЖ в электромагнитных сепараторах с регулируемой степенью очистки / В.Е. Сазанов, Е.М. Булыжев, В.Г. Ромашкин // Повышение эффективности и качества в механосборочном производстве. Пермский госуд. ун-т, 1985. – С. 31 – 32.
83. Смазочно-охлаждающие жидкости для обработки металлов резанием. Рекомендации по применению. – М.: НИИМаш, 1979. – 95 с.
84. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под ред. С.Г. Энтелеса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
85. Современная техника и технология применения СОЖ при механической обработке заготовок / Е.А. Карев, В.Д. Бычков, Е.С. Киселев, В.Р. Берзин. – М.: ЦНИИинформации и ТЭИ, 1991. – 70 с.
86. Степанов М.С. Обеспечение качества поверхности и поверхностного слоя шлифованных деталей средствами тонкой очистки смазочно-охлаждающих технологических жидкостей от механических примесей. Дис. кан. техн. наук: Ульяновский политех. ин-т. 1988. – 291 с.

87. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания // Физические процессы при резании металлов. – Волгоградский политех. ин-т, 1984. – С. 3 – 37.
88. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, износ и разрушение инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 270 с.
89. Тихонцов А.М. Комплексные системы отбора, отделения и очистки СОЖ / А.М. Тихонцов, И.М. Баранов // Вестник машиностроения. – 1980. – № 5. – С. 60 – 64.
90. Тихонцов А.М. Системы эксплуатации водных СОЖ / А.М. Тихонцов, А.Н. Коробочка, А.Б. Пономаренко // Вестник машиностроения. – 1987. – № 1. – С. 48 – 51.
91. Тихонцов А.М. Комплексные системы транспортирования стружки и шлама и очистки СОЖ на металлорежущих станках и автоматических линиях / А.М. Тихонцов, М.П. Шмырев // Станки и инструмент. – 1979. – № 4. – С. 17 – 18.
92. Худобин Л.В. Разработка и исследование эффективности способа поэтапной подачи двух различных по составу технологических жидкостей на операциях шлифования стальных заготовок: Дис. кан. техн. наук: Ульяновский политех. ин-т. 1981. – 221 с.
93. Худобин Л.В. О сущности процесса засаливания и смазочном действии СОЖ при шлифовании // Вестник машиностроения. – 1970. – № 6. – С. 52 – 55.
94. Худобин Л.В. Пути совершенствования технологии шлифования. – Саратов: Приволжское книжное изд-во, 1969. – 213 с.
95. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. – М.: Машиностроение, 1971. 214 с.
96. Худобин Л.В. Шлифование заготовок из коррозионно-стойких сталей с применением СОЖ / Л.В. Худобин, М.А. Белов. – Саратов: СГУ, 1989. – 148 с.
97. Худобин Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский. – М.: Машиностроение, 1977. – 190 с.
98. Худобин Л.В. Эффективность магнитной обработки оборотных СОЖ при фильтровании / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев // Вестник машиностроения. – 1979. – № 11. – С. 42 – 44.
99. Худобин Л.В. Эффективность гравитационной очистки СОЖ от шлифовальных шламов при магнитной обработке / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев // Вестник машиностроения. – 1977. – № 11. – С. 60 – 63.
100. Худобин Л.В. Влияние магнитного поля на взаимодействие частиц шлифовальных шламов, содержащихся в СОЖ / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев // Теория трения смазки и обрабатываемости металлов. – Чебоксары: Чувашский госуд. ун-т, 1978. – Вып. 5. – С. 14 – 21.
101. Худобин Л.В. Исследование эффективности магнитной обработки оборотных СОЖ при их сепарации и шлифовании / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев // Обработка конструкционных материалов резанием с применением СОЖ. – М.: МДНТП, 1978. – С. 151 – 157.
102. Худобин Л.В. Ресурсосберегающее фильтрование СОЖ при механической обработке / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев, В.В. Богданов // Вестник машиностроения. – 1988. – № 7. – С. 38 – 42.
103. Худобин Л.В. Безотходное обратное ресурсосберегающее применение СОЖ в машиностроении / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев, В.Г. Ромашкин // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Волжский инж.-стр. ин-т, 1997. – С. 144 – 146.
104. Худобин Л.В. Расчет патронных цепных магнитных сепараторов численными методами / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев, В.Г. Ромашкин // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Волжский инж.-стр. ин-т, 1998. – С. 210 – 216.

105. Худобин Л.В. Технология и техника бессточного ресурсосберегающего применения технологических жидкостей / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев, В.Г. Ромашкин // «ПРОТЭК-98». МГТУ «Станкин», 1998. – С. 286 – 290.
106. Худобин Л.В. Электромагнитный сепаратор для очистки СОЖ от механических примесей / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев, В.Е. Сазанов // Вестник машиностроения. – 1984. – № 10. – С. 38 – 41.
107. Худобин Л.В. Влияние загрязнения СОЖ отходами шлифования на прижогообразование / Л.В. Худобин, Е.П. Гульнов // Вестник машиностроения. – 1978. – № 1. – С. 67 – 69.
108. Худобин Л.В. Влияние твердых примесей, содержащихся в СОЖ, на работоспособность шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, Е.П. Гульнов // Абразивы. – 1978. – № 8. – С. 5 – 7.
109. Чулок А.И. Модульный принцип построения математических процессов гибкой технологии применения СОЖ // Технологические процессы производства режущего инструмента с применением промышленных роботов и станков с ЧПУ. – М.: ВНИИинструмент, 1986. – С. 51 – 58.
110. Чулок А.И. Выбор и проектирование гибких систем эксплуатации СОЖ в автоматизированных производствах / А.И. Чулок, В.С. Лобанцова, Г.В. Березовский // Интенсификация технологических процессов механической обработки. ЛМИ, 1986. – С. 32 – 37.
111. Шаповал Б.С. СОЖ для финишной обработки металлов / Б.С. Шаповал, Ф.Ф. Гладкий. – Киев: Знание, 1990. – 16 с.
112. Эффективность органических связующих для окомковывания железных руд // Экспресс-обзор. Новейшие зарубежные достижения. – М.: Черметинформация. 1991. – Вып. 6. – С. 78 – 82.
113. Allander G.E. Ein graphisches Verfahren zur Bestimmung des mittleren Abscheidegrades gewisser mechanischer Staubabscheider // Staub. 1958. – № 1. – P. 15 – 17.
114. Camp T.R. Sedimentation and the design of settling tanks // Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs. – 1996. – Vol. 11. – P. 695.
115. Clements M.S. Velocity variations in rectangular sedimentation tanks // J. Inst. Civ. – 1999. – Vol. I. – P. 324.
116. Davisson J. F. Cutting fluids and coolants what to do with the residue // Tooling and Production. – 1995. – № 11. – P. 45 – 51.
117. Dick R.I. Gravity thickening of sewage studies // Wat. Pollut. Control. – 1992. – Vol. 71. – P. 368.
118. Escritt L.B. Sewerage and sewage disposal // Contractor Record. London, 282. – 1994. – 568 p.
119. Filtersystem // Werkstatt und Betrieb. – 1993. – 126. – № 4. – P. 4.
120. Fully automatic coolant filtration systems // American Machinist. – 1994. – 138. – № 360. – P. 84.
121. Hamlin M.J. Sedimentation studies / M.J. Hamlin, T.H.Y. Tebbutt // Surveyor. – 1990. – Vol. 135(4065). – P. 42.
122. Hamlin M.J. Settling characteristics of sewage in density currents / M.J. Hamlin, A.H.A. Wahab // Wat. Res. – 1990. – Vol. 4. – P. 609.
123. Hazen A. On sedimentation // Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs. – 1904. – Vol. 53. – P. 45.
124. Hofer K. Wie gut sind synthetische Kuhlsmicrmittel // Betriclstechnik. – 1975. – № 12. – P. 16.
125. March R.P. An investigation into the performance of a full-scale sedimentation tank / R.P. March, M.J. Hamlin // J. Proc. Inst. Sew. Purff. – 1996. – Vol. 2. – P. 118.

126. Morris F.T. Centralized coolant systems // Mass Production. – 1995. – 7. – P. 35 – 39.
127. Rhodes A.K. New lubes plants use state of the art hydrodevwaxing technology // Oil und Gas Journal. – 1997. – No 35. – P. 63 – 70.
128. Separation mitcleans oils and coolants // American Machinist. – 1995. – 139. – № 7. – P. 72.
129. Tebbutt T.H.Y. The performance of circular sedimentation tanks // Wat. Pollut. Control. – 1989. – Vol. 68. – P. 467 – 471.
130. United States Environmental Protection Agency. A mathematical model of a final clarifier. – Washington. 75. – 1992. – 254 p.
131. Wahab A.H.A. An investigation into the hydraulic characteristics of model rectangular sedimentation tanks // M. Sc. Thesis. Birmingham Univ. – 1989. – Vol. 12. – P. 542.
132. Zelinski P. Keep your coolant in circulation // Mod. Mach. Shop. – 1998. – 70. – № 12. – P. 96 – 98.

Научное издание

**БУЛЫЖЕВ Евгений Михайлович,
ХУДОБИН Леонид Викторович**

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ
СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ
ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ**

Редактор *Т.С. Грачева*

Художественный редактор *Т.Н. Погорелова*

Корректор *М.Я. Барская*

Инженер по компьютерному макетированию *О.В. Мочалина*

Лицензия ИД № 05672 от 22.08.2001

Сдано в набор 02.08.04 г. Подписано в печать 19.10.04 г.

Формат 60×88/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,56. Уч.-изд. л. 23,02.

Тираж 1000. Заказ 11175

ОАО «Издательство «Машиностроение»
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Отпечатано в ГУП ППП «Типография «Наука» РАН
121099, Москва, Шубинский пер., 6

