





ПРОФ. А. А. РАДЦИГ

**ПАР и его
СВОЙСТВА**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
СЕВЗАППРОМБЮРО В.С.Н.Х.
ЛЕНИНГРАД 1926**

А. РАДЦИГ

+2

ПАР И ЕГО СВОЙСТВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО СЕВ.-ЗАП. ПРОМБЮРО ВСНХ.
Ленинград. 1926



ТИПОГРАФИЯ
«СВЕТОЧ»
ИЗД-ВА СЕВ-ЗАП
ПРОМБЮРО ВСНХ
Б ПУШКАРСКАЯ 14
ЛЕНИНГРАД

Ленинградский Гублит № 8761
Тираж 5.500 экз. 2¹/₂ л.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Предлагаемая брошюра о парах имеет целью дать элементарные сведения о получении и свойствах водяного пара с применением этих сведений к техническим расчетам. С указанной целью сообщаем сначала необходимые понятия об измерении давления и о теплоте, а затем самые свойства паров предлагаются прямо в форме таблиц — с указанием способа пользования таблицами.

Мы не даем формул, выражающих зависимость между свойствами пара и его давлением или температурой, так как формулы эти по большей части очень сложны и пользоваться ими неудобно. Таблицы для насыщенного пара составлены по новейшим мюнхенским таблицам Кноблауха, Райша и Гаузена, иногда с сокращением числа десятичных знаков; таблицы для перегретого пара взяты из изданных мною в 1923 г. «Таблиц». Таблицы приведены только для давлений, принятых за независимую переменную, так как именно давление, определяемое помощью манометра, является основной данной во всех задачах, касающихся насыщенного пара, и таблицами, расположенными по равным интервалам температур (имеющимися во всех руководствах), практически никогда не приходится пользоваться.

В перегретых парах таблицы приходится составлять для двух независимых переменных: давления и температуры. Мы ограничиваемся поэтому только самыми необходимыми данными для перегретого пара, а именно — удельным объемом и теплосодержанием.

Изложение сопровождается расчетом многих численных примеров, которые, с одной стороны, уясняют способ пользования таблицами, а с другой стороны — знакомят с разными вопросами паротехники, излагаемыми в других выпусках настоящего издания.

В виду элементарного характера настоящего издания мы не приводим диаграммы Молье, хотя она и облегчает часто расчеты в области паров и является совершенно необходимой при изучении паровых турбин.

В литературном указателе мы ограничиваемся приведением нескольких русских сочинений, доступных без специальной подготовки.

А. Радци.

ГОС. ПУБЛИЧНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

5110 $\frac{10}{64}$

7
10
10

Г Л А В А I-я.

Основные понятия.

1. Значение паротехники.

Век наш часто называют веком пара и электричества. И действительно, только применение пара позволило создать современную промышленность, только оно дало возможность быстрого и правильного железнодорожного сообщения и морского транспорта. Крупные паровые станции вырабатывают с помощью паровых машин или турбин электрический ток и, передавая его на большие расстояния, дают нам освещение и энергию для приведения в движение станков на заводах, трамвайных вагонов и мелких установок разного рода.

Правда, в новейшее время наряду с паровыми двигателями стали в широких размерах применяться другие двигатели: гидравлические (использующие силу водных источников), нефтяные, газовые. Всякий слышал о грандиозных сооружениях Волховстроя, о его мощных турбинах, которые могут развить до 80.000 лошадиных сил и таким образом заменить работу до 2.000.000 человек (считая, что для замены одной лошадиной силы при непрерывной работе в течение целых суток нужно не менее 25 человек). Такие же сооружения проектируются и сооружаются и в других местах СССР (например — на Кавказе, на Днепровских порогах) и в других странах. Так, например, в Америке на одном Ниагарском водопаде используется до 1.500.000 л. с.

Особенно велики гидравлические устройства в горных странах с их быстро текущими с большой высоты реками, как, например, в Швейцарии, Норвегии, Южной Франции, Северной Италии.

Однако при всем значении, которое приобрели гидравлические силовые станции, установка их все же требует некоторых местных благоприятных условий: присутствия воды с большим падением или большим расходом воды. Самое-же устройство крупных гидроэлектрических установок связано с большими расходами и постройкой

очень сложных инженерных сооружений. Естественно поэтому, что даже в странах с большим применением водной силы все же паровые установки играют первостепенную роль. Так, например, в Соединенных Штатах Северной Америки общая мощность центральных станций составляла на 1 января 1924 г. 22.895.000 киловатт, из них гидравлические станции составляли только около одной трети (именно — 73.390.000 киловатт¹).

Движущая сила пара издавна привлекала к себе внимание. Уже в глубокой древности известны были приборы, основанные

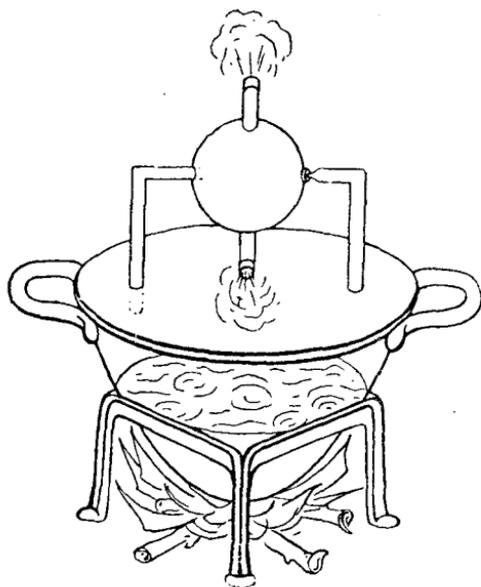


Рис. 1. Старинное изображение шара Герона.

Он представляет собой шар, помещенный на оси, с одной стороны пустой и сообщающей внутренность шара с паровым котлом. Шар снабжен открытыми трубочками, загнутыми в конце под прямым углом. Давление выходящего из этих трубочек пара, направленное в сторону, обратную выходу, приводит шар в быстрое вращательное движение.

Значительно позже, в 17-ом столетии, мы встречаем новую попытку применить движущую силу пара: итальянский ученый Бранка построил в 1624 г. колесо, приводимое в движение струей пара, вытекающей из сосуда и оказывающей давление на лопатки колеса.

Двигатели Герона и Бранка схожи по своему устройству с раз-

на давлении водяного пара. Греческий ученый Герон Александрийский, живший в первом веке нашей эры, оставил в своих книгах, дошедших до нас, описание различных приборов, основанных на действии нагретого воздуха или водяного пара. Приборы эти являлись или просто научными игрушками, или служили для религиозных церемоний (прибор для открывания двери храма помощью нагретого воздуха, получающегося при зажигании жертвенного огня).

Особенной известностью среди этих приборов пользуется так называемый вращающийся шар Герона (рис. 1).

¹) 1 киловатт равен приблизительно 1¹/₃ л. с.

личными типами современных паровых турбин. Но в свое время эти двигатели не нашли никакого практического применения и первыми паровыми двигателями, употреблявшимися для практических целей, были паровые машины.

Паровые машины были предложены первоначально для откачивания воды. Потребность в таких водоподъемных машинах особенно остро стала ощущаться в Англии в начале 18-го века, когда там увеличилась разработка каменного угля и пришлось получать его с больших глубин. При большом углублении в землю рудники заливались водою и для возможности продолжения работы приходилось принимать меры к удалению воды.

Для этой цели в начале 18-го века была предложена англичанами Сэвери и Ньюкоменом первая машина. Машина эта состояла из вертикального цилиндра, в котором двигался поршень. Под поршень впускался пар и подымал его вверх. Когда поршень находился в верхнем положении, в цилиндр впрыскивалась холодная вода, вследствие чего пар обращался в воду, в цилиндре получалось разрежение, и давление атмосферы заставляло поршень двигаться вниз, преодолевая сопротивление поднимаемой воды: это движение вниз под давлением атмосферы и было рабочим движением машины Ньюкомена, почему она и называлась атмосферной машиной. Движение поршня передавалось посредством цепей одному концу качающегося балансира; с другого конца балансира движение передавалось поршню насоса для откачивания воды.

Машина Ньюкомена давала возможность откачивать воду из рудников, но отличалась многими недостатками: она была очень громоздка, движение частей ее было слишком медленно, а главное— она расходовала слишком много пара. Введение холодной воды в цилиндр охлаждало стенки последнего, и свежий пар, входящий при следующем ходе в цилиндр, должен был прежде всего прогревать эти стенки, на что тратилось очень много пара, а следовательно и угля.

Коренные изменения были внесены в паровую машину знаменитым Уаттом во второй половине 18-го столетия. Во первых, он отделил холодильник от машины и таким образом значительно уменьшил потерю тепла на нагревание охлажденных стенок цилиндра. Вследствие этого расход пара и угля получился у него раза в 3—4 меньше чем в машинах Ньюкомена. Во вторых, он не ограничился постройкой специальной паровой машины для подъема воды (каковой являлась машина Ньюкомена), а создал тип машины с непрерывным вращательным движением, пригодной для приведения в движение всякого завода и фабрики. Изобретение именно такой машины и произвело

коренной переворот во всей промышленности, позволив производить постройку крупных фабрик в любом месте и крайне увеличив их производительность. Поэтому паровые машины начинают с чрезвычайной быстротой распространяться сначала в Англии, а потом и в других странах Европы и в Соединенных Штатах.

Первая треть 19-го века ознаменована применением пара прежде всего к судоходству, а затем и к сухопутному транспорту. В 1808 году американец Фултон произвел удачные опыты с пароходом на реке Гудзоне, и после этого новый способ приведения в движение судов быстро распространяется, так что уже в 1819 году первый американский пароход «Саванна» переплыл океан и прибыл в Англию.

В конце 20-х годов 19-го столетия появляются первые паровозы, созданные в окончательном виде Георгом Стефенсоном ¹⁾. В 1829 году открывается железная дорога Ливерпуль-Манчестер, по которой впервые в крупном масштабе применяется паровая тяга. С этого времени начинается быстрое распространение железных дорог во всем мире и этот способ транспорта вместе с паровым судоходством вносит самое коренное изменение в экономическую жизнь цивилизованных народов.

Непрерывное развитие паровых машин продолжается в течение всего 19-го века и только в конце его возникают новые и сильные конкуренты им в лице двигателей внутреннего сгорания и паровых турбин. За истекшие десятилетия двадцатого века новые двигатели сделали колоссальные успехи, но, всетаки и за паровыми машинами остались широкие области применения. Паровые же турбины за эти годы достигли громадных мощностей (до 80000 лошадиных сил в одной единице) и расширили область применения пара в силовых установках до широчайших пределов.

Кроме применения в силовых установках, пар очень часто употребляется в промышленности также для целей отопления и нагревания: во многих отраслях химической и текстильной промышленности нагревание на голом огне неудобно или вовсе неприменимо, и в настоящее время почти везде применяют нагревание паром, подводимым к нагревательным аппаратам по трубам. В нагревательных аппаратах пар отдает свою теплоту нагреваемому телу через охлаждающие поверхности, причем сам обращается в воду и вновь возвращается в котел для испарения. Аналогичным образом устраивается и паровое отопление, широко распространенное в заводских зданиях и в больших домах.

¹⁾ Первый паровоз пущен в 1825 г., поэтому в прошлом году праздновалось столетие паровоза.

В виду обширности своих приложений задача получения и использования пара является в настоящее время чрезвычайно важной. Для правильного разрешения этой задачи нужно прежде всего знакомство со свойствами водяного пара. Задача настоящей брошюры и состоит в том, чтобы дать главные сведения о паре, не касаясь самых паровых котлов, паровых двигателей и других аппаратов, потребляющих пар.

2. Теплота. Температура.

Нашу главную задачу составляет изложение свойств пара. Как всякому известно, пар получается при нагревании воды, поэтому нам нужно, прежде всего, вспомнить о теплоте и ее проявлениях.

Ощущения тепла и холода нам хорошо знакомы. Мы можем сравнивать ощущения, получаемые от разных тел и говорить, что одно из них холоднее или теплее другого, но такая непосредственная оценка зависит от случайных обстоятельств и совершенно не надежна. Можно произвести, например, такой опыт: поставим справа чашку, наполненную ледяной водой, слева — чашку с теплой водой, а по середине чашку с водой при комнатной температуре. Опустим правую руку в холодную воду, а левую — в теплую и спустя несколько времени — обе руки в среднюю чашку. Хотя обе руки будут находиться в одной и той же жидкости, наша правая рука почувствует воду теплой, а левая, наоборот, холодной.

Таким образом мы видим, что наша оценка зависит от предыдущих наших состояний. Чем ниже была температура, в которой мы находились до оценки, тем выше мы оцениваем позднейшую температуру. На нашу оценку температуры могут влиять также и болезненные состояния нашего тела. В виду этой ненадежности в непосредственной оценке температуры тел по ощущениям, нужно было устроить такой инструмент, который показывал бы сравнительное тепловое состояние тел независимо от нашего ощущения. Для этого пользуются теми действиями, которые теплота вызывает в телах. Особенно удобным для этой цели является расширение, вызываемое в телах нагреванием. В обыкновенных термометрах, применяемых в практической жизни и в технике, расширяющимся телом является обыкновенно ртуть.

Термометр состоит из стеклянной трубки с резервуаром, внизу наполненным ртутью, которая наполняет и часть трубки. Над ртутью (до верхнего запаянного конца ее) находится безвоздушное пространство. Эту трубку погружают в аппарат с кипящей водой, а затем — в сосуд с истолченным нетающим льдом. В обоих слу-

чаях замечают положение, занимаемое столбиком ртути. Таким образом получается полное расширение ртути, соответствующее нагреванию ее от состояния тающего льда до состояния кипящей воды. Часть трубочки, заключенную между указанными черточками, делят на сто равных частей, которые тоже отмечают черточками. Эти части называются градусами. Затем эти деления продолжают вверх и вниз от точки «ноль» и «сто». Мы говорили о делении указанного промежутка на сто частей, так как в настоящее время принято это деление. Такие термометры со стоградусным делением предложены были шведским ученым Цельсием еще в 1742 г.; поэтому такие термометры называются термометрами Цельсия.

Кроме них употреблялись до недавнего времени термометры Реомюра (с делением на 80° интервала между теми же основными точками), но в настоящее время они выходят из употребления¹⁾. Наконец, в Англии и Америке применяются еще особые термометры Фаренгейта, о которых мы не будем говорить, так как они не имеют в СССР значения.

Имея термометр, можно уже безошибочно сравнивать тепловое состояние тел. Для этого нужно только привести термометр в тесное соприкосновение с тем телом, тепловое состояние которого измеряется, и подождать, пока тепловое состояние тела и термометра уравниются. Тогда говорят, что тело и термометр имеют одинаковую температуру, которую определяют по тому делению, на котором в то время находился столбик ртути.

3. Количество тепла. Калория. Теплоемкость.

Пусть имеем какую-либо горелку, спиртовую или газовую, которая может долгое время гореть равномерно и следовательно выделять в каждую минуту одинаковое количество тепла.

Будем нагревать на этой горелке сосуд, в котором помещен один килограмм воды, взятой первоначально при ноле градусов. Во время нагревания воды будем ее постоянно перемешивать, чтобы температура ее по всей массе была одна и та же. Наблюдая за повышением температуры, увидим, что в равные промежутки времени температура повышается на один градус. Это количество тепла, необходимое для нагревания воды на один градус, приняли за единицу теплоты и назвали калорией. Если бы имели в нашем сосуде 2 килограмма воды, то при той же самой горелке

¹⁾ Согласно новому закону стал обязательным стоградусный термометр.

нагревание воды происходило бы вдвое медленнее; очевидно, что для нагревания двух килограммов воды нужно вдвое больше теплоты чем для нагревания одного килограмма. Точно также для нагревания воды на 2 градуса нужно вдвое больше тепла, чем для нагревания на один градус. Таким образом мы видим, что количество тепла для нагревания воды тем больше, чем больше взято воды и чем выше температура, до которой нагревается вода.

Попробуем теперь нагревать на той же горелке какую-либо другую жидкость, например, скипидар. Мы увидим, что здесь температура повышается гораздо быстрее. Отсюда мы видим, что для нагревания одного килограмма скипидара на один градус нужно гораздо меньше тепла, чем для нагревания одного килограмма воды. Точный опыт показывает, что для нагревания одного килограмма скипидара на один градус нужно только 0,4 калории. Тогда говорят, что теплоемкость или удельная теплота скипидара равна 0,4. Такие же наблюдения делаются и с другими жидкостями и с твердыми телами. Оказывается, например, что для нагревания одного килограмма ртути на один градус нужно только 0,033 калории, т. е. что ее теплоемкость равна 0,033. Для железа нашли теплоемкость равную 0,114, для меди — 0,095 и т. д. Зная теплоемкость тела, можно решать различные задачи о нагревании его.

Приведем два примера:

Пример 1-й. Сколько нужно тепла для нагревания 0,25 килограмма ртути от 15° до 80° ?

Ищем, на сколько градусов происходит нагревание в поставленной задаче; для нахождения числа градусов, на которые происходит нагревание, нужно, очевидно, вычесть 15 из 80 : $80 - 15 = 65$.

Так как теплоемкость ртути равна 0,033, то искомое количество тепла будет равно $0,033 \cdot 0,25 \cdot 65 = 0,536$ калорий.

Пример 2-ой. На сколько изменится температура двух килограммов воды, нагретых до 60 градусов, если в эту воду положить кусок свинца, весом в 1,5 килограмма, нагретый до 150 градусов. Теплоемкость свинца равна 0,031.

Эту задачу удобнее всего решить при помощи очень просто составляемого уравнения. Назовем X окончательную общую температуру свинца и воды. Тогда температура воды повысится на $X - 60$ градусов; вес воды — 2 килограмма, значит необходимая затрата $2(X - 60)$ калорий. Это количество тепла должно быть отнято у свинца; температура последнего

понижилась на $(150 - X)$ градусов. Количество потерянной им теплоты выражается так:

$$(150 - X) \cdot 0,031 \cdot 1,5 \text{ калорий.}$$

Приравнявая полученные количества тепла друг другу, получим уравнение

$$2(X - 60) = (150 - X) 0,031 \cdot 150.$$

Уравнение это очень легко решается: раскрываем скобки в левой и правой части его, предварительно исполнив умножение в правой части:

$$2X - 120 = 697,5 - 4,65X$$

или, перенося члены, содержащие X в одну часть равенства, а числа — в другую, получим окончательно

$$6,65X = 817,5$$

отсюда

$$X = \frac{817,5}{6,65} = 121,5 \text{ градуса.}$$

4. Давление.

Кроме повышения температуры, другим важным явлением при нагревании воды в закрытом сосуде, является повышение давления.

Это повышение давления может сделаться вскоре опасным, поэтому необходимо познакомиться со способами наблюдения и измерения давлений.

Давление воздуха было обнаружено впервые в Италии в XVII веке при устройстве всасывающего насоса для поднятия воды на большую высоту. В этом насосе поршень (рис. 2), двигаясь в цилиндре, увлекает за собою воду, следующую за поршнем.

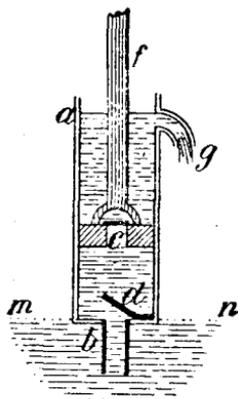


Рис. 2. Всасывающий насос.

Мы знаем, что вода следует за поршнем, вследствие давления наружного воздуха на свободную поверхность воды в колодце ¹⁾. Но в те времена этого не знали и приписывали заполнение водою пространства под поршнем «боязни пустоты»; говорили, что «природа боится пустоты».

(В самом деле, если бы вода не следовала за поршнем, то между поршнем и водой должно было бы образоваться пустое, ничем не заполненное пространство).

¹⁾ См. Лебедев. Физика и химия котельной. ЛНГ. Из-во Севзаппромбюро, серия «На рабочем ходу».

При устройстве насоса для подъема воды с большой глубины оказалось, что вода не подымается выше 10 с небольшим метров (точно — 10,33 метра). Очевидно, что это объяснение движения воды «боязнь пустоты» не годилось. Итальянский ученый Торричелли первый объяснил эту ограниченную высоту подъема давлением воздуха: это давление как раз достаточно для того, чтобы поддержать столб воды высотой в 10,33 метра, но не более. Правильность своего объяснения он доказал опытом с ртутью: последняя в 13,6 раз тяжелее воздуха, и следовательно, давление воздуха, поддерживающее столб воды высотой в 10,33 метра, может поддержать столб ртути, высоту в 13,6 раз меньший, т. е. равный $\frac{10,33}{13,6} = 0,76$ метра или в 760 миллиметров.

Опыт действительно вполне подтверждает это заключение. Для производства опыта берут стеклянную трубку в 10—20 миллиметров диаметром с одним концом запаянным, а другим — открытым. Наполнив эту трубку ртутью и закрыв отверстие пальцем, ее поворачивают отверстием вниз и опускают в чашку с ртутью. Поставив трубку вертикально, отнимают палец, после чего ртуть тотчас же опускается в ней до высоты приблизительно в 760 миллиметров (рис. 3).

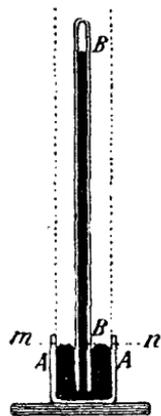


Рис. 3. Опыт со ртутью.

Эта высота поднятия не зависит ни от диаметра трубки, ни от ее длины, а исключительно от высоты места, в котором производится наблюдение, над уровнем моря, а также от состояния погоды. Пустое пространство над ртутью называется Торричеллевой пустотой, а самый прибор, если его снабдить делениями, называется барометром. Изменения высоты ртути в нем (предполагая, что барометр находится в одном и том же месте) зависят от изменения давления воздуха в этом месте.

За нормальное атмосферное давление (одну физическую атмосферу) принимают то давление, которое может поддерживать столб ртути высотой в 760 миллиметров.

Посмотрим, как велико это давление нормальной атмосферы на какую-либо единицу площади: квадратный сантиметр, квадратный метр.

Возьмем нашу барометрическую трубочку с площадью основания, равной одному квадратному сантиметру. Тогда давление атмосферы на эту площадь поддерживает столб ртути с основанием в один квадратный сантиметр, высотой в 760 миллиметров или в 76 сантиметров. Объем такого столба будет, очевидно, равен 76 кубическим

сантиметрам, а вес получится через умножение этого объема на вес одного кубического сантиметра ртути. Один кубический сантиметр воды весит один грамм; ртуть же плотнее воды в 13,6 раза, то есть один кубический сантиметр ртути весит 13,6 грамма. Наш столбик ртути с объемом в 76 кубических сантиметров, будет следовательно весить: $13,596.76=1033$ грамма, или 1,033 килограмма.

Итак, нормальное давление атмосферы на один квадратный сантиметр равно 1,033 килограмма. Так как один квадратный метр больше одного квадратного сантиметра в 10.000 раз, то давление нормальной атмосферы на один квадратный метр равно 10.330 килограмм. Мы видим, что нормальное атмосферное давление очень близко к одному килограмму на квадратный сантиметр. Поэтому в новейшее время часто принимают за единицу давления именно давление в один килограмм на квадратный сантиметр и называют его «новой» или «метрической» атмосферой.

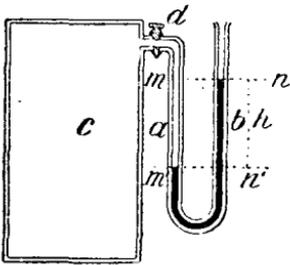


Рис. 4. Ртутный манометр.

Не трудно найти, какой барометрической высоте соответствует давление в один килограмм на квадратный сантиметр:

1 физическая атмосфера = 1,033 *кг* на один кв. *см.* соответствует 760 *мм* ртутного столба.

Значит 1 килограмм на квадратный сантиметр будет соответствовать высоте в 1,033 меньшей, т. е. высоте в $\frac{760}{1,033} = 735,5$ миллиметра. В дальнейшем мы будем обозначать давление так: *кг/см² N*; например: 8 *кг/см²* обозначает давление в 8 килограммов на один квадратный сантиметр.

5. Приборы для измерения давления. Манометры.

Как мы видели, барометрическая трубка показывает давление воздуха: оно тем больше, чем больше высота поднятия ртути в трубочке:

Всякое давление могло бы быть измеряемо помощью трубок, наполненных жидкостью (ртутью или даже водой—при малых давлениях). Проще всего было бы применять так называемый открытый ртутный манометр (рис. 4).

Он представляет собою просто U-образную трубку, наполненную ртутью. Один конец этой трубки (именно *a*) сообщается с тем пространством, в котором хотят измерить давление, а другой конец (*b*)—с наружным воздухом. Если давление в колене *a* (которое мы измеряем) равно

давлению атмосферы, то ртуть в обоих коленах стоит на одной высоте, если же давление в колене *a* больше атмосферного, то ртуть в колене *b* будет стоять выше, чем в колене *a* (соединенном с *a*).

Эту разницу высот ртути в обоих коленах можно измерить и по ней найти разность между давлением в сосуде, соединенном с коленом *a*, и атмосферным. Пусть, положим, эта разность высот равна 40 сантиметрам, а барометрическое давление равно 74 сантиметрам. Тогда следовательно давление в колене *a* таково, что уравнивает давление столба ртути в 40 сантиметров и внешнее давление атмосферы, соответствующее высоте ртутного столба в 74 сантиметра, то есть это давление соответствует столбу ртути $74 + 40 = 114$ сантиметров.

Такие открытые манометры (со ртутью или даже водой) применяются с удобством для измерения малых давлений. При помощи такого водяного манометра меряется, например, разрежение, имеющееся в топке парового котла и вызывающее тягу воздуха. Применять же их для больших давлений (которые как раз и получаются в парах) было бы крайне неудобно и в этом случае применяются обыкновенно металлические манометры с пластинкой или согнутой овальной трубкой.

Манометр с пластинкой (Шеффера) изображен на рис. 5.

Пластинка эта зажата между флянцами и пар давит на нее снизу. Под действием этого давления пластинка выпрямляется и это движение пластинки передается помощью рычагов стрелке, которая перемещается по шкале с делениями. Еще более распространены манометры с согнутой овальной трубкой (изобретенные французским инженером Бурдоном). В этих манометрах главную часть составляет трубка овального сечения, согнутая в виде круга (рис. 6) и соединенная в конце с рычажной передачей и стрелкой. Внутренность трубки соединяется с паровым пространством. При повышении в последнем давления овальная, трубка стремится приблизиться по форме к кругу, вследствие чего трубка укорачивается и вызывает движение рычагов и стрелки.

Деления на манометрах наносятся или в физических атмосферах, или в новейшее время чаще в килограммах на квадратный сантиметр. Раньше применялись и другие деления, например, в английских или русских фунтах на квадратные дюймы, но при

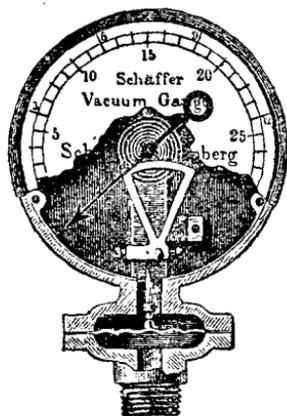


Рис. 5. Манометр Ш.ф.фера.

происходящем в настоящее время в С. С. С. Р. переходе на метрические меры все такие давления теряют свое значение и должны быть заменены (согласно правилам, изданным 11 марта 1925 г.) делениями, соответствующими килограммам на квадратный сантиметр.

При открытом котле давление в нем (как и в наполняющем его воздухе) равно одной атмосфере, между тем стрелка манометра показывает тогда цифру ноль, и только если закрыть котел и начать испарять пар, давление в котле превысит атмосферное и стрелка манометра придет в движение.

Таким образом, манометр показывает собственно разность между давлением внутри сосуда и давлением атмосферы. Чтобы из этой величины давления (так называемого манометрического давления) получить полное (или как его называют — абсолютное) давление, нужно прибавить к нему одну атмосферу. Когда мы будем говорить в дальнейшем об абсолютном давлении, то будем прибавлять к обозначению давления слово абс. Например, 9 кг/см^2 абс. Заметим в заключение, что во многих случаях приходится измерять давления меньше атмосферного. Так, например,

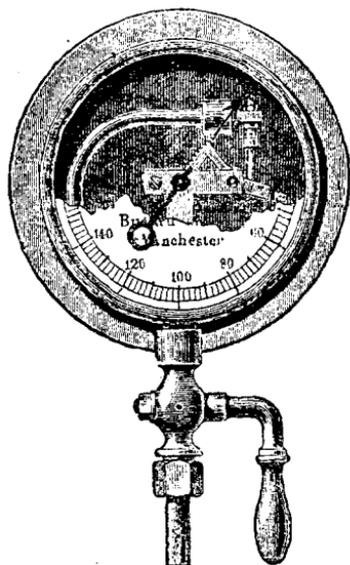


Рис. 6. Манометр Бурдона.

приходится измерять давление, имеющееся в конденсаторе, в котором пар превращается в воду вследствие охлаждения холодной водой. Давление в таком конденсаторе ниже атмосферного и для измерения его применяют аппараты, схожие с манометрами, но называемые вакуумметрами (от слова «вакуум» — пустота, разрежение вакуумметр — «измеритель разрежения»).

Деления на них наносятся или в миллиметрах ртутного столба, или в долях килограмма на квадратный сантиметр. Зная барометрическое давление, можно по данному разрежению найти абсолютное давление в исследуемом аппарате. Пусть, например, дано, что разрежение в конденсаторе равно 652 миллиметрам ртутного столба при давлении атмосферы равном 711 миллиметрам ¹⁾. Абсолютное дав-

¹⁾ Это малое давление получилось от того, что в рассматриваемом случае конденсатор находится высоко над уровнем моря: на высоте давление воздуха меньше, чем внизу; по разности давлений внизу и вверх горы, можно даже судить о ее высоте.

ление в холодильнике будет, следовательно, равно $711 - 652 = 59$ миллиметров ртутного столба, или, вспоминая, что давление одного киллограмма на квадратный сантиметр — соответствует давлению $735,5$ миллиметров ртутного столба, получаем: $\frac{59}{735,5} = 0,08$ килограмма на квадратный сантиметр. Если выразить это давление в процентах одной атмосферы, то получим $0,08 \cdot \frac{100}{1,033} = 7,7$ процента.

Разряжение же в процентах нормального атмосферного давления будет равно $100\% - 7,7\% = 92,3\%$.

ГЛАВА II.

Насыщенный водяной пар.

6. Испарение и кипение.

Большинство жидкостей медленно испаряются с поверхности при всякой температуре. К числу их принадлежит и вода, которая начинает испаряться уже при 0° , а при более высоких температурах испаряется все быстрее и быстрее. Если производить нагревание воды при нормальном атмосферном давлении (760 миллиметров ртутного столба), то когда вода достигнет температуры 100 градусов Цельсия, внутри жидкости появляются пузырьки пара, вода начинает кипеть. Говорят, что точка кипения воды при нормальном атмосферном давлении есть 100 градусов Цельсия.

Если давление на жидкость будет меняться, то и точка кипения ее меняется. Так, например, на высоких горах, где давление воздуха будет значительно меньше, чем на уровне моря, кипение происходит при значительно более низкой температуре; так, например, если бы давление было равно 700 миллиметрам ртутного столба, то кипение воды происходило бы при $97,7$ градуса Цельсия.

Это понижение температуры кипения при понижении давления может представить иногда неудобство, так как нельзя получить в открытом сосуде температуры, достаточной для варки мяса или других практических целей. С другой стороны, этим понижением давления пользуются, чтобы производить кипячение жидкостей при более низких температурах. Это делают, например, в сахарной промышленности: сахарный сок портится, если его испаряют для получения сахара при высоких температурах. Поэтому испарение производят в наглухо закрытых сосудах с разреженным воздухом (вакуум-аппаратах). Низкое разрежение производится помощью воздушного насоса. Гораздо чаще, однако, приходится иметь дело

с кипением при повышенном давлении. Паровые котлы и представляют собою приборы, в которых пар получается при высоком давлении. При этом температура кипения заметно повышается с повышением давления.

Эта зависимость температуры кипения от температуры давления очень точно изучалась учеными, так как она имеет очень большое практическое значение. В таблице 1-ой (на стр. 24) мы приводим новейшие данные для этой зависимости, при чем давление (абсолютное) выражаем, как теперь это принято, в килограммах на

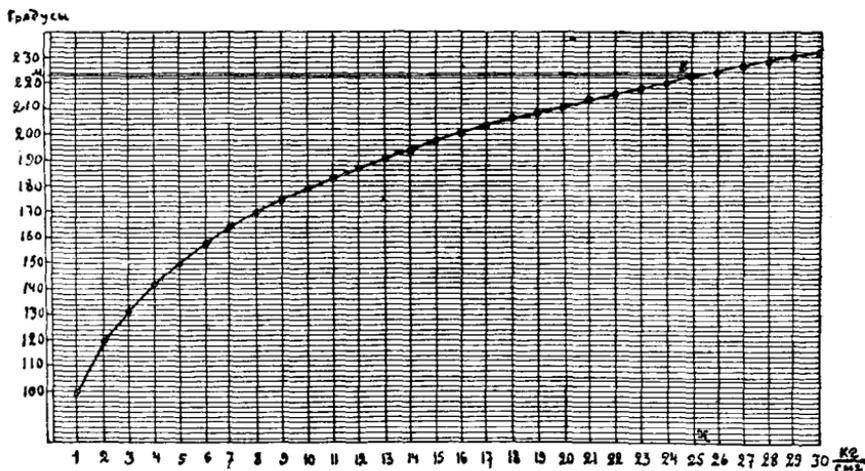


Рис. 7. Диаграмма зависимости температуры от давления.

квадратный сантиметр. В таблице этой даны температуры для давлений как ниже атмосферного, так и выше атмосферного. При этом таблица доведена до давления в 40 килограммов на квадратный сантиметр, так как, примерно, этого давления (или немного выше) достигают в современных котлах. Впрочем, такие высокие давления являются и в настоящее время исключением. В С. С. С. Р. такие станции только проектируются или начинаются постройкой. В имеющихся станциях, даже самых крупных, давление обыкновенно значительно ниже и не превосходит 15—16 килограммов на квадратный сантиметр. В мелких установках оно еще значительно ниже: 7—8 килограммов на квадратный сантиметр.

Зависимость между давлением и температурой, можно, как и всякую другую зависимость, изобразить графически с помощью диаграммы. Это и сделано на рис. 7.

Здесь по одной оси (вертикальной) откладываются в известном масштабе температуры (начиная со 100 градусов), причем длина одного квадратика (миллиметра) принята равной 2 градусам. По другой оси (горизонтальной) отложены давления, при чем это построение

делается для давлений, начиная с одного килограмма на квадратный сантиметр, и длина 5 квадратиков взята за 1 килограмм на квадратный сантиметр. Кривая эта построена до 30 килограммов на квадратный сантиметр. Пользуясь этой кривой, легко найти температуру, соответствующую данному давлению и обратно.

Пусть, например, требуется найти температуру пара, соответствующую давлению в 25 атмосфер. Ищем по оси давлений точку K , соответствующую давлению в 25 килограммов на квадратный сантиметр. Для этого нужно, очевидно, взять длину $DK = 25 \cdot 5 = 125$ квадратам (т. е. 125 мм). Через точку K нужно провести вертикальную прямую KL , пересекающую нашу кривую давлений в точке L . Теперь остается отыскать температуру, соответствующую точке L ; для этого надо провести горизонтальную линию через точку L и найти ее пересечение M с осью температур. Длина OM соответствует температуре в 223 градуса¹⁾.

Нахождение температуры по данному давлению из таблицы 1-й делается тоже просто. Если данное давление имеется в таблице, то следует прямо взять температуру из таблицы. Так, например, при давлении в 14,5 килограммов на квадратный сантиметр получается температура пара, равная 195,8 градуса. Если же данного давления нет в таблице (так как оно содержится между двумя давлениями, имеющимися в таблице), то искомую температуру можно проще всего, найти по температурам, соответствующим соседним давлениям, как это видно будет из следующего примера.

Пример. Найти температуру, соответствующую давлению в 10 килограмма на квадратный сантиметр.

В таблице находим:

| | | | |
|----------------------------------|---------------|-------|----------|
| давлению в 10 килгр на кв. сант. | соответствует | 179 | градусов |
| » » 10,5 » » » » » | | 181,2 | » |

Таким образом приращению давления в 0,5 килограмма на квадратный сантиметр соответствует приращение температуры в 2,2 градуса. Очевидно, что приращению давления на 0,1 килограмм на квадратный сантиметр соответствует приращение температуры в $\frac{2,2}{5} = 0,4$ градуса.

Температура при давлении в 10,2 килограмма на квадратный сантиметр будет равна температуре при давлении в 10 кило-

¹⁾ Кривая наша построена, начиная с температуры в 100 градусов, соответствующей, приблизительно, давлению в 1 кг/см² абс. Для давлений меньших одного кг/см² нужно было бы построить температурную кривую в большем масштабе давлений и температур.

граммов на квадратный сантиметр, сложенной с увеличением, соответствующим увеличению давления на 0,2 килограмма на квадратный сантиметр. На основании вышеприведенных цифр получим, что к температуре при давлении в 10 килограммов на квадратный сантиметр, т. е. к 179 градусам, нужно прибавить 0,4, умноженное на 2, т. е. 0,8 градуса. Искомая температура поэтому будет 179,8 градуса.

Это нахождение какой-либо величины, не имеющейся в таблицах, по соседним с ней величинам, называется интерполированием. К нему приходится часто прибегать при технических расчетах.

Рассматривая нашу таблицу, или кривую, мы видим, что возрастание температуры с повышением давления, сначала быстрое, затем идет все медленней и медленней. Так, при увеличении давления от одного килограмма до двух килограммов на квадратный сантиметр температура возрастает на 20,5 градуса, при возрастании с 5 килограммов до 6 килограммов—уже только на 7 градусов; с 10 до 11—на 4,2 градуса, с 19 до 20—на 2,6; с 29 до 30—на 1,9. Это замедление в повышении температуры продолжается и при более высоких давлениях (которых мы не помещаем в таблице). Так при возрастании давления с 55 килограммов на квадратный сантиметр до 60 килограммов на квадратный сантиметр (т. е. на 5 килограммов) температура возрастает только на 5,6 градуса. Самая высокая температура, при которой вода еще может оставаться в жидком состоянии (так называемая «критическая температура воды») будет равна 374 градусам; при этом давление должно быть равно 224 килограмма на квадратный сантиметр. Таким образом мы видим, что для того, чтобы сильно увеличить температуру пара, приходится чрезмерно повышать давление пара, что вызывает большие трудности.

Поэтому если нужен пар очень высокой температуры (например, на некоторых химических заводах), то удобнее применять не насыщенный пар, а перегретый, о котором мы будем говорить позже. В нашей таблице 1-й за основную данную принято давление; таблица расположена по кратным величинам давлений и для каждого давления дана соответствующая температура. Можно было бы сделать наоборот: принять за основную данную температуру и расположить таблицы по интервалам температур, давая для каждой температуры соответствующее давление. Такие таблицы имеются в подробных руководствах¹⁾, но мы не приводим их здесь, так как практически, обыкновенно, задается давление (измеряемое манометром) и по нему приходится отыскивать температуру, а не наоборот.

¹⁾ См. например, А. А. Радциг. Таблицы и диаграммы для водяного пара. Госиздат. 1923 г.

Т А Б Л И Ц А 1-ая

Давление, температура, плотность и удельный объем насыщенного пара.

| Давление в $\frac{\text{кг.}}{\text{см.}^2}$ абс. | Темпе- ратура в градусах Цельсия. | Плот- ность в $\frac{\text{кг.}}{\text{кб. мет.}}$ | Удель- ный объем в $\frac{\text{кб. мет.}}{\text{кг.}}$ | Давле- ние в $\frac{\text{кг.}}{\text{см.}^2}$ абс. | Темпера- тура в градусах Цельсия. | Плот- ность в $\frac{\text{кг.}}{\text{кб. мет.}}$ | Удель- ный объем в $\frac{\text{кб. мет.}}{\text{кг.}}$ |
|--|--|--|---|---|--|--|---|
| 0,02 | 17,19 | 0,0146 | 68,298 | 8,0 | 169,59 | 4,085 | 0,245 |
| 0,04 | 28,63 | 0,0282 | 35,473 | 8,5 | 172,12 | 4,327 | 0,231 |
| 0,06 | 35,82 | 0,0413 | 24,200 | 9,0 | 174,52 | 4,569 | 0,219 |
| 0,08 | 41,16 | 0,0542 | 18,455 | 9,5 | 176,82 | 4,810 | 0,208 |
| 0,10 | 45,44 | 0,0669 | 14,958 | 10,0 | 179,03 | 5,051 | 0,198 |
| 0,15 | 53,59 | 0,0979 | 10,217 | 10,5 | 181,16 | 5,291 | 0,189 |
| 0,20 | 59,66 | 0,1282 | 7,798 | 11,0 | 183,20 | 5,532 | 0,181 |
| 0,25 | 64,56 | 0,1581 | 6,325 | 11,5 | 185,18 | 5,772 | 0,173 |
| 0,30 | 68,68 | 0,1876 | 5,331 | 12,0 | 187,08 | 6,011 | 0,166 |
| 0,35 | 72,26 | 0,2167 | 4,614 | 12,5 | 188,93 | 6,251 | 0,160 |
| 0,40 | 75,42 | 0,2456 | 4,071 | 13,0 | 190,71 | 6,491 | 0,154 |
| 0,45 | 78,27 | 0,2743 | 3,645 | 13,5 | 192,45 | 6,731 | 0,148 |
| 0,5 | 80,87 | 0,3027 | 3,303 | 14,0 | 194,14 | 6,972 | 0,143 |
| 0,6 | 85,45 | 0,3591 | 2,785 | 14,5 | 195,77 | 7,211 | 0,139 |
| 0,7 | 89,45 | 0,4149 | 2,410 | 15,0 | 197,37 | 7,451 | 0,134 |
| 0,8 | 92,99 | 0,4701 | 2,127 | 16,0 | 200,44 | 7,931 | 0,126 |
| 0,9 | 96,17 | 0,5249 | 1,905 | 17,0 | 203,36 | 8,410 | 0,119 |
| 1,0 | 99,08 | 0,5793 | 1,726 | 18,0 | 206,15 | 8,892 | 0,112 |
| 1,2 | 104,24 | 0,6871 | 1,455 | 19,0 | 208,82 | 9,372 | 0,107 |
| 1,4 | 108,73 | 0,7937 | 1,260 | 20,0 | 211,39 | 9,852 | 0,101 |
| 1,6 | 112,72 | 0,8994 | 1,112 | 21,0 | 213,85 | 10,336 | 0,097 |
| 1,8 | 116,33 | 1,0042 | 0,996 | 22,0 | 216,24 | 10,821 | 0,092 |
| 2,0 | 119,61 | 1,1084 | 0,902 | 23,0 | 218,53 | 11,303 | 0,088 |
| 2,5 | 126,78 | 1,366 | 0,732 | 24,0 | 220,75 | 11,786 | 0,085 |
| 3,0 | 132,87 | 1,621 | 0,617 | 25,0 | 222,90 | 12,276 | 0,081 |
| 3,5 | 138,18 | 1,873 | 0,534 | 26,0 | 224,99 | 12,765 | 0,078 |
| 4,0 | 142,91 | 2,124 | 0,471 | 27,0 | 227,02 | 13,254 | 0,075 |
| 4,5 | 147,19 | 2,372 | 0,422 | 28,0 | 228,99 | 13,742 | 0,073 |
| 5,0 | 151,10 | 2,619 | 0,382 | 29,0 | 230,90 | 14,237 | 0,070 |
| 5,5 | 154,71 | 2,866 | 0,349 | 30,0 | 232,77 | 14,730 | 0,068 |
| 6,0 | 158,07 | 3,111 | 0,321 | 32,0 | 236,36 | 15,723 | 0,064 |
| 6,5 | 161,21 | 3,356 | 0,298 | 34,0 | 239,78 | 16,722 | 0,060 |
| 7,0 | 164,16 | 3,600 | 0,278 | 36,0 | 243,05 | 17,727 | 0,056 |
| 7,5 | 166,96 | 3,843 | 0,260 | 38,0 | 246,19 | 18,741 | 0,053 |
| — | — | — | — | 40,0 | 249,20 | 19,767 | 0,050 |

7. Плотность и удельный объем сухого насыщенного пара.

Плотностью пара, как и всякого другого тела, называют вес единицы его объема, обыкновенно—одного кубического метра. Под удельным объемом разумеют объем одного килограмма тела.

Для того, чтобы дать точную цифру плотности или удельного объема, нужно иметь пар, совершенно не содержащий воды, так как вода очень тяжела и ее присутствие, хотя бы и в небольшом количестве, сильно меняет величину плотности (или удельного объема). Пар, содержащий некоторое количество воды, называется сырым или влажным; пар же, совершенно не содержащий воды (но вместе с тем еще не перегретый), называется сухим насыщенным паром.

В таблице 1 в 3-ем столбце даны значения плотности сухого насыщенного пара (вес одного кубического метра в килограммах), а в 4-ом столбце—удельные объемы (объемы одного килограмма в кубических метрах). Значения плотности и удельного объема даны в зависимости от давления насыщенного пара. Нахождение плотности и удельного объема делается по столбцам 3-му и 4-му в зависимости от данного давления,—так же, как и выше было указано для температуры. Если данное давление содержится в таблицах, то плотность или удельный объем находят прямо из таблицы. Так, например, при давлении в $8,5 \text{ кг/см}^2$ абс. (таблицы даны для абсолютного давления) получается плотность сухого насыщенного пара, равная $4,327 \text{ кг}$ (т. е. 1 кубический метр весит $4,327 \text{ кг}$), и удельный объем, равный $0,231$ кубического метра (объем одного кг). Если дано давление, содержащееся между давлениями, имеющимися в таблице, то приходится точно также прибегать к интерполированию, как было уже подробно объяснено для температуры.

Пусть, например, требуется найти плотность и удельный объем сухого насыщенного пара при давлении равном $5,3 \text{ кг/см}^2$ абс.

Из таблицы находим:

| | | Плотность в килограм- мах равна: | Удельный объем в куб. мет. |
|-------------------|-----------------------|--|----------------------------------|
| При давлении . . | $5,5 \text{ кг/см}^2$ | 2,866 | 0,349 |
| » » . . | 5 | 2,619 | 0,382 |
| Разность . . . | $0,5 \text{ кг/см}^2$ | 0,147 | 0,033 отрицат. |
| Разность на . . . | $0,1 \text{ кг/см}^2$ | $\frac{0,147}{5} = 0,0294$ | $\frac{0,033}{5} = 0,0066$ |

Поэтому, при давлении в $5,3 \text{ кг/см}^2$ плотность получится равная $2,619 + 3 \cdot 0,0294 = 2,707 \text{ кг}$; удельный объем: $0,382 - 3 \cdot 0,0066 = 0,362 \text{ куб. мт.}$

Мы обращали уже внимание и подчеркивали, что данные в таблице относятся к сухому насыщенному пару. Но пар, получающийся в котлах, часто содержит в себе примесь воды, которая увлекается пузырьками пара во время испарения. Это особенно часто случается при напряженном или, как говорят, интенсивном испарении воды в котле, когда хотят получить в данном котле как можно больше пара. Интенсивность работы котла измеряется количеством килограммов пара, испаряемых с одного квадратного метра поверхности нагрева котла, то есть той поверхности, которая соприкасается с горячими горнами.

Для каждой системы котлов имеется практикой выработанные данные для испарения с одного квадратного метра поверхности нагрева. Так, например, для распространенных на заводах котлов с жаровыми трубами имеются такие данные:

Испарение в час с 1 кв. метра поверхности нагрева:

| | |
|-----------------------------|----------|
| Нормальная работа | 15—20 кг |
| Форсированная | 20—25 » |

При увеличении числа килограммов пара, снимаемых в час с одного квадратного метра поверхности нагрева котла, пар может получиться влажный. Большая или меньшая влажность пара зависит также и от системы котла. Так, например, можно ожидать большей влажности при интенсивной работе в котлах с небольшим диаметром барабанов, у которых поверхность испарения воды сравнительно мала. Этим свойством отличались некоторые водотрубные котлы.

Наконец, пар, первоначально сухой, может сделаться влажным вследствие внешнего охлаждения; например, в длинном и недостаточно хорошо изолированном паропроводе. Таким образом, во многих случаях практики приходится считаться с влажностью пара. Для того, чтобы характеризовать влажный пар, указывают, сколько в одном килограмме влажного пара содержится воды. Это число называется степенью влажности пара; оно может быть выражено в числе процентов (обыкновенно оно не превышает 3—5%). Количество сухого пара, содержащегося в одном килограмме влажного пара, называется паросодержанием или пропорцией пара в смеси.

Если, положим, степень влажности пара равна 4%, то паросодержание будет, очевидно, равно 96%; вообще, если выразить

паросодержание в процентах, то оно равно разности между числами 100 и степенью влажности пара, тоже выраженной в процентах.

Объем влажного пара будет несколько меньше объема сухого насыщенного пара. Объем воды несравненно меньше, чем объем сухого насыщенного пара. Так, даже для большого давления в 15 кг/см^2 абс. объем одного килограмма пара равен 0,124 куб. метра, тогда как объем одного килограмма воды равен одному литру, т. е. одной тысячной части кубического метра. Таким образом объем пара получается в 124 раза больше, чем объем воды. Поэтому при вычислении объема влажного пара можно просто пренебречь объемом содержащейся в нем воды и вычислить объем влажного пара по данному его паросодержанию.

Пусть, например, ищется объем одного килограмма пара при давлении в $9,3 \text{ кг/см}^2$ абс. при влажности в 4%. Ищем, прежде всего по таблице объем сухого насыщенного пара при данном давлении.

При давлении 9 кг/см^2 удельный объем равен 0,219 куб. метров
 » » 9,5 » » » 0,208 » »

Увеличение давления на 0,5 соотв. уменьш. удел. объем на 0,011 куб. метров.
 » » » 0,1 » » » » » 0,0022 » »

$$\text{Удельный объем при } 9,3 \text{ кг/см}^2 = 0,219 - 3 \cdot 0,0022 = 0,212.$$

При влажности в 4%, в одном килограмме влажного пара содержится 0,96 кг сухого пара. Поэтому искомый объем одного кг влажного пара при вышеприведенных условиях будет:

$$0,96 \cdot 0,212 = 0,205 \text{ кв. мт.}$$

Задачи о нахождении удельного объема пара или его плотности часто приходится решать в технике. Так, например, можно решить такой вопрос: найти полезный часовой расход пара в паровой машине двойного действия, имеющей размеры: диаметр цилиндра = 400 мм, ход поршня = 700 мм, делающей 100 оборотов в минуту. Степень наполнения этой машины, положим, равна 0,2. Давление пара при впуске примем равным $7,5 \text{ кг/см}^2$ абс. и предполагаем самый пар сухим насыщенным.

Степень наполнения паровой машины, есть та часть хода поршня, на которой происходит впуск свежего пара. Так как ход поршня равен 700 мм, то длина впуска с каждой стороны равна $700 \cdot 0,2 = 140 \text{ мм.} = 0,14 \text{ мет.}$ Диаметр поршня равен $400 \text{ мм} = 0,4 \text{ мет.}$

Площадь поршня (равная поперечному сечению цилиндра) есть площадь круга с диаметром, равным 0,4 м. Из геометрии известно,

что площадь такого круга равна произведению постоянного числа 3,14 (обозначаемого греческой буквой π — «пи») на квадрат диаметра, деленный на 4, т. е. искомая площадь поршня равна $3,14 \cdot \frac{0,4^2}{2} = 0,25 \text{ м}^2$.

Объем той части цилиндра, которая наполняется паром при каждом ходе поршня, равен произведению площади основания на высоту, т. е. этот объем будет

$$0,25 \cdot 0,14 = 0,035 \text{ куб. мт.}$$

Вес одного кубического метра сухого насыщенного пара при $7,5 \text{ кг/см}^2$ абс. берем прямо из таблицы: он будет равен $3,843 \text{ кг}$.

Таким образом за один ход поршня с одной его стороны получается расход пара, равный

$$3,843 \cdot 0,035 = 0,134 \text{ кг.}$$

За один оборот расход этот будет вдвое больше; чтобы получить расход в минуту—полученное число (2,0,134) нужно умножить на число оборотов в минуту, т. е. на 100, а в час—умножить еще на 60. Искомый полный расход пара в час будет равен: $0,134 \cdot 100 \cdot 60 = 1608 \text{ кг}$.

Этот расход мы называем полезным или видимым, так как расход пара в действительной машине больше только что полученного. В ней имеется, как говорят, «дополнительный расход» пара. Мы, конечно, не будем здесь входить в обсуждение вопроса об этом дополнительном расходе пара.

8. Количество тепла, затрачиваемого для получения пара.

Переходим теперь к изучению самого процесса нагревания воды и ее перехода в парообразное состояние.

Рассмотрение этого процесса начнем с того момента, когда вода находилась при температуре 0 градусов. Мы говорили, что для нагревания одного килограмма воды на 1 градус требуется затрата тепла, равная одной калории; следовательно, для нагревания на несколько градусов нужно затратить столько калорий, на сколько градусов происходит нагревание, считая от нуля.

Более точные измерения показали, что этот закон только приблизительно. Поэтому пришлось и самое определение калории принять более точное, именно: за одну калорию принимают теперь то количество тепла, которое нужно затратить для нагревания одного килограмма воды от $14,5$ до $15,5$ градусов в Цельсия. В других промежутках температуры количество тепла, которое нужно затратить

для нагревания одного килограмма воды от 0 Цельсия на несколько градусов, почти равно этому числу градусов. Так, для нагревания от 0 до 90 градусов разница в количестве калорий и числа градусов совершенно неощутительна. Для нагревания на 100 градусов нужно 100,1 калории, на 150 градусов—151,1 калории, на 200 градусов (соответствующее давлению почти в 16 кг/см^2 абс.) — 203,6 калории и т. д. Это количество тепла, необходимое только для нагревания жидкости до определенной температуры (но не для ее испарения), называется теплотою жидкости. Теплота жидкости почти равна температуре, отсчитываемой в градусах Цельсия.

Для более точного нахождения теплоты жидкости служат данные, помещенные в таблице 2-ой ¹⁾. Так как для состояния насыщения температура, как мы знаем, определяется по давлению, то в таблице 2-ой даны во 2-ом столбце теплоты жидкости, прямо соответствующие давлениям, приведенным в первом столбце (температуры же, соответствующие этим давлениям, уже приведены были в таблице 1-ой).

Этой таблицей надо пользоваться так же, как и таблицей 1-ой, т. е. прямо беря у нее нужные теплоты жидкостей для тех давлений, которые имеются в таблице и интерполируя для промежуточных давлений. Так, например, для давления в $5,5 \text{ кг/см}^2$ абс. получается из таблицы 1-ой температура, равная 154,71 градуса, и теплота жидкости—156,0 кал. Для давления в $6,2 \text{ кг/см}^2$ абс. находим температуру и теплоту жидкости интерполированием:

| | | |
|---|-------------------------|--|
| Давление в кг/см^2 абс. | Температура. | Теплота жидкости в калориях. |
| 6,5 | 161,21° | 162,8 |
| 6 | 158,07° | 159,5 |
| Разности давления в кг/см^2 абс. | Разность температур. | Разности теплот жид- кости в калориях. |
| 0,5 | 3,14° | 3,3 |
| 0,1 | 0,63° | 0,66 |

Давление $6,2 \text{ кг/см}^2$ соответствует температуре в $158,07^\circ + 2 \cdot 0,63^\circ = 159,33^\circ$, теплота жидкости равна $159,5 + 2 \cdot 0,66 = 160,82$ калорий.

Очень часто приходится находить количество тепла, которое нужно истратить для нагревания воды не от нуля градусов, а от какойнибудь определенной температуры до другой более высокой, соответствующей данному давлению. В этом случае искомая затрата

¹⁾ Помещенной в конце этого § на стр. «32».

тепла равна просто разности теплот жидкости, соответствующих конечному давлению и начальной температуре. Первая теплота находится по таблице, вторую можно принять просто равной данной начальной температуре.

Пусть, положим, требуется найти, сколько тепла нужно затратить для нагревания до начала испарения питательной воды, поступающей при температуре 15 градусов, в котел, имеющий давление 9 кг/см^2 по манометру. Давление в 9 кг/см^2 по манометру соответствует 10 кг/см^2 абс. При 10 кг/см^2 абс. теплота жидкости по таблице 2-ой есть 181,4 калория. Поэтому искомое количество тепла для одного кг воды будет: $181,4 - 15 = 166,4$ калорий.

Когда при некотором давлении начинается испарение воды, нагретой до соответственной температуры, то, как показывает опыт, температура воды и пара больше не меняется до самого конца испарения (если последнее происходит при постоянном давлении), хотя во время этого перехода и происходит большая трата тепла.

Это явление затраты большого количества тепла, не сопровождаемого соответственным повышением температуры, было исследовано в XVIII веке английским физиком Блеком. Согласно господствовавшим тогда воззрениям, теплоту считали особого рода невесомой жидкостью, не создаваемой и не уничтожаемой.

Чтобы объяснить себе это видимое исчезновение тепла во время испарения, необходимую затрату тепла для обращения в пар воды, нагретой до температуры испарения, называли «скрытой теплотой» испарения. Она оказалась очень большой и значительно превосходящей теплоту жидкости. Так, например, для нагревания воды до 100 градусов (что почти соответствует температуре испарения при давлении атмосферы) нужна затрата 100 калорий, а скрытая теплота испарения при атмосферном давлении равна 540,2 калории.

В настоящее время установился взгляд на теплоту, как на явление, зависящее от движения мельчайших частиц тела, и представление о теплоте, как об особой невесомой материи, совершенно оставлено. Поэтому, и скрытую теплоту теперь себе представляют совершенно иначе. Дело в том, что при обращении воды в пар происходит сильное увеличение объема: как мы видели, во время испарения, даже при больших давлениях объем первоначально взятой воды увеличивается во много раз. При этом испаряющейся воде нужно преодолеть давление, под которым она находится и, следовательно, совершить внешнюю работу. На совершение этой работы затрачивается часть теплоты, которую мы называем скрытой. С другой стороны, самый процесс парообразования состоит в изменении состояния тела, причем частицы, его составляющие, получают совер-

шенно иное расположение. На это изменение расположения частиц тоже затрачивается часть скрытой теплоты.

Величины скрытой теплоты, необходимые для испарения одного килограмма воды при разных давлениях, приведены в 3-ем столбце таблицы 2-ой. Пользование ею должно быть совершенно такое же, как пользование предыдущими таблицами, как это было нами подробно разобрано.

Мы видим, что для получения пара при каком-либо давлении из одного килограмма воды при 0 градусов нужно сначала нагреть эту воду от 0 градусов до температуры испарения (соответствующей давлению). На это нагревание надо затратить количество тепла, равное теплоте жидкости. Затем надо обратить эту нагретую воду в пар, для чего потребуется затратить количество тепла, равное скрытой теплоте испарения. Полное количество тепла, необходимое для получения 1 килограмма сухого насыщенного пара из одного килограмма воды, взятой при 0 градусов, называется полной теплотой испарения. Из сказанного выше очевидно, что полная теплота испарения равна сумме теплоты жидкости и скрытой теплоте испарения.

Для удобства вычислений величины полной теплоты испарения помещены в столбце 4-ом таблицы 2. Каждая цифра этого столбца есть, следовательно, сумма соответствующих цифр столбцов 2-го и 3-го той же таблицы.

Полная теплота испарения есть, как мы говорили, количество тепла, которое нужно затратить, чтобы получить пар из воды, взятой первоначально при нуле градусов. Если взять воду при другой начальной температуре, то, конечно, для испарения одного килограмма воды потребуется тепла меньше, чем для воды при 0 градусов. Для получения необходимого количества тепла в этом случае нужно из полной теплоты испарения, взятой из таблицы, отнять теплоту жидкости, соответствующую первоначальной температуре воды. Практически можно отнимать просто, как мы уже говорили, величину, равную первоначальной температуре воды. Это последнее вычисление имеет чрезвычайно важное значение, так как оно лежит в основе всякого расчета парового котла. В паровой котел вода поступает именно не при нуле градусов, а при некоторой более высокой температуре, и в самом котле эта вода обращается в пар. Для нахождения количества тепла, которое нужно затратить в этом случае, нужно следовательно принять во внимание температуру питательной воды.

До сих пор мы говорили о количестве тепла, необходимого для получения сухого насыщенного пара. Для получения влаж-

ного пара, при одинаковом давлении, нужно затратить меньше тепла. Очевидно, что при получении одного килограмма влажного пара всю воду нужно будет нагреть до температуры испарения, соответствующей давлению, т.-е. нужно затратить для нагревания воды количество тепла, равное теплоте жидкости. Испарить же придется только часть воды, соответствующую паросодержанию влажного пара, а следовательно и затратить нужно только соответствующую часть скрытой теплоты испарения. Покажем на нескольких примерах нахождение количества тепла, необходимого для испарения пара при разных предположениях.

Пример 1. Найти полную теплоту испарения одного килограмма сухого насыщенного пара при давлении в $15,2 \text{ кг/см}^2$ по манометру. В таблице 2 находим полные теплоты испарения для давлений: 17 кг/см^2 абс. и 16 кг/см^2 абс.

| | |
|--|---------|
| Полная теплота испарения при 17 кг/см^2 абс. | — 665,6 |
| 16 " " " | — 665,3 |

Разность давлений 1 кг/см^2 абс. — 0,3

Поэтому получаем искомую полную теплоту испарения при давлении в $16,2 \text{ кг/см}^2$ абс. равную $665,3 + 0,2 \cdot 0,3 = 665,36$.

Пример 2. Найти полную теплоту испарения одного килограмма сухого насыщенного пара при давлении в $13,5 \text{ кг/см}^2$ абс., получаемого из воды при 18 градусах Цельсия. Подобно тому, как и в предыдущем примере, находим прежде всего по таблице 2 полную теплоту испарения в предположении, что первоначальная температура воды равна 0 градусам. Эта полная теплота испарения будет равна 664,4 калориям. Для того, чтобы получить искомую полную теплоту испарения для воды, имевшей первоначальную температуру 18 градусов, нужно от этой величины отнять теплоту жидкости, соответствующую 18 градусам, т.-е. как было сказано, 18 калорий. Искомая полная теплота испарения поэтому будет: $664,4 - 18 = 646,4$ калорий.

Пример 3. Сколько нужно затратить тепла, чтобы получить в котле 2000 килограммов пара при давлении в $14,8 \text{ кг/см}^2$ по манометру. Температура питательной воды равна 15 градусам, влажность пара предполагаем равной 4 процентам. Делаем вычисление сначала для 1 килограмма.

| | | | |
|--|------------------------|-------|---------|
| При давлении 16 кг/см^2 абс. | теплота жидкости будет | 204,1 | калорий |
| " " 15 " " " | " " " " | 200,8 | " |

Разность 1 кг/см^2 3,3

Поэтому теплота жидкости при давлении в $15,8 \text{ кг/см}^2$ абс., равном данному $14,8 \text{ кг/см}^2$ по манометру, будет равна $200,8 + 0,8 \cdot 3,3 = 203,44$ калорий.

Точно также из таблицы 2-ой находим:

Скрытая теплота при 15 кг/см^2 абс. равна 461,2 калорий

" " " 16 " " " 458,3 "

Разность для 1 кг/см^2 абс. равна 2,9 калорий

Скрытая теплота при давлении в $15,8 \text{ кг/см}^2$ абс. будет: $461,2 - 0,8 \cdot 2,9 = 458,9$ калорий.

При влажности пара, равной 4 процентам, паросодержание будет равно 96 процентам. Теперь мы имеем все данные для нахождения теплоты, которую нужно затратить для нагревания 1 килограмма воды и ее испарения при условиях нашей задачи. Согласно вышесказанному, искомая теплота найдется из выражения:

теплота испарения жидкости + паросодержание \times на скрытую теплоту — теплота питательной воды

т.-е. в числах;

$$203,44 + 0,96 \cdot 458,9 - 15 = 629 \text{ калорий.}$$

Для 2000 килограммов найдем необходимое количество тепла, равное $629 \cdot 2000 = 1258000$ калорий.

Зная количество тепла, необходимое для получения пара, можно найти и количество топлива, которое нужно сжечь для получения этого пара. Для этого нужно только знать так называемую теплотворную способность топлива и степень использования в котле теплоты, получаемой при сгорании топлива в котле — так называемый коэффициент полезного действия котла.

Под теплотворной способностью топлива ¹⁾ разумеют количество тепла, выделяемое одним килограммом его при полном сгорании. Такое полное сгорание может быть достигнуто только в специальных испытательных приборах (калориметрах) путем применения для сгорания сильно сжатого чистого кислорода. В обыкновенных паровых котлах используется только часть теплотворной способности топлива, например, $0,6 - 0,75$ (и редко выше — до $0,8 - 0,85$) теплотворной способности топлива.

¹⁾ См. С. С. Бернштейн. «Уход за паровым котлом», стр. 48. Из-во Севзаппромбюро, серия «На рабочем ходу».

Найдем для только что разобранным нами случая количество необходимого топлива. Пусть топливом служит каменный уголь с теплотворной способностью в 7000 калорий. Коэффициент полезного действия котла примем равным 0,7. Каждый килограмм сожженного угля передаст воде в котле $0,7 \cdot 7000 = 4900$ кал. На испарение 2000 килограммов пара (при условиях, изложенных в разобранным примере) нам нужно истратить 1258000 калорий. Таким образом всего нам потребуется $\frac{1258000}{4900} = 257$ кг (приблизительно) угля.

Это количество топлива потребовалось для получения 2000 килограммов пара, следовательно один килограмм угля дает (при наших условиях) $\frac{2000}{257} = 7,8$ кг пара. Обыкновенно и принимают испарительную способность каменного угля в 7 — 8 кг. Вышеприведенные примеры показывают, что приведенные нами способы расчета и таблицы 1-ая и 2-ая дают возможность решить многие важные задачи из практики котельного и машинного дела. Покажем еще на одном примере приложение данных способов расчета и таблиц.

Рассмотрим конденсацию пара, т.-е. обращение его в жидкое состояние, посредством охлаждения. Это охлаждение достигается или путем смешения пара с водой (конденсаторы или холодильники смешения), или посредством пропуска пара между медными трубами, по которым пропускается охлаждающая вода (поверхностные холодильники). Холодильники смешения находят себе преимущественное применение в обыкновенных паровых машинах, поверхностные холодильники — в судовых паровых машинах и в турбинах. Благодаря применению холодильников, выходящий из машины пар получается меньшего давления, чем атмосферное, выпуск его требует меньшей затраты работы и потому машина может давать больше полезной работы.

Решим такой пример. Охлаждающая вода холодильника смешения имеет температуру 15° , пар (предполагается — сухой насыщенный) поступает в холодильник при давлении в $0,3$ кг/см² абс. Общая температура воды и конденсированного пара после их смешения и обращения пара в воду пусть будет 30° . Требуется найти количество охлаждающей воды, необходимое для конденсации одного килограмма пара.

Пар входит в конденсатор с запасом тепла, равным полной теплоте испарения. Из таблицы 2-ой имеем полную теплоту испарения при давлении в $0,3$ кг/см² абс. равную 627,2 калорий. Пар выходит из конденсатора в виде воды при температуре в 30 градусов, содержащий только теплоту жидкости, равную 30 калориям. Таким

ТАБЛИЦА 2-ая.

Теплота жидкости, скрытая теплота и полная теплота испарения насыщенного пара.

| Давление в $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ абс. | Теплота жидкости в калориях. | Скрытая теплота в калориях. | Полная теплота испарения в калориях. | Давление в $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ абс. | Теплота жидкости в калориях. | Скрытая теплота в калориях. | Полная теплота испарения в калориях. |
|---|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 0,02 | 17,2 | 586,9 | 604,1 | 8,5 | 174,2 | 487,0 | 661,2 |
| 0,04 | 28,6 | 580,9 | 609,5 | 9,0 | 176,6 | 485,0 | 661,6 |
| 0,06 | 35,8 | 577,1 | 612,9 | 9,5 | 179,1 | 483,0 | 662,1 |
| 0,08 | 41,2 | 574,1 | 615,3 | 10,0 | 181,4 | 481,1 | 662,5 |
| 0,10 | 45,4 | 571,8 | 617,2 | 10,5 | 183,6 | 479,2 | 662,8 |
| 0,15 | 53,6 | 567,1 | 620,7 | 11,0 | 185,8 | 477,4 | 663,2 |
| 0,20 | 59,6 | 563,7 | 623,3 | 11,5 | 187,9 | 475,5 | 663,4 |
| 0,25 | 64,5 | 560,9 | 625,4 | 12,0 | 189,9 | 473,8 | 663,7 |
| 0,30 | 68,7 | 558,5 | 627,2 | 12,5 | 191,9 | 472,1 | 664,0 |
| 0,35 | 72,3 | 556,4 | 628,7 | 13,0 | 193,8 | 470,4 | 664,2 |
| 0,40 | 75,4 | 554,6 | 630,0 | 13,5 | 195,6 | 468,8 | 664,4 |
| 0,45 | 78,3 | 552,9 | 631,2 | 14,0 | 197,4 | 467,2 | 664,6 |
| 0,5 | 80,9 | 551,3 | 632,2 | 14,5 | 199,1 | 465,7 | 664,8 |
| 0,6 | 85,5 | 548,6 | 634,1 | 15,0 | 200,8 | 464,1 | 664,9 |
| 0,7 | 89,5 | 546,2 | 635,7 | 16,0 | 204,1 | 461,2 | 665,3 |
| 0,8 | 93,0 | 544,1 | 637,1 | 17,0 | 207,3 | 458,3 | 665,6 |
| 0,9 | 96,3 | 542,0 | 638,3 | 18,0 | 210,2 | 455,5 | 665,8 |
| 1,0 | 99,2 | 540,2 | 639,4 | 19,0 | 213,1 | 452,9 | 666,0 |
| 1,2 | 104,4 | 537,0 | 641,4 | 20,0 | 215,9 | 450,3 | 666,2 |
| 1,4 | 108,9 | 534,1 | 643,1 | 21,0 | 218,6 | 447,7 | 666,3 |
| 1,6 | 113,0 | 531,5 | 644,5 | 22,0 | 221,1 | 445,2 | 666,4 |
| 1,8 | 116,7 | 529,1 | 645,8 | 23,0 | 223,6 | 442,9 | 666,5 |
| 2,0 | 120,0 | 526,9 | 646,9 | 24,0 | 226,1 | 440,5 | 666,6 |
| 2,5 | 127,3 | 522,0 | 649,3 | 25,0 | 228,4 | 438,3 | 666,7 |
| 3,0 | 133,5 | 517,7 | 651,2 | 26,0 | 230,7 | 436,0 | 666,7 |
| 3,5 | 139,0 | 513,8 | 652,8 | 27,0 | 232,9 | 433,8 | 666,7 |
| 4,0 | 143,8 | 510,4 | 654,2 | 28,0 | 235,1 | 431,7 | 666,8 |
| 4,5 | 148,3 | 507,1 | 655,4 | 29,0 | 237,2 | 429,6 | 666,8 |
| 5,0 | 152,3 | 504,1 | 656,4 | 30,0 | 239,2 | 427,5 | 666,8 |
| 5,5 | 156,0 | 501,3 | 657,3 | 32,0 | 243,2 | 423,5 | 666,7 |
| 6,0 | 159,5 | 498,7 | 658,2 | 34,0 | 247,0 | 419,7 | 666,7 |
| 6,5 | 162,8 | 496,1 | 658,9 | 36,0 | 250,7 | 415,9 | 666,6 |
| 7,0 | 165,8 | 493,7 | 659,5 | 38,0 | 254,1 | 412,3 | 666,5 |
| 7,5 | 168,7 | 491,3 | 660,1 | 40,0 | 257,5 | 408,9 | 666,4 |
| 8,0 | 171,5 | 489,2 | 660,7 | -- | -- | -- | -- |

образом один килограмм пара теряет в конденсаторе $627,2 - 30 = 597,2$ калории. Эта теплота идет на нагревание охлаждающей воды. Один килограмм ее нагревается от 15 градусов до 30 градусов, т.-е. приобретает 15 калорий. Отсюда находим искомый расход охлаждающей воды: $\frac{597,2}{15} = 39,8$ кг. Итак расход охлаждающей воды получился очень значительный: около 40 кг воды на 1 кг пара. В поверхностных холодильниках при высоких степенях разрежения (применимых в паровых турбинах) получается еще больший расход воды: до 50—60 кг охлаждающей воды на один кг пара. Это обстоятельство вынуждает ставить большие паровые станции в таких местах, где имеется большое количество воды, т.-е. на реке с достаточным расходом воды. Этим примером мы заканчиваем наше изложение свойств насыщенного пара и переходим к перегретым парам.

ГЛАВА III.

Перегретый пар.

9. Получение перегретого пара.

Если нагреть воду в сосуде, снабженном поршнем, на который производится снаружи известное давление, до полного испарения, то получится сухой насыщенный пар, температура которого, как мы видели, вполне определяется величиною давления, при котором происходит испарение. Если же продолжить нагревание и после того, как вся вода испарилась, оставляя давление постоянным (для чего нужно позволить пару расширяться, так как объем его будет увеличиваться), то температура полученного пара начнет повышаться. В этом состоянии пар называется перегретым.

Практически перегретый пар получают так: насыщенный пар собирается сверху котла (рис. 8) и затем после открытия клапана пускается в трубу, ведущую в перегреватель. Последний представляет собою систему железных трубок небольшого диаметра помещенных, как показывает рис. 8 (изображающий водотрубный котел системы Бабкок и Вилькоккс), между барабаном котла и трубками. В других случаях перегреватель помещается сзади котла, а иногда хотя и реже, даже делают перегреватели с отдельными топками.

В настоящее время применяется перегретый пар очень высокой температуры: так в крупных локомотивных заводах Вольфа и Ланца перегрев доводят до 320—330 градусов при давлении около 15 кг/см^2 по манометру, что соответствует температуре насыщенного пара около 200 градусов. Таким образом, перегрев достигает в этих

локомотивах 120—130 градусов. В перегревателях В. Шмидта, применяемых в паровозах, температура доводится до 350 градусов.

На крупных паро-турбинных станциях перегретый пар котлов тоже доводится до температуры 350—360 градусов. В новейшее

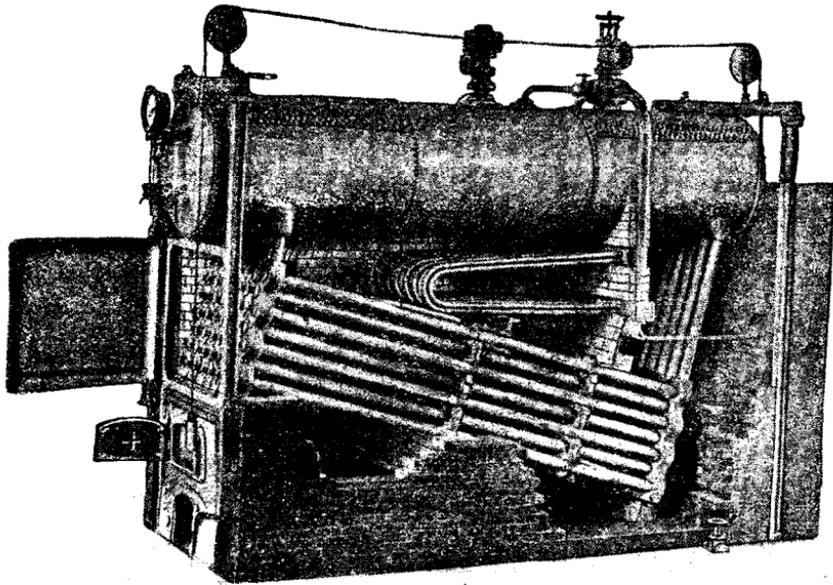


Рис. 8. Водотрубный котел системы Бабкок и Вилькоккс.

время делаются предложения доводить температуру перегретого пара даже до 400 градусов (турбины шведского завода Юнгстрема). Поэтому изучение свойств перегретого пара получило особенное развитие в последнее десятилетие и сейчас имеется хороший опытный материал относительно перегретого пара до давления в 30 кг/см^2 и температуры в 350 градусов (таблицы же составляются и для более высоких давлений и температур).

10. Свойства перегретого пара.

Свойства перегретого пара, имеющие особенно важное значение в технике, следующие: 1) удельный объем и плотность при различных давлениях и температурах, 2) количество тепла, которое нужно затратить для получения одного килограмма перегретого пара при данном давлении и данной температуре. Эта последняя данная особенно важна, так как служит основой для нахождения поверхности перегревателя, достаточной для восприятия полученного количества тепла, а также для вычисления количества тепла, приносимого с паром

в машину (или турбину) и могущего быть в ней использованным. Эту полную теплоту называют также теплосодержанием перегретого пара.

Удельный объем перегретого пара. Для удельных объемов перегретого пара мы прямо даем готовую таблицу (таблица 3), в которой даны эти объемы для давлений от 1 кг/см^2 абс. до 19 кг/см^2 абс. и для каждого из этих давлений от температуры насыщения (t_3) 550° . Пользование этой таблицей—такое же, как и таблицами 1-й и 2-й, то есть если требуется найти удельный объем пара при давлении и температуре, имеющих в таблице, то он прямо и берется из таблицы. Для промежуточных же давлений и температур удельный объем находится интерполированием.

Способ пользования этой таблицей мы поясним на примере.

Пусть нам требуется найти вес перегретого пара, полезно расходуемого в час в паровой машине, разобранный в § 6. Перегретый пар предположим имеющим давление в $13,5 \text{ кг/см}^2$ абс. и температуру, равную 250° .

Из таблицы 3 находим следующие данные для удельных объемов при температурах и давлениях, соседних с данными:

| Температура | Давление 13 кг/см^2 абс. | Давление 15 кг/см^2 абс. |
|-------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 240 град. | 0,177 | 0,152 |
| 260 » | 0,185 | 0,160 |

При 250 градусах можно взять средние данные между данными для 240 и 260 градусов:

| Температура | Давление 13 кг/см^2 абс. | Давление 15 кг/см^2 абс. |
|-------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 250 град. | 0,181 | 0,156 |

Мы видим, что увеличению давления на 2 кг/см^2 соответствует уменьшение удельного объема на $0,025$ куб. мет.; увеличению на 1 кг/см^2 значит, отвечает уменьшение вдвое меньше т. е. на $\frac{0,025}{2} = 0,0125$ куб. мет., а следовательно давлению в $13,5 \text{ кг/см}^2$ абс. будет отвечать удельный объем, равный $0,181 - 0,00625 = 0,175$ куб. мет. Мы видели (в § 6), что объем пара, выпускаемого в цилиндр за 1 ход поршня должен быть равен $0,035$ куб. мет. Таким образом, за 1 ход в цилиндр войдет $\frac{0,035}{0,175} = 0,21$ килограмма пара, за один оборот—вдвое больше, т. е. $0,4$ килограмма, а за 1 час (при 100 оборотах в минуту) $0,4 \cdot 60 \cdot 100 = 2400$ килограммов пара.

ТАБЛИЦА 3-я.

Удельные объемы перегретого пара при различных давлениях и температурах.

| Температура в градусах. | Давление $\frac{кг}{см^2}$ | | | | | | | | | |
|----------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| 140 | 1,927 | 0,630 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 150 | 1,975 | 0,648 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 160 | 2,024 | 0,665 | 0,392 | — | — | — | — | — | — | — |
| 170 | 2,072 | 0,681 | 0,403 | 0,283 | — | — | — | — | — | — |
| 180 | 2,120 | 0,698 | 0,414 | 0,291 | 0,223 | — | — | — | — | — |
| 190 | 2,167 | 0,715 | 0,424 | 0,299 | 0,230 | 0,185 | — | — | — | — |
| 200 | 2,215 | 0,731 | 0,434 | 0,307 | 0,236 | 0,191 | 0,159 | 0,136 | — | — |
| 220 | 2,311 | 0,764 | 0,454 | 0,322 | 0,248 | 0,201 | 0,168 | 0,144 | 0,126 | 0,111 |
| 240 | 2,406 | 0,796 | 0,474 | 0,336 | 0,260 | 0,211 | 0,177 | 0,152 | 0,133 | 0,118 |
| 260 | 2,501 | 0,829 | 0,494 | 0,351 | 0,271 | 0,220 | 0,185 | 0,159 | 0,140 | 0,124 |
| 280 | 2,596 | 0,861 | 0,514 | 0,365 | 0,283 | 0,230 | 0,193 | 0,167 | 0,146 | 0,130 |
| 300 | 2,691 | 0,893 | 0,534 | 0,379 | 0,294 | 0,239 | 0,202 | 0,174 | 0,153 | 0,136 |
| 350 | 2,928 | 0,973 | 0,582 | 0,415 | 0,322 | 0,262 | 0,221 | 0,191 | 0,168 | 0,150 |
| 400 | 3,164 | 1,053 | 0,631 | 0,450 | 0,349 | 0,285 | 0,241 | 0,211 | 0,183 | 0,164 |
| 450 | 3,401 | 1,132 | 0,679 | 0,484 | 0,376 | 0,307 | 0,260 | 0,225 | 0,198 | 0,177 |
| 500 | 3,636 | 1,211 | 0,726 | 0,518 | 0,403 | 0,329 | 0,278 | 0,241 | 0,213 | 0,190 |
| 550 | 3,872 | 1,290 | 0,774 | 0,557 | 0,429 | 0,351 | 0,297 | 0,257 | 0,227 | 0,203 |

Теплосодержание или количество тепла для получения перегретого пара. В таблице 4 приведены полные количества тепла, необходимые для получения из одного килограмма воды, взятой при 0 градусов, одного килограмма перегретого до различных температур пара, при чем перегрев происходит, как было указано, при постоянном давлении.

Количества тепла, приведенные в этой таблице, представляют суммы теплоты жидкости, скрытой теплоты испарения и теплоты перегрева. Для получения только теплоты перегрева нужно из цифр таблицы 4 вычитать соответствующие значения полных теплот испарения, взятые из таблицы 2. Самую таблицу мы приводим для избежания громоздкости только для давлений от 6 $кг/см^2$ абс. до 20 $кг/см^2$ абс. (более низкие и более высокие давления редко встречаются в котельной практике). Мы доводим ее до перегревов в 350 градусов.

В таблице помещены только данные, касающиеся перегретого пара, т. е. для каждого давления помещены полные теплоты пара, начи-

ТАБЛИЦА 4-я
Теплосодержание перегретого пара при различных давлениях и температурах.

| Температуры в градусах Цельсия. | Давления в $\frac{кг}{см^2}$ абс. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|---|---|---|---|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | | | | |
| 160 | 659,2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 170 | 664,8 | 663,6 | 662,2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 180 | 670,2 | 669,0 | 667,8 | 666,5 | 665,2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 190 | 675,5 | 674,3 | 673,5 | 672,3 | 671,0 | 669,9 | 668,7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 200 | 680,8 | 679,8 | 678,8 | 677,8 | 676,9 | 676,0 | 674,9 | 673,7 | 672,7 | 671,7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 210 | 685,8 | 685,0 | 684,2 | 683,5 | 682,7 | 681,9 | 681,0 | 680,1 | 679,1 | 678,2 | 677,2 | 676,2 | 675,0 | 673,7 | — | — | — | — | — | — |
| 220 | 691,0 | 690,2 | 689,6 | 688,8 | 688,2 | 687,5 | 686,9 | 686,1 | 685,5 | 684,7 | 683,9 | 683,2 | 682,3 | 681,3 | 680,3 | — | — | — | — | — |
| 230 | 696,0 | 695,3 | 694,6 | 693,9 | 693,3 | 692,8 | 692,2 | 691,6 | 691,0 | 690,4 | 689,7 | 689,0 | 688,4 | 687,7 | 687,0 | — | — | — | — | — |
| 240 | 700,9 | 700,4 | 699,8 | 699,2 | 698,6 | 698,1 | 697,5 | 696,9 | 696,4 | 695,9 | 695,3 | 694,8 | 694,2 | 693,6 | 693,1 | — | — | — | — | — |
| 250 | 705,9 | 705,3 | 704,7 | 704,2 | 703,6 | 703,2 | 702,6 | 702,2 | 701,7 | 701,3 | 700,8 | 700,4 | 699,9 | 699,4 | 699,0 | — | — | — | — | — |
| 260 | 710,8 | 710,2 | 709,1 | 709,6 | 708,6 | 708,2 | 707,7 | 707,2 | 706,8 | 706,4 | 706,0 | 705,6 | 705,3 | 705,0 | 704,6 | — | — | — | — | — |
| 270 | 715,7 | 715,1 | 714,5 | 714,1 | 713,6 | 713,2 | 712,8 | 712,4 | 712,0 | 711,7 | 711,3 | 710,9 | 710,6 | 710,3 | 710,0 | — | — | — | — | — |
| 280 | 720,7 | 720,1 | 719,6 | 719,0 | 718,6 | 718,2 | 717,8 | 717,4 | 717,0 | 716,7 | 716,3 | 716,0 | 715,7 | 715,4 | 715,1 | — | — | — | — | — |
| 290 | 725,5 | 725,0 | 724,5 | 724,0 | 723,7 | 723,3 | 722,9 | 722,5 | 722,2 | 721,9 | 721,6 | 721,3 | 721,0 | 720,6 | 720,4 | — | — | — | — | — |
| 300 | 730,5 | 730,1 | 729,6 | 729,0 | 728,6 | 728,2 | 727,9 | 727,5 | 727,1 | 726,8 | 726,5 | 726,2 | 725,8 | 725,5 | 725,3 | — | — | — | — | — |
| 310 | 735,4 | 735,0 | 734,5 | 734,1 | 733,7 | 733,3 | 733,0 | 732,6 | 732,2 | 731,9 | 731,6 | 731,3 | 731,0 | 730,7 | 730,3 | — | — | — | — | — |
| 320 | 740,4 | 740,0 | 739,6 | 739,1 | 738,7 | 738,4 | 738,0 | 737,7 | 737,3 | 737,0 | 736,7 | 736,3 | 736,1 | 735,8 | 735,5 | — | — | — | — | — |
| 330 | 745,1 | 744,8 | 744,4 | 744,1 | 743,7 | 743,4 | 743,0 | 742,7 | 742,3 | 742,1 | 741,8 | 741,4 | 741,2 | 740,9 | 740,6 | — | — | — | — | — |
| 340 | 750,2 | 749,7 | 749,4 | 749,0 | 748,7 | 748,3 | 748,0 | 747,7 | 747,3 | 747,1 | 746,8 | 746,5 | 746,2 | 745,9 | 745,7 | — | — | — | — | — |
| 350 | 755,0 | 754,6 | 754,4 | 754,0 | 753,7 | 753,4 | 753,0 | 752,7 | 752,4 | 752,1 | 751,8 | 751,6 | 751,3 | 751,0 | 750,9 | — | — | — | — | — |

ная с области перегрева. Поэтому, например, для 9 кг/см^2 абс. в 4 графе, соответствующей 170 градусам поставлена просто черта: температура насыщенного пара при 9 кг/см^2 абс. равна 174,6, значит при рассматриваемом давлении пар не может иметь температуру в 170 градусов, а при этой температуре насыщенный пар должен иметь немного более низкое давление.

Способ пользования таблицей 4 будет показан на нескольких примерах.

Пример 1. Найти количество тепла, необходимое для перегрева 200 килограммов пара, имеющего давление в 9 кг/см^2 от состояния насыщения до 250 градусов. Находим полную теплоту одного килограмма перегретого пара при давлении в 9 кг/см^2 абс. и температуре в 250 градусов. Она будет равна 704,2 калорий. Теплота сухого насыщенного пара при давлении в 9 кг/см^2 абс. найдется по таблице 2; она будет равна 661,6 калорий. Таким образом для перегрева одного килограмма сухого насыщенного пара при постоянном давлении в 9 кг/см^2 до температуры в 250 градусов нужно затратить $704,2 - 661,6 = 42,6$ калорий. А для получения 200 килограммов пара понадобится $42,6 \cdot 200 = 8520$ калорий.

Пример 2. Найти количество угля с теплотворной способностью в 7000 калорий, которое нужно сжечь в котле, имеющем коэффициент полезного действия 0,7, для получения 2000 килограммов перегретого пара при давлении в $14,5 \text{ кг/см}^2$ абс. и температуре в 300 градусов. Температура питательной воды — 15 градусов.

Ищем прежде всего количество тепла, которое нужно затратить для получения одного килограмма пара с указанными в задаче свойствами. В таблице 4-й нет указанного давления, поэтому, находим искомое теплосодержание интерполированием между данными для 14 и 15 кг/см^2 .

Теплосодержание перегретого пара:

при 14 кг/см^2 абс. и 300 градусах — 727,1 калорий

» 15 » 300 » — 726,5 »

при 14,5 абс. и 300 градусах = $\frac{727,1 + 726,5}{2}$ кал.

= 726,8 калорий.

Для получения 1 килограмма перегретого пара при давлении в $14,5 \text{ кг/см}^2$ абс. из воды при 15 градусах нужно, следовательно, истратить $726,8 - 15 = 711,8$ калорий, а для 2000 килограммов — $711,8 \cdot 2000 = 1423600$ калорий. 1 килограмм угля с данной

теплотворной способностью в 7000 кал. дает, при сгорании в котле с коэффициентом пол. действия в $0,7—70000,7=4900$ кал. Таким образом, количество потребного топлива будет равно $\frac{1423600}{4900} = 290,5$ кг.

Пример 3. Сравнить работу двух паровых машин, из которых одна расходует на 1 лошадиную силу в час 5 килограммов перегретого пара при давлении в 14 кг/см^2 абс. и температуре и 300 градусов, а другая 7 килограммов сухого насыщенного пара при том же давлении. Температуру питательной воды предложим в обоих случаях одинаковой и равной 12 градусам.

Теплосодержание 1 кг. перегретого пара при 14 кг/см^2 и 300 градусах равно (по таблице 4-й) 727,1; при температуре питательной воды в 12 градусов для получения 1 килограмма такого пара нужно затратить $727,1—12=715,1$ кал. Полная же теплота испарения сухого насыщенного пара при давлении в 14 кг/см^2 абс. равна 664,6 кал., а для получения 1 килограмма такого пара из воды при 12 градусах нужно $664,7—12=652,7$ кал. Таким образом, получаем следующие расходы тепла на 1 лошадиную силу в калориях:

При насыщенном паре $652,6 \cdot 7 = 4568,2$

» перегретом » $715,1 \cdot 5 = 3575,5$.

Экономия при применении перегретого пара получается равной $4568,2—3575,5=992,7$. Если ее выразить, экономию, в процентах тепла, расходуемого при насыщенном паре, то получится: $100 \frac{992,7}{4568,2} = 21,7\%$.

Литература.

Ограничиваемся приведением некоторых русских более доступных сочинений, в которых читатель, желающий пополнить сведения о парах, мог бы найти нужные указания в достаточно простой форме.

1. Б. Розинг. Физика для всех. Теплота, изд. «Сеятель» 1924 г.
2. В. С. Наумов. Теплотехника, Из-во Сев. Зап. Промбюро 1925 г. Глава III (Водяной пар и его свойства).
3. А. А. Радциг. Таблицы и диаграммы для водяного пара. Госиздат 1923 (в этой книге теоретическая часть сложна, но имеется много таблиц для расчетов).
4. Шюле. Техническая термодинамика. Москва. 1922 г. (перепечатка Киевского издания 1911 г.). Отдел о парах, в котором разобрано много примеров.

Краткие сведения о парах имеются также в любом курсе физики, например, в «Начальной физике» А. В. Цингера. (Госиздат, 1923 г.) гл. V.

О Г Л А В Л Е Н И Е.

| | |
|-----------------------|--------|
| Предисловие | Стр. 3 |
|-----------------------|--------|

Г Л А В А I.

Основные понятия.

| | |
|---|----|
| 1. Значение паротехники | 5 |
| 2. Теплота. Температура | 9 |
| 3. Количество тепла. Калория. Теплоемкость | 10 |
| 4. Давление | 12 |
| 5. Приборы для измерения давления манометра | 14 |

Г Л А В А II.

Насыщенный водяной пар.

| | |
|---|----|
| 6. Испарение и кипение | 17 |
| 7. Плотность и удельный объем сухого насыщенного пара | 21 |
| Таблица 1-ая | 24 |
| 8. Количества тепла, затрачиваемые для получения насыщенного пара | 25 |
| Таблица 2-ая | 32 |

Г Л А В А III.

Перегретый пар.

| | |
|---|----|
| 9. Получение перегретого пара | 33 |
| 10. Свойства перегретого пара | 34 |
| Таблица 3-я | 36 |
| Таблица 4-ая | 37 |
| Литература | 39 |



О.К.

- 15

Ж

2734

M-4c



С ТРЕБОВАНИЯМИ ОБРАЩАТЬСЯ:

в Ленинграде — Книжный Торговый Сектор
Изд-ва — Пр. 25 Октября, 58, тел. 236-58
в Москве — Петровка, 7/10, телефон 389-30
Книжный магазин Изд-ва в Ленинграде —
Проспект Володарского, 53-а, тел. 161-75

JHC

2734