

Пар высокого давления в паровых установках целлюлозного производства.

Доклад проф. Eberle на общем собрании Союза германских инжеров бумажников и целлюлозников 5 марта 1925 г.¹⁾

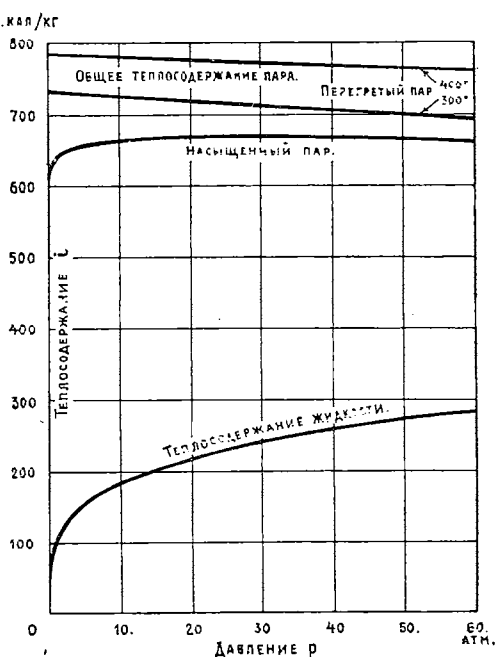
W. Schmidt и его сотрудники показали, что применение сильно перегретого до 400°C пара высокого давления в 60 атм. может значительно уменьшить расход тепла на единицу мощности паровой машины. Это вызвало большой интерес к вопросу о паре высокого давления не только среди теплотехников, но также среди специалистов всех отраслей промышленности, потребляющих тепло и энергию.

Цель настоящего доклада выяснить, что может дать применение пара высокого давления целлюлозному производству.

Свойства пара высокого давления представлены на фиг. 1. Из нее видно, что теплота насыщенного пара увеличивается до 30 атм. и затем медленно падает. Для получения 1 кгр. насыщенного пара в 60 атм. необходимы 660 кал. Это почти то же количество тепла, которое требуется для получения 1 кгр. пара в 7 атм.; перегретый до 400° пар в 7 атм. содержит 779,6 кал., в то время как теплота пара в 60 атм.

и 400°C составляет 762,5 кал. Таким образом, теплосодержание перегретого до 400° пара в пределах 10—60 атм. изменяется не более, чем на 2%.

Применение пара в конденсационной машине. Повышение давления влечет за собой лучшее использование тепла и соответственное умень-

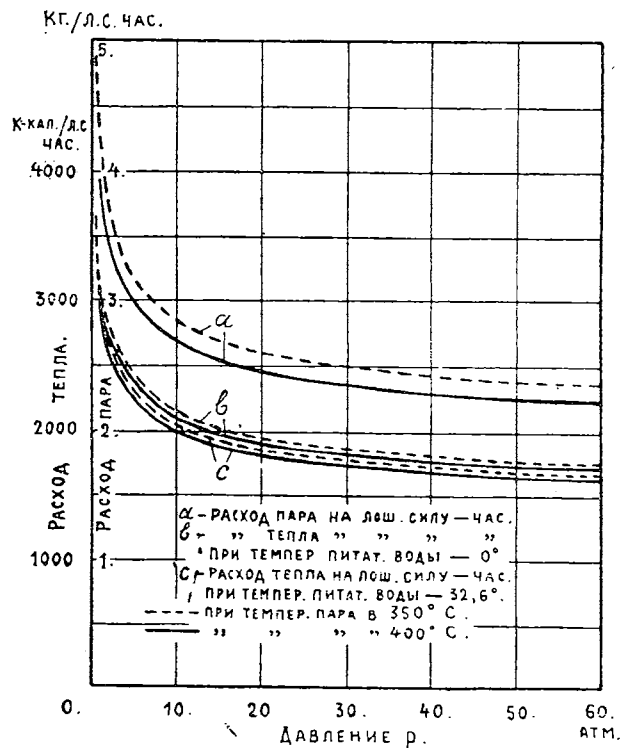


Фиг. 1. Зависимость теплосодержания от давления.

¹⁾ „Woch. f. Pap.“ 1925 № 13 и „Pap. Fabr.“ 1925 № 14.

шение его расхода. На фиг. 2 представлено влияние давления пара на расход тепла в работающей без потерь машине. Кривые *a* дают расход пара на силу-час для перегретого пара в 350° и 400°C при давлении в конденсаторе в 0,05 атм. Кривые *b* представляют зависимость расхода тепла от начального давления для тех же температур при температуре питательной воды в 0° . Кривые *c* показывают расход тепла при температуре питательной воды в $32,6^{\circ}$, что соответствует давлению в конденсаторе в 0,05 атм.

На диаграмме фиг. 3 представлено изменение в зависимости от давления расходов пара и тепла для машины с известным термодинамическим коэффициентом полезного действия. Кривые диаграммы относятся к конденсационной машине, работающей стрех-ступенчатым расширением и промежуточным перегревом. Термодинамический коэффициент полезного действия в отдельных ступенях принят равным 80%. Линии *a*, *b* и *c* представляют расход пара и тепла в машине при допущении, что перегрев доводится до получения насыщения каждой ступени в конце расширения. Линии *d* и *e* — для тех же условий, но в случае многоступенчатого подогрева питательной воды. Из сравнения ли-



Фиг. 2. Расход пара и тепла в зависимости от давления.
 $p_2 = 0,05$ атм. абс.

видно влияние этого подогрева. Машина, работающая с начальным давлением в 27 атм. с многоступенчатым подогревом, в отношении расхода тепла равноценна машине, работающей с паром в 60 атм. и при температуре питательной воды в 0° . В остальном кривые диаграммы фиг. 3, так же как и фиг. 2, показывают, что в хорошей конденсационной машине с высоким вакуумом влияние повышения давления до 30 атм. значительно и что от 30 до 60 атм. это влияние сравнительно мало.

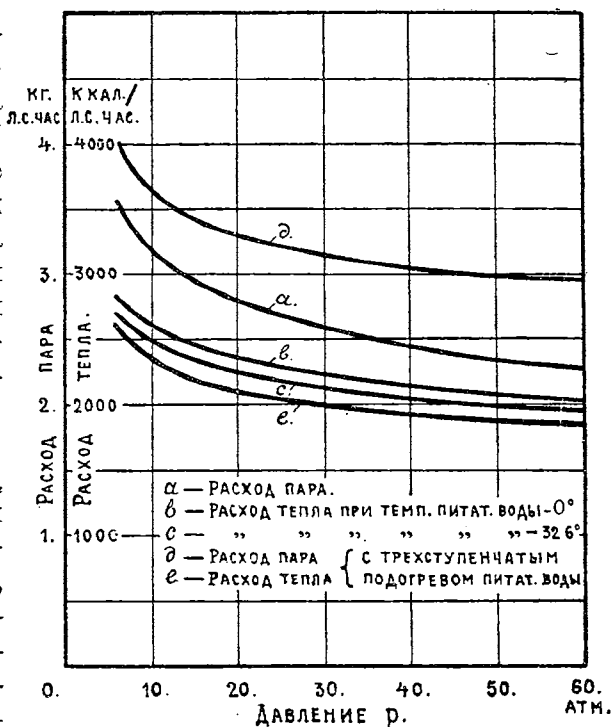
Повышение давления от 20 до 30 атм. дает такое же уменьшение расхода тепла, как и все увеличение давления от 30 до 60 атм. Из диаграмм можно также усмотреть увеличивающееся с повышением

нального давления влияние многоступенчатого подогрева питательной воды на расход тепла.

Примесение пара в машине с противодавлением. Предприятия, расходуящие большие количества пара на производство, как например, целлюлозные заводы, могут значительно понизить общий расход тепла, используя отработавший пар для производственных целей. Наилучший эффект такого соединения силового и теплового хозяйства получается тогда, когда удастся настолько уменьшить расход пара двигателями, что он будет равен количеству пара, необходимого для производства.

Если N —мощность машины в лощ. силах, W_h —часовой расход тепла на производство, то $w_h = W_h : N$ —количество тепла, которое может быть расходуемо для производственных целей на 1 лощ. силу в час. Если отработавший пар должен быть полностью использован, то отбросное тепло машины на 1 л.с.-час должно быть равно или менее w_h . Зависимость величины w_h от начального давления и от противодавления представлена на диаграмме 4, показывающей, в какой высокой степени давление пара и в особенности противодавление влияет на величину w_h . Кривые диаграммы получены при термодинамическом коэффициенте полезного действия, принятом равным 80%, и при предположении, что пар вступает в машину настолько перегретым, что рабочий пар при выходе из машины как раз находится в состоянии насыщения. Диаграмма дает возможность исследовать особые условия паровой установки целлюлозного завода. Приведем такое исследование на конкретном примере.

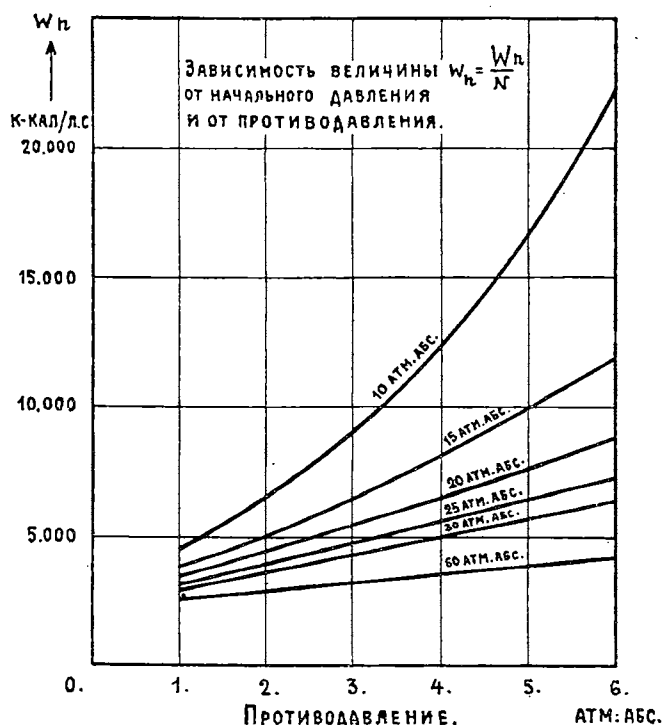
На целлюлозном заводе работают 3 варочных котла, каждый емкостью 12 тонн целлюлозы. Время оборота котла—18 часов, в том числе 3 часа на заварку и 9 часов на варку. Общее число варок в сутки—4. Расход пара на варку на 1 кгр. целлюлозы составляет 3 кгр. Общий расход пара на одну варку получается, таким образом, равным 36.000 кгр., из которых $\frac{2}{3}$, т.-е. 24.000, расходуется на заварку и $\frac{1}{3}$ —12.000 кгр. на варку. Суточный расход пара равен 144.000 кгр.



Фиг. 3. Расход тепла в конденсационной машине в зависимости от давления. $p_2 = 0,05$ атм. абс.

Для сушки целлюлозы требуется 2 кгр. пара на 1 кгр. целлюлозы; следовательно в сутки требуется на это 96.000 кгр. пара. Таким образом, общий расход пара на производство $= 144.000 + 96.000 = 240.000$ кгр. Для варки целлюлозы употребляется пар в 7 атм. абс., для сушки—в 4 атм. абс.¹⁾.

Для определения количества потребной энергии примем, что на каждые 100 кгр. часовой продукции целлюлозы требуется 25 киловатт. Отсюда мощность машины $= 0,25 (4 \times 12.000) : 24 = 500$ киловатт.



Фиг. 4.

Расход пара в машине (если он должен покрывать расход пара на производство) будет 20 кгр. на киловатт-час.

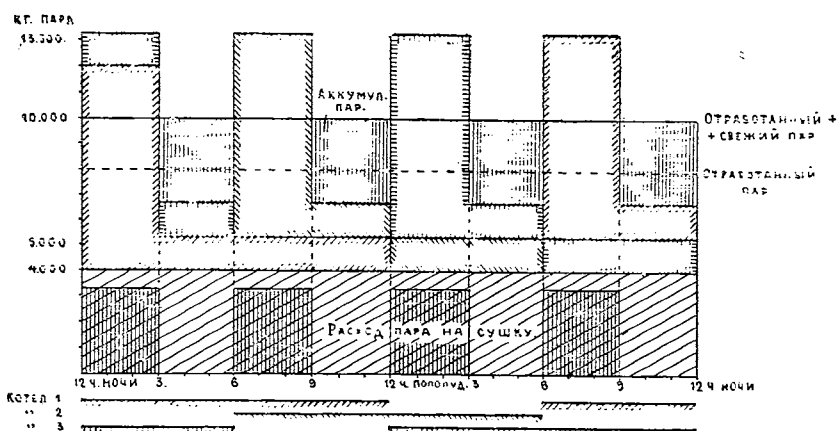
Если принять, что термодинамический коэф. пол. действия $= 75\%$, механический коэф. полезн. действия $= 95\%$, коэф. полезн. действия генератора $= 92\%$, то теоретическое падение работы пара в машине будет 65,7 кал./кгр. Если конечное давление пара в машине — 7 атм. абс., то для получения вычисленного падения

достаточно начальное давление пара в 24 атм. абс. при начальной температуре в 350°C .

На практике такая машина не даст благоприятного результата. Малейшие изменения принятого отношения между расходами пара будут иметь своим следствием излишек отъемного пара и, значит, известную потерю. Необходимо иметь достаточный интервал между нормальным расходом пара в машине и нормальным расходом пара на производство для возможности выравнивания колебаний в расходе и приходе пара. Этот интервал определяется нами в 20% . Поэтому необходимо взять машину, расход пара в которой составляет 16 кгр. на 1 киловатт-час; тогда вышенайденная нами цифра в 65,7 кал./кгр. соответственно увеличится до 82,3 кал./кгр. Для этого начальное

¹⁾ Редакция считает вполне достаточным давление пара для сушки—3 атм. абс.

давление должно быть равно 30 атм. абс., начальная температура — 175°C при противодавлении в 7 атм. абс. Суточный расход пара в машине будет 192.000 кгр. Для покрытия общего расхода пара на производство необходима, следовательно, добавка свежего пара в $192.000 - 144.000 = 48.000$ кгр. пара в 24 часа. На основании этих цифр составлена диаграмма расхода пара в течение суток. Сначала нанесен постоянный расход пара на сушку, а над ним сильно колеблющийся расход на варку. Если машина, как это предполагается, работает с равномерной нагрузкой, то она даст в час 8.000 кгр. отработавшего пара. Если при этом и котельная работает равномерно, то добавка свежего пара в час будет составлять 2.000 кгр. и в общем для производственных целей будем иметь 10.000 кгр. пара в 7 атм.



Фиг. 5. Расход пара на целлюлозном заводе.

абс. Отсюда легко получить то количество пара, которое необходимо аккумулировать. Во время трех-часового периода заварки приход пара отстаёт от расхода его на 3.330 кгр. в час, т.-е. всего должно быть взято из аккумулятора 10.000 кгр. пара; это количество, как раз составляющее разницу между приходом и расходом пара во время варки, поступает в это время в аккумулятор. Сначала пар в 7 атм. абс. идет на варку; остаток после понижения давления идет на сушку или собирается в аккумуляторе.

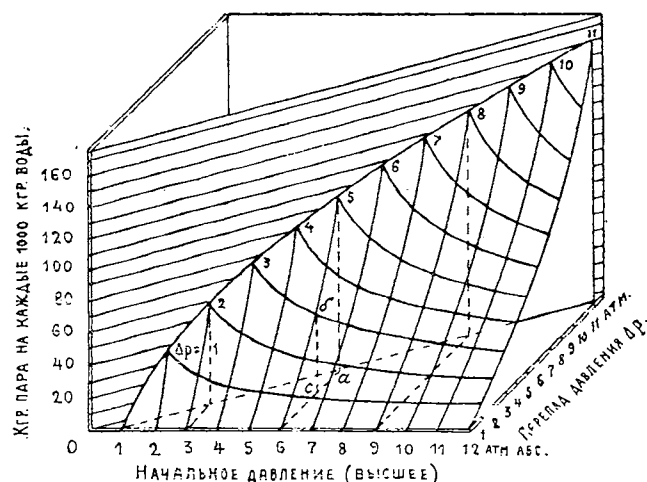
Если отказаться от совершенно равномерной нагрузки котельной установки, то количество пара, которое надо аккумулировать, может быть понижено до величины излишка отъёмного пара, получаемого в периоде между двумя заварками. Машина даёт в час 8.000 кгр. пара; расход пара на производство составляет в это время 6.660 кгр. в час, следовательно, за трехчасовой период заварки должно быть аккумулировано кругло 4.000 кгр. пара. Это является минимумом, еще обеспечивающим полное использование отъёмного пара.

Расход тепла для получения энергии для данного примера исчисляется, исходя из следующих соображений: для получения 1 кгр. пара в 30 атм. абс. давления и 375°C питательной воды с темпера-

турой в 100°C требуется 660 кал. Проходящий через машину пар превращает там в кинетическую энергию 82,3 кал./кг. пара. Так как через машину проходит только 80% всего количества пара, то из общего расхода тепла на получение энергии идет

$$0,8 \times (82,3 : 660) \times 100 = 10\%.$$

Определение величин аккумулятора пара. Известно, что производительность аккумулятора с водяным пространством, о котором здесь только и может быть речь, растет с увеличением перепада давления и особенно с уменьшением давления пара. В данном случае давление пара в варочном котле представляет собой высший предел — 7 атм. абс., а низшим пределом является давление пара, которое принято здесь равным 4 атм. абс. Диаграмма 6 показывает влияние давления пара и перепада давления на мощность аккумулятора пара. При 6 атм. абс. максимального давления отрезок ВС представляет собой



Фиг. 6. Мощность аккумулятора пара в зависимости от давления пара и перепада давления.

мощность аккумулятора при перепаде давления на 3 атм., а отрезок аБ ту же мощность при перепаде давления на 5 атм.

По диаграмме 6 вычислены приведенные в нижеследующей таблице количества воды в аккумуляторе, которые необходимы для запаса 10.000 и соотв. 4.000 кг. пара при перепадах давления с 7 до 4, 7 до 3 и 7 до 2 атм. абс.

Содержание воды в аккумуляторе.

Перепад давления в аккумуляторе.	Мощность аккумулятора	
	10.000 кг.	4.000 кг.
7 — 4 атм. абс.	230.000 кг. воды	92.000 кг. воды
7 — 3 " "	166.000 " "	66.400 " "
7 — 2 " "	113.000 " "	45.200 " "

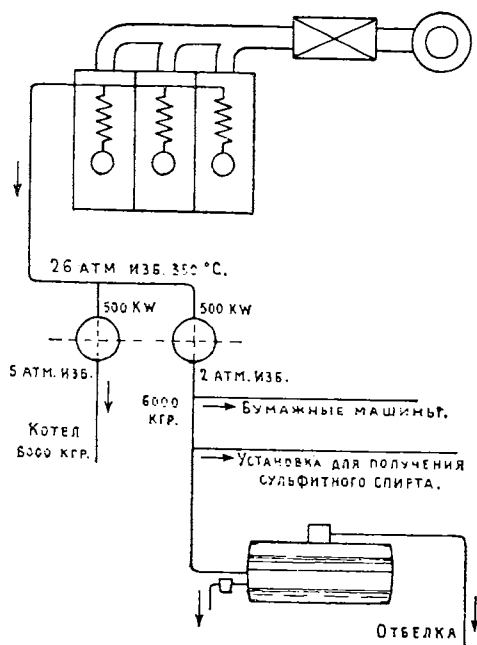
Установки с приблизительно постоянным расходом пара на производство. На заводах, имеющих не менее 6 варочных котлов и работающих при условиях, приведенных выше для нашего примера, вполне

нужно достичь приблизительно постоянного расхода пара. В этом случае отпадает необходимость аккумуляирования пара и представляется возможным применение двухступенчатой машины, которая при одинаковом начальном состоянии пара дает большую производительность или одинаковую производительность при более низком начальном давлении. В данном случае при начальном давлении 30 атм. абс. и 375°C температуры пара из общего количества пара в 4.800 кгр. в час на варку и 3.200 кгр. в час на сушку при применении двух ступеней с конечным давлением 7 и 4 атм. абс. достигается мощность машины в 567 киловатт. При уменьшении давления пара, идущего на сушку, до 2 атм. эта мощность повышается до 637 киловатт.

Представленная схематически на фиг. 7 установка работает на одном целлюлозном заводе, в котором число варочных котлов достаточно для достижения равномерного отъема пара. Давление пара в котле—27 атм. абс. К двум одноцилиндровым паровым машинам с противодавлением, работающим с давлением при выпуске пара в 6 и 3 атм. абс., подводится рабочий пар 26 атм. абс. и 350°C . Отработавший пар низшего давления идет на сушку, отбелку и на установку для получения сульфитного спирта. Так как пар, идущий для отбелки, не должен содержать масла и, поэтому, непосредственное применение отработавшего пара из поршневой машины не могло иметь места, то для получения пара на отбелку был приспособлен котел с жаровыми трубами, при чем последние служили поверхностью нагрева для отработавшего пара из машины.

Описанная установка работает без аккумулятора с совершенным, тем не менее, использованием отъемного пара для производственных целей.

В последние годы уже работает целый ряд паровых установок с давлением до 30 атм. Опыт ближайших лет укажет, какие требования должны быть предъявлены к конструкции, материалу, постройке, и работе котлов высокого давления. В качестве двигателей должны будут еще несколько лет применяться паровые машины, поскольку разница между термодинамическим коэф. полезного действия паровых машин и паровых турбин еще слишком велика—20—30%. Улучше-



Фиг. 7. Схема паровой установки целлюлозного завода.

нием конструкции паровых турбин их термодинамический к. п. д. для данных пределов давления в некоторых случаях уже доводится до 80%. Если дальнейшие опыты покажут, что такой к. п. д. станет обычным для паровых турбин без ущерба для безопасности их работы, то разница между машинами и турбинами возможно сделается настолько малой, что турбины станут применяться на целлюлозных заводах наравне с машинами.

Из всего вышеизложенного можно сделать следующий вывод:

На целлюлозных заводах при нормальных условиях уже при применении пара в 30 атм. абс. и 375°C и при одноступенчатой паровой машине с противодавлением возможно совершенное использование отработавшего пара для производственных целей, при чем необходимый для получения энергии расход тепла составит только 10% от общего количества тепла. Этот наиболее благоприятный результат достигается и при более низких начальных давлениях пара в установках с приблизительно равномерным расходом тепла и при применении двухступенчатых машин ¹⁾.

М. В.

¹⁾ Выводы автора сохраняют свое значение только для чисто целлюлозных заводов для комбинированных предприятий получается совершенно иная картина. Ред.