

Расчет расхода пара на сушку бумаги.

В процессе удаления воды из бумаги в сушильной части бумагоделательной машины надо различать следующие моменты: 1) испарение воды из самой бумажной ленты, 2) испарение воды и водяных паров, поглощенных сукнами, 3) удаление насыщенного водяными парами воздуха от машины, 4) замену этого воздуха свежим.

Для всех этих процессов необходима известная затрата тепловой энергии, которую, за единичными исключениями (нагреваемые электрическим током сушильные цилиндры), дает водяной пар. Эта затрата не ограничивается одним лишь теплом, необходимым для испарения в единицу времени определенного количества влаги, а состоит из целого ряда отдельных слагаемых, рассмотрению которых будет посвящено дальнейшее изложение.

Удаление воды из бумаги в сушильной части самочерпки можно охарактеризовать, как физический процесс испарения жидкости при нормальном давлении в закрытом, но соединяющемся с внешним воздухом, помещении. Исходя из этого, скорость испарения, т.-е. весовые количества влаги, оставившие бумажную ленту, в единицу времени, согласно Дальтону, пропорциональны поверхности испарения Q в кв. м., разности давлений водяного пара на внешней поверхности бумаги P в мм. и в воздухе P' в мм. и обратно пропорциональны величине внешнего барометрического давления H в мм.

$$\text{Скорость испарения: } G = \frac{45,6 \cdot C \cdot (P - p) \cdot Q}{H} \frac{\text{кг}}{\text{час}} \quad (1)$$

Постоянная C зависит от скорости движения воздуха и изменяется примерно в пределах от 0,55 при неподвижном воздухе до 0,86 при сильной тяге или ветре.

Из формулы ясно, что скорость испарения тем значительнее, чем больше давление водяного пара, оставляющего поверхность бумаги, и чем меньше давление его в окружающей сушильную часть машины воздухе.

Так как величина P находится в прямой зависимости от температуры бумажной ленты, а p — от влажности окружающей воздушной среды, то для

¹⁾ Строго говоря, формула эта в данном случае не вполне точна, так как она относится к помещениям, не соединяющимся с внешним воздухом. Кроме того, несколько усложняет процесс испарения сушильное сукно. Но для основных теоретических изысканий и практических расчетов формула вполне удовлетворительна.

более быстрой сушки бумаги необходимо давать ее внешней поверхности максимальный нагрев, а влажный воздух над этой бумагой отводить возможно быстрее, заменяя его наименее влажным свежим воздухом. Казалось бы, таким образом, что надо стремиться во что бы то ни стало повысить нагрев сушильных цилиндров; однако, не следует упускать из виду, что такой нагрев влечет за собой парообразование на нижней поверхности бумаги. При этом пары, возникшие между цилиндрами и прилегающей к ним бумагой, обладая крайне плохой теплопроводностью, препятствуют повышению температуры на верхней ее поверхности, что естественно неблагоприятно отражается на величине P , т.-е. на интенсивности испарения. Кроме того, эти пары отделяют бумагу от цилиндра и затрудняют в значительной степени ее поступательное движение. С другой стороны, повышение температуры внешней поверхности сушильных цилиндров до 100° С. влечет за собою опасность закипания воды, находящейся в бумажной ленте. Процесс парообразования переносится тогда вглубь среды, и образующиеся при этом пузыри портят бумагу. Помимо этого, не следует забывать, что слишком интенсивный нагрев бумаги может вредно отразиться на прочности и проклейке бумаги.

Переходя к величине поверхности испарения Q , необходимо прежде всего отметить, что она находится в прямой зависимости от так называемого коэффициента использования поверхности нагрева сушильной части.

Если Q_n — общая поверхность нагрева сушильной части, d — диаметр цилиндров, L — ширина их, N — число их, то

$$Q_n = \pi dLN + \frac{\pi d^2}{4} \cdot N \dots \dots \dots (2)$$

Обозначая действительную поверхность соприкосновения бумаги с цилиндрами через Q , рабочую ширину машины через l , число бумаго-сушильных цилиндров через n , а степень их охвата бумажной лентой через α , имеем:

$$Q = \pi d n \cdot \alpha \cdot l \dots \dots \dots (3)$$

Отсюда коэффициент использования поверхности нагрева $\varepsilon = \frac{Q}{Q_n} = \varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_n} = \frac{\pi d n \alpha l}{\pi d L N + \frac{\pi d^2}{4} N} = \alpha \cdot \frac{l}{L + \frac{d}{4}} \cdot \frac{n}{N} \dots \dots \dots (4)$$

т.-е. коэффициент использования поверхности нагрева сушильной части ε повышается с увеличением степени охвата сушильных цилиндров бумагой α , с приближением рабочей ширины бумаги l к общей ширине цилиндров L и с уменьшением числа сушительных цилиндров, входящих в величину N .

Коэффициент ε достигает своего максимума, равного примерно 0,46 на целлюлозо-отжимных машинах, и соответственно понижается, доходя до 0,3 и меньше на машинах для бумаг высоких сортов. Степень охвата цилиндров бумагой α колеблется от 0,8 при самосъемочных машинах до 0,7 и ниже.

Теоретическое количество пара, необходимое для получения 1 кг сухой бумаги, определяется следующим образом: если процентное содержание волокна перед поступлением на сушильную часть $= a_1\%$, а после выхода из нее, т.е. в готовой бумаге $= a_2\%$ и если далее: t_1 — температура влажной бумаги перед сушильной частью, t_2 — температура испарения воды, c_b — удельная теплота воды в $\frac{\text{кал.}}{\text{кг}/\text{C}^0}$, c_6 — удельная теплота бумажной массы в $\frac{\text{кал.}}{\text{кг}/\text{C}^0}$, и наконец, λ — скрытая теплота испарения воды при данной t_2 в $\frac{\text{кал.}}{\text{кг}/\text{C}^0}$, — то тогда теоретический расход тепла на 1 кг бумаги будет складываться из:

- 1) нагрева бумажной массы с температуры t_1 до t_2 — $(t_2 - t_1) c_6$;
- 2) нагрева воды, находящейся в бумаге с температуры t_1 до t_2 ; количество ее в одном кг абсолютно сухой массы равно $\left(\frac{100 - a_1}{a_1}\right) = \frac{100}{a_1} - 1$;

отсюда расход тепла будет: $\left(\frac{100}{a_1} - 1\right) \cdot (t_2 - t_1) c_b$;

- 3) и наконец скрытой теплоты парообразования для испарения воды при повышении содержания волокна в бумаге с $a_1\%$ до $a_2\%$ —

$$\left[\left(\frac{100}{a_1} - 1 \right) - \left(\frac{100}{a_2} - 1 \right) \right] \lambda.$$

Таким образом, общий теоретический расход тепла для удаления воды в сушильной части определится следующей величиной:

$$q = (t_2 - t_1) c_6 + \left(\frac{100}{a_1} - 1 \right) (t_2 - t_1) c_b + \left[\left(\frac{100}{a_1} - 1 \right) - \left(\frac{100}{a_2} - 1 \right) \right] \lambda \text{ кал} \quad (5)$$

считая на 1 кг абс. сухой бумаги.

Эта формула может быть отнесена с таким же успехом и к целлюлозо-отжимной машине с той лишь разницей, что существенно меняется конечная влажность продукта и температура испарения воды t_2 . По данным Лассберга ¹⁾ t_2 — для бумаги в среднем равно 90°C ., для целлюлозы — 75°C .

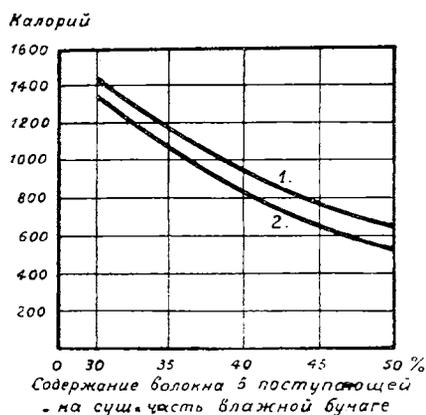
Естественно, что с повышением процентного содержания волокна при поступлении целлюлозы или бумаги на сушильную часть значительно понижается расход тепла на их сушку. Наглядно это изображено кривыми на фиг. 1, взятыми из работ Лассберга.

Условия исследования: $t_1 = 15^\circ \text{C}$, $t_2 = 90^\circ \text{C}$ (для бумаги), $t_2 = 75^\circ \text{C}$ (для целлюлозы).

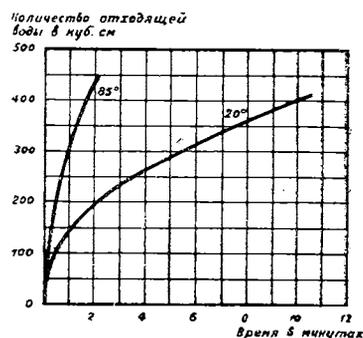
Из формулы 5 и кривых фиг. 1 видно, насколько важно в целях экономии пара перед поступлением бумажной ленты на сушильную часть отжимать из нее максимальное количество воды. Для этой цели в послед-

¹⁾ v. Lassberg. «Die Wärmewirtschaft in der Zellstoff—und Papierindustrie».

нее время многие бумагоделательные и целлюлозоотжимные машины снабжаются особыми прессами высокого давления самой различной конструкции, которые помещаются непосредственно перед сушильной частью, а иногда и монтируются на одной с нею станине. На целлюлозоотжимных машинах и некоторых бумагоделательных вал такого пресса делается поперечно-рифленным, и тогда такой пресс, расходуя в среднем 10—20 л. с., повышает процентное содержание волокна, по литературным данным ¹⁾, до 53 и даже 55%. Считая, что с повышением содержания волокна во влажной бумаге или целлюлозе перед сушильной партией на 1% сокращается расход пара приблизительно на 3,35 до 3,66%, получим, что установка пресса высокого давления уменьшает расход пара на 40%. Если даже предположить, что приведенные данные являются предельными и что, в среднем,



Фиг. 1. Теоретический расход тепла на сушку 1 кг бумаги и целлюлозы ²⁾.



Фиг. 2. Скорость отхода воды из массы, содержащей 50% целлюлозы и 50% древесной массы.

экономия пара значительно ниже, все же надо иметь в виду, что расход энергии на механическую работу отжима в несколько раз меньше, чем расход ее на добавочный пар.

Нагревание массы или мокрой бумажной ленты перед поступлением ее на сушильную часть также значительно понижает процентное содержание воды в волокне. Так как с увеличением температуры повышается кинетическая энергия молекул воды, то величина их притяжения друг к другу уменьшается: вода становится «жиже»; кроме того, по той же причине уменьшается сила сцепления между молекулами воды и массы. Оба эти явления значительно облегчают отжим воды на прессах, и бумага поступает на сушку со сравнительно высоким процентным содержанием волокна.

¹⁾ Alfthan «Woch. für die Pap.». 1922..

²⁾ 1. Бумага. Т-ра поступления на суш. часть—15° С, т-ра испарения—90° С, $\alpha_2 = 100\%$. 2. Целлюлоза. Т-ра поступления на суш. часть—15° С, т-ра испарения—75° С, $\alpha_2 = 88\%$.

Особенно рекомендуется установка между 2-м и 3-м прессом небольшого сушильного цилиндра, который подогревает бумажную ленту на 60—70° С и повышает конечный эффект отжима воды мокрыми прессами на 4%, что влечет за собой, в свою очередь, повышение производительности машины на 5,4%.

Однако, не следует упускать из виду, что всякое подогревание массы или самой бумаги, до прохода ее через все пресса, естественно требует само по себе значительного расхода тепла, так как приходится подогревать и ту воду, которая стекает на сетке или на прессах. Правда, эта вода в значительной мере снова поступает на машину, но по пути она, конечно, опять остывает, и поэтому необходим постоянный приток тепловой энергии для поддержания степени ее нагрева.

Для некоторых бумаг, как, например, пергамина, с очень жирным размолом, подогревание массы даже крайне желательно в виду очень сильного сцепления молекул воды и массы между собой. Как известно, общая сила сцепления пропорциональна поверхности соприкосновения. В других случаях такой предварительный нагрев очень хорошо отражается на взаимной укладке волокон в толще бумаги. Вообще следует отметить, что повышение температуры массы до 20—30° весьма желательно, потому что, как видно из фиг. 2, скорость удаления воды изменяется значительно быстрее повышения температуры.

Многочисленные опытные данные, приведенные в литературе, однако, сходятся в большинстве случаев на одном и том же практическом выводе: подогревание массы, оборотной воды или самой бумажной ленты особыми брызгалками целесообразно лишь в том случае, если для этого пользоваться теплой водой конденсата и т. п., но никак не свежим паром.

Рассматривая далее формулу 5

$$Q = (t_2 - t_1) c_6 + \left(\frac{100}{a_1} - 1 \right) (t_2 - t_1) c_b + \left[\left(\frac{100}{a_1} - 1 \right) - \left(\frac{100}{a_2} - 1 \right) \right] \lambda \text{ кал.},$$

приходим к заключению, что теоретический расход тепла на сушку бумаги зависит от скрытой теплоты парообразования воды.

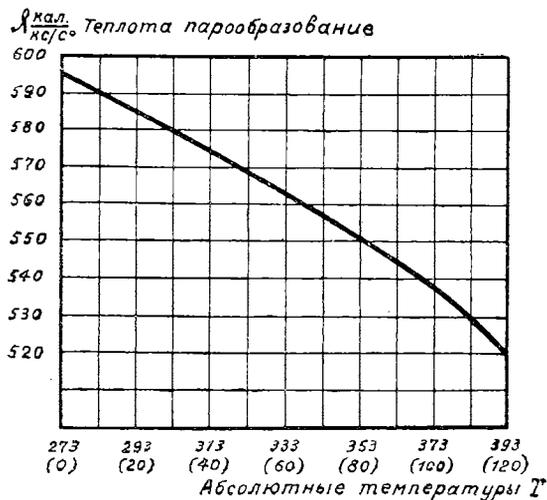
Как видно из фиг. 3, скрытая теплота парообразования зависит от абсолютной температуры и понижается с ее увеличением, следовательно с повышением температуры внешней стороны бумажной ленты t_2 . Если вернуться к скорости испарения воды из бумаги:

$$G = \frac{45,6 \text{ С. } (P - p) \cdot Q}{H} \frac{\text{кг}}{\text{час.}} \quad (1)$$

то следует обратить внимание, что с увеличением температуры испарения t_2 значительно увеличивается давление водяных паров на поверхности бумажной ленты, а следовательно и интенсивность сушки или, другими словами, величина допустимой нагрузки сушильной части. Связь между температурой и давлением водяных паров логарифмическая и графически она изображена на фиг. 4.

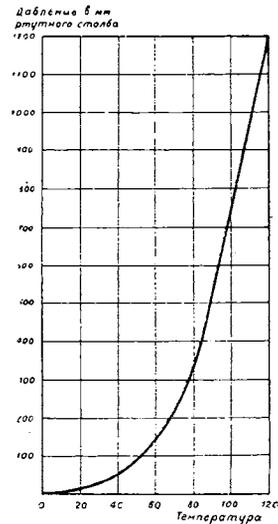
Для того, чтобы вплотную подойти к способам возможно рационального повышения этой температуры t_2 верхней поверхности бумажной ленты

на сушильной партии, необходимо несколько подробнее остановиться на ряде тепловых процессов, которые протекают в самых сушильных цилиндрах. Здесь следует прежде всего учесть коэффициент использования подводимой к ним паром тепловой энергии.



Фиг. 3.

Зависимость между теплотой парообразования и абсолютной температурой воды.



Фиг. 4. Зависимость между давлением водяных паров в воздухе и его температурой.

Если принять, что один кг пара при данных условиях работы содержит общее количество тепла = r , а количество тепла в его конденсате = q , то общее количество тепла, отданного 1 кг пара цилиндру будет,

$$V = r - q \dots (6)$$

а коэффициент его использования

$$\eta_1 = \frac{r - q}{r} = 1 - \frac{q}{r} \dots (7)$$

Рассматривая энтропийную диаграмму пара, необходимо прийти к заключению, что при более низких давлениях количество тепла в конденсате q падает несколько быстрее, чем падение общего количества тепловой энергии пара r .

Отсюда следует, что по мере падения давления пара отношение $\frac{q}{r}$ становится все меньше и меньше, а коэффициент использования тепла сушильным цилиндром η_1 приближается к единице. Этими теоретическими соображениями отчасти объясняется стремление понизить давление пара, употребляемого для сушки бумаги.

Другим основанием, которое побуждает понижать это давление является желание возможно полнее использовать энергию пара в силовых установках. Лишь там, где есть дешевая водяная сила, допустимо давать на сушку бумаги пар непосредственно из паровых котлов, почти же во

Во всех остальных случаях для этого пользуются отъемным или иным паром.

Возвращаясь к рассмотрению энтропийной диаграммы, следует особенно отметить, что падение давления пара на одну атмосферу почти не влияет на общее количество отданного им тепла. Единственно, что отражается в неблагоприятную для процесса сушки бумаги сторону, это падение температуры насыщенного пара.

Например, для пара в 3 абс. атмосферы она равна . . . 132,9° С.,
а для пара в 2 абс. атмосферы она равна 119,6° С.,
разница получается в 13,3° С.,

что, конечно, понижает в свою очередь температуру бумажной ленты.

Чтобы избежать, при переходе на более низкое давление, понижения производительности машины, успешно применяется ряд методов, о которых речь будет ниже.

Возвращаясь к коэффициенту отдачи тепла паром, следует, однако, добавить, что, конечно, не все то тепло, которое принимается сушильными цилиндрами, передается ими на бумагу.

Часть этого тепла неминуемо расходуется на обогревание окружающей среды и на лучеиспускание, так что в формулу 7—коэффициент использования тепла—необходимо ввести некоторую поправку.

Если общее количество отданного цилиндру одним килограммом пара тепла равно $(r - q)$. . . (6), а на сушку бумаги действительно использовано всего A калорий, то коэффициент этого использования

$$\mu_2 = \frac{A}{r - q} \dots \dots \dots (8)$$

Таким образом, более точный коэффициент использования тепловой энергии пара

$$\mu = \mu_1 \cdot \mu_2 = \frac{r - q}{r} \cdot \frac{A}{r - q} = \frac{A}{r} \dots \dots \dots (9)$$

Степень обогрева верхней поверхности бумаги зависит от теплопроводности среды, которая отделяет от нее пар. Теплопроводность резко падает с понижением влажности бумаги и с уменьшением степени прилегания бумажной ленты к поверхности цилиндров, так как сухая бумага и воздух являются плохими проводниками тепла.

Обозначая количество тепла, отдаваемого сушильными цилиндрами на верхнюю поверхность бумаги, через Q , имеем

$$Q = K \cdot F \cdot S (t_1 - t_2) \text{ калорий} \dots \dots \dots (10)$$

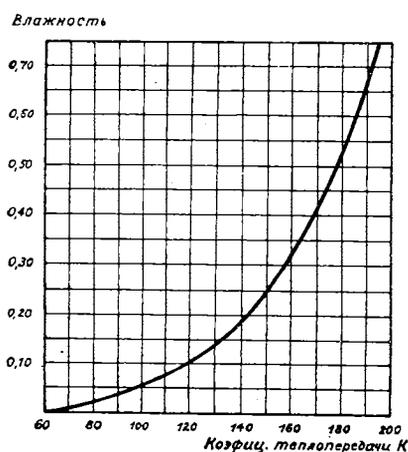
где F —поверхность соприкосновения цилиндров и бумаги в кв. метрах, S — время в часах, t_1 —температура верхней поверхности цилиндров, t_2 —температура верхней поверхности бумаги и K —коэффициент теплопередачи (за-

висящий от среды) в $\frac{\text{кал.}}{\text{кв. м/час./C}^0}$.

Между этим коэффициентом K и влажностью бумаги g существует по Линднеру ¹⁾ следующая зависимость:

$$K = 210 \sqrt[4]{g} \dots \dots \dots (11)$$

представленная графически на фиг. 5.



Фиг. 5.
Зависимость между теплопередачей и влажностью бумаги.

Чтобы сохранить неизменным количество тепла Q , подводимого к верхней поверхности бумаги, необходимо в конце сушильной части повысить температуру нагрева цилиндров t_1 (см. формулу 10), что и делается при желании провести сушку бумаги возможно равномернее.

Дабы избежать плохого прилегания бумаги к цилиндрам и понизить разность $(t_1 - t_2)$, доходящую иногда до $10^\circ - 20^\circ \text{C}$., употребляются особые прижимные валики, которые препятствуют образованию вышеупомянутых воздушных прослоек. Конечно, эти валики необходимы лишь там, где введен интенсивный нагрев сушильных цилиндров, не отражающийся на качестве бумаги.

Бумажная лента, находясь между цилиндрами, продолжает испарять воду и черпает, охлаждаясь, скрытую теплоту испарения из своего собственного нагрева. Это охлаждение крайне нежелательно и не только вредно отражается на качестве бумаги, но и требует добавочной теплоты со следующего сушильного цилиндра для повторного нагревания бумажной ленты до данной температуры испарения.

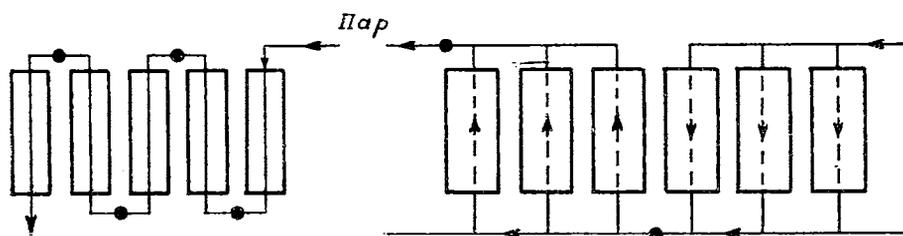
Помимо чисто конструктивных возможностей укоротить путь бумаги между сушильными цилиндрами, существует еще ряд способов устранения этих температурных колебаний, о которых речь будет ниже. Следует вообще сказать, что скачки в температуре верхней поверхности бумаги, при проходе ее через сушильную партию, чем бы они ни вызывались, должны быть устранены; в частности, должно быть обращено особое внимание на наиболее рациональный способ подачи пара в сушильный цилиндр. Остановившись на этом вопросе, необходимо между прочим отметить, что, поскольку есть возможность поддерживать температуру перегретого пара постоянной, этот пар также вполне пригоден для сушки бумаги. Дело в том, что теплопроводность бумаги, особенно сухой, значительно ниже теплопроводности перегретого пара, а поэтому никаких резких колебаний по пути движения тепла к верхней поверхности бумажной ленты не замечается.

¹⁾ Lindner. «Über die Wirkung der Trockenpartie». «Woch.» 1916.

Но, поскольку существует, как было отмечено выше, стремление пользоваться для сушки отъемным паром, его подводят в цилиндры возможно низкого давления.

Часто, однако, желательно (см. выше) и даже необходимо (сушка сукон) подавать в некоторые цилиндры пар более высокого давления, чем принято в производстве. В этом случае пользуются иногда паром, прошедшим уже раз через сушильный цилиндр, доводя его в особом компрессоре, при незначительной добавочной затрате свежего пара, до желаемого давления.

При таком методе работы имеется в виду групповое обогревание сушильной части со всеми его преимуществами. Не задерживаясь в цилиндрах, пар через них продувается и отдает, по выходе из каждого цилиндра, свою влагу особым приемникам. Способ продувания различен. Пар, либо поступает в каждый цилиндр в направлении встречном ходу бумаги последовательно, либо идет одновременно по нескольким цилиндрам, чтобы



Фиг. 6.

по выходе из них, отдать свою влагу приемникам и снова поступить в следующую серию (см. фиг. 6).

Описанный способ пропускания пара через сушильную часть исключает черпачные приспособления и отдельные конденсационные горшки, а также устраняет возможность образования на внутренней поверхности самих цилиндров водяной пленки.

Следует отметить, что для увеличения циркуляции пара намечалось снабжение сушильных цилиндров особыми помещенными в них внутренними барабанами; однако, сколько-нибудь значительного практического применения эти приспособления не получили. Выше было указано, что коэффициент использования пара, поступающего в сушильные цилиндры, понижается в виду того, что часть тепла идет на лучеиспускание и обогревание окружающей среды, особенно, если степень охвата этих цилиндров бумагой невелика.

Учитывая неизбежность дополнительного расхода пара на обогревание помещения и потолка его во избежание капания конденсирующейся воды, учитывая далее желательность возможно высоких температур между цилиндрами, дабы препятствовать конденсации водяных паров на сукнах, и принимая, наконец, во внимание обогревание свежего воздуха и связанное с этим повышение его способности поглощать водяные пары, — не при-

воздуха под давлением в 300—600 мм водяного столба. По литературным данным этот метод повышает допустимую нагрузку сушильной части на 15%.

Практически он применяется в большинстве строящихся новых быстросходных машин, но и старые машины могут снабжаться соответствующими приспособлениями, ибо выполнение их очень несложно.

Поскольку для нагрева этого воздуха использована теплота конденсата из сушильных цилиндров,—вся аппаратура не требует дополнительной затраты тепловой энергии и значительно понижает добавочный расход тепла C на обогревание воздуха и, в известной мере, также расход тепла A в самой сушильной части.

Количество тепла, требуемое для поддержания в известном помещении определенной температуры t_n , тем выше, чем ниже температура внешнего воздуха t_b . Кроме того, это количество Q зависит от коэффициента теплопередачи K , выраженного в $\frac{\text{Кал.}}{\text{кв. м / час. / } 1^\circ \text{C.}}$, того материала, из которого сделано данное помещение.

Обозначая поверхности отдельных стен, потолка, перекрытий и т. д. через F_1, F_2, F_3, \dots , а соответствующие им величины K через K_1, K_2, K_3, \dots и т. д., имеем

$$Q = F_1 K_1 + F_2 K_2 + F_3 K_3 + F_4 K_4 \dots (t_n - t_b) \dots (13)$$

Расчет количества тепла, необходимого для нагрева свежего воздуха, подводимого к сушильной части, надо вести следующим образом: если бумага поступает на сушильную часть с содержанием волокна равным $a_1\%$, а покидает ее с содержанием волокна $= a_2\%$, то на 1 килограмм абсолютно сухой бумаги надо удалить

$$\left(\frac{100 - a_1}{a_1} - \frac{100 - a_2}{a_2} \right) = \left(\frac{100}{a_1} - 1 \right) - \left(\frac{100}{a_2} - 1 \right) \text{ кг воды. (14)}$$

Допустим далее, что температура внешнего воздуха равна t_b , а его относительная влажность — φ_1 и он содержит в одном килограмме m_1 водяного пара.

Отмечая из соответствующей таблицы или кривой (фиг. 7) максимальное количество водяного пара, могущего при данной температуре t_b быть принятым одним килограммом воздуха, и обозначая это количество через m_2 , имеем:

$$\frac{m_1}{m_2} = \varphi_1; m_1 = m_2 \varphi_1 \dots (15)$$

Отсюда следует, что данное количество воздуха (1 кг) может принять еще до полного насыщения при существующих условиях

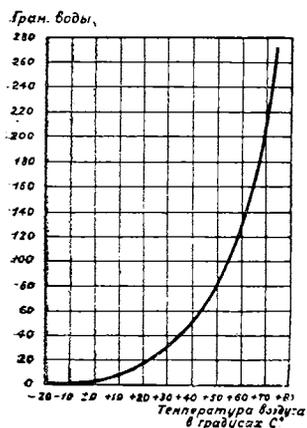
$$m_2 - m_1 = m_2 - m_2 \varphi_1 = m_2 (1 - \varphi_1) \text{ граммов водяного пара} \dots (16)$$

Если этот воздух предварительно нагреть до температуры t_n , при которой одному килограмму воздуха соответствует в момент полного насыщения m_3 граммов воды, то тогда теоретически данный килограмм воздуха может еще принять

$$m_3 - m_1 = m_3 - m_2 \varphi_1 \text{ гр. водяного пара} \dots (17)$$

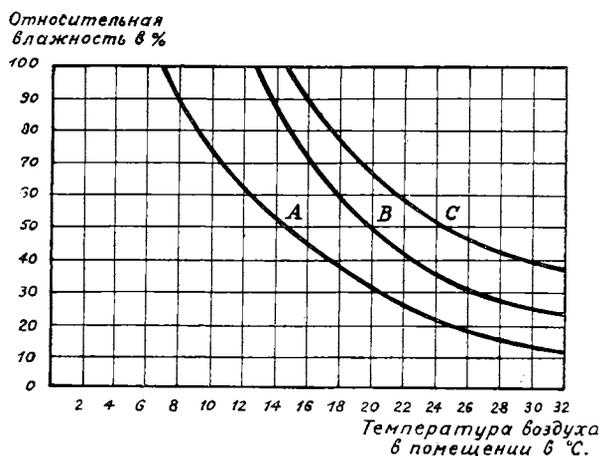
Так как в помещении трудно насытить воздух на 100%, без того, чтобы он не давал тумана, который появляется иногда уже при 90% относительной влажности, то принято как максимально допустимую относительную влажность принимать 85%.

Следует еще сказать, что в данном вопросе играют крупную роль гигиенические соображения, которые заставляют, по крайней мере перед машиной на высоте человеческого роста, не повышать относительной влажности воздуха более 65%. Подробно эти данные видны из фиг. 8.



Фиг. 7.

Кривая насыщения влажного воздуха (грам. воды в 1 кг воздуха).



Фиг. 8.

Предельные кривые для пребывания во влажном воздухе¹⁾. Все точки вправо от кривых вредны для здоровья.

Но, так или иначе, определяя предельную относительную влажность над машиной через φ_2 , имеем:

$$\frac{m_4}{m_3} = \varphi_2 \text{ или } m_4 = m_3 \varphi_2 \dots \dots \dots (18)$$

где m_4 количество влаги, которое практически может принять 1 кг воздуха при данной температуре t_n и предельной допустимой относительной влажности φ_2 .

Таким образом, см. формулу 15, количество водяных паров, поглощаемых одним килограммом воздуха, выразится следующим равенством;

$$m_4 - m_1 = m_3 \varphi_2 - m_2 \varphi_1 \text{ граммов } \dots \dots \dots (19)$$

где, следовательно:

m_3 — количество водяных паров в 1 кг влажного воздуха в момент его насыщения при данной температуре помещения равной t_n ,

m_2 — количество водяных паров в 1 кг влажного воздуха в момент его насыщения при данной температуре внешнего воздуха равной t_b ,

¹⁾ А—предельная кривая для работы в неподвижном воздухе; В—предельная кривая для пребывания в неподвижном воздухе; С—предельная кривая для неподвижного пребывания в воздухе, струящемся со скоростью 1 м/мин.

m_4 — количество водяных паров, которое при данных условиях практически может поглотить 1 кг влажного воздуха,

m_1 — количество водяных паров в 1 кг внешнего воздуха,

φ_1 — относительная влажность внешнего воздуха,

φ_2 — допустимая относительная влажность над машиной.

Отсюда следует, что для испарения 1 кг воды нужно располагать

$$L = \frac{1.000}{m_3 \varphi_2 - m_2 \varphi_1} \text{ кг. влажного воздуха} \dots \dots \dots (19a)$$

Принимая, что удельная теплота воздуха при постоянном давлении:

$c_p = 0,24 \frac{\text{кал.}}{\text{кг } ^\circ\text{C}}$, определяем, что для подогревания этого количества воздуха внешней температуры t_b до желательной температуры помещения необходимо затратить

$$Q = \left(\frac{1.000}{m_3 \varphi_2 - m_2 \varphi_1} \right) \cdot (t_n - t_b) \cdot c_p \text{ кал.} \dots \dots \dots (20)$$

Последняя формула не вполне точна, так как в ней не принят во внимание находившийся первоначально во воздухе водяной пар с несколько другим c_p , чем самый воздух. Строго говоря, величина Q складывается из двух компонентов:

Q' — количество тепла, потребное для нагревания воздуха —

$$\left(\frac{1.000}{m_3 \varphi_2 - m_2 \varphi_1} - \frac{m_2 \varphi_1}{m_3 \varphi_2 - m_1 \varphi_1} \right) (t_n - t_b) \cdot c'_p \dots \dots (21)$$

и Q'' — количество тепла, необходимое для подогревания уже находящегося в нем пара —

$$\frac{m_2 \varphi_1}{m_3 \varphi_2 - m_2 \varphi_1} \text{ кг:}$$

$$Q'' = \frac{m_2 \varphi_1}{m_3 \varphi_2 - m_2 \varphi_1} (t_n - t_b) \cdot c''_p \dots \dots \dots (22)$$

где c''_p — удельная теплота водяного пара при постоянном давлении.

Таким образом:

$$Q = Q' + Q'' \dots \dots \dots (23)$$

однако Q'' по сравнению с Q' настолько незначительно, что им можно при приблизительных расчетах пренебречь и считать лишь влажный воздух, как сухой.

Для получения 1 кг готовой бумаги конечной влажности $(100 - a_2)\%$ надо удалить

$$\frac{a_2}{100} \left[\left(\frac{100}{a_1} - 1 \right) - \left(\frac{100}{a_2} - 1 \right) \right] \text{ кгр. воды} = N = \frac{a_2 - a_1}{a_1}.$$

Подходим к общему расходу тепла Q_o на подогревание всего подводимого к машине воздуха:

$$Q_o = Q \cdot N \cdot P \text{ калорий} \dots \dots \dots (24)$$

где P — часовая продукция машины «брутто».

Как было отмечено выше, неохваченная бумагой сушильная часть машины, свободные поверхности сукон и наконец сама бумажная лента.

отдают в окружающее пространство известное количество тепла, которое, конечно, понижает добавочный расход его на отопление здания и обогревание свежего воздуха.

Исчисление этого количества тщательно разработано ¹⁾ и может быть проведено следующим образом, если: α — степень охвата бумагосушильных цилиндров бумагой, L — ширина цилиндров, l — ширина бумажной ленты, l' — ширина сукна, d — диаметр бумагосушильных цилиндров, d' — диаметр сукносушильных цилиндров, n_1 — число бумагосушильных цилиндров, n_2 — число сукносушильных цилиндров и β — степень охвата сукносушильных цилиндров сукном, то общая свободная поверхность сушильных цилиндров =

$$H = \left[2 \cdot \frac{\pi d^2}{4} + \pi d (L - l) + (\pi dl - \pi dl\alpha) \right] n_1 + \left[2 \cdot \frac{\pi d'^2}{4} + \pi d' (L - l') + \pi d' l' (1 - \beta) \right] n_2 \dots \dots \dots (25)$$

Если далее температура пара в цилиндрах = t_1 , температура воздуха вокруг сушильной части = t_2 и K — коэффициент теплопередачи в $\frac{\text{кал.}}{\text{кг} \cdot \text{час} / ^\circ \text{C}}$ (в виду небольшой скорости цилиндров зависимостью между K и скоростью движения можно пренебречь), то отдача тепла в час:

$$q_1 = H \cdot K (t_1 - t_2) \dots \dots \dots (26)$$

или, обозначая часовую производительность машины через p , отдача тепла свободными поверхностями цилиндров, отнесенная к 1 кг готовой бумаги

$$q = \frac{H \cdot K (t_1 - t_2)}{p} \dots \dots \dots (27)$$

К этой величине следовало бы прибавить тепло, отдаваемое в окружающий воздух станинами и другими частями сушильной части, соприкасающимися с цилиндрами, но оно сравнительно незначительно и количеством его можно пренебречь.

Попутно следует сказать несколько слов об отдаваемой цилиндрами, лучистой тепловой энергии:

$$q_e = F \cdot \varphi \cdot \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{Q}{100} \right)^4 \right] \dots \dots \dots (28)$$

где F — площадь в кв. метрах, σ — коэффициент лучеиспускания в $\frac{\text{калориях}}{\text{квм} / \text{час} / ^\circ \text{C}}$, T_1 — температура тепловой поверхности (абс. темп.), Q — температура противоположной холодной поверхности (абс. темп.), φ — функция угла между обоими поверхностями ²⁾.

¹⁾ 1) V. Hüttig. „Heizungs—und Lüftungsanlagen in Fabriken“. 2) Lassberg, там же. 3) Mallich. „Woch“ 1921. 4) Strauch. „Pap. Fabr“. Festheft 1922.
²⁾ Otto. „Die zahlenmässige Bewertung von Heizflächenanord“ Z. Bayr. Rev. 1924.

Коэффициент лучеиспускания

$$\sigma = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c}} \dots \dots (29),$$

где

- c_1 — коэффициент лучеиспускания теплой поверхности,
- c_2 — » » противоположной холодной стены,
- c — » » абсолютно черной поверхности.

В данных расчетах величина q_e однако не играет особенно существенной роли, так как, хотя днища цилиндров отдают довольно много лучистого тепла, его количественная величина, благодаря сравнительно невысокой температуры днищ, относительно невелика. Кроме того, в виду того, что воздух диатермический газ,—тепловые лучи его не нагревают и всецело поглощаются стенами здания.

Учтя количество тепла, отданное цилиндрами при соприкосновении их с воздухом q , переходим к потерям тепла сукном и бумагой.

По Малиху¹⁾ для определения этих величин надо различать следующие моменты: 1) ход бумаги по сушильным цилиндрам без сукон, 2) ход бумаги по воздуху, 3) ход бумаги по сушильным цилиндрам с сукном, 4) ход сукна по сукносушильному цилиндру, 5) ход сукна по воздуху.

Приступая к разбору 1-го пункта этой классификации, следует оговориться, что он относится к машинам без сушильных сукон. Отдача тепла частью бумаги F_1 , находящейся на цилиндрах, определится формулой:

$$Q_1 = F_1 \cdot K_1 (t_{\text{пар}} - t_{\text{воздух}}) z \dots \dots (30)$$

где K_1 — коэффициент теплопередачи, а z — время.

Если машина выработала за это время P_1 кг бумаги, то отдача тепла на 1 кг бумаги по пункту 1-му будет

$$Q'_1 = F_1 K_1 \left(\frac{t_{\text{пар}} - t_{\text{воздух}}}{P_1} \right) z \dots (31)$$

Коэффициент теплопередачи K_1 выражен в $\frac{\text{кал.}}{\text{квм/час/}^\circ\text{C}}$

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\beta_1}{\gamma_1} + \frac{\beta_2}{\gamma_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \dots \dots (32)$$

где α_1 — коэффициент отдачи тепла паром цилиндру в $\frac{\text{кал.}}{\text{квм/час/}^\circ\text{C}}$, β_1 — толщина стенок цилиндра в метрах, γ_1 — теплопроводность сушильного цилиндра, β_2 — толщина бумаги в метрах, γ_2 — теплопроводность бумаги, α_2 — коэффициент отдачи тепла бумагой воздуху в $\frac{\text{кал.}}{\text{квм/час/}^\circ\text{C}}$.

¹⁾ Малих, там же.

Величины, относящиеся к бумаге, изменяются в зависимости от ее влажности. Из форм. 11 можно определить величину α_2 ($= 60 - 340$ $\frac{\text{кал.}}{\text{кв. м/час.}^\circ\text{C}}$ в зависимости от влажности).

$$K = 210 \sqrt[4]{g} \dots (11)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\beta}{\gamma} + \frac{1}{\alpha_2}} \dots (11_a)$$

остальные данные находятся в соответств. таблицах (см. в конце).

Переходя к отдаче тепла бумагой, идущей между цилиндрами свободно по воздуху, подходим к величине:

$$Q_2 = 2 F_2 \alpha_2 = (t_{\text{бум}} - t_{\text{воздух}}) \dots (33)$$

где α_2 — коэффициент отдачи тепла бумагой воздуху.

Коэффициент 2 включен в формулу, так как в данном случае надо учитывать отдачу тепла обоими поверхностями бумаги.

Температура бумаги, которая на верхней стороне ее бывает иногда на $10-20^\circ$ выше, чем на нижней, берется средней. Относя отдачу тепла к 1 кг бумаги, имеем:

$$Q_2^1 = \frac{2 F_2 \alpha_2 z (t_s - t_b)}{p} \dots (34)$$

За время хода по сушильным цилиндрам вместе с сукном бумага отдает тепло:

$$Q_3 = F_1 K_2 z (t_n - t_b) \dots (35)$$

на 1 кг бумаги:

$$Q_3^1 = \frac{F_1 K_2 z (t_n - t_b)}{p} \dots (36)$$

при чем

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\beta_1}{\gamma_1} + \frac{\beta_2}{\gamma_2} + \frac{\beta_3}{\gamma_3} + \frac{1}{\alpha_3}} \dots (37)$$

где α_1 — коэффициент отдачи тепла паром цилиндру (примерно $6.000-8.000$ $\frac{\text{кал.}}{\text{кв. м/час.}^\circ\text{C}}$)

- α_3 — коэффициент отдачи тепла сукном воздуху,
- β_1 — толщина цилиндра в метрах,
- β_2 — » бумаги »
- β_3 — » сукна »
- γ_1 — теплопроводность цилиндра,
- γ_2 — » бумаги,
- γ_3 — » сукна.

Опять-таки следует оговориться, что величины, относящиеся к сукну и бумаге, меняются в зависимости от влажности последних.

Конечно, в расчетах принимается либо пункт 1-й, либо 3-й, в зависимости от того, производится ли сушка с сукном или без него.

Во время движения по сукносушильному цилиндру сукно отдает тепло:

$$Q_4 = F_4 \cdot K_3 \cdot z (t_{\text{пар}} - t_{\text{воздух}}) \dots \dots \dots (38)$$

на 1 кг бумаги:

$$Q_4' = \frac{F_4 \cdot K_3 \cdot z (t_{\text{п}} - t_{\text{в}})}{p} \dots \dots \dots (39)$$

где:

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\gamma_1} + \frac{\delta_3}{\gamma_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \dots \dots \dots (40)$$

α_3 — коэффициент отдачи тепла сукном воздуху, а все остальные величины те же, что и выше.

Наконец, во время свободного хода по воздуху отдача тепла сукном

$$Q_5 = 2 F_5 \cdot z \cdot \alpha_3 (t_{\text{сукно}} - t_{\text{воздух}}) \dots \dots \dots (41)$$

или на 1 кг бумаги:

$$Q_5' = \frac{2 F_5 \cdot z \cdot \alpha_3 (t_{\text{с}} - t_{\text{в}})}{p} \dots \dots \dots (42)$$

где значение α_3 то же, что и в форм. 40.

Итак, общая отдача тепла бумагой и сукнами от соприкосновения с воздухом определится формулой:

$$Q = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \text{ (сушка с сукном)} \dots \dots (43)$$

или

$$Q = Q_1 + Q_3 \text{ (сушка без сукна)} \dots \dots \dots (44)$$

Лучеиспусканием бумаги и сукна можно за незначительностью пренебречь.

На основании вышеприведенных расчетов и непосредственных наблюдений Малих подошел к известным цифровым данным, которые графически изображены приведенными кривыми.

Все эти расчеты требуют конечно знания целого ряда величин, экспериментальное определение которых сопряжено со значительными трудностями.

Помимо точной кубатуры здания необходимо располагать исчерпывающим материалом о конструкции машины, характере изготавливаемой бумаги, ее влажности в различных частях сушильной части, сведениями об условиях работы, таблицами коэффициентов теплопередачи и т. д. Для предварительных грубых подсчетов достаточна следующая эмпирическая формула:

$$P = k \Sigma d \cdot b \cdot Z \dots \dots \dots (45)$$

где P — производительность машины в кг/часах, Z — количество часов, Σd — сумма диаметров всех цилиндров, включая сукносушители, b — рабочая ширина машины в метрах и k — постоянная.

Величина константы k колеблется в зависимости от количества мокрых прессов, давления в цилиндрах и т. д.

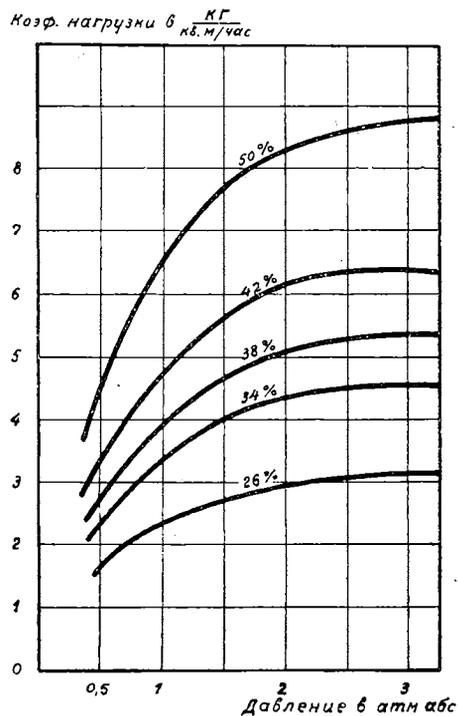
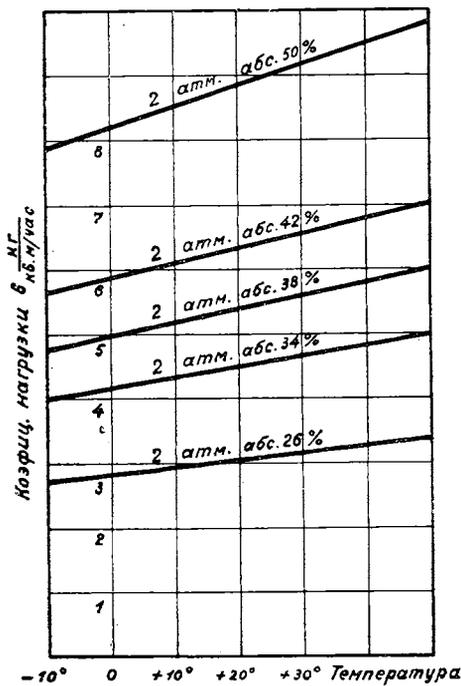
Для ротационной бумаги	»	$k = 12-15.$
» оберточной	»	$k = 15-18.$
» самосъемочной	»	$k = 20-25.$
» гравюрной	»	$k = 3$
» целлюлозы	»	$k = 20-24.$

Для правильного выбора сушильной части бумагоделательной машины, целесообразного определения числа сушильных цилиндров и т. п. можно еще рекомендовать следующую формулу:

$$P = O \cdot p,$$

где P — производительность машины в час, O — поверхность нагрева всех сушильных цилиндров, включая сукносушители и p — допустимая нагрузка сушильной части в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2/\text{час}}$.

Величина p зависит от ряда условий и может быть взята из кривых ¹⁾ на фиг. 9, 10 и 11. Конечная влажность бумаги принята в 94%.



Фиг. 9.

Зависимость коэффициента нагрузки сушильной части от температуры окружающей среды.

Фиг. 10.

Зависимость между давлением пара в сушильных цилиндрах и коэффициентом нагрузки. Т-ра окруж. среды — 10° С.

Кривые отнесены к различному % содержанию волокна в поступающей на сушильную часть массе.

Возвращаясь к коэффициенту использования тепла, поданного к сушильной части:

$$M = \frac{A}{B + C} \dots \dots \dots (12)$$

и вспоминая, что A — теоретическое количество тепла для сушки бумаги, B — количество тепла, подведенное к сушильным цилиндрам, а C — доба-

¹⁾ Schiebuh r. «Die Verminderung der Selbstkosten in der deutschen Papierindustrie. Strauch. «Pap.-Fabr». 1923.

значное тепло для отопления, вентиляции и т. д., — следует оговорить 4-й из помеченных выше пунктов: возможность понижения добавочной теплоты C в счет использования тепла A , т. е. того тепла, которое в процессе сушки бумаги перешло в водяные пары, поднимающиеся над сушильной частью. До сего времени возникали заботы лишь о том, чтобы воспрепятствовать конденсации этих паров у потолка и избежать явления капания сконденсированного пара.

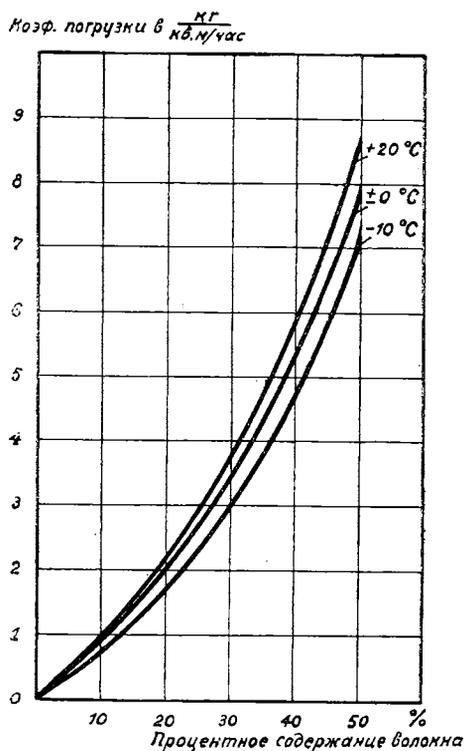
Для этого под потолком прокладывались трубы, либо тонкие, через которые прогонялся пар, либо значительного поперечного сечения для теплого воздуха, а также устраивались вытяжки всевозможных размеров и форм, вентиляторы и т. п., чтобы повысить тягу над машиной. Расход пара для обогрева потолка подавался примерно в 8—10%, сверх положенного на сушку бумаги.

Строго говоря, эти цифры довольно неточны и правильной определять их по расходу тепла, необходимого для отопления здания (см. форм. 13).

Здесь следует еще заметить, что значительный расход пара на обогревание потолка объяснялся часто слишком большим количеством вдуваемого в помещение свежего воздуха. Совершенно ясно, что к сушильной части самочерпки следует подавать лишь столько воздуха, сколько теоретически требуется для поглощения им водяных паров (см. форм. 19а). Всякий излишек служит нежелательным балластом, повышающим расход тепловой энергии для его обогрева, или, при постоянной величине такового, понижающим температуру помещения.

В самое последнее время в Швеции и Америке вопрос о передаче тепла, заключенного в отходящей смеси «воздух + пар» уже разрешен в положительном смысле.

Пространство над сушильной частью машины, заключается в особые ширмы¹⁾ или перекрывается колпаком, и поднимающийся от нее влажный воздух искусственно направляется к особому калориферу, через который



Фиг. 11.

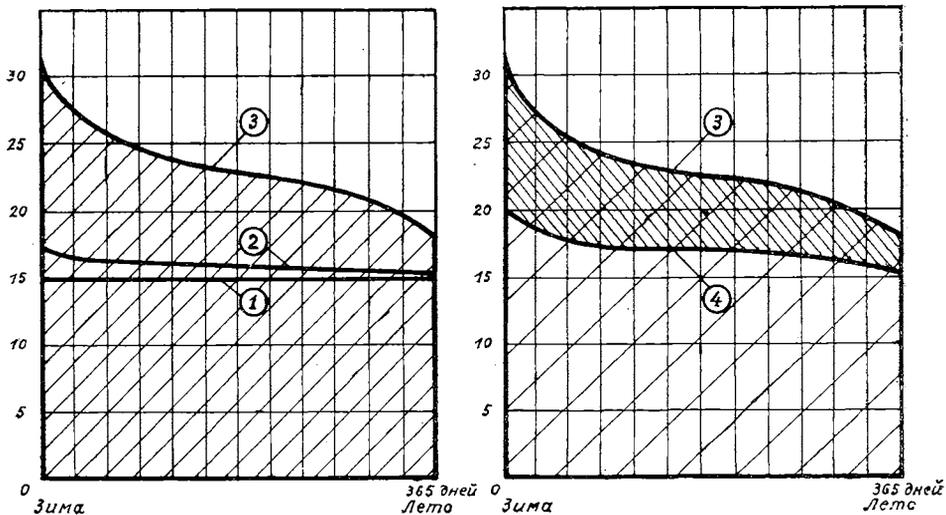
Зависимость между коэф. загрузки и % содержанием волокна в массе при поступлении на сушильную часть. Кривые отнесены к различным температурам окружающего воздуха.

¹⁾ F. Gre win. «Wärme und Kraft in der Papierindustrie».

пропускается холодный воздух, поступающий в помещение бумагоделательной машины извне.

Описанная установка довольно сложна и требует тщательной теоретической и конструктивной проработки. Кроме того, постоянно затрачивается известная энергия для искусственного продувания воздуха в желаемом направлении. Наконец, следует всегда иметь в виду, что установочные и эксплуатационные расходы могут не оправдаться по следующей причине: поскольку на фабрике установлена паровая турбина, для нее так или иначе необходимо известное количество пара, которое затем в виде отъемного пара, не представляющего особой ценности в силовых установках, все же успешно может быть употреблено для сушки бумаги. Поэтому очень часто описанная выше экономия пара является бесцельной и как правило может рекомендоваться лишь там, где используется гидроэнергия. Но все же так или иначе ею понижается теоретически на 25—35% расход пара на сушку бумаги (см. фиг. 12). Приведенные цифры можно пока считать предельными.

Кол. в миллионах



Фиг. 12.

Годовой расход тепла на сушку бумаги на одной из шведских фабрик производительностью 10 тонн в сутки до и после установки аппаратуры для утилизации тепла, заключенного в отходящем от машины влажном и нагретом воздухе.

Расход тепла графически определяется площадями, окаймленными жирными линиями.

1. 1-я кривая ограничивает площадь, характеризующую расход тепла на подогревание воды и бумажной массы и испарение воды из бумаги.

2. Количество тепла, прошедшее сквозь стены и крышу здания заключено между кривыми 1-й и 2-й.

3. Теплота для подогревания воздуха, вентиляции и проч. представлена площадью между кривыми 2-й и 3-й.

4. При утилизации тепла по описанному способу экономия изображена графически в виде площади между кривыми 3-й и 4-й.

Климатические условия: средних широт Швеции.

Другую разновидностью такой установки является подводка труб, отсасывающих влажный воздух от машины к самым цилиндрам и пространствам между ними, чем достигается удаление паров в момент их возникновения.

Наметилась также работа под вакуумом, которая достигла своего предела на некоторых американских фабриках, где отсасывается почти чистый пар.

К сказанному выше следует лишь добавить, что искусственное продувание воздуха и т. п. создает часто явление сквозняка, и потому должно применяться с большой осторожностью.

На утилизацию тепла, заключенного в парах, отходящих от машины, а также на тепло в конденсационной воде сушильных цилиндров, следует обратить во всяком случае самое серьезное внимание. Рациональное решение этого вопроса является, по общему мнению современной зарубежной литературы, одним из самых серьезных моментов при проектировании и постройке новых бумажных фабрик.

В. Соколов.

С Е Т К И ДЛ Я БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ
МАШИ Н ВСЕХ СИСТЕМ

ЭГУТТЕРЫ ДЛ Я БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ
МАШИ Н, ВСЕМ ИЗВЕСТНОГО
НАИЛУЧШЕГО ВЫПОЛНЕНИЯ.

Образцы высылаются по требованию

ANDREAS KUFFERATH

Mariaweiler bei Düren

==== (ГЕРМАНИЯ). ====