

Из заграничной литературы.

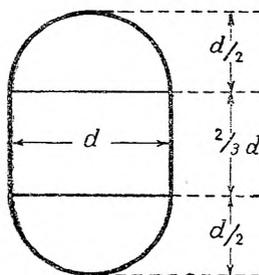
Тепловой балансе процесса варки сульфитной целлюлозы.

H. Frankenbach, „Wöch. für Pap.“, 1924 г. №№ 23 и 27.

Для варки целлюлозы, как по способу Митчерлиха, так и по способу Риттер-Кельнера, согласно данным литературы и практики, на 1 килограмм целлюлозы требуется от 2,8 до 3 кг. пара. Разберем вопрос о расходе пара и выведем тепловой баланс процесса варки сульфитной целлюлозы по обоим способам на следующем конкретном примере.

Объем котла (брутто)	225 куб. м.
Давление при варке	4 атм. избыт.
Температура „ „	140° С.
Давление пара	7 атм. избыт.
Содержание влаги в дереве	20%
Удельный вес (абс. сух.) дерева	0,45
Продолжительность варки по Риттер-Кельнеру	18 часов
„ „ по Митчерлиху	25 часов.

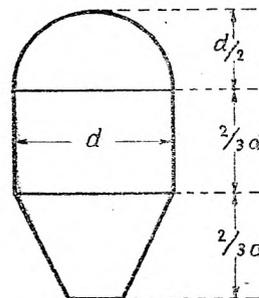
Размеры котлов обычного типа примем следующие:



Митчерлих:

$L = 10,00$ м.
 $d = 6,00$ м.
 $W = 225$ м³.
 $F = 193$ м².

$\alpha = F : W = 0,855$



Риттер-Кельнер:

11,00 м.
 6,00 м.
 225 м³.
 193 м².

0,875

где L — общая высота котла, d — диаметр, W — объем (брутто), F — поверхность, α — удельная поверхность.

Под удельной поверхностью надо понимать число кв. метров поверхности котла, падающее на каждый куб. метр его объема—брутто. Потери от лучеиспускания и прикосновения пропорциональны α ; каждый конструктор, поэтому, должен стремиться к тому, чтобы α было возможно меньше. Lassberg в своей диссертации о тепловом хозяйстве в целлюлозном производстве ¹⁾, подробно исследовал величину α . Между прочим он показал, что с увеличением емкости котла α уменьшается. В пределах от 20 до 100 куб. м. кривая круто идет вниз, затем ассимптотически приближается к оси абсцисс.

Обратимся теперь к тепловому балансу.

Тепло расходуется на:

1. потери через лучеиспускание и прикосновение,
2. нагрев железного кожуха котла,
3. „ обмуровки „
4. „ щепы,
5. „ воды, содержащейся в дереве,
6. „ кислоты,
7. „ газов, образующихся при варке.

1. Потери через лучеиспускание и прикосновение

можно вычислить, зная величину поверхности котла, коэффициент лучеиспускания и разницу температур кожуха котла и окружающего воздуха, по формуле $K = F \cdot n \cdot (t_1 - t_2) Z$, где n — коэффициент, а Z — продолжительность варки.

По Lassberg'у при вышеприведенных размерах коэффициент n колеблется в пределах от 10,8 до 11,8 кал. /м.²—11° С/ час. Rietschel определяет его в 9—11 кал., Richter ²⁾ в 10 кал.

В среднем, таким образом, коэффициент n можно принять равным 10,5 кал., что будет достаточно точно, тем более, что все вышеприведенные цифры были найдены вполне независимо друг от друга. Далее Lassberg определил, что колебания температуры кожуха котла при тех же условиях будут от +30° С до +60° С. Средняя температура будет, таким образом, равна +45° С, а разница между последней и температурой воздуха +25° С.

Следовательно, тепло, расходуемое на лучеиспускание и прикосновение $K_1 = F \cdot n \cdot (t_1 - t_2) Z$ будет

по способу Митчерлиха:

$$K_1 = 193 \cdot 10,5 \cdot 25 \cdot 25 = 1.260.000 \text{ кал.},$$

по способу Риттер-Кельнера:

$$K_1 = 198 \cdot 10,5 \cdot 25 \cdot 18 = 930.000 \text{ кал.}$$

¹⁾ V. Lassberg. „Wärmetechnische und wärmewirtschaftliche Untersuchungen aus der Zellstoff-Fabrikation“.

²⁾ „Woch. für Pap“. 1922, Festschrift. стр. 72.

2. Потери на нагрев железного кожуха котла.

Пусть толщина стенок котла будет 25 мм., удельный вес железа — 7,8, теплоемкость — 0,114 и разность температур (см. выше) = $60^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C} = 30^{\circ}\text{C}$.

Тогда расход тепла на нагрев кожуха

$$K_2 = F \cdot 0,025 \cdot 7,8 \cdot 1000 \cdot 0,114 \cdot (t_1 - t_2)$$

по способу Митчерлиха:

$$K_2 = 193 \cdot 0,025 \cdot 7,8 \cdot 1000 \cdot 0,114 \cdot 30 = 128.000 \text{ кал.}$$

по способу Риттер-Кельнера:

$$K_2 = 198 \cdot 0,025 \cdot 7,8 \cdot 1000 \cdot 0,114 \cdot 30 = 132.000 \text{ кал.}$$

3. Потери на нагрев обмуровки котла.

Примем толщину обмуровки равной 14,5 см., удельный ее вес — 2,13, теплоемкость — 0,2 и среднюю температурную разницу = $115^{\circ} - 75^{\circ} = 40^{\circ}$ (по Lassberg'у).

Тогда потеря на нагрев обмуровки

$$K_3 = F \cdot 0,145 \cdot 2,13 \cdot 1000 \cdot 0,2 \cdot (t_1 - t_2)$$

по способу Митчерлиха:

$$K_3 = 193 \cdot 0,145 \cdot 2,13 \cdot 1000 \cdot 0,2 \cdot 40 = 475.000 \text{ кал.}$$

по способу Риттер-Кельнера:

$$K_3 = 198 \cdot 0,145 \cdot 2,13 \cdot 1000 \cdot 0,2 \cdot 40 = 487.000 \text{ кал.}$$

4. Расход тепла на нагрев щепы.

Здесь, для теоретического исследования, допускается, что дерево не воздушно-сухое или сырое, а с вполне определенной степенью влажности. При критическом разборе баланса ниже мы к этому еще вернемся. Также предполагается вполне точно определенным удельный вес дерева. Согласно литературным данным удельный вес дерева колеблется от 0,44 до 0,51. Thenius⁴⁾ принимает удельный вес абсолютно сухого елового дерева равным 0,44. По Kirchner'у удельный вес воздушно-сухого дерева с 12% влажности равен 0,47, что при пересчете на абсолютно-сухое дерево дает 0,43, т.е. величину, близкую к цифре Thenius'a.

Примем удельный вес дерева равным 0,44.

Вес щепы вычисляется по весу 1 куб. м. дерева и объему нетто котла. Последний равен в данном случае 197 куб. м. Вес 1 gm. (склад метра) абсолютно сухой щепы по данным Richter'a равен 153 кгp. (при удельном весе в 0,44); по Nakanson'у⁵⁾ он составляет 150 кгp.

Таким образом, вес сухого дерева = $197 \cdot 153 \approx 31.000$ кгp.

Теплоемкость примем (по Nakanson'у) равной 0,5, разность температур будет $140^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C} = 125^{\circ}\text{C}$ и расход тепла на нагрев щепы —

$$K_4 = 31.000 \cdot 0,5 \cdot 125 = 1.940.000 \text{ кал.}$$

³⁾ Максимальная и минимальная температура середины обмуровки.

⁴⁾ Thenius. „Das Holz“.

⁵⁾ „Der Papier Fabrikant“, 1921, стр. 930.

5. Расход тепла на нагрев воды, содержащейся в дереве.

Выше мы приняли содержание влаги в дереве равным 20%. Отсюда, вес воды будет $31.000 : 4 = 7.750$ кгр. и расход тепла при увеличении температуры от 15°C до 140°C

$$K_5 = 7.750 \cdot 1 \cdot 125 = 975.000 \text{ кал.}$$

6. Расход тепла на нагрев кислоты.

Количество кислоты определяется по объему котла нетто за вычетом объема, занимаемого щепой. Последний, в свою очередь, определяется по весу дерева и его удельному весу $+2-3\%$ на разбухание и будет

$31.000 : 0,44 = 70.500 + 3\% = 72.600$ литров $= 72,6$ куб. м., а объем, занимаемый кислотой, будет $197 - 72,6 = 124,4$ куб. м.

Е. Richter в своей вышеупомянутой работе установил, что при емкости котла в 106 куб. см. около 1000 литров кислоты впитывается щепой. В нашем случае это добавочное количество кислоты соответственно составит

$$\frac{197}{106} \times 1 = 1,85 \text{ куб. м.}$$

и общее количество кислоты будет

$$124,4 + 1,85 = 126,25 \text{ куб. м.}$$

Если среднюю теплоемкость кислоты принять равной 0,98, а температурную разницу $(140^{\circ} - 25^{\circ}) = 115$, то расход тепла будет

$$K_6 = 126,25 \cdot 0,98 \cdot 115 \cdot 1000 = 14.300.000 \text{ кал.}$$

7. Расход тепла на нагрев газов, образующихся при варке.

Е. Richter определил количество газов при котле, емкостью 106 куб. см., в 3600 кгр. Оно, правда, зависит также от условий варки, но для нашего случая приведенная цифра может быть принята в основание расчета. Таким образом, количество газов в данном случае будет равно

$$\frac{197}{106} \cdot 3600 = 6700 \text{ кгр.}$$

По Richter' у теплота парообразования равна 505 калорий, откуда расход тепла равен

$$K_7 = 6700 \cdot 505 = 3.400.000 \text{ кал.}$$

Эти 3.400.000 калорий во время процесса варки выходят из котла и должны быть замещены новыми, чтобы температура держалась на уровне 140°C .

⁶⁾ Принято во внимание предварительное нагревание газами.

Суммируя все перечисленные отдельные статьи расхода, получим:

	Риттер-Кельнер.	Митчерлих.
1. Лучеиспускание	930.000	1.260.000
2. Кожух котла	132.000	128.000
3. Обмуровка котла	487.000	475.000
4. Дерево (уд. вес = 0,44)	1.940.000	1.940.000
5. Вода, содерж. в дереве	975.000	975.000
6. Кислота	14.300.000	14.300.000
7. Газы	3.400.000	3.400.000
В с е г о	22.164.000	22.478.000

Выход из воздушно-сухой целлюлозы (88%) составляет, считая на абсолютно сухое дерево, при способе Риттер-Кельнера около 43%, — Митчерлиха—около 48% ⁷⁾.

Таким образом, в нашем случае выход целлюлозы равен:

	Риттер-Кельнер.	Митчерлих.
Абсолютно сухой целлюлозы	13.300 кгр.	14.900 кгр.
Воздушно-сухой "	15.100 "	16.900 "

Расход пара определяется следующим образом: так как давление внутри котла равно 4 атм. избыт., при чем теплота жидкости составляет 150 калорий, то 1 кгр. пара дает 663 (теплосодержание пара)—150 = 513 кал.

Таким образом, расход пара при способе Риттер-Кельнера будет

$$\frac{22.164.000}{15.100 \times 513} = 2,88 \text{ кгр.}$$

В случае применения способа Митчерлиха конденсат находится под давлением в 7 атм. избыт. В этом случае теплота жидкости будет равна 175 кал. и для варки могут быть использованы с 1 кгр. пара 663 — 175 = 488 кал.

Расход пара на 1 кгр. воздушно-сухой целлюлозы в этом случае получается равным

$$\frac{22.478.000}{16.900 \times 488} = 2,74 \text{ кгр.}$$

Термический (тепловой) коэффициент полезного действия варки — это отношение тепла, расходуемого на нагрев щепы, воды и кислоты, к общему расходу тепла. Так как при способе Риттер-Кельнера используются только 513 кал., то общий расход тепла должен быть помножен на отношение 663 : 513 = 1,29, и термический коэффициент полезного действия будет равен:

$$\frac{17.215.000}{22.164.000 \times 1,29} = 60\%.$$

⁷⁾ Ср. E. Klein, „Woch. für Pap.“ 1920, стр. 2887.

При способе Митчерлиха соотношения несколько иные, так как 85% тепла, выделяемого при конденсации пара, может быть вновь использовано. Общий расход тепла в этом случае надо помножить на отношение $512:488=1,05$, и термический коэффициент полезного действия равен

$$\frac{17.215.000}{22.478.000 \times 1,05} = 73\%$$

Все вышесказанное дает нам возможность составить следующую сравнительную таблицу:

	Риттер-Кельнер.	Митчерлих.
Объем брутто	225 куб. м.	225 куб. м.
" нетто	197 " "	197 " "
" обмуровки	28,6 " "	27,9 " "
" железного кожуха	5,25 " "	5,0 " "
Вес сухого дерева	31.000 кгр.	31.000 кгр.
Объем дерева	72,6 куб. м.	72,6 куб. м.
Удельный вес дерева	0,44	0,44
Вес воды (20%) в дереве	7.750 кгр.	7.750 кгр.
Вес 1 скл. м. абс. сухой щепы	153 " "	153 " "
Объем кислоты	124,4 куб. м.	124,4 куб. м.
Вес газов (5—6%)	6.700 кгр.	6.700 кгр.
Теплота паробразования на 1 кгр. кислоты	505 кал.	505 кал.
Выход абсол.-сухой целлюл. " воздуш. " "	13.300 кгр.	14.900 кгр.
" из куб. м. брутто	15.100 " "	16.900 " "
" " " нетто	67 " "	75 " "
" " " " "	77 " "	86 " "
Давление пара	7 атм. избыт.	7 атм. избыт.
" " в вар. котле	4 " "	4 " "
Теплосодержание пара	663 кал.	663 кал.
" " могущего быть использованным	513 " "	488 " "
Расход пара на 1 кгр. возд. сухой целлюлозы	2,88 кгр.	2,74 кгр.
Тепловой коэфф. полезного действия	60%	73%

Как видим, термический коэффициент полезного действия при способе Митчерлиха на целых 13% выше, чем при способе Риттер-Кельнера, хотя расход пара в первом случае (2,74) даже немногим ниже, чем во втором (2,88).

Из сказанного видно, что обычно приводимые данные о расходе пара не характеризуют экономичности того или иного способа. Только величина термического коэффициента полезного действия дает представление о действительных соотношениях.

Экономии в 13% топлива противостоит, правда, большая, (на 25%) продолжительность варки. Но, если принять во внимание больший выход при способе Митчерлиха, процент этот понижается до 20. При одной и той же суточной производительности потребуется при способе Митчерлиха на 20% больший об'ем котла. Нетрудно подсчитать, однако, что вызываемые этим обстоятельством более высокие амортизационные расходы (эксплуатационные расходы остаются теми же) не в состоянии хоть в сколько-нибудь значительной степени повлиять на экономию, получающуюся благодаря превышению термического коэффициента полезного действия на 13%.

Для лучшего понимания нижеследующего изложения приведем тепловой баланс в кгр. пара, расходуемого на 1 варку, и в процентах к общему расходу:

	Риттер-Кельнер.		Митчерлих.	
	кгр. пара	%.	кгр. пара	%.
1. Потери через лучеиспускание и прикосновение	1.810	4,2	2.580	5,70
2. Потери на нагрев кожуха котла	258	0,6	262	0,57
3. „ на нагрев обмуровки	950	2,2	975	2,13
4. Нагрев щепы	3.800	8,8	4.000	8,70
5. „ воды	1 900	4,4	2.000	4,35
6. „ кислоты	28.000	64,5	29.400	63,20
7. Потери на нагрев газов	6.650	15,3	7.000	15,35
	43.368	100%	46.217	100%

Критический обзор теплового баланса.

Как видим, доминирующую роль в балансе играет тепло, идущее на нагрев кислоты—64% от всего расхода тепла; в сравнении с ним все остальные статьи расхода, за исключением нагрева газов, относительно незначительны. Все внимание, поэтому, должно быть направлено в эту сторону. Вопрос о предварительном нагревании кислоты обработавшим паром должен быть, таким образом, предметом самого серьезного исследования.

Предварительно рассмотрим более подробно также и другие статьи баланса и постараемся выяснить, нет ли и здесь каких-либо возможностей с'экономить тепло.

В отношении потерь от лучеиспускания и прикосновения вполне естественной является мысль уменьшить их посредством изоляции. Благодаря изоляции при лучшем изоляционном материале толщиной в 25 см. может быть уменьшено количество получаемого тепла, приблизительно на 15%, что дает экономии около 400 кгр. пара на варку, а в год, считая 360 дней, всего 144 000 кгр. пара, т.-е. 24.000 кгр. угля. Принимая стоимость тонны угля в 20 зол. марок, получаем экономию, равную 480 м., что соответствует капиталу в 1450 м. (проценты на капитал—20% и амортизация 10%), т.-е. изо-

ляция перестанет быть выгодной, если стоимость ее превысит 1450 м. При условиях данного случая это не будет иметь места. Но кроме выгоды необходимо еще принять во внимание и безопасность устройства. Если котел получит течь, то кислота будет просачиваться под изолирующий слой, проложит себе дорогу по стенке котла и выступит наружу большей частью на расстоянии нескольких метров от действительного места повреждения. Обнаружение последнего в этом случае довольно затруднительно и связано с необходимостью сорвать большую поверхность изоляции и т. д. Подобного рода соображения, естественно, понижают экономичность изоляции, так как принятый выше коэффициент амортизации соответственно увеличивается.

Что касается содержания воды в дереве, то очевидно, что его увеличение, благодаря большой теплоемкости воды, довольно неблагоприятно отражается на величине расхода пара на килограмм целлюлозы; при этом допускается, что отношение количества дерева к кислоте одинаково как при сыром, так и при сухом дереве. Если бы оказалось, однако, что количество кислоты уменьшится соответственно увеличению воды в дереве, то вследствие приблизительно одинаковой теплоемкости кислоты и воды, разницы с чисто теплотехнической точки зрения в расходе тепла не будет.

Исследование этого вопроса является очень благодарной задачей для лабораторий целлюлозных заводов.

Согласно литературным данным механическое уплотнение щепы дает возможность увеличить количество ее в отношении 0,63 : 0,55. Это, естественно, влечет за собой соответственное уменьшение количества кислоты.

Посмотрим, как это повлияет на наш баланс. При коэффициенте $0,63 : 0,55 = 1,15$, вес дерева увеличится до $31.000 \times 1,15 = 35.600$ кгр., объем — до $35.600 : 0,44 = 81$ м³, количество кислоты будет тогда равно $197 - 81 = 116$ м³, а с прибавкой 2 м³ на поглощение щепой — 118 м³.

Принимая во внимание указанные изменения и сделав соответственные подсчеты, получим следующий тепловой баланс в случае уплотнения щепы.

	Риттер-Кельнер. кал.	Митчерлих. кал.
Лучеспускание	930.000	1.260.000
Кожух котла	132.000	128.000
Обмуровка котла	487.000	475.000
Дерево	2.220.000	2.220.000
Вода в дереве	1.110.000	1.110.000
Кислота	13.300.000	13.300.000
Газы	3.120.000	3.120.000
И т о г о	21.299.000	21.613.000

Выход целл. абс. сухой	15.000 кгр.	17.100 кгр.
„ „ возд. „ (88%)	17.700	19.400 „
Расход пара на 1 кгр. целл.	2.35	2.28 „

Экономия пара при применении уплотнения щепы составляет, таким образом, около 18,5%.

Этой экономии необходимо противопоставить расход энергии на пневматическую трамбовку (Luftstampfer)—30 л. с., амортизацию установки и увеличение времени наполнения.

Перейдем теперь к важнейшей статье баланса, к расходу на нагрев кислоты.

Schwalbe в своей книге „Chemie der Cellulose“ указал, что кислота может быть без потерь предварительно нагрета вне котла до 70—80°C.

Так как конечная температура равна 140°C., а начальная температура кислоты, предварительно нагретой газами, равна 25°C, то температурная разность составит 115°C. Из последних 75—25=50°C могут быть получены посредством предварительного нагрева отходящим теплом, или паром низкого давления, в то время, как сейчас на это тратится свежий пар среднего давления—8 атм. абс., т. е.

$\frac{100.50}{115} = 43\%$ пара, идущего на нагрев кислоты, могли бы быть на промежутке падения давления от 8 атм. абс. до 2 атм. абс. использованы на получение энергии. Эти 43% пара $= \frac{29.400.43}{100} = 12.500$ кгр. могут дать в паровом двигателе с противодействием или с промежуточным отбором пара (при термодинамическом коэффициенте полезного действия=80%) следующее число лошадиных сил.

Если примем давление пара в котле равным 20,2 атм. абс. и температуру—310°C, то, использованный пар с 8-атм. абс. в противодействии будет еще иметь температуру 220° С. В промежутке падения с 8 атм. и 220° С. до 2-х атм. абс. имеем 62 калории, из которых можно превратить в механическую работу 49,5 кал. Следовательно,

12.500 кгр. дадут $\frac{12.500.49,5}{632} = 980$ инд. л. с. час. = 900 эффект.

л. с. час., что соответствует мощности в течение одной варки в 37 эфф. л. с.

Итак, при подогреве кислоты мы получаем лишних 37 эфф. л. с. на 1 котел без добавочного расхода угля.

Кроме того, предварительный подогрев влечет за собой также некоторое уменьшение времени оборота. Примем, что в случае способа Митчерлиха возрастание температуры при варке будет от 8 до 10°C в час. Начальная температура теплоты при помощи целесообразного пропаривания загрузки и предварительного подогревания кислоты будет 70°C, в то время как без пропаривания и подогревания она равна всего около 25°C. Таким образом сберегается 45°C (70—25) : 10° = 4,5 часа. При 24 часовой работе это составляет

20%, т.-е. производительность котла увеличивается при подогреве кислоты на 20%.

Фирма Mannheim - Waldhof патентовала недавно способ подогрева кислоты отходящими горячими (500—600°C) сернистыми газами. Рассмотрим также и в этом случае, какая получается экономия.

Считая 11 кг. серы на 100 кг. целлюлозы, получим, что всего серы должно быть сожжено $\frac{16.900.11}{100} = 1.860$ кг., которые дадут

$$\frac{64}{32} \cdot 1860 = 3700 \text{ кг. или } 2600 \text{ м}^3 \text{ SO}_2.$$

Если в среднем примем объемный процент SO₂ в 10%, то объем воздуха будет 22.500 м³, вес его 29.000 кг.

Количество тепла на 1 кг. = t° · Cp =

$$\text{для SO}_2 = 500 \cdot 0,164 = 81,8 \text{ кал.}$$

$$\text{„ возд.} = 500 \cdot 0,249 = 124 \text{ „}$$

а для

$$3.700 \text{ кг. SO}_2 - 3.700 \cdot 81,8 = 300.000 \text{ кал.}$$

$$\text{и } 29.000 \text{ кг. воздуха} - 29.000 \cdot 124 = 3.600.000,$$

а всего около 4.000.000 кал.

Принимая во внимание, что можно использовать только 400°C, имеем в результате $\frac{4}{5}$. 4.000.000 = 3.200.000 кал. Это составляет около $\frac{1}{7}$ всего расхода тепла, т.-е. 46.217 : 7 = 6.600 кг. пара.

Расход пара на 1 кг. целлюлозы в случае утилизации сернистых газов будет, таким образом,

$$46.217 - 6.600 = 39.617 : 16.900 = 2,3 \text{ кг.}$$

Это в отношении 2,74 кг., потребных, когда подогрев сернистыми газами не применяется, составит около 15% экономии.

В случае применения как уплотнения щепы, так и предварительного подогрева кислоты, общая экономия составляет 18 + 15 = 33%.

В заключение приведем сравнительную таблицу расхода пара на 1 кг. целлюлозы при уплотнении щепы и подогреве кислоты сернистыми газами и расхода пара в случае неприменения уплотнения и подогревания.

	Риттер-Кельнер. кг. пара.	Митчерлих. кг. пара.
Без уплотнения и без подогрева .	2,88	2,74
С уплотнением	2,35	2,28
Без уплотнения, с подогревом . .	2,39	2,30
С уплотнением и подогревом . .	1,92	1,84

Необходимо еще, кроме того, указать на вышеупомянутое увеличение производительности котла на 20%, а также на экономию в топливе, вследствие более равномерной нагрузки паровых котлов.

М. В.