

УДК 620.92+676.056.5

В.Н. Сапич, А.С. Стребков, Н.А. Курбатская

ОЦЕНКА ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА ПРИ СНИЖЕНИИ ПОТЕРЬ ПРОЛЁТНОГО ПАРА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОДУКЦИИ

Рассмотрены способы снижения потерь пролётного пара при производстве целлюлозно-бумажной продукции. Оценена экономия топлива при снижении потерь пролётного пара в пароконденсатных системах бумагоделательных машин. Определен оптимальный вариант модернизации пароконденсатных систем.

Ключевые слова: пароконденсатная система, бумагоделательная машина, пролётный пар, сушильный цилиндр, сепаратор, инерционный влагоотделитель, парокompрессорная установка, параллельное пароснабжение, каскадное пароснабжение, условное топливо.

До недавнего времени многие предприятия целлюлозно-бумажной промышленности уделяли недостаточно внимания состоянию пароконденсатных систем (ПКС) бумагоделательных машин. Рост цен на энергоносители, ужесточающиеся требования к рациональному потреблению энергоресурсов, конкуренция на рынке вынуждают изменить отношение к оценке эффективности работы ПКС бумагоделательных машин (БДМ).

При производстве бумаги с использованием БДМ требуется значительное количество пара давлением до 0,5 МПа для сушки целлюлозной массы. Особенность технологического процесса такова, что полная конденсация пара в цилиндрах БДМ ухудшает качество бумаги из-за её высокой гигроскопичности. Чтобы обеспечить рациональный режим сушки бумажного листа, требуется поддерживать степень сухости отработанной пароконденсатной смеси на уровне 10-20%.

В настоящее время применяются различные системы подвода пара и удаления конденсата. Их можно объединить в три основные группы: системы с параллельным подводом пара к сушильным цилиндрам БДМ; системы каскадного пароснабжения сушильных цилиндров с последовательным перепуском пара по отдельным группам; комбинированные системы, сочетающие черты как параллельной, так и каскадной систем [1]. Все эти схемы в конечном счете реализуют разделение пара и конденсата, но в разных количествах и с различной степенью эффективности использования отработанного пара. Между тем, восполнение потерь пара влечет повышение нагрузки паровых котлов, что, в свою очередь, требует дополнительных топливных затрат.

В параллельной системе подвода пара к цилиндрам БДМ (исходный вариант исследования) отработанный влажный пар направляется в сепаратор влаги с рабочим давлением, близким к атмосферному (рис.1). При снижении давления в сепараторе происходит разделение пара и конденсата, причем выход пролётного пара увеличивается из-за частичного вскипания конденсата. Конденсат возвращается в котельную, а пролётный пар через клапан стравливается в атмосферу. Выход дополнительно образующегося пара вторичного вскипания тем больше, чем больше рабочее давление пара в цилиндре БДМ. Это самый неэффективный способ работы БДМ, поскольку кроме повышенного расхода топлива в котельной для компенсации потерь пролётного пара требуются дополнительные затраты теплоты на химическую очистку и подогрев питательной воды.

Устранить непродуктивные потери пролётного пара и связанный с ними перерасход топлива на генерацию пара в производственной котельной позволяет установка на выходе из сепаратора парового компрессора (узел «А» на рис. 1). Компрессор повышает давление отработанного пара до рабочего давления в подающем паропроводе БДМ. Затраты электроэнергии на привод парового компрессора зависят от степени снижения давления в сепараторе влаги. Чтобы сократить эти затраты, для разделения парокапельной влаги

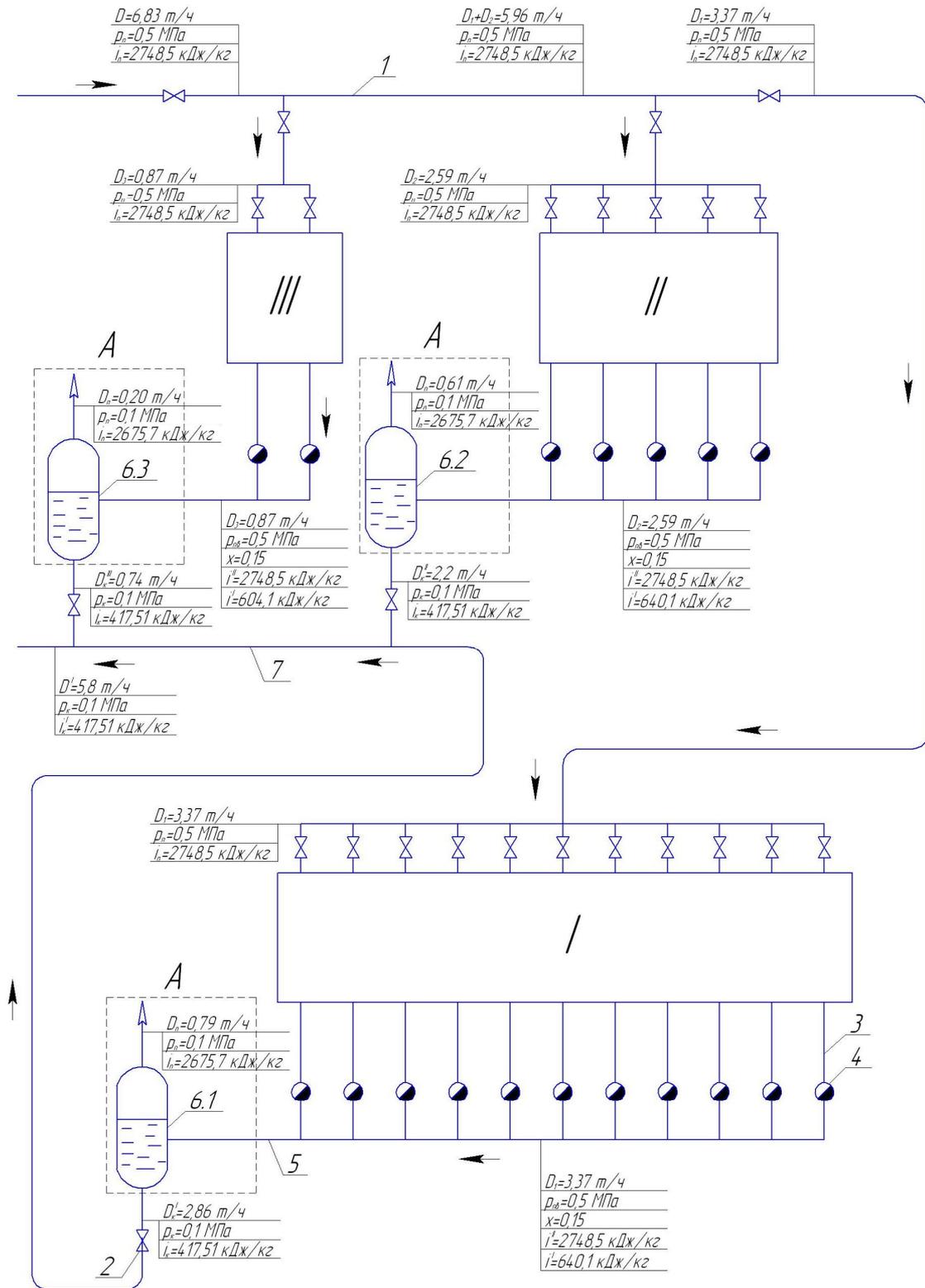


Рис.1. Параллельная система теплоснабжения сушильных цилиндров БДМ: D – расход пара в сушильную часть; D_1, D_2, D_3 – расходы пара в цилиндры паровых групп; $D_к^I, D_к^II, D_к^III$ – расходы конденсата из сепараторов соответствующих паровых групп; D^* – общий расход конденсата; I, II, III – паровые группы цилиндров; 1 – главный паропровод; 2 – регулирующие вентили; 3 – конденсаторопроводы; 4 – конденсатоотводчик; 5 – групповой конденсаторопровод; 6.1, 6.2, 6.3 – сепараторы; 7 – сборный конденсаторопровод

можно использовать инерционный влагоотделитель вместо сепаратора. Давление пара при такой компоновке снижается лишь на величину аэродинамических потерь, но при этом выход пара вторичного вскипания будет минимальным и на снижение топливных затрат на устранение пролётного пара влияния не окажет. При выборе режима работы дожимного парового компрессора (рис. 2) необходимо не только стремиться к снижению стоимостных показателей у производителя бумаги, но и добиваться общего снижения расхода топлива как на производстве, так и в энергосистеме в натуральном выражении.

На рис. 3 представлены данные по оценке топливных затрат в расчете на генерацию 1 т/ч пара в производственной котельной и при использовании дожимного парового компрессора на различных режимах работы. Экономия условного топлива, затрачиваемого на замещение пара прямой генерации в котельной паром на выходе из дожимного компрессора выше, если электроэнергия на привод компрессоров поставляется от промышленной ТЭЦ энерготехнологического комплекса, однако положительный эффект сохраняется и при поставке электро-

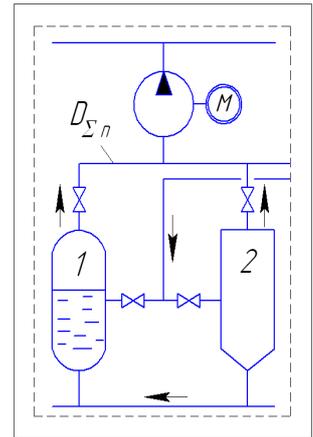


Рис. 2. Варианты установки дожимного парового компрессора: 1 – сепаратор; 2 – инерционный влагоотделитель

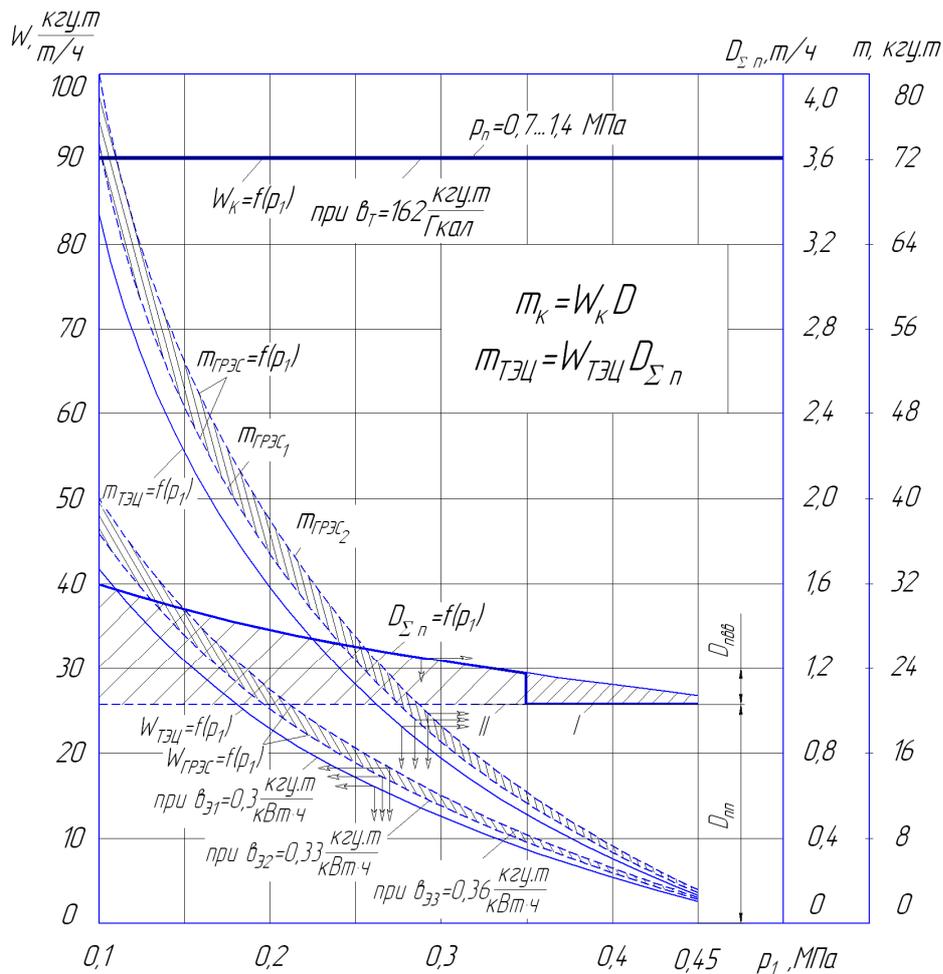


Рис. 3. Энергетические характеристики использования пролётного пара и паравторичного вскипания в параллельной системе теплоснабжения БДМ: I – выход пара при использовании инерционного влагоотделителя; II – выход пара при использовании сепаратора; $b_{31} = 0,30$ кг у.т./кВт·ч (энергоснабжение от ТЭЦ), $b_{32} = 0,33 - 0,36$ кг у.т./кВт·ч (энергоснабжение от ГРЭС)

энергии от региональной энергосистемы. Относительное повышение удельных затрат электроэнергии W на дожимание пара из сепараторов компенсируется повышенным выходом пара вторичного вскипания $D_{\text{ПВВ}}$ (кроме режимов с давлением от 0,35 до 0,45 МПа в инерционном влагоотделителе).

Наряду с параллельными системами подачи пара в БДМ применяются каскадные системы пароснабжения (рис.4). В каскадных системах парораспределения рабочее давление пара на различных стадиях обработки бумажного полотна последовательно увеличивается.

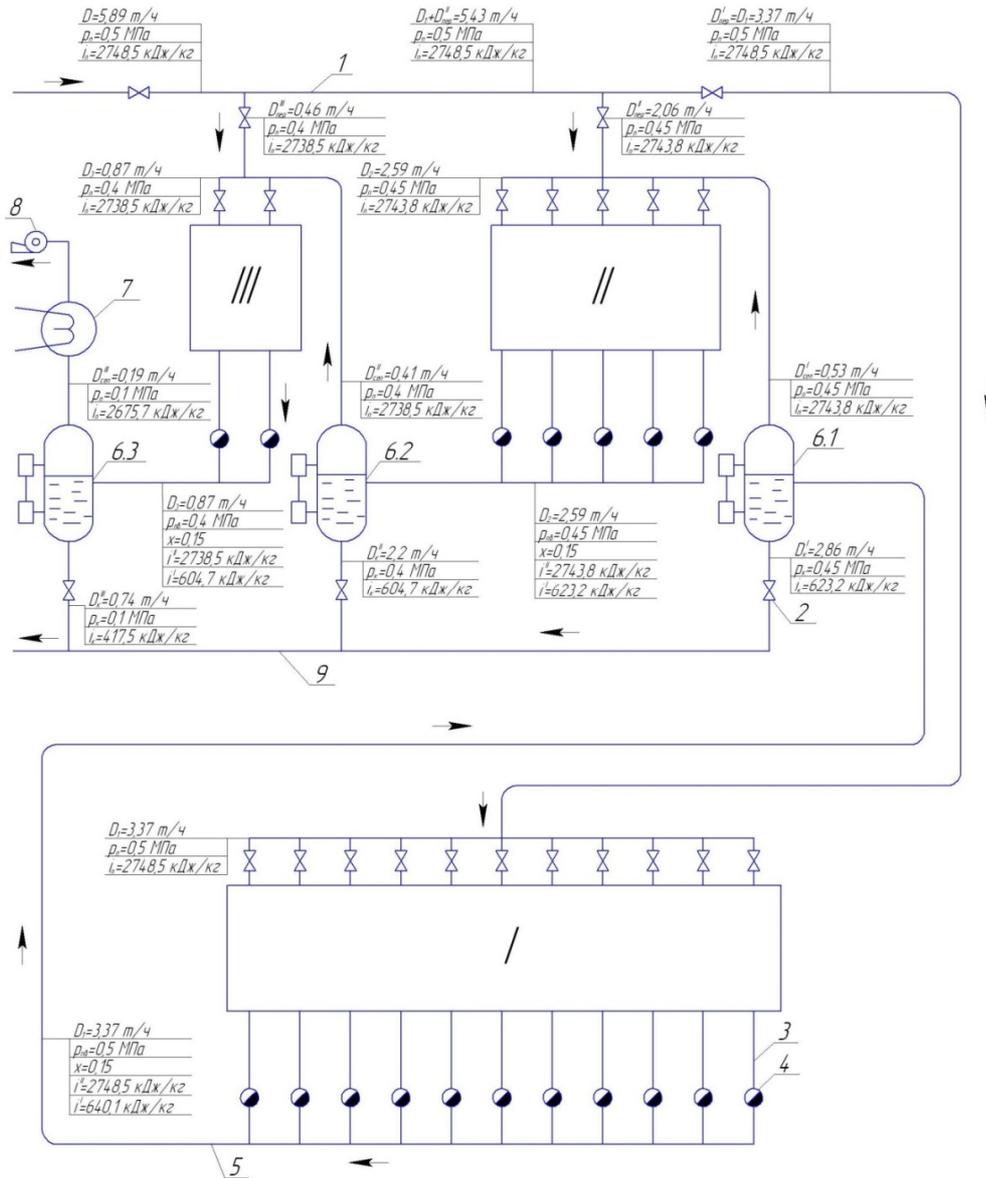
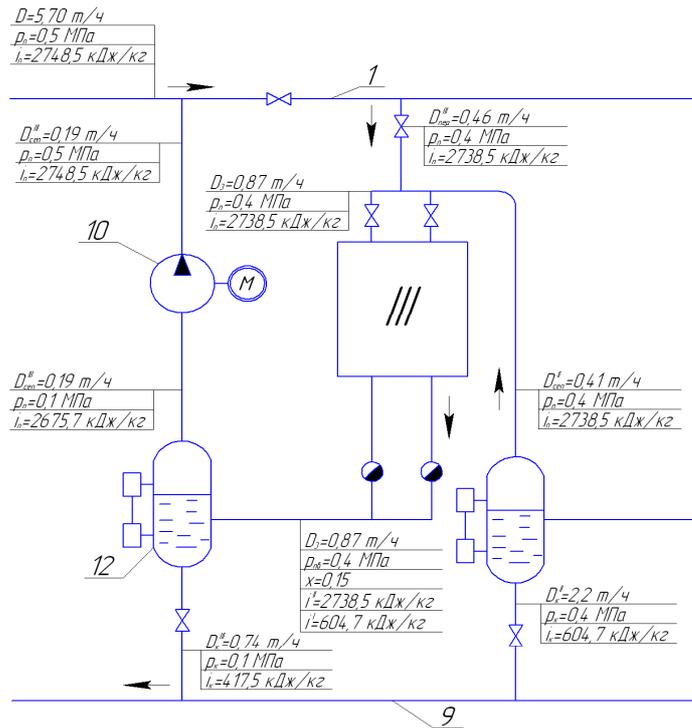
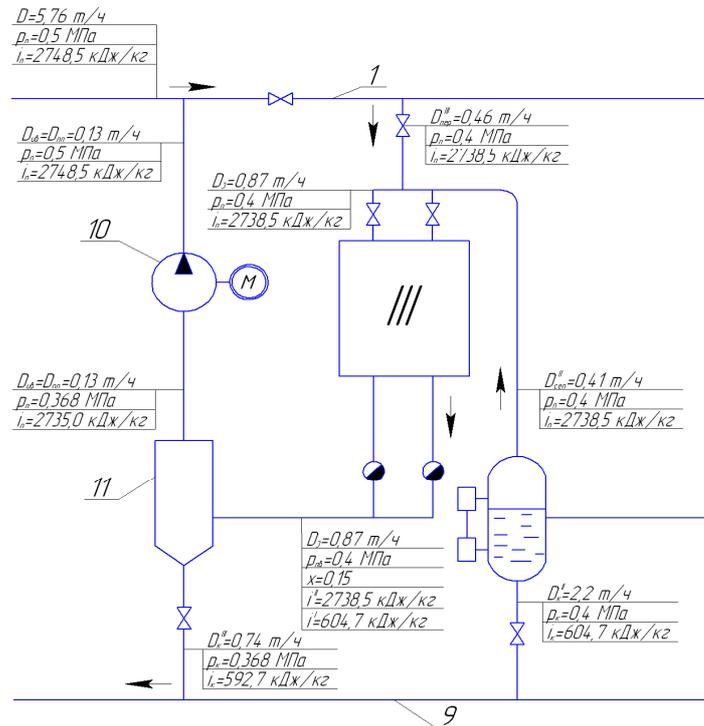


Рис. 4. Система каскадного пароснабжения сушильных цилиндров с использованием вторичного пара: D – расход пара в сушильную часть; D_1, D_2, D_3 – расходы пара в цилиндры паровых групп; $D_{\text{пер}}^I, D_{\text{пер}}^{II}, D_{\text{пер}}^{III}$ – расходы пара, перепускаемого из главного паропровода в цилиндры паровых групп; $D_{\text{сеп}}^I, D_{\text{сеп}}^{II}, D_{\text{сеп}}^{III}$ – суммарные расходы пролетного пара и пара вскипания из сепараторов паровых групп; $D_{\text{сеп}}^I, D_{\text{сеп}}^{II}, D_{\text{сеп}}^{III}$ – расходы конденсата из сепараторов паровых групп; 1 – главный паропровод; 2 – регулирующие вентили; 3 – конденсатопроводы; 4 – регулирующие дроссельные клапаны; 5 – групповой конденсатопровод; 6.1, 6.2, 6.3 – сепараторы; 7 – конденсатор; 8 – вакуум-насос; 9 – сборный конденсатопровод



a/



b/

Рис. 5. Варианты модернизации каскадной пароконденсатной системы: D – расход пара в сушильную часть; D_{III}^I – расход пара в цилиндры третьей паровой группы; D_{III}^III – расход конденсата из третьей паровой группы; III – третья группа цилиндров; 1 – главный паропровод; 9 – сборный конденсатопровод; 10 – паровой компрессор; 11 – циклон; 12 – сепаратор

Давление 0,4 МПа применяется на стадии прогрева бумажного полотна III. Отработанная пароконденсатная смесь подается в сепаратор 6.1. Разделение фаз ведется при давлении 0,45 МПа. Образовавшийся пар используется на стадии предварительной сушки бумажного полотна II, частично замещая свежий пар из котла. Аналогично организуется пароснабжение стадии окончательной сушки бумажного полотна I при наибольшем давлении пара 0,50 МПа.

Эффективность каскадной схемы определяется снижением выхода пролётного пара из сепаратора 6.3 последнего каскада. Однако она ограничивается необходимостью установки конденсатора и вакуум-насоса, чтобы избежать материальных потерь пролётного пара при его конденсации. Кроме того, для конденсации пара требуется значительное количество охлаждающей воды и последующий отвод её низкопотенциальной теплоты в окружающую среду. Чтобы избежать конденсации пролётного пара и пара вторичного вскипания из сепаратора 6.3, целесообразно рассмотреть варианты поэтапной модернизации каскадной ПКС БДМ (рис.5).

Вначале предлагается заменить конденсатор и вакуум-насос на паровой компрессор. В этом случае обеспечивается наибольший выход пара вторичного вскипания и соответствующее сокращение подачи пара из котельной, но требуются максимальные затраты электроэнергии на привод дожимного парового компрессора, поскольку давление пара в сепараторе близко к атмосферному (рис. 5а).

В качестве альтернативного варианта следует рассмотреть возможность замены конденсатора, вакуум-насоса и сепаратора на инерционный влагоотделитель и паровой компрессор. При этом выход пара вторичного вскипания практически отсутствует, но зато значительно сокращаются затраты электроэнергии на привод компрессора, поскольку давление пара на выходе из влагоотделителя значительно выше атмосферного (рис. 5б).

В предлагаемых модернизированных схемах полная конденсация пролётного пара заменяется его дожиманием до рабочего давления в пароконденсаторных агрегатах. Это позволяет избежать снижения энергетического потенциала пара, возвращаемого в технологический цикл без потери значительной теплоты фазового перехода.

Итак, чтобы определить, при каких условиях достигается наибольшая топливная экономичность производства бумаги, необходимо рассмотреть энергетические показатели работы шести вариантов организации системы пароснабжения БДМ (табл. 1).

Таблица 1

Варианты организации системы пароснабжения БДМ

№ варианта	Тип ПКС БДМ
0	Базовый вариант - параллельная система теплоснабжения сушильных цилиндров (экономии не предполагается)
1	Модернизированный вариант параллельной системы с установкой сепаратора и парового компрессора
2	Модернизированный вариант параллельной системы с установкой инерционного влагоотделителя и парового компрессора
3	Система каскадного пароснабжения сушильных цилиндров с поэтапным использованием вторичного пара
4	Модернизированный вариант каскадной пароконденсатной системы с заменой конденсатора и вакуум-насоса паровым компрессором
5	Модернизированный вариант каскадной системы, с заменой конденсатора, вакуум-насоса и сепаратора инерционным влагоотделителем и паровым компрессором

Эффект от снижения потерь пролётного пара в натуральном и стоимостном выражении можно оценить по следующей методике.

Дополнительный нагрев воды от температуры в деаэраторе до температуры насыщения, °С:

$$\Delta t = t_g(p_g) - t_d,$$

где t_g – температура насыщения при давлении p_g ; t_d – температура воды в деаэраторе, К.

Удельные затраты тепла на образование пара с учетом дополнительного нагрева питательной воды в котельной от температуры в деаэраторе до температуры насыщения, кДж/кг:

$$r' = r + c_p \Delta t$$

где $r = f(p)$ – теплота парообразования, кДж/кг [3]; c_p – теплоёмкость воды, кДж/кг·К.

Теплота, необходимая для генерации пара в производственной котельной, Гкал/ч:

$$Q = \frac{1}{4190} D_n r',$$

где D_n – расход 1 т/ч пара, производимого в котельной.

Удельный расход условного топлива на производство 1 т/ч пара, кг у.т./(т/ч):

$$W_k = Q b_t.$$

где b_t — удельный расход условного топлива на выработку 1 Гкал тепловой энергии в производственной котельной. Принимаем $b_t = 162$ кг у.т./Гкал [2].

Масса дополнительно сжигаемого условного топлива в производственной котельной, кг у.т.:

$$m_k = W_k D_i,$$

где D_i — расход пара, подаваемого в пароконденсатную систему, т/ч; i — номер варианта системы пароснабжения БДМ ($i = 0 \dots 5$).

Мощность потребления электроэнергии паровым компрессором при сжатии 1 т/ч пара, кВт:

$$N_i = \frac{1}{3600} \frac{k}{k-1} R T_i D_i \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_{эл} \eta_k},$$

где $k = 1,33$ — показатель адиабаты насыщенного водяного пара; R — газовая постоянная насыщенного водяного пара, Дж/(кг·К); p_1 — давление пара перед компрессором, МПа; p_2 — давление пара на выходе из компрессора, МПа; $\eta_{эл}$ — электромеханический КПД; η_k — КПД компрессора; T_i — температура пара перед компрессором, D_i — расход пара, т/ч.

Принимаем $R = 461$ Дж/(кг·К), $\eta_{эл} = 0,97$, $\eta_k = 0,7$ [4].

Удельный расход условного топлива на ТЭЦ при производстве 1 т/ч пара, связанный с обеспечением работы пароконденсаторной установки, кг у.т./(т/ч):

$$W_{ТЭЦ} = N b_{э1},$$

где $b_{э1}$ — удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт электроэнергии.

В расчетах полагаем, что электроснабжение осуществляется от промышленной ТЭЦ с удельным расходом топлива $b_{э1} = 0,3$ кг у.т./(кВт·ч).

Расход конденсата из сепаратора или инерционного влагоотделителя для j -й паровой группы, т/ч:

$$D_{кв}^j = D_{пв}^j (1 - x),$$

где $D_{пв}^j$ — расход пароводяной смеси j -й паровой группы, т/ч ($j = I, II, III$); $x = 0,15$ — степень сухости насыщенного водяного пара.

Расход пролётного пара j -й паровой группы, т/ч:

$$D_{пп}^j = D_{пв}^j - D_{кв}^j.$$

Расход пара вторичного вскипания j -й паровой группы, т/ч:

$$D_{пвв}^j = \frac{h'_1 - h'_2}{r_2} D_{кв}^j,$$

где h'_1, h'_2 — энтальпия воды на линии насыщения при среднем давлении в цилиндрах группы и в циклоне или сепараторе, кДж/кг; r_2 — теплота парообразования при среднем давлении в сепараторе или циклоне, кДж/кг.

Расход пара из сепаратора или инерционного влагоотделителя j -й паровой группы, т/ч:

$$D_{п}^j = D_{пп}^j + D_{пвв}^j.$$

Общий расход пара из сепараторов или инерционного влагоотделителя, т/ч:

$$D_{сп} = \sum D_{п}^j.$$

Масса сжигаемого условного топлива на ТЭЦ, кг у.т.:

$$m_{ТЭЦ} = W_{ТЭЦ} D_{сп}.$$

Общие затраты условного топлива, идущие на производственную котельную и ТЭЦ, кг у.т.:

$$m_t = m_k + m_{ТЭЦ}.$$

Экономия условного топлива, %:

$$\Delta m_T = \frac{m_{T0} - m_{Ti}}{m_{T0}} 100,$$

где m_0 – масса условного топлива, расходуемая в котельной и на ТЭЦ в базовом варианте ($i=0$), кг у.т.; m_{Ti} – масса условного топлива, расходуемая при модернизации системы пароснабжения ($i = 1 \dots 5$), кг у.т.

Расход топлива, $m^3/ч$:

$$B = 10^3 D(h_{np} - h_{пв}) / (Q_H^p \eta_k / 100),$$

где D – расход пара из котельной, т/ч; h_{np} – энтальпия насыщенного пара, кДж/кг; $h_{пв}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг; $Q_H^p = 35880$ кДж/м³ – низшая расчетная теплота сгорания топлива [5]; $\eta_k = 90,8$ – брутто-КПД котла.

Сокращение расхода топлива, $m^3/ч$

$$\Delta B = B_0 - B_i,$$

где B_0 – расход топлива в параллельной системе пароснабжения сушильных цилиндров, $m^3/ч$; B_i – расход топлива в i -м варианте системы пароснабжения, $m^3/ч$.

Экономия от сокращения расхода топлива (руб./ч) на производство пара:

$$P_T = C_T \Delta B,$$

где C_T – стоимость топлива, руб./м³; ΔB – экономия топлива, $m^3/ч$.

Дополнительные затраты на электроэнергию, руб./ч:

$$P_E = C_E N_i,$$

где C_E – тариф на электроэнергию, руб./(кВт·ч); N_i – мощность на привод компрессорного оборудования, потребляемая дополнительно по сравнению с базовым вариантом ($i=0$), кВт.

Экономический эффект после проведения модернизации, руб./ч:

$$\Delta P = P_T - P_E$$

Снижение энергоёмкости продукции, %:

$$B = \frac{D_0 - D_i}{D_i} 100,$$

где D_0 – расход паров базовом варианте ($i=0$), т/ч; D_i – расход пара из котельной при модернизации системы пароснабжения ($i=1 \dots 5$), т/ч.

Относительный рост затрат электроэнергии на единицу расходуемого топлива при производстве бумаги:

$$\alpha = N/B,$$

где N – потребляемая мощность, кВт; B – расход топлива, $m^3/ч$.

Основные результаты расчетов представлены в сводной табл. 2. Как свидетельствуют расчетные данные, все рассмотренные варианты модернизации системы пароснабжения БДМ обеспечивают снижение потребления топлива на производство технологического пара в натуральном выражении. В параллельных системах подачи пара к БДМ наибольшее снижение генерации пара в производственной котельной наблюдается при установке сепараторов влаги атмосферного типа. Экономия условного топлива у производителя в этом случае также максимальна, и достигается она за счет генерации значительного потока пара вторичного вскипания. Однако этот вариант требует наибольших затрат условного топлива при выработке электроэнергии на промышленной ТЭЦ (для ГРЭС этот показатель может дополнительно увеличиться еще на 10-15%), поскольку требуется значительное повышение давления отработанного пара в дожимной пароконпрессорной установке. В итоге экономия топлива в натуральном выражении в энерготехнологическом комплексе («потребитель – производитель» топливно-энергетических ресурсов) еще сохраняется, но по сравнению с прочими вариантами она минимальна – 12,6%.

В стоимостном выражении дополнительные затраты на приобретение электроэнергии в энергосистеме значительно превосходят экономию, полученную в производственной

котельной от снижения потребления топлива на генерацию пара. При действующих тарифах на топливно-энергетические ресурсы в промышленном секторе экономики такой вариант модернизации следует оценивать как бесперспективный. Отказ от использования пара вторичного вскипания за счет повышения его давления на выходе из инерционного влагоотделителя обеспечивает устойчивый эффект экономии условного топлива и в каскадных системах пароснабжения БДМ.

Выход пролётного пара в этих компоновках предельно ограничен (варианты 3, 4, 5), поэтому затраты на повышение давления пара как в натуральном, так и в стоимостном выражении невелики независимо от величины давления отработанного пара на выходе из влагоотделителя любого типа.

Таблица 2

Результаты расчетов

Параметр	Обозначение	Размерность	№ варианта					
			0	1	2	3	4	5
Расход пара из котельной	D	т/ч	6,83	5,23	5,80	5,89	5,70	5,76
Масса условного топлива, сжигаемого в котельной	m_k	кгу.т.	617,7	473,0	524,6	532,7	515,5	520,9
Масса условного топлива, дополнительно сжигаемого на ТЭЦ	$m_{ТЭЦ}$	кгу.т.	-	66,7	2,6	-	7,9	1,0
Общие затраты условного топлива	m_T	кгу.т.	617,7	539,7	527,2	532,7	523,4	521,9
Экономия условного топлива	Δm_T	%	-	12,6	14,6	13,7	15,3	15,5
Сокращение расхода топливного газа ($Q_{г}^P = 35880 \text{ кДж/м}^3$)	ΔB	$\text{м}^3/\text{ч}$	-	114,5	73,7	67,2	80,8	76,5
Дополнительная потребляемая электрическая мощность	N	кВт·ч	-	222,4	8,7	-	26,4	3,2
Экономия за счет сокращения расхода топлива на производство пара	P_1	руб./ч	-	465,0	299,3	273,2	328,4	310,9
Дополнительные затраты на электроэнергию	P_2	руб./ч	-	689,0	27,0	-	81,8	10,0
Экономический эффект после проведения модернизации	ΔP	руб./ч	-	224,0	272,3	273,2	246,6	300,7
Относительное снижение энергоёмкости продукции	$\Delta \varepsilon$	%	-	30,6	17,7	15,9	19,8	18,6
Относительный рост удельных затрат электроэнергии на 1м^3 топлива	a	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3}$	-	0,594	0,021	-	0,065	0,008

Таким образом, наибольшую экономию условного топлива обеспечивает модернизация системы пароснабжения БДМ с использованием инерционного влагоотделителя при минимально возможном снижении давления отработанного пара на выходе из III ступени и последующим дожиманием пара в парокompрессорной установке. При выборе этой компоновки системы использования пролётного пара достигается также и наименьший относительный рост потребления электроэнергии на единицу расхода топлива при производстве бумаги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жучков, П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве/ П.А. Жучков. – М.: Лесная промышленность, 1978.–408с.
2. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник/под общ.ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб.-М.: Энергоатомиздат, 1991. - Кн.4. –588с.
3. Ривкин, С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара/ С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980.–428с.
4. Страхович, К.И. Компрессорные машины/ К.И. Страхович, М.И. Френкель, И.К. Кондряков, В.Ф. Рис. - М.: Гос. изд-во торг. лит., 1961.–300с.
5. Роддатис, К.Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности/ К.Ф. Роддатис, А.Н. Полтарецкий. – М.: Энергоатомиздат, 1989.–488с.

Материал поступил в редколлегию 17.06.14.