

# ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2016  
12

INDUSTRIAL POWER ENGINEERING

С Днем  
энергетика!



## Опыт подготовки отработанных щелоков к регенерации в филиале ОАО “Группа Илим” в Братске и предложения по оптимизации работы выпарных станций

Суслов В. А., доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный технологический университет  
растительных полимеров

Готовский М. А., доктор техн. наук

ОАО “НПО ЦКТИ”, Санкт-Петербург

Поздняков А. А., инж.

ОАО “Группа Илим”, Санкт-Петербург

Представлены аппаратурное оформление выпарного цеха, режимные параметры работы основного оборудования. Даны предложения по оптимизации эксплуатации выпарных станций предприятия.

**Ключевые слова:** целлюлозно-бумажная промышленность, целлюлоза, черные щелоки, многоступенчатые вакуум-выпарные станции, выпарные аппараты.

Основная продукция целлюлозно-бумажных комбинатов — целлюлоза. В процессе ее производства растительные целлюлозосодержащие ткани, предварительно подвергнутые механической и химико-механической обработке, выдерживают (варят) при определенных температуре и давлении в щелочном растворе едкого натра и сульфида натрия в соотношении примерно 70 и 30 %. При сульфатной варке все компоненты древесной ткани за исключением целлюлозы растворяются. В результате из древесины получают полуфабрикат — техническую целлюлозу с выходом от 50 до 80 % [1].

Отработанный после варки древесины водный щелочной раствор называют черным сульфатным щелоком. Он состоит из 1/3 неорганических и 2/3 органических веществ. Известно, что для получения 1 т целлюлозы наиболее “безвредным” сульфатным способом затрачивается около 10 т чистой воды, превращаемой в процессе производства в агрессивные растворы. Поэтому для сохранения экологии региона черный сульфатный щелок подвергается комплексной обработке для высвобождения химических реагентов в процессе сжигания органики в сорегенерационных котлоагрегатах (СРК), попутно генерирующих пар для производства электроэнергии и технологических нужд.

В настоящее время в филиале ОАО “Группа Илим” в Братске в сутки вырабатывается 3450 т целлюлозы различных марок.

При этой производительности основной продукции в выпарной цех комплекса поступает около 1410 т/ч слабых черных щелоков. Для доведения сухости щелока до уровня пригодности к устойчивому его сжиганию раствор концентрируется на восьми выпарных станциях (ВС) и трех концентраторах до концентрации абсолютно сухих веществ (а.с.в.) 65 – 75 %. Чем выше концентрация черного щелока, тем качественнее его горение и меньше вредных выбросов.

Таким образом, являясь основными участниками процесса подготовки отработанных растворов к регенерации реагентов и получению тепловой и электрической энергии на технологических ТЭЦ, выпарные станции обеспечивают снижение себестоимости продукции и экологическую безопасность региона.

Черный щелок, полученный от производства хвойной беленой целлюлозы, выпаривается до концентрации 53 % а.с.в. на трех шестиступенчатых восьмикорпусных ВС № 1, 2 и 3 со смешанным питанием корпусов щелоком:

$$\rightarrow IV \rightarrow V \rightarrow VIA \rightarrow VIB \rightarrow III \rightarrow IA \rightarrow IB \rightarrow II.$$

Питание ВС предварительно уплотненным до концентрации 24 % а.с.в. слабым щелоком осуществляется насосом параллельно в выпарных аппаратах (ВА) IV, V и VIA в количествах соответственно 50, 25 и 25 % общего расхода. Из ВА IV щелок самотеком последовательно переходит в ВА V, VIA и VIB, далее насосом подается в бак полуупаренно-

Таблица 1

Показатель	Корпус ВС № 1						
	1	2	3	4	5	6А	6В
Температура греющего пара, °С	138	123	102,6	90	81,3	71,3	71,3
Температура кипящего щелока, °С	129,5	111,6	95,0	84,4	75,2	64,0	63,5
Температурный напор, °С	8,5	11,4	7,6	5,2	6,1	7,3	7,8
Концентрация раствора на выходе из аппарата, % а.с.в.	42,4	52,8	35,3	27,2	29,3	31,9	26,9
Расход щелока на входе в аппарат, кг/с	48,8	40,6	60,2	39,3	51,5	44,1	19,7
Количество выпаренной влаги, кг/с	8,2	8,6	7,6	4,3	5,6	3,2	3,1
Коэффициент теплопередачи, кВт/(м <sup>2</sup> · °С)	0,934	1,118	1,509	1,248	1,372	0,657	0,588
Эффективность выпаривания, кг/кг	0,27						

го щелока, где происходит съем мыла. Из этого бака насосом щелок прокачивается через подогреватели и противоточно подается в ВА III. Из ВА III насосом через подогреватели щелок подается в двухходовой корпус — подогреватель IA, где доводится до кипения. Образовавшаяся парощелочная смесь переходит в ВА IB. Затем щелок самотеком поступает в ВА II, а из него насосом подается в бак крепкого щелока, откуда откачивается для дальнейшего выпаривания в концентраторах. Концентрация крепкого щелока составляет примерно 50 % а.с.в.

Корпуса IA и ВА IB обогреваются острым паром давлением 0,35 МПа и температурой 138 °С. ВА II, III, IV и V обогреваются соответственно вторичным паром корпусов IB, II, III и IV. ВА VIA и VIB работают по пару параллельно и обогреваются паром ВА V. Вторичный пар из ВА VIA и VIB поступает на конденсационную установку, где конденсируется в поверхностном конденсаторе [2].

ВС укомплектованы семью ВА фирмы “Rozenblad” с восходящей пленкой раствора с кипяtilьной поверхностью 1800 м<sup>2</sup> и не имеющим сепаратора корпусом-перегревателем IA с поверхностью теплообмена 1190 м<sup>2</sup>. Трубные системы и части, соприкасающиеся со щелоком, в корпусах IA, IB и II выполнены из нержавеющей стали, части остальных корпусов изготовлены полностью из углеродистой стали. Корпуса IB и II — двухходовые. ВС укомплектованы также подогревателями щелока, поверхностными конденсаторами, баками слабого, полупаренного, крепкого щелока и вспомогательным оборудованием.

Чистый конденсат из перегревателя IA и ВА IB, пройдя через расширители конденсата, откачивается на ТЭЦ. Грязные конденсаты от остальных ВА после расширителей направляются на очистку. Производительность по выпаренной воде каждой ВС составляет 160 т/ч. Рассчитанные параметры работы ВС № 1 представлены в табл. 1.

Черный щелок, полученный от производства целлюлозы высокого выхода, выпаривается до концентрации 47 % а.с.в. на двух шестиступенчатых семикорпусных ВС № 4 и 5 фирмы “Rozenblad” со следующей схемой питания ВА: → IV → V → VI → III → IA → IB → II. Производительность по выпаренной воде каждой ВС составляет 99 т/ч. Площадь поверхности теплообмена корпуса-перегревателя составляет 540 м<sup>2</sup>, кипяtilьной поверхности остальных ВА — 260 м<sup>2</sup>. Технологическая схема этих ВС практически аналогична описанной выше. Отличие ВС заключается в отсутствии корпуса VIB и меньшей поверхности теплообмена ВА. Рассчитанные показатели режима работы ВС № 4 представлены в табл. 2.

Из приведенных в табл. 1 и 2<sup>1</sup> данных следует, что рассмотренные ВС (1964 г. ввода в эксплуатацию) могут успешно работать на проектной производительности. Тепловые расчеты ВС № 4 и 5 показали возможность выпаривания щелока до требуемой концентрации 55 % а.с.в.

Для выпаривания черных щелоков из производства беленой целлюлозы в 1974 г. в филиале были введены в эксплуатацию две одинаковые ВС № 6 и 7 фирмы “Rozenblad” производительностью по 220 т/ч выпаренной

Таблица 2

Показатель	Корпус ВС № 4					
	1	2	3	4	5	6
Температура греющего пара, °С	138	123,2	102,6	90	81,3	71,3
Температура кипящего щелока, °С	129,9	112,1	95,0	84,9	75,3	64,2
Температурный напор, °С	8,1	11,1	7,6	5,0	6,0	7,1
Концентрация раствора на выходе из аппарата, % а.с.в.	39,8	48,4	33,7	26,6	28,6	29,5
Расход щелока на входе в аппарат, кг/с	27,4	23,3	31,3	21,2	28,0	34,9
Количество выпаренной влаги, кг/с	4,7	4,6	3,6	3,3	3,4	3,7
Коэффициент теплопередачи, кВт/(м <sup>2</sup> · °С)	1,117	1,184	1,321	1,794	1,457	1,423
Эффективность выпаривания, кг/кг	0,2					

Таблица 3

Показатель	Корпус ВС № 6							
	Концентратор		1	2	3	4	5	6
	А	В						
Температура греющего пара, °С	140	143	138	129	116,4	99	86,9	72,8
Температурный напор, °С	5	5	16,3	6,6	13	8,8	10,4	6,7
Температура кипящего щелока, °С	135	138	121,7	122,4	103,4	90,2	76,5	64
Концентрация раствора на выходе из аппарата, % а.с.в.	52,8	62,6	42,7	39	36,2	25,6	28,1	31,5
Расход щелока на входе в аппарат, кг/с	32,5		58,0	32,5	66,6	82,3	83,0	70,6
Количество выпаренной влаги, кг/с	9,0		7,7	3,4	9,1	5,75	9,2	8,4
Коэффициент теплопередачи, кВт/(м <sup>2</sup> · К)	1,319		0,397	0,840	0,632	2,293	0,822	1,195
Эффективность выпаривания, кг/кг	0,28							

воды. Площадь поверхности теплообмена ВА составляет 2800 м<sup>2</sup>. Технологическая схема данных ВС практически идентична описанной выше схеме. Отличие заключается в отсутствии на ВС № 6 и 7 корпуса VIB, корпуса-перегревателя и большего числе подогревателей щелока.

Расчитанные режимные показатели работы ВС № 6 представлены в табл. 3, из которой следует, что количество выпаренной влаги в ВА II (12 т/ч) в 2 – 3 раза меньше, чем в других ВА, что объясняется значительной нехваткой пара, поступающего из концентратора. Малое количество выпаренной влаги в ВА II определяет недостаточную эффектив-

ность работы последующих ВА. Из-за пониженной тепловой нагрузки коэффициенты теплопередачи в ВА ниже, чем приведенные в табл. 1 и 2, что свидетельствует о неэффективном распределении зон кипения в кипятильных трубах ВА.

Для уменьшения серосодержащих выбросов с продуктами сгорания в атмосферу от СРК в 1993 г. были введены в эксплуатацию два двухступенчатых концентратора фирмы "Alstrem" с площадью поверхности теплообмена 1155 м<sup>2</sup> пластинчатого (ламельного) типа. Схема концентратора приведена на рис. 1.

Производительность концентратора составляла 28,8 т/ч по выпаренной воде. Концен-

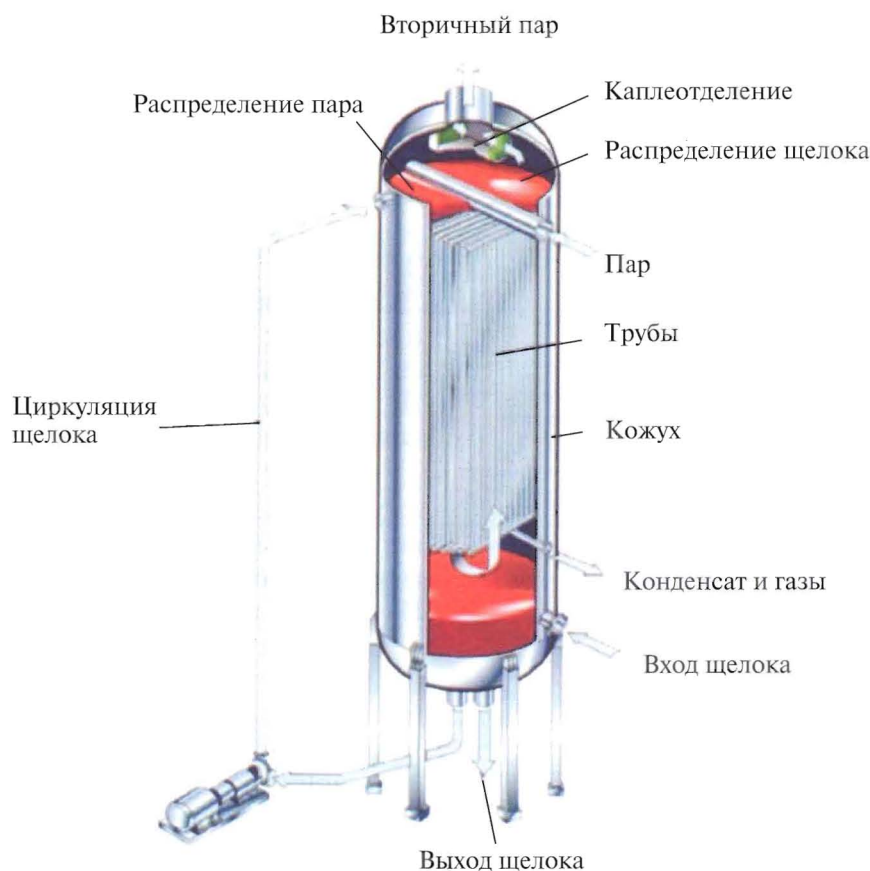


Рис. 1. Технологическая схема концентратора

трация уплотненного щелока достигала 60 – 62 % а.с.в. Для обогрева концентраторов планировалось подавать свежий пар давлением 0,4 – 0,5 МПа. Вторичный пар от концентраторов предполагалось направлять в третий корпус выпарных станций № 6 и 7. Конденсат греющего пара от ВС и установки концентраторов направляется на участок химводоочистки.

Для увеличения производительности каждого концентратора до 42 т/ч по выпаренной влаге и концентрации щелока на выходе из аппаратов до 68 % а.с.в. концентраторы подверглись реконструкции. Тип концентратора с гравитационным течением выпариваемого раствора на наружной стенке поверхности остался прежним, но кипящая поверхность стала трубчатой и увеличена до 1865 м<sup>2</sup>. Вторичные пары из концентраторов направлены в ВА II ВС № 6 и 7. Данный концентратор имеет существенный недостаток – он практически лишен рабочего объема сепаратора (см. рис. 1), где должна осуществляться сепарация вторичных паров. Неудовлетворительная сепарация вторичного пара особенно проявляется при увеличенной производительности концентратора. Этот факт

подтвердила ревизия ВА II ВС № 7, показавшая значительный занос щелоком (по паровой стороне) межтрубного пространства кипяильника ВА.

Для обеспечения надежной сепарации вторичных паров необходимо:

увеличить в концентраторах рабочий объем сепаратора, обеспечив его высоту не менее 1 м для сепарации вторичного пара перед каплеуловителем за счет увеличения головки аппарата;

при невозможности реконструкции концентраторов установить на всех паропроводах вторичного пара, связывающих концентраторы с корпусами ВС, щелоковые ловушки с тангенциальным вводом парощелоковой смеси [3].

Для уменьшения серосодержащих выбросов в атмосферу от СРК за существующими концентраторами были последовательно установлены суперконцентраторы производительностью 27,2 т/ч по выпаренной влаге, выпаривающие щелок до 75 % а.с.в. Давление и температура греющего суперконцентраторов редуцированного пара равны соответственно 0,4 МПа и 200 °С. Установка суперконцентраторов обеспечила снижение содержания

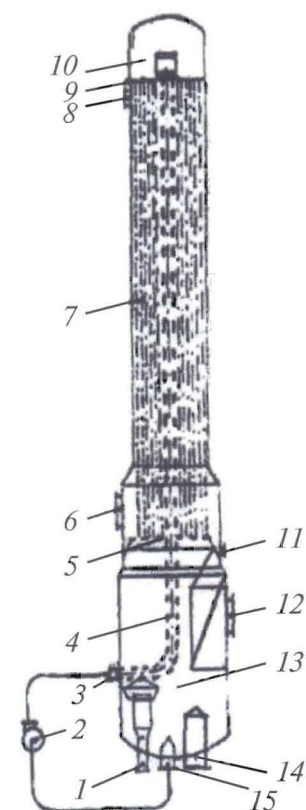


Рис. 2. Схема выпарного аппарата с гравитационным течением выпариваемого раствора фирмы "Metso Power":

1 — патрубок входа выпариваемого щелока; 2 — циркуляционный насос; 3 — вход щелока в циркуляционную систему; 4 — подъемная труба; 5 — нижняя трубная решетка; 6 — вход греющего пара; 7 — кипятильный пучок; 8 — газоотводная трубка; 9 — верхняя трубная решетка; 10 — головка аппарата; 11 — патрубок выхода конденсата; 12 — патрубок выхода вторичного пара; 13 — сепаратор аппарата; 14 — патрубок выхода выпаренного щелока; 15 — патрубок выхода циркулирующего щелока

вредных выбросов в атмосферу до допустимых пределов.

С целью улучшения экологической обстановки на предприятии смонтирована установка дезодорации, на которую направляются грязные конденсаты со всех ВС. Установка состоит из реактора каталитического окисления и бака-сборника очищенного конденсата.

Дурнопахнущие газы от ВС направляются на сжигание в корьевой котел.

Для обеспечения процесса регенерации щелоков при увеличении производительности филиала по выпуску целлюлозы смонтирована четырехступенчатая станция предварительного выпаривания (СПВ) со смешанным питанием корпусов щелоком: III → IV → V → IIВ → IIА. Производительность СПВ составляет 175 т/ч по выпаренной влаге. СПВ укомплектована пятью ВА фирмы "Metso Power" (рис. 2), выпаривающими гравитационно стекающий черный щелок до концен-

трации 30 % а.с.в. Площади кипятильных поверхностей ВА IIА и IIВ составляют по 900 м<sup>2</sup>, ВА III — 1300, IV — 1200 и V — 1500 м<sup>2</sup>. ВА IIА и IIВ обогреваются вторичными парами соответственно от концентратора беленой целлюлозы и установки дезодорации. Давления греющих паров равны 2,5 · 10<sup>5</sup> и 1,2 · 10<sup>5</sup> Па, температуры — 127 и 105 °С. Вторичные пары из IIА и IIВ ВА направляются в ВА III. ВА IV и V обогреваются вторичным паром впереди стоящего ВА III. Вторичный пар из ВА V поступает на конденсационную установку.

Слабый щелок из питательных баков насосом подается в ВА III, работающий с гравитационным течением пленки раствора внутри труб и принудительной циркуляцией. Из ВА III щелок прямоотком последовательно переходит в аналогичные ВА IV и V, прокачивается через подогреватели щелока и противоточно подается в ВА IIВ и далее в IIА. Выпаренный до 31 % а.с.в. раствор направляется в смеситель щелока. Результаты теплового расчета СПВ приведены в табл. 4.

Из представленных данных следует, что несмотря на высокие коэффициенты теплопередачи в ВА СПВ имеет низкую тепловую эффективность. Это объясняется работой СПВ по четырехступенчатой схеме, при которой вторичные пары из ВА IIА и IIВ направляются в ВА III. ВА с гравитационным течением выпариваемого раствора могут работать с низкими температурными напорами, что дает возможность создавать ВС с большим числом ступеней выпаривания. Известно, что с увеличением числа ступеней повышается эффективность ВС. В данном случае рекомендуется перевести СПВ на пятиступенчатую схему, направив вторичные пары из ВА IIА в ВА IIВ. При этом необходимо дополнительно обеспечить станцию соответствующими средствами КИПиА для управления режимами работы СПВ при согласовании параметров вторичных паров, поступающих от концентратора беленой целлюлозы и установки дезодорации.

Выпаривание пенообразующих растворов слабой концентрации в аппаратах, работающих при гравитационном течении выпариваемого раствора, связано с интенсивным пенообразованием, вызывающим множество негативных моментов, влияющих на эффективность работы [4, 5]. Поэтому рассмотренные ВС предназначены для выпаривания, как правило, концентрированных растворов.

Таблица 4

Показатель	Корпус СПВ				
	ПА	ПВ	3	4	5
Температура греющего пара, °С	127	105	95,1	85,2	73,6
Температурный напор, °С	27,7	6,5	7,6	9,1	10,7
Температура кипящего щелока, °С	99,3	98,5	87,5	76,1	62,9
Концентрация раствора на выходе из ВА, % а.с.в.	31	26,4	18,5	20,5	23,1
Расход щелока на входе в аппарат, кг/с	85,7	92,7	129,8	116,7	104
Количество выпаренной влаги, кг/с	13,0	5,9	12,6	14,2	13,2
Коэффициент теплопередачи, кВт/(м <sup>2</sup> · °С)	1,324	2,36	3,205	2,679	1,731
Эффективность выпаривания, кг/кг	0,349				

Таблица 5

Выпарная станция	Производительность по щелоку, т/ч	Концентрация щелока, % а.с.в.		
		начальная	на входе в ВС	на выходе из ВС
№ 1	278,2	15,0	25,5	53,1
№2	278,2	15,0	25,5	53,9
№3	288,9	15,0	24,4	46,2
№4	149,8	10,1	24,4	48,4
№5	144,4	10,1	24,4	51,4
№6	270	15,0	26,8	40,2
№7	378	15,0	26,8	34,4
СПВ	515	12,0	17,0	31,0

Из данных материального баланса цеха следует, что производительность всех ВС по щелоку (примерно 1690 т/ч) превышает количество поступающего слабого щелока в выпарной цех (1431 т/ч). Разница в расходах определяется добавками крепкого щелока к отработанному в процессе варки слабому щелоку для его укрепления в баках смешения.

Щелок, как следует из табл. 5, поступает из промывного отдела со средней концентрацией 13,5 % а.с.в. Средняя концентрация щелока, подаваемого на смесители от всех ВС для укрепления слабого щелока, составляет примерно 45 % а.с.в. При этом средняя концентрация укрепленного щелока, направляемого на ВС для выпаривания, равна приблизительно 24,3 % а.с.в.

Изменение расхода подаваемого на укрепление крепкого щелока  $G_{кр}$  в зависимости от его концентрации  $b_{кр}$  при постоянных концентрациях слабого и укрепленного щелоков  $b_{укр}$  показано в графическом виде на рис. 3.

Как видно, низкая концентрация крепкого щелока, подаваемого на укрепление, и высокая концентрация укрепленного щелока приводят к излишним расходам выпариваемого на ВС раствора. Так, для укрепления слабого щелока при вышеуказанных параметрах в настоящее время подается 800 т/ч крепкого щелока. Во избежание перерасходов пара на выпаривание и электроэнергии на перекачку потока щелоков необходимо стремиться подавать на укрепление крепкий щелок с концентрацией не ниже 55 % а.с.в., а укреплять слабый до концентрации не выше

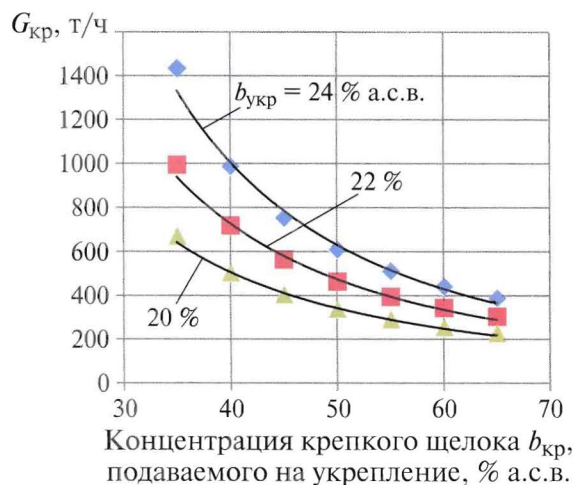


Рис. 3. Зависимости расхода крепкого щелока  $G_{кр}$ , подаваемого на укрепление, от его концентрации  $b_{кр}$

22 % а.с.в. При указанных параметрах для укрепления 1410 т/ч слабого щелока с концентрацией 14 % а.с.в. до концентрации 22 % а.с.в. требуется 340 т/ч щелока с концентрацией 55 % а.с.в. Такой расход крепкого щелока для укрепления могут обеспечить две ВС, например ВС № 1 и 2. Остальные ВС,

включая СПВ, должны концентрировать щелок от 22 до 55 % для дальнейшего его выпаривания в концентраторах.

### Список литературы

1. **Технология** целлюлозы. В 3-х т. Т. II. Непенин Ю. Н. Производство сульфатной целлюлозы. Учеб. пособ. для вузов. — 2-е изд., перераб. — М.: Лесная промышленность, 1990.
2. **Суслов В. А.** Основные процессы при выпаривании щелоков целлюлозного производства : Учеб. пособ. для вузов. — СПб.: СПбГТУ РП, 1998.
3. **Справочник** по теплообменникам: В 2-х т. Т. 1 / Пер. с англ., под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. **Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г.** Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: Учеб. пособ. для ВТУЗов. — 3-е изд., испр. — М.: Высшая школа, 1986.
5. **Тобилевич Н. Ю.** Кризис теплообмена при испарении в стекающей пленке жидкости при спутном движении жидкости и вторичного пара. — В кн. Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации. Т. 1. Пузырьковое, переходное и пленочное кипение. Кризисы кипения (тезисы докладов Всесоюзн. конф.). Рига, 1982.

[vyachsuslov@mail.ru](mailto:vyachsuslov@mail.ru)

### Experience in preparation of the waste liquor to regeneration at OJSC "Ilim Group" in Bratsk and approaches to optimization of the evaporator plants

Suslov V. A., Gotovskii M. A., Pozdnyakov A. A.

Hardware design of an evaporation plant, operation parameters of the main equipment are presented. Approaches to optimization of the operation of evaporator plants of the enterprise are considered.

**Keywords:** pulp and paper industry, pulp and black lye, a multistage vacuum evaporator plant, evaporators.

## Вниманию читателей!

Вы можете приобрести электронную версию журнала "Промышленная энергетика" (до 2017 г.) или отдельные статьи текущего года.

Заявки следует присылать на электронную почту:

[prom\\_energy@rambler.ru](mailto:prom_energy@rambler.ru) или [prom-energe@yandex.ru](mailto:prom-energe@yandex.ru)

Телефоны для справок:

(495) 234-74-49, 234-74-18, 234-74-20.