

## ИНТЕГРИРОВАННАЯ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*О.А.Усанова, аспирантка, М.В.Бушуев, аспирант, А.В.Невский, профессор, В.А. Шарнин, проректор по научной работе  
кафедра Общей химической технологии  
Ивановский государственный химико-технологический университет  
e-mail:nevsky@isuct.ru*

**П**редложена методология проектирования водных ресурсосберегающих химико-технологических систем стекольных производств. Основой ее служит термодинамический подход к анализу и синтезу (проектированию) производственных процессов (применение термодинамического эксергетического метода). Предложенная методология апробирована при проектировании водных химико-технологических систем крупных стекольных предприятий (производство по выпуску стекловолокна, стеклоткани, бронированного стекла).

**Ключевые слова:** водопотребление, водоотведение, ресурсосбережение, стекольное производство

К началу нынешнего тысячелетия обнаружилась тенденция к подъему и интенсивному развитию стекольной промышленности. Рост выпуска продукции предприятий стекольной промышленности, повышение ее качества и ассортимента обусловлены повышением спроса на изделия как специального назначения (стекловолокна, стеклоткани, бронированного стекла и др.), так стеклотары, потребителями которой являются предприятия таких успешно развивающихся отраслей, как пищевая, фармацевтическая, химическая и др.. При ежегодном росте промышленного производства в России за последние годы на уровне 5 – 7 %, рост производства стекольной промышленности достигает 20 – 25 %. С ростом объемов производства существенно увеличиваются сырьевые затраты стекольной отрасли, особенно такого ценного сырья, как свежая вода, растут объемы отработанной технологической воды и загрязненных сточных вод. При этом, естественно, возрастают энергозатраты на транспортировку (перекачку) водных потоков по коммуникациям и технологическому оборудованию.

В ходе обследования ряда крупных действующих стекольных производств нами был проведен эколого-технологический анализ ряда производственных процессов стекольных предприятий, а именно, производства стекловолокна, стеклоткани, бронированного стекла. Установлено, что основное количество потребляемой свежей воды используется преимущественно на промывку выпускаемых изделий и технологического оборудования. Высокий уровень водопотребления обуслов-

ливает и значительный объем образования сточных вод.

Обследованные нами производства стекловолокна и стеклоткани представляют чередующиеся ванны выщелачивания (в растворе серной кислоты) и ванны промывки водопроводной водой с завершением процесса промывкой в ванне с обессоленной водой. Кроме того, с периодичностью, примерно, один раз в два месяца происходит смена всех рабочих растворов в ваннах выщелачивания и один-два раза в год – смена рабочих растворов в ваннах смачивания. При производстве бронированного стекла в процессе его химического травления (в растворе плавиковой кислоты) образуются сточные воды, содержащие свободные кислоты – плавиковую и кремнефтористоводородную и нерастворимые соли этих кислот. Потери кислот со сточными водами в данных производствах составляют, в среднем, со сточными водами порядка 40 %, со шламом на уровне 30 %.

В настоящее время традиционным подходом к организации систем водного хозяйства стекольных предприятий является прямоточное (не повторно-последовательное) техническое водоснабжение и объединение отработанной технологической воды (сточных вод) отдельных подразделений (цехов). Далее этот объединенный поток, в лучшем случае, подвергается обработке на локальных очистных сооружениях (ЛОС) предприятия, но чаще, сбрасывается в систему водоотведения населенного пункта для последующей очистки на биологических сооружениях.

Нами ранее показано, что такой подход не отвечает требованиям теории и практики

анализа и синтеза (проектирования) энерго-ресурсосберегающих водных химико-технологических систем (ВХТС) [1]. В частности, в работах [2, 3] установлено, что смешение водных технологических потоков различного происхождения приводит к увеличению суммарной энтропии системы в результате разбавления (рассеивания) ингредиентов. Это, в свою очередь, увеличивает энергетические и, следовательно, экономические затраты на последующую обработку воды. При рассмотрении качественной, организационной стороны вопроса желательным, насколько это возможно, избегать смешивания потоков отработанной воды различных технологических линий данного предприятия. Для количественной характеристики происходящих процессов необходим метод, позволяющий оценить степень рассеивания компонентов жидкофазной системы за счет разбавления водных потоков (сточных вод) при их нецелесообразном смешивании. Удобной для использования характеристикой в этом случае может быть величина потери эксергии:

$$Ex = H - T_0 S \quad (1)$$

где:  $H$ ,  $S$  и  $T_0$  – соответственно энтальпия, энтропия и абсолютная температура системы (индекс «0» означает состояние системы в условиях окружающей среды).

Абсолютная величина потери эксергии,  $\Delta Ex$ , равна:

$$\Delta Ex = Ex_{кон} - Ex_{нач} \quad (2)$$

где:  $Ex_{нач}$  и  $Ex_{кон}$  – эксергия жидко-фазной системы соответственно на входе в систему (до смешивания потоков) и на выходе из системы (после объединения потоков).

В свою очередь, величина потери эксергии,  $\Delta Ex$ , при изменении состава системы, в частности, при смешивании водных технологических потоков может быть рассчитана как:

$$\Delta Ex = -RT_0 \sum_i^n n_i \ln \frac{1}{X_i} \quad (3)$$

Или

$$\Delta Ex = -RT_0 \sum_i^n \left[ \left( \frac{m_i}{M_i} \right) \ln \frac{1}{\frac{(m_i / M_i)}{\sum_j (m_j / M_j)}} \right] \quad (4)$$

где:  $n_i$  – молярный расход вещества, содержащегося в водном потоке, (моль/час);  $X_i$  – мольная доля вещества, содержащегося в водном потоке;  $m$  – массовый расход ве-

щества, содержащегося в водном потоке (кг/час);  $M$  – мольная масса вещества, содержащегося в водном потоке (кг/моль); индекс  $i$  относится к данному виду компонента (вещества), а индекс  $j$  – к набору всех компонентов, содержащихся в водных потоках.

Значения расходов вещества, содержащегося в водном потоке, определяются технологическими параметрами. Если виды компонентов – загрязняющих веществ (ЗВ) точно известны, тогда их мольные доли могут быть легко рассчитаны. Однако, в силу разных причин точная мольная масса для каждого ЗВ может быть неизвестна, например, если расчет ведут по брутто-показателям состава водной фазы (например, таким как «общее содержание кислоты, щелочи», «взвешенные вещества», «химическое потребление кислорода», или другим). В первом приближении предположим, что все ингредиенты имеют одинаковую молекулярную массу. Эта аппроксимация вполне возможна, так как для выбора последовательности процессов обработки водных потоков интерес представляет не истинное значение потери эксергии, а ее относительные изменения для рассматриваемых вариантов. Тогда уравнение 4 можно записать в виде:

$$\Delta Ex = - \frac{RT_0}{M} \sum_i^n m_i \ln \frac{\sum_j m_j}{m_i} \quad (5)$$

где:  $M_i = M_j = M$ .

Следовательно, вместо расчета абсолютной величины потери эксергии,  $\Delta Ex$ , можно оценить значение относительного изменения потери эксергии при смешивании водных потоков, %  $\Delta Ex$  :

$$\% \Delta Ex = \frac{\Delta Ex}{Ex_{ex}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Таким образом, понятие эксергии, как меры технической работоспособности, максимальной способности системы к совершению работы с учетом взаимодействия с окружающей средой, может быть использовано для определения снижения потенциала жидкофазной системы в процессе смешивания ее компонентов и может служить мерой деградации (разбавления) водных технологических потоков.

Целью данной работы было проектирование структуры интегрированной ресурсосберегающей химико-технологической системы водного хозяйства (И-ВХТС) стекольного производства, предусматривающей повторно-последовательное водопотребления и водоотведения, высокоэффективную обработ-

ку сточных вод и их повторное использование. Для достижения поставленной цели применяли разработанную нами методологию проектирования систем водопотребление и водоотведение промышленных предприятий [1], а также результаты проведенного эколого-технологического анализа основных процессов предприятий стекольной промышленности [4, 5].

В табл. 1 приведены исходные данные для проектирования структуры целевой И-ВХТС стекольного производства на базе индивидуальных ВХТС, соответствующих отдельным технологическим процессам.

В качестве обобщающей характеристики (брутто-показателя) уровня загрязнения технологической воды в рассматриваемых производствах нами принят показатель «общее содержание кислоты», мг/л, – один из основных нормируемых показателей водных потоков стекольных предприятий. Начальные значения этого показателя – на входе в соответствующую технологическую операцию,  $C_{вх.}$ , представляют собой рекомендуемые величины для технологической воды, используемой на отдельных операциях в стекольном производстве. Конечные значения показателя – на выходе из соответствующей технологической операции,  $C_{вых.}$ , оценены нами по данным инвентаризации источников отведения отработанной технологической воды в процессе функционирования соответствующих производственных линий.

Масса ЗВ, перешедших в воду в результате ее контакта с обрабатываемыми (промышленными) изделиями, соответствующая данному изменению значения «общее содержание кислоты» в водном технологическом потоке (массовая нагрузка),  $m$ , очевидно равна:

$$m = (C_{вых.} - C_{вх.}) \cdot Q_{в.},$$

где  $Q_{в.}$  – расход технологической воды из расчета трехсменной работы оборудования.

С целью разработки оптимального технико-эколого-экономического варианта проекта И-ВХТС стекольного производства нами проведен численный эксперимент, задачей которого явилась генерация многовариантного набора параметров рассматриваемой И-ВХТС. Расчет параметров И-ВХТС проводили на ЭВМ с помощью специально разработанной информационной системы проектирования [6, 7].

Результаты расчета на базе анализа трех основных водных потоков: линии производст-

ва стекловолокна (ВХТС-1), линии производства стеклоткани (ВХТС-2) и линии производства бронированного стекла (ВХТС-3) приведены в табл. 2.

Низкие значения относительного изменения потери эксергии для случая смешивания технологических водных потоков линий промывки стекловолокна и стеклоткани ( $\% \Delta Ex = 1.2575$ ), обуславливают возможность принятия решения об их смешении. Видно, что вариант смешивания водного потока линии производства стеклоткани с водным потоком линии производства бронированного стекла является нежелательным в связи с максимальным значением относительного изменения потери эксергии ( $\% \Delta Ex = 2.3369$ ). Аналогичная неблагоприятная ситуация наблюдается для варианта смешивания водных потоков всех трех линий ( $\% \Delta Ex = 2.4135$ ).

В пользу такого решения свидетельствуют также данные, полученные нами при проведении эксергетического анализа вариантов смешивания-разделения двенадцати подпотоков рассматриваемых цехов (см. табл. 1). В итоге получено порядка четырех тысяч вариантов смешения подпотоков рассматриваемых цехов. Значительное количество вариантов проектирования является особенностью применения термодинамического эксергетического метода анализа и синтеза ресурсосберегающих ВХТС рассматриваемых нами стекольных предприятий. Показано, что основная часть наиболее приемлемых вариантов проектов (с наименьшей относительной потерей эксергии – варианты смешения подпотоков линий производства стекловолокна и стеклоткани и наиболее близкие по характеристикам варианты смешения подпотоков линий производства стекловолокна и стеклоткани и первого и второго подпотока линии производства бронированного стекла) находится, примерно, в первой трети общего количества проанализированных вариантов смешения водных подпотоков.

Для рассматриваемых ВХТС при невысоких, в целом, абсолютных значениях  $\% \Delta Ex$  диапазон изменения данной величины для различных комбинаций объединения потоков достаточно широк (более трех порядков). Это дает основание сделать убедительное заключение о преимуществах или недостатках того или иного варианта объединения водных технологических потоков подразделений стекольного производства.

Таблица 1. Исходные данные для проектирования интегрированной ВХТС стекольного производства.

№ ВХТС	Тех. операция	Q, м <sup>3</sup> /сут м <sup>3</sup> /час	C <sub>вх</sub> , мг/л	C <sub>вых</sub> , мг/л	m, кг/час
<b>1. Линия производства стекловолокна</b>					
1.1	Центрифугирование, отмывка и обезвоживание	18.0 1.0	10	100	0.090
1.2	Первая ванна промежуточной промывки	36.0 2.0	10	1400	2.78
1.3	Вторая ванна промежуточной промывки	36.0 2.0	10	1400	2.78
1.4	Ванна промывки	36.0 2.0	10	3000	5.98
	Итого	126.0 7.0		1696	11.63
<b>2. Линия производства стеклоткани</b>					
2.1	Вторая ванна промывки	108.0 6.0	10	400	2.34
2.2	Первая ванна промывки	108.0 6.0	10	600	3.54
2.3	Первая ванна промежуточной промывки	36.0 2.0	600	2000	2.80
2.4	Вторая ванна промежуточной промывки	36.0 2.0	400	3000	5.20
	Итого	288.0 16.0		954	13.88
<b>3. Линия производства бронированного стекла</b>					
3.1	Промывка осадка регенерирующего раствора (мешочный фильтр)	0.03 0.0025	2.0	300	0.001
3.2	Промывка ионообм. смолы - 2-ая порция (ионообм. фильтр)	0.4 0.033	2.0	400	0.013
3.3	Промывка ионообм. смолы - 1-ая порция (ионообм. фильтр)	0.4 0.033	2.0	5500	0.18
3.4	Промывка стекла а ванне улавливания (ванна промывки-улавливания)	1.01 0.084	30	10000	0.84
	Итого	1.84 0.15		6903	1.032

Таким образом, результаты проектирования позволяют предложить оптимальный вариант сети водных технологических потоков стекольного предприятия и разработать структуру его И-ВХТС, функциональная блок-схема которой приведена рис. 1.

В соответствии с этой схемой поток отработанной технологической воды линии производства бронированного стекла отдельно отводится и очищается на самостоятельных локальных очистных сооружениях (ЛОС-1). Сточные воды линий производства

стекловолокна и производства стеклоткани смешиваются и проходят последующую обработку на самостоятельных ЛОС-2. Основной объем очищенных сточных вод (до 90%) направляется на повторное использование. Оставшаяся часть воды, обработанной на ЛОС-1 и ЛОС-2 (до 10%), сбрасывается (С) в систему водоотведения населенного пункта. Объем свежей воды, равный объему сброшенных очищенных сточных вод, направляется на подпитку (П) оборотной системы водного хозяйства стекольного предприятия.

Таблица 2. Результат расчета параметров структуры И-ВХТС при проведении эксергетического анализа трех основных вариантов технологических потоков.

Технологические операции	$m_{зв}$ , кг/час	$m_{H_2O}$ , кг/час	$X_{зв}$	$X_{H_2O}$	$\Delta E_x$ , кДж/час	$\% \Delta E_x$ , %
Производство стекловолокна (СВ)	11.63	126000	0.0845019	0.9154981	-39.8616728	
Производство стеклоткани (СТ)	13.88	288000	0.0459785	0.9540215	-56.3004821	
Производство бронированного стекла (БС)	1.032	1840	0.3593315	0.6406685	-1.8755096	
Смешивание (СВ+СТ)	25.51	414000	0.0580419	0.9419581	-97.3714307	1.2575
Смешивание (СВ+БС)	12.66	127840	0.0901197	0.9098803	-42.5460723	1.9380
Смешивание (СТ+БС)	14.91	289840	0.0489316	0.9510684	-59.5355213	2.3369
Смешивание (СВ+СТ+БС)	26.54	415840	0.0599979	0.9400021	-100.4038151	2.4135

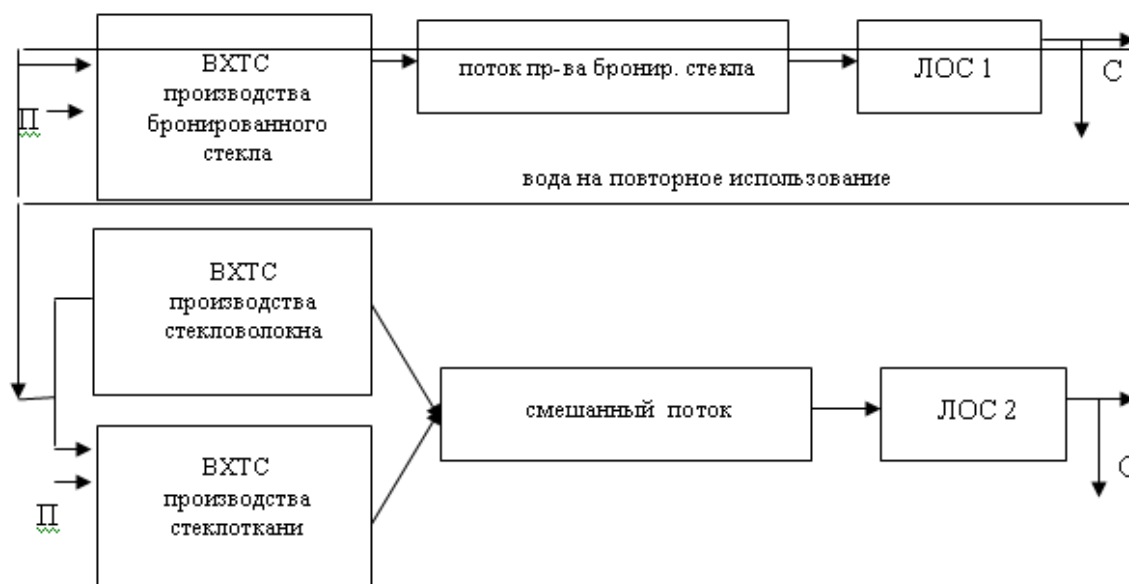


Рис. 1. Функциональная блок-схема интегрированной ресурсосберегающей химико-технологической системы водного хозяйства стекольного предприятия.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Невский, А. В. Анализ и синтез водных ресурсосберегающих химико-технологических систем / А. В. Невский, В. П. Мешалкин, В. А. Шарнин. – М. : Наука, 2004. – 212 с.
2. Кутепов, А.М. Общая химическая технология / А. М. Кутепов, Т. И. Бондарева, М. Г. Беренгартен. – М. : Высшая школа, 1990. – 520 с.
3. Термодинамический подход к проектированию систем водопотребления и водоотведения промышленного предприятия / А. М. Кутепов, В. П. Мешалкин, А. В. Невский, В. А. Шарнин, В. А. Шорманов / Экология и промышленность России. – 2002. – № 4. – С. 12–15.
4. Ресурсосберегающие технологии травильных операций стекольного производства / О. А. Усанова, В. Ф. Павлова, А. В. Невский, В. А. Шарнин // Вузовская наука – региону : сб. матер. IV Всеросс. научно-техн. конф., Вологда, Россия, 4–8 апреля 2006. – Вологда, 2006. – С. 515–517.
5. Информационная система анализа и синтеза энергоресурсосберегающих водопотребляющих химико-технологических процессов / А. В. Невский, В. А. Шарнин, М. В. Бушуев, О. А. Усанова // Научно-технологические технологии-2008 : докл. XII Междунар. научно-техн. конф., Волгоград, Россия, 21–24 мая 2008. – Волгоград, 2008. – С. 284.
6. Разработка информационной системы эксергетического анализа при проектировании ресурсосберегающих технологических процессов / М. В. Бушуев, О. В. Кашина, А. В. Невский, В. А. Шарнин В.А. // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 3. – С. 69–76.
7. Ватагин, В. С. Нейротехнологии проектирования интегрированных автоматизированных систем управления техногенной безопасностью производства / В. С. Ватагин, А. В. Невский // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 4. – С. 75–81.