

ОСОБЕННОСТИ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

О.В. Кашина, ведущий инженер, М.В. Бушуев, соискатель,
А.В. Невский, профессор, В.А. Шарнин, проректор по научной работе,
заведующий кафедрой

кафедра Общей химической технологии

Ивановский государственный химико-технологический университет

e-mail: nevsky@isuct.ru

Рассмотрены особенности применения метода эксергетического анализа энергоресурсо-сберегающих систем водного хозяйства промышленных предприятий. Проведен анализ влияния изменения величины массовой нагрузки по загрязняющему веществу на изменение значения эксергии при смешивании водных технологических потоков.

The specific features of applying the exergy analysis method for the energy resource saving waterworks systems of industrial plants were considered. The analysis of the influence of changes in polluting substance mass loading value on changes in exergy value upon mixing water technological flows was carried out.

Ключевые слова: энергоресурсосбережение, водопотребление, водоотведение.

Key words: energy resource-saving, water consumption, wastewater disposal.

Одной из основных проблем, возникающих при организации энергоресурсосберегающих систем водного хозяйства промышленных предприятий, является поиск оптимального варианта разделения или смешивания индивидуальных водных потоков с целью их обработки, повторного использования очищенной воды или сброса сточных вод (СВ). Увеличение числа компонентов, присутствующих в жидкофазной системе обычно приводит к росту числа взаимодействий между этими компонентами. Таким образом, смешивание водных технологических потоков различного происхождения приводит к разбавлению (рассеиванию) токсичных ингредиентов. Это, в свою очередь, увеличивает энергетические и, следовательно, экономические затраты на последующую обработку воды. Рассматривая качественную сторону вопроса, желательно, насколько это возможно, избегать разбавления СВ и происходящего при этом рассеивания компонентов. Для количественной характеристики происходящих процессов необходим метод, позволяющий оценить степень рассеивания компонентов жидкофазной системы за счет разбавления водных потоков при их нецелесообразном смешивании. Весьма перспективным в этом случае является метод эксергетического анализа, в основе которого лежит оценка термодинамической характеристики – величины эксергии [1, 2]:

$$E_x = H - T_0 S, \quad (1)$$

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

Связи, устанавливаемые в ходе эксергетического анализа между термодинамическими

параметрами и технико-экономическими показателями проектируемой водоиспользующей химико-технологической системы (ВХТС), дают возможность оценить эффективность функционирования последней, а также определить пути и способы повышения ее эффективности. Экологическое содержание получаемых при таком анализе оценок обусловлено, прежде всего, тем, что они основаны на расчете минимально необходимых материальных и энергетических затрат на реализацию исследуемого технологического процесса. В большинстве других методов для этих целей используют некоторые частные характеристики сравнения, по отношению к которым и оцениваются показатели изучаемого объекта; результаты подобного анализа, естественно, зависят от более или менее удачного выбора операций и объектов сравнения. Эксергетический анализ избавляет исследователя от необходимости подбора таких операций и объектов сравнения для действующих ВХТС, а для новых (проектируемых) позволяет выявить возможность их внедрения в производство путем сопоставления минимально требуемых затрат с имеющимися в наличии ресурсами.

Значение величины потери эксергии, ΔE_x , может быть использовано для определения снижения потенциала (эффективности) ВХТС в процессе объединения в производственных условиях индивидуальных водных технологических потоков различного состава. Величина потери эксергии в результате смешивания водных потоков может быть рассчитана по уравнению:

$$\Delta E_x = \Delta H + RT_0 \sum_i^n n_i \ln X_i \quad (2)$$

где: ΔH – теплота смешивания; n_i – молярный расход вещества, содержащегося в водном по-

токе, (моль/ч); X_i – мольная доля ЗВ, содержащегося в водном потоке.

Из практики известно, что потоки СВ в производственных условиях чаще всего являются достаточно разбавленными растворами (с концентрацией ингредиентов на уровне $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-1}$ моль/л). В этой связи с весьма незначительной потерей в точности можно сделать допущение об их идеальности, и величиной ΔH в уравнении 2 можно пренебречь. Тогда:

$$\Delta Ex = RT_0 \sum_i^n \left[\left(\frac{m_i}{M_{\epsilon_i}} \right) \ln \frac{(m_i / M_{\epsilon_i})}{\sum_j (m_j / M_{\epsilon_j})} \right] \quad (3)$$

где: m – массовый расход ингредиента загрязняющего вещества (ЗВ), содержащегося в водном потоке (кг/ч); M_{ϵ} – молекулярная масса вещества, содержащегося в водном потоке (кг); индекс i относится к данному виду компонента (ЗВ), а индекс j – к набору всех компонентов (ЗВ), содержащихся в водных потоках.

Значения расходов вещества, содержащегося в водном потоке, определяются технологическими параметрами. Если виды загрязняющих компонентов точно известны, тогда их мольные доли могут быть легко рассчитаны. Однако в силу разных причин точная молекулярная масса для каждого загрязняющего вещества может быть неизвестна, например, если расчет ведут по брутто-показателям (таким как взвешенные вещества или ХПК). Поэтому в первом приближении предположим, что все ингредиенты будут иметь одинаковую молекулярную массу. Эта аппроксимация возможна, так как для выбора последовательности процессов обработки водных потоков представляет интерес не истинное значение потери эксергии, а ее относительные величины для рассматриваемых вариантов. Тогда уравнение 3 можно записать в виде:

$$\Delta Ex = \frac{RT_0}{M_{\epsilon}} \sum_i^n \left[m_i \ln \frac{m_i}{\sum_j m_j} \right], \quad (4)$$

где: $M_{\epsilon_i} = M_{\epsilon_j} = M_{\epsilon}$.

Таким образом, вместо расчета абсолютной величины потери эксергии, ΔEx , можно оценить значение относительного изменения потери эксергии при смешении водных потоков, $\% \Delta E_x$:

$$\% \Delta E_x = \frac{\Delta E_x}{\Delta E_{x_{нач}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где ΔE_x – изменение потери эксергии в процессе смешения водных потоков, определяемое как:

$$\Delta E_x = \Delta E_{x_{кон}} - \Delta E_{x_{нач}}, \quad (6)$$

где: $\Delta E_{x_{нач}}$ и $\Delta E_{x_{кон}}$ – эксергия жидкофазной

системы соответственно на входе в систему (до смешения) и на выходе из системы (после объединения индивидуальных потоков).

В качестве термодинамически обоснованных должны быть выбраны такие технологические схемы взаимодействия водных потоков, которым отвечают минимальные значения величины $\% \Delta E_x$.

Практическое использование величины относительного изменения потери эксергии при смешении водных потоков фактически предполагает сравнение значения эксергии объединенного водного потока с суммой значений эксергий индивидуальных потоков до их смешения.

Тогда дальнейшая схема расчета может быть предложена в следующем варианте.

Уравнение 4 удобнее записать в виде:

$$\Delta Ex = k \sum_i^n \left[m_i \ln \frac{m_i}{\sum_j m_j} \right], \quad (7)$$

где: $k = \frac{RT_0}{M_{\epsilon}}$ – константа при данной температуре; для расчета примем $T_0 = 293$ К, $M_{\epsilon_i} = M_{\epsilon_j} = M_{\epsilon} = 18$ кг (как для воды), $R = 8.314$ Дж/(моль·град).

В настоящее время исследователи, работающие в области применения эксергетического анализа ВХТС, учитывают, в основном, влияние изменения эксергии крупных потоков вещества и энергии в масштабе производства. Ранее [3-6] нами был проведен экологического-технологического анализ основных водопотребляющих технологических процессов предприятий по выпуску масложировой продукции (производства майонеза, растительного масла) и предложены технические решения по водоресурсосбережению в данной отрасли производства. В ходе данной работы с целью развития методологии проектирования целевых интегрированных ВХТС (И-ВХТС) была предложена методика учета влияния вклада изменения эксергии при смешивании индивидуальных (частных) потоков производственных подразделений (цехов, участков, технологических линий, единичного оборудования). Так, при проектировании И-ВХТС масложирового комбината нами предложено принимать во внимание данные технологических параметров не только для трех основных водных потоков: цеха по производству майонеза (ВХТС-1), экстракционного цеха производства растительного масла (ВХТС-2) и цеха рафинации производства растительного масла (ВХТС-3), но и для частных водных потоков этих подразделений (см. табл. 1). Такая декомпозиция общей структуры ВХТС производства имеет целью повышение надежности

результатов проектирования целевой И-ВХТС и расширяет возможности выбора при принятии решения об оптимальном варианте разделения – смешивания водных технологических потоков производства в целом.

В данном случае в качестве обобщающей характеристики (брутто-показателя) уровня загрязнения технологической воды в рассматриваемом производстве нами принят показатель химического потребления кислорода (ХПК) водной пробы. Начальные значения показателя ХПК (соответствующие концентрации кислорода – в миллиграммах кислорода на литр воды)

– на входе в соответствующую технологическую операцию, $C_{вх.j}$ – представляют собой рекомендуемые величины для технологической воды, используемой на отдельных операциях в масложировом производстве. Подстрочный индекс j относится к данной индивидуальной ВХТС. Конечные значения величины ХПК – на выходе из соответствующей технологической операции $C_{вых.j}$ – оценены нами по данным обследования и инвентаризации источников отведения отработанной технологической воды на действующих предприятиях.

Таблица 1. Исходные данные для проектирования структуры целевой И-ВХТС масло-жирового комбината.

№, п/п	Технологическая операция (частные водные потоки)	$Q_{в.j},$ м ³ /сут/м ³ /ч	$C_{вх.j},$ мг О ₂ /л	$C_{вых.j},$ мгО ₂ /л	$m_j,$ кг/ч	$2m_j,$ кг/ч	$m_j/2,$ кг/ч
ВХТС-1		Производство майонеза					
1.	Мойка новой тары	65 / 4.643	5	180	0.813	1.626	0.4065
2.	Мойка возвратной тары	75 / 5.357	100	1500	7.500	15	3.75
3.	Промывка оборудования	10 / 0.714	500	30000	21.063	42.126	10.531
	Всего:	150 / 10.714			29.376	58.752	14.688
ВХТС-2		Экстракционный цех					
1.	Охлаждение паров растворителя при отгонке из шрота	140 / 10.000	5	100	0.95	1.9	0.475
2.	Отгонка растворителя из шрота	42 / 3.000	150	600	1.35	2.7	0.675
3.	Шламовыпариватель	14 / 1.000	300	800	0.5	1	0.250
4.	Мойка оборудования	8 / 0.571	500	30000	16.845	33.69	8.422
	Всего:	204 / 14.571			19.645	39.29	9.822
ВХТС-3		Цех рафинации					
1.	Охлаждение, сушка масла (барометрические воды)	50 / 3.571	5	100	0.339	0.678	0.169
2.	Промывка масла после щелочной нейтрализации	15 / 1.071	50	3000	3.159	6.318	1.579
3.	Разложение соапстоков, мойка оборудования и помещений	20 / 1.429	3000	8000	7.145	14.29	2.382
	Всего:	85 / 6.071			10.643	21.286	5.321
	Итого:	439 / 31.356			59.664	119.33	29.832

Масса ЗВ, перешедших в воду в результате ее контакта с технологическим оборудованием, соответствующая данному изменению значения ХПК в водном технологическом потоке – массовая нагрузка, m_j , очевидно, равна:

$$m_j = (C_{вых.j} - C_{вх.j}) * Q_{в.j}, \quad (8)$$

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

Для разработки оптимального технико-эколого-экономического варианта проекта целевой И-ВХТС нами проведен численный эксперимент, в задачу которого входило формирование

базы данных, состоящей из многовариантного набора параметров структуры проектируемой И-ВХТС. Расчет параметров И-ВХТС проводили с помощью разработанной нами информационной системы, включающей пакет прикладных программ [7].

Особый интерес представляет изучение влияния изменения массовой нагрузки ЗВ, содержащихся в водном потоке в ходе технологического процесса, на значение величины потери эксергии. Значения массовой нагрузки ЗВ определяются заданным интервалом технологи-

ческих параметров процесса и могут варьироваться в пределах данного интервала как в сторону уменьшения, так и увеличения. В табл. 1 в колонке 6 приведены значения массовой нагрузки, соответствующие принятым в данное время на производстве, а в колонках 7 и 8 – соответственно увеличенные и уменьшенные в

два раза. В ходе проведения численного эксперимента нами рассмотрено более тысячи вариантов разделения – смешивания водных технологических потоков в пределах допустимого варьирования величины массовой нагрузки ЗВ. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

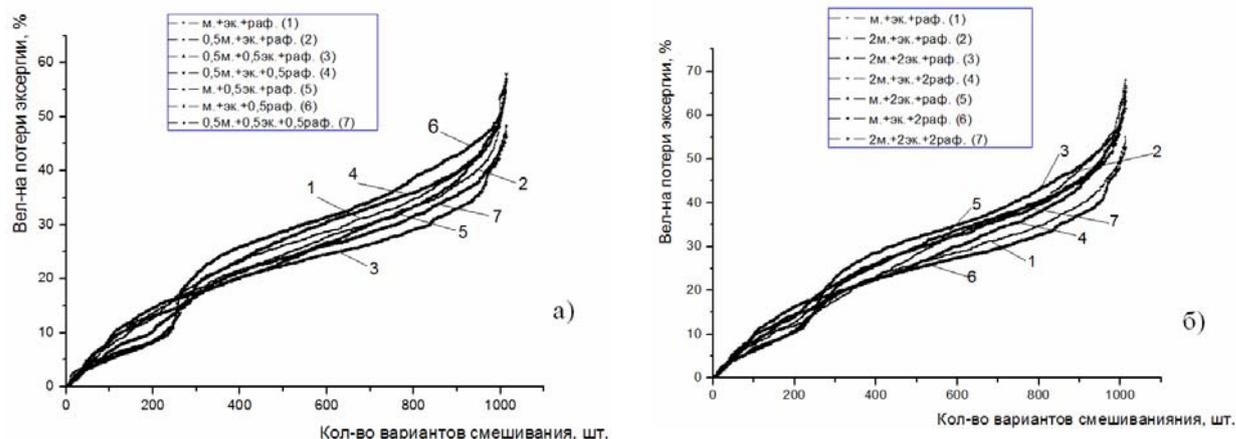


Рис. 1. Зависимость величины относительной потери эксергии от количества вариантов смешивания частных водных потоков:

- а) при уменьшении массовой нагрузки ЗВ в два раза по сравнению с исходным значением;
 - б) при увеличении массовой нагрузки ЗВ в два раза по сравнению с исходным значением;
- обозначения: м. – производство майонеза; эк. – экстракционный цех; раф. – цех рафинации; коэффициенты 2 и 0.5 – означают соответствующие увеличение и уменьшение массовой нагрузки ЗВ по сравнению с исходным значением для рассматриваемых цехов.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что при пошаговом изменении массовой нагрузки наблюдается точка перегиба на соответствующих зависимостях, которая лежит в области значений величины относительной потери эксергии 15–20% при количестве вариантов смешивания в диапазоне 260–280. Вероятно, этот диапазон вариантов смешивания является наиболее чувствительным, значимым и информативным для принятия решения об оптимальной структуре И-ВХТС. В качестве термодинамически обоснованных должны быть выбраны такие технологические схемы взаимодействия водных потоков, которым отвечают минимальные значения величины $\% \Delta E_x$. Именно в указанной области находятся низкие значения относительной потери эксергии, соответствующие наиболее благоприятным вариантам разделения – смешивания водных технологических потоков целевой И-ВХТС в рассматриваемом случае.

Представляется важным анализ полученных результатов при варьировании количества смешиваемых частных водных потоков производства. Из приведенных на рисунке зависимостей видно, что, если в области смешивания относительно небольшого количества водных потоков соответствующие кривые близко расположены друг относительно друга, то при увеличении вариантов смешивания – зависимости меняют положение относительно друг друга с наблюда-

емым увеличением расстояния между кривыми. Очевидно, это связано с более резким увеличением значений относительной потери эксергии в этих условиях. Как следствие, увеличение вариантов смешивания при росте количества участвующих в этом частных водных потоков, приводит к необходимости принятия решения о нецелесообразности с точки зрения термодинамики объединения водных технологических потоков рассматриваемых цехов в данных вариантах проектирования.

В табл. 2 приведены результаты расчета параметров структуры проектируемой И-ВХТС, соответствующие исходным данным, приведенным в табл. 1 (случай, без варьирования величины массовой нагрузки ЗВ относительно принятой в производстве). Видно, что низкие значения относительного изменения потери эксергии для случая смешивания технологических водных потоков экстракционного цеха и цеха рафинации ($\% \Delta E_x = 0.1015$), а также производства майонеза и цеха рафинации ($\% \Delta E_x = 0.2958$) обуславливают возможность принятия решения об их смешении.

Очевидно, что вариант смешивания водного потока экстракционного цеха с водным потоком производства майонеза является нежелательным в связи с максимальным значением относительного изменения потери эксергии ($\% \Delta E_x = 0.8630$). Аналогичная неблагоприятная ситуация наблюдается для варианта смешивания водных потоков всех трех производств ($\% \Delta E_x = 0.7167$).

Таблица 2. Расчет параметров структуры проектируемой И-ВХТС.

Производства	$m_{\text{комп.}}$ кг/ч	$m_{\text{воды}}$ кг/ч	$X_{\text{комп.}}$	$X_{\text{воды}}$	ΔE_x , кДж/ч	$\% \Delta E_x$
произв-во майонеза (м)	29.376	10714	0.002734	0.997266	-27433.2	
экстракционный цех (эк)	19.645	14571	0.001346	0.998654	-20231.1	
цех рафинации (раф)	10.643	6071	0.001750	0.998250	-10582.6	
смешивание (эк + раф)	30.288	20642	0.001465	0.998535	-30845.0	0.1015
смешивание (м + раф)	40.019	16785	0.002379	0.997621	-38128.3	0.2958
смешивание (м + эк + раф)	59.664	31356	0.001903	0.998097	-58662.5	0.7167
смешивание (м + эк)	49.021	25285	0.001935	0.998065	-48075,7	0.8630

Таким образом, при выборе окончательного, оптимального варианта объединения водных потоков цехов решающее значение должно иметь минимальное значение относительной потери эксергии для случая смешивания технологических потоков экстракционного цеха и

цеха рафинации. Этот вывод полностью подтверждается заключениями, сделанными в ходе проведенного выше анализа полученных данных при варьирования величины массовой нагрузки ЗВ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Невский А.В., Мешалкин В.П., Шарнин В.А. Анализ и синтез водных ресурсосберегающих химико-технологических систем. – М.: Наука, 2004. 212 с.
2. Невский А.В., Вагагин В.С., Шарнин В.А., Усанова О.А., Бушуев М.В. Термодинамический подход к проектированию энергоресурсосберегающих химико-технологических систем водопотребления // Вестник Казанского технол. ун-та. 2010. № 2. С. 145–149.
3. Кашина О.В., Невский А.В., Шарнин В.А. Экологические технологии: проектирование водосберегающей химико-технологической системы для масложирового производства // Инж. экология. 2007. № 1. С. 48–54.
4. Кашина О.В., Бушуев М.В., Невский А.В., Шарнин В.А. Ресурсосберегающая химико-технологическая система водного хозяйства экстракционного цеха масложирового комбината // Изв. вузов. Химия и хим. технол. 2008. Т. 51. Вып. 1. С. 98–101.
5. Кашина О.В., Бушуев М.В., Невский А.В., Шарнин В.А. Проектирование водной ресурсосберегающей химико-технологической системы цеха рафинации масложирового производства // Экология и промышленность России. 2008. № 5. С. 15–17.
6. Кашина О.В., Бушуев М.В., Невский А.В., Шарнин В.А. Ресурсосберегающая система водопотребления и водоотведения масложирового комбината // Экология и промышленность России. 2009. № 2. С. 16–18.
7. Бушуев М.В., Кашина О.В., Невский А.В., Шарнин В.А. Разработка информационной системы эксергетического анализа при проектировании ресурсосберегающих технологических процессов // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 3. С. 69–76.