

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗОПРЕНОВОГО КАУЧУКА (СКИ-3) В УСЛОВИЯХ ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

Мешалкин В.П., академик РАН, д-р техн. наук, профессор, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ), профессор кафедры логистики и экономической информатики, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», г. Москва

Кудрявцева С.С., д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры логистики и управления ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань

Минулина О.В., соискатель кафедры логистики и управления, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань

В статье предложена методика по расчету эффективности системы водопользования в производстве изопренового каучука (СКИ-3) в условиях экономики замкнутого цикла. Благодаря предлагаемой методике у пользователей имеется инструментальный и методические наработки, которые позволяют оценивать эффективность производственных систем в условиях экономики замкнутого цикла. Апробация данной методики приведена на примере нефтехимических производств в части их водоснабжения. Применение методики позволяет автоматизировать расчет эффективности водопользования в нефтехимических производствах в экономике замкнутого цикла, по таким параметрам, как расчетный объем воды, возвращаемый в производственный цикл; объем воды, поступающей в водооборотный цикл производства вместе с сырьем мономером-изопреном; удельный вес воды, используемой в системе замкнутого водоснабжения; коэффициент использования первичной воды из стороннего источника; удельный вес потери воды в процессе производства каучука.

Ключевые слова: водопользование, экономика замкнутого цикла, изопреновый каучук, эффективность систем, балансовая модель, ресурсосбережение.

Цитирование: Мешалкин В.П., Кудрявцева С.С., Минулина О.В. Анализ эффективности организации систем водопользования в производстве изопренового каучука (СКИ-3) в условиях экономики замкнутого цикла // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 4(85). С. 86–90.

ВВЕДЕНИЕ

Ресурсоэнергосбережение позволяет не только обеспечить природные и материальные ресурсы для будущих поколений, растянуть на значительно более длительные сроки их рациональное использование и обеспечить охрану окружающей среды, но также открывает широчайшие возможности для увеличения объема выпуска высококачественной продукции при тех же или даже меньших затратах общественного труда и экономии капитальных вложений.

Важным показателем эффективности химико-технологической системы и уровня ресурсоэнергосбережения в нефтегазохимическом комплексе является материалоемкость продукции. Материалоемкость продукции — это удельный расход всех видов материальных ресурсов, необходимых для изготовления единицы какой-либо продукции, который выражается либо в натуральных показателях, либо в процентах стоимости использованных сырья и топливно-энер-

гетических ресурсов в себестоимости продукции. Снижение материалоемкости химической продукции позволяет повысить уровень ресурсосбережения в промышленности.

В современных малоотходных производственных системах в силу ограниченности технологий переработки побочных продуктов имеется возможность замыкать лишь отдельные стадии технологического процесса. Наиболее часто на нефтехимических предприятиях прибегают к рациональному потреблению энергетических ресурсов и используют замкнутое или обратное водоснабжение [1–4].

В нефтехимическом производстве циркулирует значительное количество воды для различных целей. Например, в производстве синтетического каучука в ПАО «Нижнекамскнефтехим» потребляется до 1600 м³ на тонну продукции. Вода используется для технологических целей (как растворитель, как среда для осуществления физических и

механических процессов и пр.), в качестве теплоносителя и хладагента, в качестве сырья и реагента.

При этом водооборотные циклы технологических установок нефтехимических предприятий позволяют многократно использовать воду без выброса загрязненных стоков в водоемы, а потребление первичной воды для ее восполнения ограничено только технологическими превращениями (в качестве компонента сырья) и естественными потерями.

В нефтехимических производствах используют три основных типа систем оборотного водоснабжения. На примере производства изопренового каучука (СКИ-3) завода по производству синтетических каучуков ПАО «Нижнекамскнефтехим» визуализирована схема оборотного водообеспечения с охлаждением воды. В целом в производстве каучука СКИ-3 минимальный и максимальный расход воды (первичной воды, забираемой из внешних источников) составляет, соответственно, 0,89–0,95 Гкал/т в год [5,6].

ОСНОВНАЯ ПРОБЛЕМАТИКА СТАТЬИ

Водооборотный цикл производства СКИ-3 образует следующие потоки, которые подлежат непрерывному мониторингу на основе данных расходомеров:

поток 1 – объем первичной воды из источника (добавочный объем) (Q_1);

поток 2 – объем воды, подаваемой из резервуара в производство (Q_2);

поток 3 – объем воды, безвозвратно потребляемый в производстве (Q_3);

поток 4 – объем оборотной воды как вторичного ресурса (Q_4);

поток 5 – объем потерь воды на испарение и унос из охладительных установок (Q_5);

поток 6 – объем воды, сбрасываемой в водоем (Q_6).

поток 7 – объем воды, удаляемой со шламом (остаточным продуктом) (Q_7).

Водооборотный цикл состоит из семи основных потоков, которые образуют балансовые модели. Исходя из представленных выше схем водооборота в производстве можно выделить базовые балансовые равенства, определяемые объем первичного водного ресурса (приобретаемого со стороны) и вторичного водного ресурса, возвращаемого в производственный цикл.

Балансовая модель № 1 – баланс объема добавочной первичной воды из источника ввиду безвозвратных потерь воды в процессе производства:

$$Q_1 = \sum (Q_3, Q_5, Q_6, Q_7), \quad (1)$$

где Q_1 – объем первичной воды из источника (добавочный объем);

Q_3 – объем воды, безвозвратно потребляемый в производстве;

Q_5 – объем потерь воды на испарение и унос из охладительных установок;

Q_6 – объем воды, сбрасываемой в водоем;

Q_7 – объем воды, удаляемая со шламом (остаточным продуктом).

Балансовая модель № 2 – баланс оборотной воды как вторичного ресурса, возвращаемого в производственный цикл:

$$Q_4 = Q_2 - \sum (Q_3, Q_5, Q_6, Q_7), \quad (2)$$

где Q_4 – объем оборотной воды как вторичного ресурса;

Q_2 – объем воды, подаваемой из резервуара в производство.

Технология непрерывного мониторинга на основе данных, аккумулируемых с расходомеров, позволяет формировать базу данных о расходе воды на том или ином участке (потоке) замкнутого водообращения. Ниже в табл. 1 представ-

Таблица 1

Данные с расходомеров воды в водооборотном цикле и параметры технического регламента производства каучука СКИ-3 (рассчитано авторами)

№ ЗАМЕРА	ОБЪЕМ ВОДЫ, ПОДАВАЕМОЙ ИЗ РЕЗЕРВУАРА В ПРОИЗВОДСТВО (Q_2), м ³ В СУТКИ	ОБЪЕМ ВОДЫ, СБРАСЫВАЕМОЙ В ВОДОЕМ (Q_6), м ³ В СУТКИ	ОБЪЕМ СЫРЬЯ (МОНОМЕРА-ИЗОПРЕНА), ТОНН В СУТКИ	ЗАДАННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ПОТОКА ВОДЫ (λ)	ВЛАЖНОСТЬ МОНОМЕРА-ИЗОПРЕНА (β), %
1	43700	600	12700	0,45	30
2	29700	650	13000	0,45	30
3	47500	660	13100	0,50	32
4	28500	690	13400	0,55	32
5	25000	710	13600	0,45	32

лены отдельные параметры процесса водной дегазации полимеризата в производстве СКИ-3 (на примере ПАО «Нижнекамскнефтехим»). Замеры производились по партиям изопренового каучука в течение 6 календарных месяцев. Отметим, что расчет эффективности системы водопользования в производстве СКИ-3 произведен при отсутствии расходомера на участке «Поток 4 – объем оборотной воды как вторичного ресурса».

Эффективность системы водопользования в производстве СКИ-3 в условиях замкнутого цикла рассчитаем по следующим показателям.

1. Расчетный объем воды, возвращаемый в производственный цикл:

$$Q_{4расч} = Q_2 \times \lambda, \tag{3}$$

где $Q_{4расч}$ – расчетный объем оборотной воды как вторичного ресурса;
 Q_2 – объем воды, подаваемой из резервуара в производство;
 λ – заданный коэффициент рециркуляции потока воды.

2. Объем воды, поступающей в водооборотный цикл производства вместе с сырьем мономером-изопреном:

$$Q_8 = Q_{сырья} \times \beta, \tag{4}$$

где Q_8 – объем воды, поступающей в водооборотный цикл производства вместе с сырьем (мономером-изопреном);
 $Q_{сырья}$ – объем сырья (мономера-изопрена), поступающего в производство;
 β – влажность мономера-изопрена.

3. Удельный вес воды, используемой в системе замкнутого водоснабжения:

$$УЗВ = \frac{Q_{4расч}}{\Sigma (Q_{4расч}, Q_2, Q_8)} * 100, \tag{5}$$

где $УЗВ$ – удельный вес воды, используемой в системе замкнутого водоснабжения, %;
 $Q_{4расч}$ – расчетный объем оборотной воды как вторичного ресурса;
 Q_2 – объем воды, подаваемой из резервуара в производство;
 Q_8 – объем воды, поступающей в водооборотный цикл производства вместе с сырьем (мономером-изопреном).

4. Коэффициент использования первичной воды из стороннего источника, определяющий рациональность использования воды на производство каучука СКИ-3:

$$Кив = \frac{Q_2 + Q_8 - Q_6}{Q_2 + Q_8}, \tag{6}$$

где $Кив$ – коэффициент использования в производстве первичной воды из стороннего источника;
 Q_2 – объем воды, подаваемой из резервуара в производство;
 Q_8 – объем воды, поступающей в водооборотный цикл производства вместе с сырьем (мономером-изопреном);
 Q_6 – объем воды, сбрасываемой в водоем.

5. Удельный вес потери воды в процессе производства каучука:

$$УПВ = \frac{Q_2 + Q_8 - Q_6}{Q_2 + Q_8 + Q_{4расч}} \times 100, \tag{7}$$

где $УПВ$ – удельный вес потери воды в процессе производства каучука, %;
 Q_2 – объем воды, подаваемой из резервуара в производство;
 Q_8 – объем воды, поступающей в водооборотный цикл производства вместе с сырьем (мономером-изопреном);

Таблица 2

Результаты расчета эффективности системы водопользования в производстве СКИ-3 в условиях экономики замкнутого цикла (рассчитано авторами)

№ ЗАМЕРА	РАСЧЕТНЫЙ ОБЪЕМ ВОДЫ, ВОЗВРАЩАЕМЫЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦИКЛ, М³ В СУТКИ	ОБЪЕМ ВОДЫ, ПОСТУПАЮЩЕЙ В ВОДООБОРОТНЫЙ ЦИКЛ ПРОИЗВОДСТВА ВМЕСТЕ С СЫРЬЕМ МОНОМЕРОМ-ИЗОПРЕНОМ, М³ В СУТКИ	УДЕЛЬНЫЙ ВЕС ВОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В СИСТЕМЕ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ, % ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ (МЛ/АИ)	КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ВОДЫ ИЗ СТОРОННЕГО ИСТОЧНИКА	УДЕЛЬНЫЙ ВЕС ПОТЕРИ ВОДЫ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА КАУЧУКА, %
1	19665,00	3810,00	29,27	0,99	69,83
2	13365,00	3900,00	28,46	0,98	70,16
3	23750,00	4192,00	31,48	0,99	67,64
4	15675,00	4288,00	32,34	0,98	66,23
5	11250,00	4352,00	27,71	0,98	70,54

Q_6 – объем воды, сбрасываемой в водоем;

$Q_{4расч}$ – расчетный объем оборотной воды как вторичного ресурса.

В табл. 2 сведены рассчитанные значения эффективности системы водопользования в производстве СКИ-3 в условиях замкнутого цикла. Удельный вес воды, используемой в системе замкнутого водоснабжения, составляет в среднем по пяти замерам производства 29,85% при максимальном значении 32,34%.

Коэффициент использования первичной воды из стороннего источника менее 1 ($0,98 < 1$), что входит в диапазон допустимых значений, но приближается к верхней границе диапазона. Удельный вес потери воды в процессе производства каучука в среднем по всем замерам составляет 68,88%. По нормативам использования воды данный показатель должен быть не более 100%, что в данном случае выполняется.

Однако при соблюдении ограничений использования водных ресурсов, установленных технологическим регламентом производства каучука СКИ-3, рассчитанные параметры свидетельствуют об относительно невысоком уровне замкнутости водооборота в производстве. Также есть вероятность технически и технологически устаревших требований по использованию воды в производ-

ственном регламенте предприятия. Установленные диапазоны значений характерны для схем традиционного прямоточного водообеспечения, а не замкнутого водооборотного цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для повышения замкнутости водооборотного цикла необходимо:

- 1) автоматизировать производственный мониторинг, предусматривающий передачу данных с расходомеров воды на каждом участке производственного цикла и формирование базы данных;
- 2) проводить регулярный анализ данных о расходе водных ресурсов, эффективности их использования (удельный вес воды, используемой в системе замкнутого водоснабжения; коэффициент использования первичной воды из стороннего источника; удельный вес потери воды в процессе производства каучука);
- 1) при модернизации технологических линий производства уделить внимание процессу водообеспечения с акцентом на повышение замкнутости водооборотного цикла (поиск и разработка технологий зацикливания воды, подбор соответствующего оборудования, размещение и развитие смежных производств с целью интеграции водных потоков и т.д.).

Список использованных источников и литературы

1. Мешалкин В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. – Смоленск: Универсум, 2021. – 999 с.
2. Mendeleev Communications. 2024. Vol. 34. Is. 5. P. 609–768.
3. Shinkevich A.I., Kudryavtseva S.S., Simaeva E.P., Stolyarova A.N., Kharisova G.M., Petrova E.V. Transport and communication space development in open innovation model // Espacios. 2018. T. 39. № 9. С. 27–36.
4. Шинкевич А.И., Кудрявцева С.С., Барсегян Н.В. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов. – Курск: Университетская книга, 2021. – 102 с.
5. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 32-217 «Производство полимеров, в том числе биоразлагаемых». – Бюро НТД, 2017. – 401 с.
6. Лаптедутье Н.К., Дремичева Н.К. Водопользование на предприятиях по добыче и переработке нефти. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – 105 с.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ORGANIZING WATER MANAGEMENT SYSTEMS IN THE PRODUCTION OF ISOPRENE RUBBER (SKI-3) IN THE CONDITIONS OF A CLOSED-LOOP ECONOMY

Meshalkin V.P., Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the International Institute of Logistics of Resource Conservation and Technological Innovation (REC), Professor of the Department of Logistics and Economic Informatics, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow

Kudryavtseva S.S., Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Logistics and Management, Kazan National Research Technological University, Kazan

Minulina O.V., applicant of the Department of Logistics and Management, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technological University», Kazan

The article proposes a methodology for calculating the efficiency of the water use system in the production of isoprene rubber (SKI-3) in a closed-loop economy. The proposed methodology provides users with tools and methodological developments that allow assessing the efficiency of production systems in a closed-loop economy. The methodology is tested using the example of petrochemical production in terms of their water supply. The application of the methodology allows automating the calculation of water use efficiency in petrochemical production in a closed-loop economy, based on such parameters as the estimated volume of water returned to the production cycle; the volume of water entering the water circulation cycle of production together with the raw material monomer isoprene; the specific gravity of water used in the closed-loop water supply system; the coefficient of use of primary water from an external source; the specific gravity of water loss during rubber production.

Keywords: water use, closed-loop economy, isoprene rubber, system efficiency, balance sheet model, resource conservation.

For citation: Meshalkin V.P., Kudryavtseva S.S., Minulina O.V. Analysis of the efficiency of organizing water management systems in the production of isoprene rubber (SKI-3) in the conditions of a closed-loop economy. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2025; 4 (85): 86–90. (In Russ.).

References

1. Meshalkin V.P. Osnovy intensivatsii i resursoenergoeffektivnosti himiko–tekhnologicheskikh sistem [Fundamentals of intensification and resource-energy efficiency of chemical-technological systems]. Smolensk: Universum, 2021, 999 p.
2. Mendeleev Communications. 2024. Vol. 34. Is. 5. P. 609–768.
3. Shinkevich A.I., Kudryavtseva S.S., Simaeva E.P., Stolyarova A.N., Kharisova G.M., Petrova E.V. Transport and communication space development in open innovation model. Espacios. 2018. Vol. 39. no. 9. P. 27–36.
4. Shinkevich A.I., Kudryavtseva S.S., Barsegyan N.V. Modelirovanie i optimizatsiya organizatsionnykh struktur i proizvodstvennykh processov [Modeling and optimization of organizational structures and production processes]. Kursk: Universitetskaya kniga, 2021, 102 p.
5. Informatsionno-tekhnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam ITS 32-217 «Proizvodstvo polimerov, v tom chisle biorazlagaemykh» [Information and technical reference book on the best available technologies ITS 32-217 «Production of polymers, including biodegradable ones»]. Byuro NTD, 2017, 401 p.
6. Lapedul'che N.K., Dremicheva N.K. Vodopol'zovanie na predpriyatiyah po dobyche i pererabotke nefi [Water use in oil production and processing plants]. Kazan': Kazan. gos. energ. un-t, 2017, 105 p.