

Применение энергосберегающих технологий при обслуживании и ремонте подвижного состава

Е.А. Милованова✉, В.Е. Гозбенко

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉evakami@yandex.ru

Резюме

Реализация компанией «ЛокоТех» пилотного проекта «Цифровое депо» ставит своей задачей комплексное применение решений для более эффективной организации производственных процессов. Используемые в настоящее время на железнодорожном транспорте технические устройства для мойки и очистки как подвижного состава, так и его деталей при достаточно большой зоне охвата номенклатуры изделий предполагают обработку объектов либо струей жидкости с моющим веществом, либо их «купание» в моющей среде. Существующая технология очистки и конструктивное исполнение моечных машин при этом не позволяют повысить коэффициент полезного действия таких устройств, а агрессивные свойства жидкостей, применяемых в технологическом процессе, вырабатываются не полностью. Решение видится в интенсификации технологических процессов мойки и очистки деталей подвижного состава путем рациональной организации структуры потоков моющей жидкости с целью повышения их производительности. Ее увеличение также обеспечивается созданием большой удельной поверхности контакта фаз «газ – жидкость». Таким образом, речь идет о повышении эффективности технологии очистки путем использования конструктивных возможностей аппаратов, а не за счет повышения агрессивности рабочей жидкости. В статье приводится оценка конструктивных признаков традиционных схем газлифтных аппаратов, разработаны подходы к оптимальному секционированию аппаратов, т. е. к выявлению в их циркуляционном контуре зон для более выгодного размещения объектов жидкостной обработки, предложено применение аппаратов с принудительным газоснабжением для осуществления технологических процессов в условиях промышленных производств.

Ключевые слова

проект «Цифровое депо», мойка и очистка подвижного состава, конструкции моечных аппаратов и машин, аппараты газлифтного типа, интенсификация процесса обработки

Для цитирования

Милованова Е.А. Применение энергосберегающих технологий при обслуживании и ремонте подвижного состава / Е.А. Милованова, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 70–79. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).70-79.

Информация о статье

поступила в редакцию: 2.07.2022 г.; поступила после рецензирования: 28.09.2022 г.; принята к публикации 29.09.2022 г.

The use of energy-saving technologies in the maintenance and repair of rolling stock

Е.А. Milovanova✉, V.E. Gozbenko

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉evakami@yandex.ru

Abstract

The implementation of the pilot project «Digital Depot» by the company «Locotech» is aimed at the integrated application of solutions for more efficient organization of production processes. The technical devices currently used in railway transport for washing and cleaning both rolling stock and its parts, with a sufficiently large coverage area of the product range, affect the objects being processed either with a jet of liquid with a detergent, or involve "bathing" the object in a cleansing medium. The existing cleaning technology and the design of washing machines do not allow to increase the efficiency of such devices, and the aggressive properties of liquids used in the technological process are not fully created. The solution is seen in the intensification of technological processes of washing and cleaning of rolling stock parts by rationally organizing the structure of washing fluid flows to increase their productivity. The increase in productivity is also ensured by the creation of a large specific contact surface of the gas-liquid phases. Thus, we are talking about improving the efficiency of cleaning technology by using the design capabilities of the devices, and not by increasing the aggressiveness of the working fluid. The article provides an assessment of the design features of traditional schemes of gas lift apparatuses, approaches to optimal partitioning of apparatuses, to identify zones in their circulation circuit for the most advantageous placement of liquid treatment facilities, the use of devices with forced gas supply for the implementation of technological processes in industrial production conditions is proposed.

Keywords

the Digital Depot project, washing and cleaning of rolling stock, washing machines and machinery designs, gas lift type apparatuses, intensification of the processing process

For citation

E.A. Milovanova, V.E. Gozbenko *Primenenie energosberegayushchikh tekhnologii pri obsluzhivanii i remonte podvizhnogo sostava* [The use of energy-saving technologies in the maintenance and repair of rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 70–79. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).70-79.

Article info

Received by: July 2, 2022; Revised: September 28, 2022; Accepted: September 29, 2022.

Введение

В ОАО «РЖД» принята Программа повышения экологической ответственности. Согласно принятой стратегии, решено снизить нагрузку на окружающую среду от всех видов деятельности в два раза к 2030 г.

На протяжении последних лет ведется планомерная работа по расширению полигона возобновляемых источников энергии в рамках проекта «Умный вокзал», реализуется программа ликвидации угольных котельных, организован селективный сбор отходов в офисных помещениях и на вокзалах [1], осуществляется разработка подходов к созданию перспективных видов транспорта [2, 3].

Также группой компаний «ЛокоТех» с 2018 г. реализуется пилотный проект «Цифровое депо», который ставит своей задачей комплексное применение решений, позволяющих минимизировать влияние обслуживающего персонала на качество процесса ремонта подвижного состава при повышении эффективности организации производственных процессов.

Подобное осуществимо путем системного подхода к организации технологического процесса, а именно к рациональной организации цеховых (участковых) технологических потоков при обязательном подборе высокопроизводительного, энергосберегающего и экологически безопасного оборудования как для персонала, так и окружающей среды.

В связи с этим особый интерес вызывает внедрение безотходных производств и экономических технологических процессов с возможностью совмещения нескольких технологических операций [4].

Применяют в технологических операциях системы, в которых используется принцип взаимодействия газа и жидкости [5]. Для разделения газовых смесей и выделения ценных компонентов успешно применяется физическая или

химическая абсорбция [6], также широкое распространение получили такие химические реакции, как гидроформилирование, окисление, алкилирование и др. [7]. Осуществляются эти технологии в реакторах различного типа (реакторы смешения и вытеснения, каскады реакторов и секционированные аппараты).

Газлифтные аппараты осуществляют высокое контактное взаимодействие между газом и жидкостью, отличаются низким энергопотреблением, а конструкция обеспечивает простоту дооснащения системами теплообмена и отсутствие подвижных деталей. Они также незаменимы при очистке и утилизации образующихся выбросов и отходов [8–10], именно поэтому такие аппараты широко применяются в различных отраслях.

В связи с большим количеством сточных вод и, как следствие, высокими экономическими потерями перед компанией ОАО «РЖД» остро стоит вопрос создания и применения систем замкнутого водооборота. Кроме того, речь идет и о рациональном использовании водных ресурсов. Так, на Восточно-Сибирской железной дороге ежегодное водопотребление с последующим образованием сточных вод составляет около 25 млн. м³, а широко применяемые методы – отстаивание и фильтрование – не обеспечивают должный уровень очистки сточных вод.

Решение проблемы в данной области видится в усовершенствовании действующих и разрабатываемых методов очистки сточных вод, в изменении технологии проектирования и создания машин, повышающих уровень безопасности их эксплуатации, в том числе путем обеспечения экологической защиты обслуживающего персонала.

Широкое разнообразие конструкций аппаратов и машин для осуществления технологических процессов очистки деталей и узлов позволяет выделить из их числа наиболее рас-

пространенные на железнодорожном транспорте [11–13].

Моечная машина МСП-1 (рис. 1) используется для очистки и сушки вагонных и локомотивных подшипников буксовых узлов.

Допускается как самостоятельная работа моечной машины, так и совместная с позицией выпрессовки подшипников и машиной для мойки букс, при этом все операции цикла выполняются автоматически. Подача объектов обработки в устройство происходит по двум направляющим, при этом буксовые подшипни-

ки пересекают моечную камеру, в которой обеспечивается их вращение и обработка моющей средой посредством сопловой системы при температуре до 95 °С. Далее буксовые подшипники направляются в сушильную камеру для обработки сжатым воздухом.

Для очистки деталей экипажной части предназначена моеющая камера (рис. 2).

Очистка поверхности колесных пар производится при помощи металлических щеток. Работа установки может осуществляться как самостоятельно, так и в составе автоматизиро-

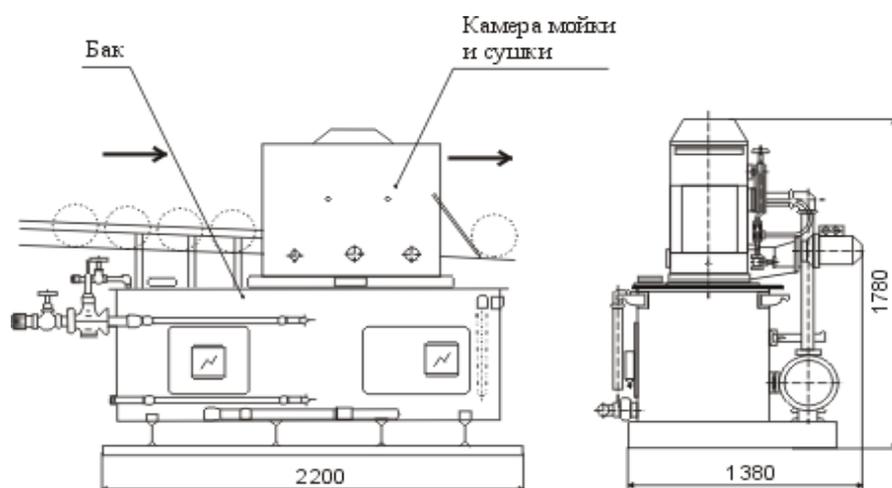


Рис. 1. Моечная машина МСП-1 для промывки и сушки роликовых подшипников буксовых узлов подвижного состава
Fig. 1. Washing machine MSP-1 for washing and drying roller bearings of axle box assemblies of the rolling stock

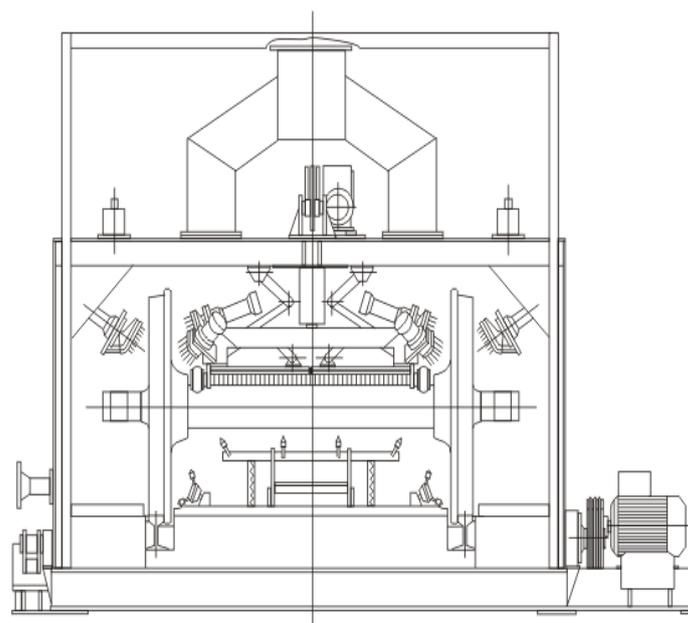


Рис. 2. Камера очистки колесных пар подвижного состава
Fig. 2. Rolling stock wheelset cleaning chamber

ванной поточной линии.

Мойка поверхностей железнодорожных вагонов, колесных тележек, узлов и деталей подвижного состава перед их демонтажем и разборкой зачастую осуществляется с применением моечного комплекса. Его основой является гидравлическая установка высокого давления (30–150 бар), которая представляет собой агрегат, подключаемый к электрической и водопроводной сетям; рабочими органами таких установок являются всевозможные распылительные головки. Предусмотрен нагрев воды и парогенератор (нагревательный котел на дизельном топливе), а для удаления особо тяжелых загрязнений – работа со щелочными моющими препаратами.

Приведенный обзор моечных машин и устройств очистки деталей подвижного состава показывает, что конструктивно они требуют расположения в горизонтальной плоскости с занятием больших производственных площадей, которые, кроме позиции непосредственно для уста-

новки моечной машины, требуют и пространства для их обслуживания и безопасного размещения обслуживающего персонала для предотвращения воздействия агрессивных жидкостных сред при брызгоуносе [14].

Подобное техническое исполнение моечных машин ограничивает возможности использования энергии течения жидкостной среды с целью повышения эффективности технологического процесса, так как в основном предполагает обработку объектов либо струей жидкости с моющим веществом, либо их «купание» в моющей среде. Существующая технология очистки и конструктивное исполнение моечных машин при этом не позволяют повысить коэффициент полезного действия таких устройств, а агрессивные свойства жидкостей, применяемых в технологическом процессе, вырабатываются не полностью. Возникающие единичные попытки внедрения рециркуляции не могут улучшить сложившуюся ситуацию, которая усложняется необходимостью дополнительных затрат энергии. Результатом

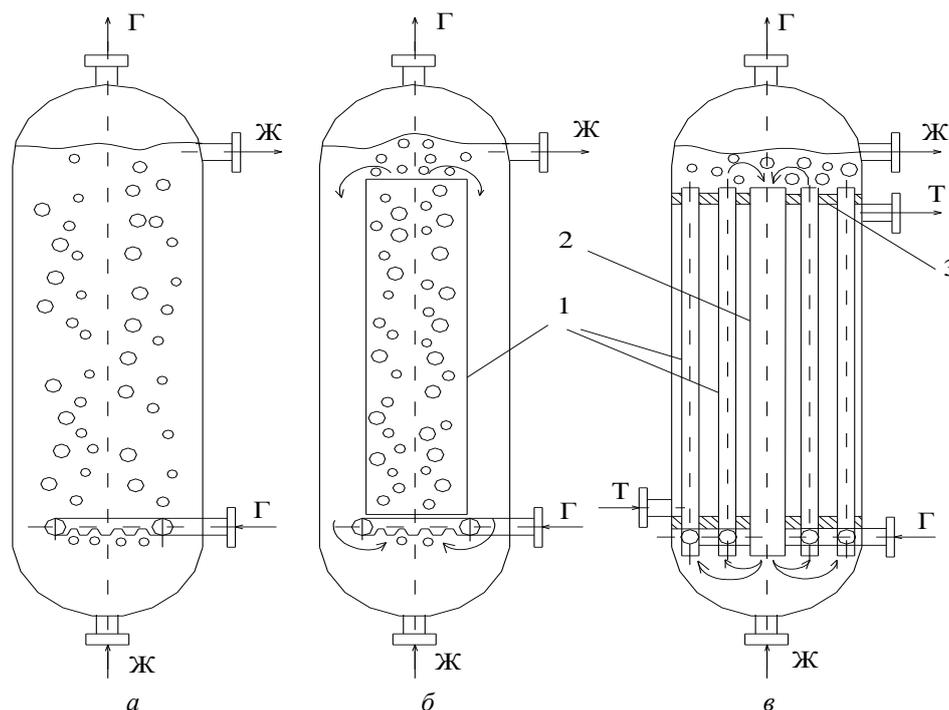


Рис. 3. Принципиальные схемы газлифтных реакторов (1 – зона восходящего потока, 2 – зона нисходящего потока, 3 – перегородка; Ж – линия подачи-отвода рабочей жидкости, Г – линия нагнетания-отвода рабочего газа, Т – линия движения теплоносителя)
 а – реактор с открытой зоной барботаж; б – реактор с циркуляционной трубой;
 в – кожухо-трубный реактор

Fig. 3. Schematic diagrams of gas lift reactors (1 – upstream zone, 2 – downstream zone, 3 – septum; Zh – the line of supply-discharge of the working fluid; G – the line of injection-discharge of the working gas; T – the line of movement of the coolant)
 a – reactor with an open bubbling zone; b – reactor with a circulation pipe; c – shell-and-tube reactor

является большой объем токсичных стоков производства в виде агрессивных текучих сред.

Моечные машины для очистки узлов и деталей подвижного состава железных дорог имеют низкую степень унификации, что влечет увеличение себестоимости оборудования.

Решение задачи видится в интенсификации технологических процессов мойки и очистки деталей подвижного состава путем рациональной организации структуры потоков моющей жидкости для повышения их производительности.

Достижение цели основывается на исследовании влияния гидродинамических факторов и конструктивных параметров газлифтных аппаратов на производительность процесса очистки и мойки.

Классические схемы исполнения газлифтных реакторов [11, 15] отличаются следующими обобщенными конструктивными особенностями: вертикально расположенная емкость (реактор), как правило, цилиндрической формы с перегородкой, создающей зоны восходящего и нисходящего газожидкостных потоков (ЗВП и ЗНП), с возможностью сообщения восходящей и нисходящей зон в верхней (над перегородкой) и нижней (под перегородкой) частях реактора. При отсутствии конструктивной перегородки (материальной границы) в реакторе происходит взаимодействие восходящих и нисходящих потоков во всем его объеме. По барботеру, расположенному у дна реактора, в зоне нисходящего потока подается газ (пар), который обеспечивает создание движущегося циркуляционного контура газожидкостной смеси.

Принципиальные схемы газлифтных реакторов приведены на рис. 3.

Лучшие технические решения, чья оригинальность подтверждается патентами на изобретение и выданными авторскими свидетельствами [16–18] совокупно представлены в принципиальных схемах классических конструкций, а повышение интенсивности течения жидкости традиционно осуществляется за счет применения различного рода проточных элементов и насадок с выполненными в них технологическими отверстиями, а также путем осуществления других видов модификаций.

Признанными достоинствами реакторов, выполненных по традиционным схемам являются:

– техническая простота конструкции;

– легкость ее модификации путем внесения в конструкцию реакторов дополнительных элементов, позволяющих использовать устройства для широкого перечня нужд в различных отраслях промышленности;

– возможность плавного регулирования газосодержания путем изменения интенсивности подачи газа (пара);

– неподвижность базовых элементов конструкции;

– возможность выработки агрессивных свойств рабочей жидкости за счет оптимального выбора числа циклов ее циркуляции в конструкции редулятора.

Предлагаемое совершенствование традиционных схем газлифтных реакторов осуществляется на основании известного из практики опыта неэффективного использования энергии нисходящих потоков жидкости в ЗНП для обеспечения качественного воздействия на объекты обработки, и, таким образом, увеличения производительности этого процесса [19, 20].

С целью ликвидации указанных недостатков предлагаются конструктивные мероприятия по внесению в устройство реактора «пассивных» изменений структуры газожидкостных потоков (т.е. не требующих дополнительного расхода электроэнергии на функционирование элементов, способствующих интенсификации массообменных процессов).

Повышение интенсивности массообменных процессов в зоне нисходящего потока обеспечивается помимо открытого струйного потока дополнительными конструктивными изменениями.

В ЗНП (у дна аппарата) вносится дополнительный малорасходный барботер, производительность которого составляет около 15 % от общей газовой производительности (с учетом барботера, расположенного в зоне восходящего потока).

В конструкцию аппарата вносится «пассивный» элемент, представляющий собой горизонтальную перегородку со сквозными отверстиями, имеющими форму сопловых насадок для организации открытого струйного течения газожидкостной смеси в зоне нисходящего потока. Проход газа в ЗНП осуществляется за счет выполненных в горизонтальной перегородке клапанов. Предложенные изменения отражены на схеме реактора с открытым струйным течением (рис. 4).

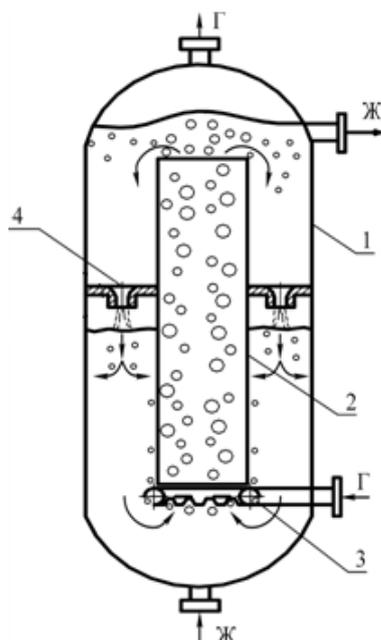


Рис. 4. Принципиальная схема реактора с открытым струйным течением в зоне нисходящего потока:

1 – корпус; 2 – циркуляционная труба; 3 – барботер;
4 – горизонтальная перегородка

Fig. 4. Schematic diagram of a reactor with an open jet stream in the downstream flow zone:

1 – housing; 2 – circulation pipe; 3 – bubbler;
4 – horizontal septum

Лабораторные исследования, выполненные на установке, соответствующей схеме (см. рис. 4), показали увеличение уровня газонасыщения в зоне нисходящего потока около 15 % по сравнению с традиционными схемами, а также выравнивание уровня газожидкостной

смеси в зонах восходящего и нисходящего потоков с учетом газосодержания $\varphi_r = 0,4$ в ЗНП.

При испытаниях определялась интенсивность изменения скорости сорбции кислорода раствором сульфата натрия в зависимости от геометрических параметров проточных отверстий F_c в горизонтальной перегородке и площади $F_{\text{ЗНП}}$ сечения зоны нисходящего потока, а также в зависимости от уровня размещения горизонтальной перегородки в зоне нисходящего потока.

Полученные данные об изменении скорости сорбции кислорода приведены в табл. 1, 2, где количество строк – число измерений, а столбцы отражают конструктивные изменения в классической схеме.

Результаты эксперимента показаны на рис. 5, 6. Отсутствие перегородки в зоне нисходящего потока показывает среднее значение скорости сорбции кислорода близкое к рекомендуемому [21].

Приведенные измерения сорбции кислорода (табл. 1) соответствуют фиксированному положению горизонтальной перегородки в ЗНП по высоте ($h_n / h_{\text{ст}} = 0,6$), в табл. 2 – постоянной площади сечения проточного отверстия в горизонтальной перегородке ($F_c / F_{\text{ЗНП}} = 0,02$).

Последняя строка в таблицах информирует о проценте изменения величины скорости сорбции кислорода по сравнению с аппаратом, работающим по традиционной схеме (знак «+» соответствует увеличению скорости растворения кислорода, «-» – уменьшению).

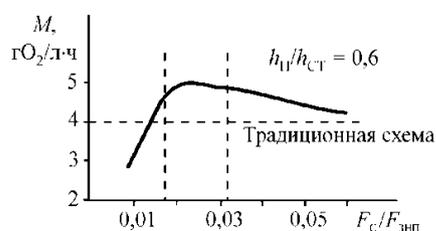
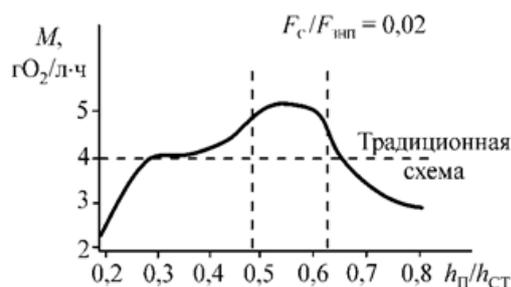
Таблица 1. Зависимость изменения скорости сорбции кислорода от диаметра проточного отверстия в горизонтальной перегородке в зоне нисходящего потока

Table 1. Dependence of the change in the rate of oxygen sorption on the diameter of the horizontal baffle flow hole in the downflow area

№ п/п	$F_c / F_{\text{ЗНП}}$						без перегородки в зоне нисходящего потока
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	
1	2,8	4,5	4,6	4,6	4,2	4,1	3,6
2	2,9	5,0	4,9	4,8	4,2	4,2	3,8
3	2,7	4,5	4,6	4,7	4,4	3,9	3,8
4	3,2	5,2	5,1	4,9	4,6	4,5	3,7
5	3,1	5,2	5,0	5,0	4,8	4,5	4,1
6	3,2	5,1	5,3	4,9	4,5	4,6	4,3
7	3,1	5,2	5,1	4,9	4,7	4,5	4,1
8	3,3	4,5	4,5	4,4	4,3	3,9	4,2
9	2,9	4,4	4,6	4,2	4,3	3,8	3,8
10	2,7	4,4	4,3	4,2	4,0	3,8	3,5
Среднее значение	3,0	4,8	4,8	4,6	4,4	4,2	3,9
$\Delta\%$	-23	+23	+23	+18	+13	+8	-

Таблица 2. Зависимость изменения скорости сорбции кислорода от уровня размещения горизонтальной перегородки в зоне нисходящего потока**Table 2.** The dependence of the change in the rate of oxygen sorption on the level of placement of the horizontal septum in downflow area

№ п/п	$h_n/h_{ст}$						
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
1	2,1	3,9	4,1	4,7	4,8	3,3	2,6
2	2,3	4,0	4,2	5,0	5,1	3,5	2,8
3	2,3	3,7	3,9	4,7	4,8	3,5	2,8
4	2,2	4,3	4,5	5,2	5,3	3,4	2,7
5	2,6	4,3	4,5	5,1	5,2	3,8	3,1
6	2,8	4,4	4,6	5,4	5,5	4,0	3,3
7	2,6	4,3	4,5	5,2	5,3	3,8	3,1
8	2,7	3,7	3,9	4,6	4,7	3,9	3,2
9	2,3	3,6	3,8	4,7	4,8	3,5	2,8
10	2,0	3,7	3,9	4,4	4,5	3,2	2,5
Среднее значение	2,4	4,0	4,2	4,9	5,0	3,6	2,9
$\Delta\%$	-38	+23	+6,9	+25	+27	-8,4	-27

**Рис. 5.** Изменение скорости сорбции кислорода в зависимости от диаметра проточного отверстия в горизонтальной перегородке в зоне нисходящего потока**Fig. 5.** Change in oxygen sorption rate depending on the diameter of the flow hole in the horizontal partition in the downflow zone**Рис. 6.** Изменение скорости сорбции кислорода в зависимости от уровня размещения горизонтальной перегородки в зоне нисходящего потока**Fig. 6.** Dependence of the change in oxygen sorption rate on the level of placement of the horizontal septum in the downflow zone

Для подтверждения обоснованности и эффективности предлагаемых конструктивных мероприятий проведен сравнительный аналитический расчет мощности, обусловленной

структурой течения жидкости в замкнутом циркуляционном контуре.

Кинетическая энергия и мощность потока на перемешивание для традиционных аппаратов (см. рис. 3, б) определяется по приведенной далее последовательности.

Объем газожидкостной смеси:

$$V_{г-ж} = \frac{V_{ж}}{1 - \varphi_{г}}$$

Для упрощения расчетов площади сечений зон восходящего и нисходящего потоков приняты равными $F_{звп} = F_{зпп} = F$, тогда уровень газожидкостной смеси над барботером определяется как

$$H_{г-ж} = \frac{h}{1 - \varphi_{г}}$$

Плотность газожидкостной смеси:

$$\rho_{г-ж} = \rho_{ж} \cdot (1 - \varphi_{г}) + \rho_{г} \cdot \varphi_{г}$$

Объемный расход жидкости через сечение потока:

$$V_{ж.расх.} = V_{г-ж} - V_{звп} = F \cdot (H_{г-ж} - h_{ст.}) = F \cdot \left(\frac{h}{1 - \varphi_{г}} - h_{ст.} \right)$$

Падение уровня монолита жидкости над барботером в зоне нисходящего потока при установившемся течении рабочей смеси в рабочем контуре аппарата:

$$\Delta h_{ж.зпп} = \frac{V_{ж.расх.}}{F} = \frac{h}{1 - \varphi_{г}} - h_{ст.}$$

Уровень верхней кромки вертикальной перегородки над монолитом жидкости при

установившемся течении рабочей смеси в рабочем контуре аппарата:

$$h_{\text{ст1}} = h_{\text{ст}} - h + \Delta h_{\text{ж.ЗНП}} = \frac{h \cdot \varphi_{\Gamma}}{1 - \varphi_{\Gamma}}.$$

Потенциальная энергия, накопленная жидкостью в ЗВП, трансформируется в кинетическую энергию ниспадающего, переливающегося через вертикальную перегородку потока жидкости, на поверхности монолита жидкости в зоне нисходящего потока:

$$\Pi = m_{\text{ж.расх}} \cdot g \cdot h_{\text{ст1}} = T.$$

Массовый расход жидкости:

$$m_{\text{ж.расх}} = V_{\text{ж.расх}} \cdot \rho_{\text{ж}}.$$

Кинетическая энергия рабочего потока жидкости:

$$T = F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h \cdot \varphi_{\Gamma} \cdot \frac{h - h_{\text{ст}} \cdot (1 - \varphi_{\Gamma})}{(1 - \varphi_{\Gamma})^2}.$$

Мощность рабочего потока жидкости:

$$N = m_{\text{ж.расх}} \cdot W_{\text{с.п}} \cdot g.$$

Скорость струи без учета потерь, переливающейся через вертикальную перегородку:

$$W_{\text{с.п}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{\text{ст1}}}.$$

Тогда:

$$N = \sqrt{2} \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^{3/2} \cdot h^{1/2} \cdot \varphi^{1/2} \cdot \frac{h - h_{\text{ст}} \cdot (1 - \varphi_{\Gamma})}{(1 - \varphi_{\Gamma})^{3/2}}.$$

Для значений $h = 0,75h_{\text{ст}}$; $\varphi_{\Gamma} = 0,3$:

$$T = 0,023 \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h_{\text{ст}}^2;$$

$$N = 0,0553 \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^{3/2} \cdot h_{\text{ст}}^{3/2}.$$

Получены значения кинетической энергии и мощности для традиционного аппарата.

Аналитический расчет для аппарата, выполненного по схеме (см. рис. 4), выполняется при допущениях, принятых ранее при реализации традиционной схемы.

Кинетическая энергия жидкости без учета потерь, выходящей из проточного отверстия в горизонтальной перегородке 4, определяется количеством жидкости над этой перегородкой, т. е.:

$$\Pi = m_{\text{ж}} \cdot g \cdot (h_{\text{ст}} - h_n) = T.$$

Масса жидкости:

$$m_{\text{ж}} = F \cdot (h_{\text{ст}} - h_n) \cdot \rho_{\text{ж}}.$$

Кинетическая энергия рабочей жидкости:

$$T = (1 - K)^2 \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h_{\text{ст}}^2$$

Мощность рабочей жидкости:

$$N = m_{\text{ж}} \cdot W_{\text{с}} \cdot g.$$

Скорость движения струи жидкости без учета потерь:

$$W_{\text{с}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{\text{ст}} - h_n)}.$$

Тогда мощность рабочей жидкости:

$$N = \sqrt{2} \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^{3/2} \cdot (h_{\text{ст}} - h_n)^{3/2}$$

или

$$N = \sqrt{2} \cdot (1 - K)^{3/2} \cdot F \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g^{3/2} \cdot h_{\text{ст}}^{3/2}.$$

Далее, задаваясь значениями различного относительного уровня размещения горизонтальной перегородки K , выполнен расчет сравнительных показателей увеличения кинетической энергии ниспадающего потока в ЗНП (строка 4) и его мощности (строка 5) на перемешивание (табл. 3).

Заключение

Результаты сравнительных массообменных исследований позволили сформулировать рекомендации по выбору относительной площади проточного отверстия в горизонтальной перегородке $F_c / F_{\text{ЗНП}} = 0,025$ и уровне ее размещения $h_n / h_{\text{ст}} = 0,55$. Газожидкостные реакторы с измененной структурой потоков газожидкостной смеси, выполненной путем введения в конструкцию дополнительных конструктивных элементов, позволили повысить производительность технологического процесса до 30 % по сравнению с традиционной схемой.

В связи с этим применение устройств для мойки и очистки деталей подвижного состава в подразделениях железных дорог, конструктивные особенности которых будут учитывать сформулированные рекомендации, позволят обеспечить повышение производительности технологических процессов при обеспечении энергоэффективности и безопасности производства.

Список литературы

1. Гапанович В.А. Экологическая стратегия в действии // Локомотив. 2015. № 12 (708). С. 2–4.
2. Милованова Е.А., Милованов А.А., Милованов А.И. Поиск новых путей развития транспортной системы в зоне Восточного Зауралья России // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии : тр. 2-й Междунар. науч. конф. СПб., 2014. С. 113–125.
3. Simulation of the vibration of the carriage asymmetric parameters in mathcad / V.E. Gozbenko, S.K. Kargapol'tsev, N.V. Minaev et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11, № 23. P. 11132–11136.

4. Тимофеев В.С., Серафимов Л.А. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза. М. : Высшая школа, 2003. 536 с.
5. Данквертс П.В. Газожидкостные реакции. М. : Химия, 1973. 296 с.
6. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». СПб. : Химиздат, 2003. 608 с.
7. Потехин В.М., Потехин В.В. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки. СПб. : Химиздат, 2005. 912 с.
8. Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартеп М.Г. Общая химическая технология. М. : Академкнига, 2003. 528 с.
9. Инженерная защита поверхностных вод от промышленных стоков / Д.А. Кривошеин, П.П. Кукин, В.Л. Лапин и др. // М. : Высшая школа, 2008. 344 с.
10. Халиуллин А.К., Салауров В.Н. Основы промышленной экологии. Иркутск : Оттиск, 2002. 268 с.
11. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. Л. : Машиностроение, 1976. 216 с.
12. Пат. 939060 СССР. Трубчатый реактор / С.Н. Булатов, В.А. Кернерман, А.А. Волошин и др. № 2957782/23-26 ; заявл. 26.06.1980 ; опубл. 30.06.1982, Бюл. № 24. 4 с.
13. Пат. 1214191 СССР. Химический реактор / А.В. Шишкин, И.И. Барбаш, А.А. Мамедов. № 3815553/23-26 ; заявл. 16.07.1984 ; опубл. 28.02.1986, Бюл. № 8. 3 с.
14. Моющие средства / С.К. Каргапольцев, А.Н. Волков, А.И. Милованов и др. // Деп. в ДЦНТИ ВСЖД 14.11.2003, № 629.488.2. 18 с.
15. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : Химия, 1973. 752 с.
16. Пат. 766629 СССР. Газлифтный аппарат / Ю.В. Ердяков, С.Б. Ермаков, Н.Г. Павлов и др. № 2686917/23-26 ; заявл. 22.11.1978 ; опубл. 30.09.1980, Бюл. № 36. 3 с.
17. Пат. 1525930 Великобритания. Циркулятор газожидкостных смесей / ICI LTD ; заявл. 4.12.74 ; опубл. 27.09.1978.
18. Пат. 3630848 США. Способ и устройство для непрерывной ферментации / Л. Лефранко. № 786,930 ; заявл. 26.12.68 ; опубл. 28.12.1971.
19. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М. : Химия, 1990. 206 с.
20. Виестур У.Э., Кузнецов А.М., Савенков В.В. Системы ферментации. Рига : Зинатне, 1988. 368 с.
21. Методика определения сульфитного числа с помощью датчика растворенного кислорода. М. : ВНИИЭНЕРГЕТИКА, 1976.

References

1. Gapanovich V.A. Ekologicheskaya strategiya v deistvii [Environmental strategy in action]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2015, no. 12 (708), pp. 2–4.
2. Milovanova E.A., Milovanov A.A., Milovanov A.I. Poisk novykh putei razvitiya transportnoi sistemi v zone Vostochnogo Zauralya Rossii [Search for new ways to develop the transport system in the zone of the Eastern Trans-Urals of Russia]. *Trudy 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Magnitolevitatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii»* [Proceedings of the 2nd International Scientific Conference «Magnetolevitation Transport Systems and Technologies»]. Saint Petersburg, 2014, pp. 113–125.
3. Gozbenko V.E., Kargapol'tsev S.K., Minaev N.V., Karlina A.I. Simulation of the vibration of the carriage asymmetric parameters in mathcad. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 23, pp. 11132–11136.
4. Timofeev V.S., Serafimov L.A. Printsipy tekhnologii osnovnogo organicheskogo i neftehimicheskogo sinteza [Principles of basic organic and petrochemical synthesis technology]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 536 p.
5. Dankvert's P.V. Gazozhidkostnye reaktzii [Gas-liquid reactions]. Moscow: Khimiya Publ., 1973. 296 p.
6. Frolov V.F. Lektsii po kursu «Protsestry i apparaty khimicheskoi tehnologii» [Lectures on the course «Processes and devices of chemical technology»]. Saint Petersburg: Khimizdat Publ., 2003. 608 p.
7. Potekhin V.M., Potekhin V.V. Osnovy teorii khimicheskikh protsessov tekhnologii organicheskikh veshchestv i neftepererabotki [Fundamentals of the theory of chemical processes technology of organic substances and oil refining]. Saint Petersburg: Khimizdat Publ., 2005. 912 p.
8. Kutepov A.M., Bondareva T.I., Berengartep M.G. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya [General chemical technology]. Moscow: Akademkniga Publ., 2003. 528 p.
9. Krivoshein D.A., Kukin P.P., Lapin V.L., Ponomarev N.L., Serdyuk N.I., Fetisov A.G. Inzhenernaya zashchita poverkhnostnykh vod ot promyshlennykh stokov [Engineering protection of surface waters from industrial effluents]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 2008. 344 p.
10. Haliullin A.K., Salaur'ov V.N. Osnovy promishlennoi ekologii [Resistance of materials]. Irkutsk: Ottisk Publ., 2002. 268 p.
11. Sokolov V.N., Domanskii I.V. Gazozhidkostnye reaktory [Gas-liquid reactors]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1976. 216 p.
12. Bulatov S.N., Kernerman V.A., Voloshin A.A., Gusev-Donskoi A.P. Copyright certificate SU 939060 A1, 30.06.1982.
13. Shishkin A.V., Barabash I.I., Mamedov A.A. Copyright certificate SU 1214191 A, 28.02.1986.
14. Kargapol'tsev S.K., Volkov A.N., Milovanov A.I., Milovanova E.A. Moyuscchie sredstva [Detergents]. *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript], no 629.488.2, dated November 14, 2003, 18 p.
15. Kasatkin A.G. Osnovnye protsestry i apparaty khimicheskoi tehnologii. [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow: Khimiya Publ., 1973. 752 p.
16. Erdyakov Yu.V., Ermakov S.B., Pavlov N.G., Kalas A.E., Malenko Yu.I., Fraishtadt V.Ya., Kotov V.A., Kukartsev E.M., Basov B.K. Copyright certificate SU 766629, 30.09.1980.
17. ICI LTD. Patent GB1525930A, 27.09.1978.
18. Louis Alfred Auguste Lefrancois. Patent US3630848A, 28.12.1971.

19. Kardashev G.A. Fizicheskie metody intensivatsii processov himicheskoi tehnologii [Physical methods of intensification of chemical technology processes]. Moscow: Khimiya Publ., 1990. 206 p

20. Viestur U.E., Kuznetsov A.M., Savenkov V.V. Sistemy fermentatsii. [Fermentation systems]. Riga: Zinatne Publ., 1988. 368 p.

21. Metodika opredeleniya sul'fitnogo chisla s pomoshchyu datchika rastvorenno kislороda [Method for determining the sulfite number using a dissolved oxygen sensor]. Moscow: VNIENERGETIKA Publ., 1976.

Информация об авторах

Милованова Евгения Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: evakami@yandex.ru.

Гозбенко Валерий Ерофеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vgozbenko@yandex.ru.

Information about the authors

Evgeniya A. Milovanova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electric rolling stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: evakami@yandex.ru.

Valerii E. Gozbenko, Doctor of Engineering Science, the Full Professor, Professor of Department of Math, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vgozbenko@yandex.ru.