

**ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГО- И РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ,
РЕАКТОРНЫХ СИСТЕМ И ОБОРУДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОГО ДЕЙСТВИЯ,
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

**В.Н. Блиничев, А.Н. Лабутин, Г.А. Зуева, М.Ю. Колобов, Е.А. Алексеев, Г.В. Волкова,
С.В. Воробьев, А.М. Козлов, Г.Н. Кокурина, М.А. Лысова, Е.В. Миронов, С.В. Натареев,
В.Ю. Невиницын, Ю.Н. Пономарева, И.В. Постникова, С.Е. Сахаров, О.В. Чагин**

Валерьян Николаевич Блиничев (ORCID 0000-0001-6442-8194), Михаил Юрьевич Колобов (ORCID 0000-0001-6317-8816), Александр Михайлович Козлов (ORCID 0000-0003-3727-4796), Евгений Викторович Миронов (ORCID 0000-0002-1087-2633), Сергей Валентинович Натареев (ORCID 0009-0007-5620-7747), Ирина Викторовна Постникова (ORCID 0000-0001-7363-829X), Сергей Евгеньевич Сахаров (ORCID 0000-0003-3078-0266), Олег Вячеславович Чагин (ORCID 0000-0002-8921-0850)

Кафедра технологических машин и оборудования, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: blinich@isuct.ru, mikhaikolobov@rambler.ru, ale3069@yandex.ru, mironov_81@mail.ru, natoret@mail.ru, poirvic@mail.ru, cergce@mail.ru, chagin@isuct.ru

Александр Николаевич Лабутин (ORCID 0009-0006-6579-1204), Евгений Алексеевич Алексеев (ORCID 0009-0009-3504-9422), Галина Витальевна Волкова (ORCID 0009-0006-7907-568X), Сергей Владимирович Воробьев (ORCID 0000-0001-9280-2657), Владимир Юрьевич Невиницын (ORCID 0000-0003-2987-0096), Юлия Николаевна Пономарева (ORCID 0009-0007-5940-0999)

Кафедра технической кибернетики и автоматики, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: lan@isuct.ru, alekseev_ea@isuct.ru, volkova_gv@isuct.ru, ch4rlythec4t@gmail.com, nevinitsyn@isuct.ru, julia-zagarinskaya@yandex.ru

Галина Альбертовна Зуева (ORCID 0000-0003-0696-4460)*, Галина Николаевна Кокурина (ORCID 0009-0002-6628-5195), Марина Александровна Лысова (ORCID 0000-0002-4551-4035)

Кафедра Высшей и прикладной математики, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: galina@isuct.ru*, galnikkok_79@mail.ru, lysova_ma@isuct.ru

Представлены теоретические основы аппаратурного оформления энерго- и ресурсосберегающих процессов интенсивного действия, моделирования гетерогенных химико-технологических процессов, управления ресурсосберегающими многопродуктовыми реакторными системами.

Ключевые слова: технология, аппаратурное оформление, моделирование, оптимальное управление процессами

**PROBLEMS OF THE DEVELOPMENT OF ENERGY- AND RESOURCE-SAVING PROCESSES,
REACTOR SYSTEMS AND EQUIPMENT OF INTENSE ACTION, MODELING
AND OPTIMAL MANAGEMENT**

**V.N. Blinichev, A.N. Labutin, G.A. Zueva, M.Yu. Kolobov, E.A. Alekseev, G.V. Volkova,
S.V. Vorobyov, A.M. Kozlov, G.N. Kokurina, M.A. Lysova, E.V. Mironov, S.V. Natareev,
V.Yu. Nevinitsyn, Yu.N. Ponomareva, I.V. Postnikova, S.E. Sakharov, O.V. Chagin**

Valeryan N. Blinichev (ORCID 0000-0001-6442-8194), Mikhail Yu. Kolobov (ORCID 0000-0001-6317-8816), Alexander M. Kozlov (ORCID 0000-0003-3727-4796), Evgeniy V. Mironov (ORCID 0000-0002-1087-2633), Sergey V. Natareev (ORCID 0009-0007-5620-7747), Irina V. Postnikova (ORCID 0000-0001-7363-829X), Sergey E. Sakharov (ORCID 0000-0003-3078-0266), Oleg V. Chagin (ORCID 0000-0002-8921-0850)

В.Н. Блиничев и др.

Department of Technological Machines and Equipment, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: blinich@isuct.ru, mikhailkolobov@rambler.ru, ale3069@yandex.ru, mironov_81@mail.ru, natoret@mail.ru, poirvic@mail.ru, cergce@mail.ru, chagin@isuct.ru

Alexander N. Labutin (ORCID 0009-0006-6579-1204), Evgeny A. Alekseev (ORCID 0009-0009-3504-9422), Galina V. Volkova (ORCID 0009-0006-7907-568X), Sergey V. Vorobyov (ORCID 0000-0001-9280-2657), Vladimir Yu. Nevinityn (ORCID 0000-0003-2987-0096), Yulia N. Ponomareva (ORCID 0009-0007-5940-0999) Department of Technical Cybernetics and Automation, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: lan@isuct.ru, alekseev_ea@isuct.ru, volkova_gv@isuct.ru, ch4rlythec4t@gmail.com, nevini-tsyn@isuct.ru, julia-zagarinskaya@yandex.ru

Galina A. Zueva (ORCID 0000-0003-0696-4460) *, Galina N. Kokurina (ORCID 0009-0002-6628-5195), Marina A. Lysova (ORCID 0000-0002-4551-4035)

Department of Higher and Applied Mathematics, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: galina@isuct.ru*, galnikkok_79@mail.ru, lysova_ma@isuct.ru

Theoretical foundations of hardware design of energy- and resource-saving processes of intensive action, modeling of heterogeneous chemical-technological processes, control of resource-saving multi-product reactor systems are considered.

Key words: technology, hardware design, modeling, optimal process control

Для цитирования:

Блиничев В.Н., Лабутин А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурина Г.Н., Лысова М.А., Миронов Е.В., Натареев С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В. Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185–202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j.

For citation:

Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G.N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevinityn V.Yu., Ponomareva Yu.N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V. Problems of the development of energy- and resource-saving processes, reactor systems and equipment of intense action, modeling and optimal management. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 185–202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607. 6845j.

ВВЕДЕНИЕ

Способы и приемы ресурсосбережения в химической технологии изложены в работах академиков Кафарова В.В., Кутепова А.М. и др. [1-3].

Практическая реализация различных способов ресурсосбережения осуществляется путем: режимно-параметрической, аппаратурно-технологической, конструкционной, организационно-технической и технико-экономической оптимизации химико-технологических процессов (ХТП) и химико-технологических схем (ХТС), моделирования, оптимального управления процессами.

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Кафедра технологических машин и оборудования (до 01.09.2018 г. кафедра машин и аппаратов химических производств) занимается разработкой теоретических основ и аппаратурного оформления энерго- и ресурсосберегающих процессов интенсивного действия в дисперсных средах.

Разработка массообменных устройств, надежно работающих при высоких скоростях газа, создающих как большие поверхности тепло- и мас-

сообмена, так и высокие значения коэффициентов массопередачи, работающих в противоточном режиме, а также хорошо сепарирующий спектр капель жидкой фазы, образующихся при высоких скоростях газа (более 3,5 м/с), легко масштабируемых на любой диаметр аппарата, является актуальной задачей в области дальнейшего развития абсорбционного, десорбционного и ректификационного оборудования. На кафедре ТМиО ИГХТУ создана пакетная вихревая насадка [4], используемая в аппаратах данного типа. Данная насадка состоит из множества одинаковых ячеек прямоугольной формы, соединенных между собой в единый пакет, стенки каждой ячейки смещены относительно друг друга по вертикали, перекрывающая фронтальную щель на входе в ячейку за счет удлиненных, загнутых внутрь окончаний, образующих завихритель. На выходе из ячейки окончания обеих стенок также выполнены удлиненными и загнутыми внутрь, перекрывая фронтальную щель и образуя второй завихритель. Поверхность каждой ячейки полностью или частично покрыта регулярной шероховатостью или перфорацией любой формы.

Такое конструктивное решение позволяет проводить массообменный процесс на более высоких скоростях движения газового потока, в условиях противоточного режима движения взаимодействующих фаз, по сравнению с другими существующими видами насадок [5].

Пространственная форма пакетной вихревой насадки способствует развитию в объеме насадочного слоя интенсивного взаимодействия газового и жидкостного потоков, причем межфазная поверхность контакта в несколько раз превосходит физическую поверхность насадки. Визуальные наблюдения показывают, что с увеличением скорости наблюдается не только общее увеличение количества удерживаемой жидкости, но и более интенсивное межфазное взаимодействие, протекающее также в значительной мере в межслойных пространствах насадочного комплекта.

Данный тип насадки был применен при экспериментальном исследовании процесса абсорбции нитрозных газов слабым раствором аммиака [4]. Данные исследования проводились в цехе разложения апатита по улавливанию технологических выбросов (оксидов азота) в процессах производства НРК ПАО «ДОРОГОБУЖ».

Задачу очистки газовых выбросов от оксидов азота решали путем использования пакетной вихревой насадки (ПВН), а также увеличения высоты зоны улавливания и снижения температуры

в зоне улавливания до 20-25 °С. Нейтрализация полученной слабой азотной кислоты производится слабым водным раствором аммиака с получением аммиачной селитры. Конечный жидкий продукт процесса очистки – 16% водный раствор аммиачной селитры, который может быть отправлен на упаривание с получением товарной продукции.

Целевые параметры работы установки по качеству улавливания и производительности достигались за счет существенно большей эффективности взаимодействия газа и абсорбента в объеме ПВН по сравнению с альтернативными насадочными контактными устройствами. Контактные устройства представляют собой три секции ПВН, разнесенные между собой. В верхней секции использовалось контактное устройство малого сечения (ПВН.11), в двух нижних секциях – крупного сечения (ПВН.22). Контактные устройства орошались абсорбентом в объеме до 100 м³/(м²·ч). В циркуляционный контур установки входил теплообменник охлаждения абсорбента до температуры 20-25 °С. К теплообменнику был организован подвод охлаждающей воды. Таким образом, диаметр зоны абсорбции может быть существенно уменьшен при сохранении глубины очистки.

С целью снижения отрицательного влияния фторидов и силанов, присутствующих в очищаемом газе, на процесс абсорбции оксидов азота, в системе очистки устанавливалась дополнительная колонна, предшествующая основной. На контактное устройство колонны в качестве абсорбента подается 10% раствор NH₄OH, что приводит к абсорбции с фторидов и силанов до их проникновения в основную колонну. Проблема «зарастания» контактного устройства соединениями кремния решена посредством использования псевдооживленного слоя.

Глубина очистки технологических выбросов от оксидов азота производства НРК ПАО «Дорогобуж» достигалась посредством применения скруббера с ПВН при высоте слоя насадки 9 м и составила 92,23%, что полностью соответствует экологическим нормам. Дальнейшее повышение степени очистки может быть достигнуто посредством увеличения высоты насадочного слоя. Испытания показали возможность создания скруббера очистки технологических выбросов от оксидов азота цеха производства магниевой добавки ПАО «Дорогобуж» с использованием насадки ПВН.

Разработанный тип насадки также применялся для исследования влияния конструктивных и режимных параметров на процесс пылеулавливания [6]. Цель исследования процесса пылеулав-

ливания заключается в определении предельных концентраций орошающих суспензий в аппаратах различного конструктивного оформления. Для хорошо известных насадок, таких как кольца Рашига и псевдооживленная шаровая, оптимальные режимы для проведения процесса при противоточном движении фаз широко освещены в справочной литературе, поэтому для них приняты рекомендуемые значения.

Для пакетной модифицированной насадки оптимальные режимы работы были определены экспериментальным путем. Оптимальное число слоев насадки - 5. Это число слоев обеспечивает высокие значения к.п.д. аппарата (выше 99%) и низкие энергетические потери. В этом случае наблюдается большой объем жидкости, зависающей в слое, более равномерное орошение всех пакетных ячеек, из-за перераспределения жидкости в межслойном пространстве. Оптимальной скоростью движения аэрозоля является скорость $U_r = 4$ м/с.

При такой величине скорости наблюдается наибольшая эффективность процесса, невысокое гидравлическое сопротивление, устойчивый противоточный режим работы аппарата, отсутствие брызгоуноса. Было найдено, что оптимальная плотность орошения составляет $L = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Данная величина соответствует, с одной стороны, незначительному расходу орошающей жидкости, что снижает затраты на ее рециркуляцию, с другой, обеспечивает высокое значение к.п.д. $\eta = 99,8\%$, при достаточном заполнении слоя насадки жидкостью. Достаточное объемное содержание жидкости внутри насадочного комплекта обеспечивает надежность работы аппарата при повышенных входных концентрациях пыли $C_{вх} > 10 \text{ г/м}^3$. При недостатке жидкости в аппарате может наблюдаться обрастание пылью поверхности насадки в застойных зонах.

После установления оптимальных режимных параметров были проведены эксперименты по улавливанию различных пылей: хорошо смачиваемой – пыли каолина, удовлетворительно смачиваемой - стеклянных шариков и плохо смачиваемой - сажи. Эксперименты показали, что все виды пылей улавливаются с высокой эффективностью, а для некоторых пылей наблюдается максимум эффективности пылеулавливания (для сажи с 99,1 до 99,8% и стеклянных шариков с 99,1 до 99,6%). Максимальная эффективность соответствовала концентрации твердой фазы в орошающей жидкости $C = 5\%$. При этой концентрации происходит лучшее заполнение жидкостью насадки, взвешенные частицы еще не оказывают дополнительного сопротивления улавливанию частиц.

Исследования показали, что вихревая пакетная, модифицированная насадка обладает рядом преимуществ. Легкость масштабирования при переходе к аппаратам промышленного образца, так как в этом случае увеличивается лишь количество вихревых ячеек, наличие которых исключает проскок пыли в крупных пузырях газа, присущего аппаратам с псевдооживленным слоем орошаемой насадки. Низкое гидравлическое сопротивление аппарата при больших расходах газа, а также малые габариты при высокой производительности по газовой фазе.

На кафедре ТМиО ИГХТУ создана экспериментальная установка для исследования процесса смешения с использованием статического смесителя [7]. В качестве смешиваемых сред использовались вода и растительное масло. Полученная эмульсия содержала 2,5% масла. При разработке конструкции статического смесителя особый упор делается на конструкцию внутренних смесительных устройств, определяющих основные параметры смесителя.

В качестве смесительного устройства также использовалась ПВН, которая обеспечивала многократное дробление жидкостного потока, а также изменение направления движения потоков внутри насадочных устройств и приводила к увеличению дисперсности смешиваемых сред.

Таким образом, созданная на кафедре ТМиО ИГХТУ пакетная вихревая насадка имеет возможность применения в аппаратах колонного типа и демонстрирует высокие тепломассообменные характеристики в различных технологических процессах [8-11].

На кафедре разработаны физические и математические модели движения фаз в трехфазной псевдооживленной системе. В основе физических моделей положено обтекание движущейся пленки жидкости пульсирующим газожидкостным потоком в слое подвижной шаровой насадки. Математическое описание газожидкостного и твердого дисперсного потока учитывает их энергетические характеристики и выполнено на основе формул полуэмпирической теории турбулентности и вынужденных колебаний трехфазной системы.

Разработана методика инженерного расчета процесса абсорбции и хемосорбции. Методика инженерного расчета использована при проектной проработке вариантов реконструкции промышленных абсорберов для очистки газовых выбросов от SO_2 , NH_3 , HF , NO_x [12-13].

На основе представлений о термодинамическом равновесии в системах жидкость-твердое тело и газ-твердое тело, структуре твердых тел,

элементарных актах процессов переноса энергии, импульса и вещества в дисперсных системах сформулированы макрокинетические модели кинетики и динамики адсорбции, ионного обмена, сушки и других процессов в аппаратах простых геометрических форм [14].

Например, разработанные методики расчета процессов ионного обмена без учета продольной диффузии в аппаратах простых геометрических форм основываются на решении уравнения материального баланса:

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial \bar{C}_{cp}}{\partial \tau} + \Omega v_{вх} \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где C – концентрация сорбируемого вещества в растворе; \bar{C}_{cp} – средняя концентрация сорбируемого вещества в частице; $v_{вх}$ – скорость потока раствора на входе в плотный неподвижный слой ионита; x – текущая координата по высоте, толщине или радиусу слоя; τ – время; ε – порозность; Ω – коэффициент формы аппарата.

Для ионитового фильтра $v_{вх} = v$ и $\Omega = 1$, для кольцевого адсорбера $\Omega = R_{в.р}/(R_{в.р}-x)$, для горизонтального адсорбера $\Omega = R_0/(R_0^2-x^2)^{1/2}$, для адсорбера конической формы с кипящим слоем $\Omega = R_{р.р}^2/(R_{р.р}+x \operatorname{tg}\gamma/2)^2$, для аппарата со сферическим неподвижным слоем ионита $\Omega = R_0^2/(R_0^2-x^2)$. Принятые обозначения: v – скорость потока раствора, $R_{в.р}$ – радиус внешней цилиндрической решетки, γ – угол конусности аппарата, R_0 – радиус аппарата, $R_{р.р}$ – радиус распределительной решетки.

Получены аналитические решения уравнения (1) в области линейной изотермы адсорбции совместно с уравнением кинетики диффузии и симметричными граничными условиями третьего рода [15, 16].

Отдельное направление работ посвящено решению линейных задач диффузии и теплопроводности для тел классических форм при равномерном и неравномерном начальном распределении соответственно сорбируемого вещества и температуры для полупериодических процессов, протекающих в аппаратах идеального смешения проточного типа, когда параметры среды внутри аппарата изменяются вследствие протекания тепло- и массообмена между телами твердого материала и сплошной средой, а также поступления в аппарат и отвода из него газа или раствора [17-19]. Новизна полученных аналитических решений рассмотренных задач, например, о диффузионном извлечении целевого компонента и симметричных граничных условиях третьего рода с переменной во времени концентрацией раствора состоит в

том, что впервые для нахождения неизвестной функции $C(\tau)$ используется характеристическое уравнение полупериодического аппарата полного смешения:

$$V \frac{dC(\tau)}{d\tau} + \bar{V} \frac{d\bar{C}_{cp}(\tau)}{d\tau} = Q[C_{вх} - C(\tau)] \quad (2)$$

где V – объем раствора, \bar{V} – объем твердой фазы, Q – расход раствора.

Адекватность разработанных математических моделей подтверждена экспериментальными исследованиями [20-21].

Ряд работ посвящены получению и экспериментальному исследованию физико-химических и сорбционных свойств биосорбентов на основе растительного сырья [22, 23]. Данные сорбенты используются для очистки воды от ионов тяжелых металлов (ИТМ). В качестве примера на рис. 1-3 приведены изотермы и кинетические кривые ионообменной сорбции ионов Cu^{2+} и Zn^{2+} на новом гранулированном композиционном древесно-хитозановом катионите (КДХК). На рисунках приняты следующие обозначения: C_p и C_0 , – равновесная и начальная концентрация раствора, \bar{C}_p – равновесная концентрация сорбируемого вещества в частице, F_{cp} – степень завершенности процесса.

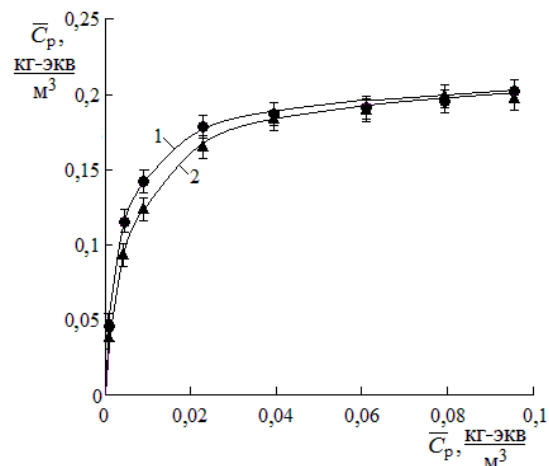


Рис. 1. Изотермы процессов ионообменной сорбции ионов Cu^{2+} (1) и Zn^{2+} (2) на КДХК

Fig. 1. Isotherms of ion-exchange sorption processes of Cu^{2+} (1) and Zn^{2+} (2) ions on CDCA

Полученный КДХК характеризуется следующими потребительскими свойствами: имеет однородный гранулометрический состав, высокую механическую прочность и осмотическую стабильность, постоянную обменную емкость, не изменяющуюся при многократной регенерации, и хорошие кинетические свойства.

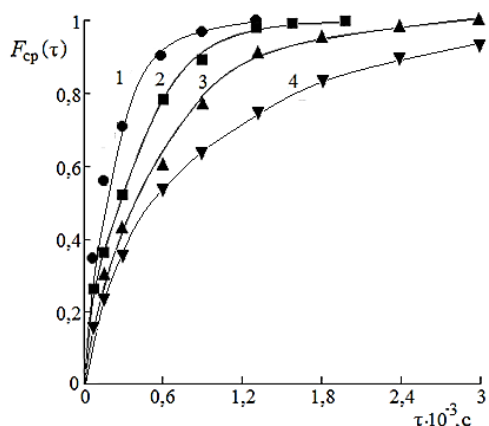


Рис. 2. Кинетические кривые процессов ионообменной сорбции ионов Cu^{2+} на КДХК: C_0 , кг-экв/м³: 1 – 0,1; 2 – 0,05; 3 – 0,01; 4 – 0,005

Fig. 2. Kinetic curves of the processes of ion-exchange sorption of Cu^{2+} ions on CDCA: C_0 , kg-eq/m³: 1 – 0.1; 2 – 0.05; 3 – 0.01; 4 – 0.005

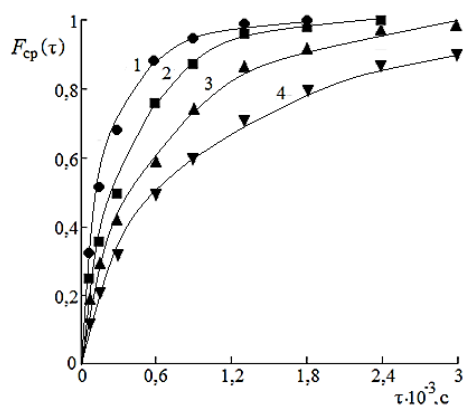


Рис. 3. Кинетические кривые процессов ионообменной сорбции ионов Zn^{2+} на КДХК: C_0 , кг-экв/м³: 1 – 0,1; 2 – 0,05; 3 – 0,01; 4 – 0,005

Fig. 3. Kinetic curves of the processes of ion-exchange sorption of Zn^{2+} ions on CDCA: C_0 , kg-eq/m³: 1 – 0.1; 2 – 0.05; 3 – 0.01; 4 – 0.005

Для очистки воды с помощью целлюлозо-содержащих сорбентов разработаны высокоэффективные аппараты, на конструкции которых получены патенты на изобретения РФ. Неоспоримым достоинством данных аппаратов является возможность использования в качестве насадки сорбентов с плотностью меньшей, чем плотность очищаемой воды. Благодаря сжатию слоя сорбента с помощью частиц инертного материала исключается возможность внутрислойного перемешивания.

Полученные природные сорбенты и разработанные ионообменные аппараты прошли испытания на ряде предприятий г. Иваново и Ивановской области. В результате проведенных исследований разработаны технологические схемы очистки промышленных сточных вод от ИТМ и

даны рекомендации по ведению технологических процессов.

Актуальной задачей является разработка технологии разрушения поликомпонентных материалов с целью увеличения полноты извлечения целевого компонента при разработке сухих способов обогащения фосфатных руд.

Проведенные исследования показали, что при разрушении поликомпонентных материалов высокоскоростное нагружение частиц позволяет интенсифицировать не только процесс их измельчения [24], но также и процесс раскрытия многокомпонентного материала на составляющие компоненты с целью более полного извлечения раскрытого целевого компонента.

Для исследования процесса избирательного измельчения полученной смеси компонентов руды была спроектирована, изготовлена и испытана установка, основной частью которой является аппарат комбинированного способа измельчения, представляющий собой модифицированную струйную мельницу с псевдоожиженным слоем. На установку получен патент на изобретение РФ. В изготовленном аппарате отдельно исследован вклад псевдоожиженного слоя в избирательное измельчение смеси разнопрочных компонентов [25].

Получены расчетные зависимости для нахождения максимальных значений термических напряжений сжатия и растяжения, возникающих на границах связи основных компонентов поликомпонентного материала – апатит-нефелиновой руды, больших пределов прочности их связей [26-29].

Получено эмпирическое уравнение кинетики истирания частиц твердых материалов в псевдоожиженном слое с учетом основных факторов, влияющих на процесс истирания и позволяющее рассчитать его вклад в суммарный процесс избирательного измельчения.

Струйная мельница с псевдоожиженным слоем позволяет существенно повысить концентрацию твердой фазы в струе за счет накопительных карманов, что позволяет повысить общую производительность струи без существенных энергетических затрат.

Разработана методика расчета процесса измельчения в струйном измельчителе с псевдоожиженным слоем с учетом вероятности столкновения и разрушения частиц твердого материала, в противоточных двухфазных струях, истекающих из псевдоожиженным слоем.

В настоящее время наблюдается тенденция долгосрочного роста поступлений использо-

ванных автопокрышек. Резина шин в процессе эксплуатации подвергается структурным изменениям, однако свойства ее, как правило, остаются относительно близкими к первоначальным.

На основании полученных расчетных зависимостей разработана методика расчета вибропневмосепаратора, позволяющая распределение скоростей воздушного потока при отделении волокна на разрыхлительном устройстве и на решетке вибростолы, а также скорости транспортирования резинотекстильной смеси и к.п.д. разделения [30, 31].

Предложена новая конструкция вибропневмосепаратора, защищенная патентом на полезную модель. Разработанная методика расчета принята к использованию в ЗАО «Ивановский завод искусственных кож».

Разработаны технические средства (измельчители центробежного действия, дезинтеграторы, смеситель непрерывного действия), предназначенные для обработки дисперсных материалов, позволяющие существенно снизить энергоемкость процесса. Конструкции защищены патентами РФ.

Исследования проведены с целью повышения эффективности технологии обработки дисперсных материалов путем совершенствования технологических процессов и технических средств центробежного действия, обеспечивающих улучшение качества готового продукта, снижение энергетических и материальных затрат.

Теоретически и экспериментально обоснованы конструктивно-технологические параметры измельчителей и смесителей центробежного действия [32-41].

Разработаны математические модели процессов измельчения и смешивания дисперсных материалов, износа поверхностей разгонных и ударных элементов измельчителей центробежного действия, процесса механической активации дисперсных материалов [42-45].

Разработанные технические средства внедрены на предприятиях Ивановской области.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Кафедра высшей и прикладной математики занимается моделированием гетерогенных химико-технологических процессов. Строятся математические модели тепломассобменных процессов с учетом комбинированного подвода энергии к твердой фазе. Математическое описание процессов термообработки гетерогенных систем основано на фундаментальных принципах систем-

ного анализа, аналитических методах теории теплопроводности, теории случайных марковских процессов.

Последовательно развивается аналитическая теория теплопроводности для областей с подвижными границами с использованием метода дифференциальных рядов. Корректно поставлены и аналитически решены задачи стефановского типа (с подвижными границами) для тел канонической формы (шар, неограниченный цилиндр, неограниченная пластина), позволяющие описать процессы фазового и химического превращения в твердом материале (на примере сублимации, сушки, обжига) [46, 47]. Проверена работоспособность метода дифференциальных рядов при решении краевой задачи с неподвижной границей. При постановке краевых задач учтено наличие внутренних источников теплоты, инициированных механическим нагружением, ИК излучением и комбинированным подводом энергии извне, что позволило моделировать и рассчитывать совмещенные процессы термической обработки материалов. Метод дифференциальных рядов позволяет получать искомые функции в виде бесконечного ряда дифференцируемых функций. Изложенный метод решения задачи более эффективен, чем описанные в литературе инженерные и численные методы, т.к. во-первых, позволяет описать процесс на протяжении всего его течения, а не только на завершающей стадии, во-вторых, учесть влияние начального теплосодержания на динамику изменения размеров и температуры тела. В математическом аспекте главной особенностью таких задач является специфическая связь скорости перемещения поверхности превращения и температуры на этой поверхности. Эта особенность позволила успешно применить метод дифференциальных рядов для решения соответствующих краевых задач с движущейся границей.

В частности, решен ряд задач тепло- и массопереноса в процессе сушки неограниченного цилиндра, в том числе задача Стефана с движущейся границей раздела жидкой и паровой фаз. Учтены факторы различной природы, интенсифицирующие явления переноса в процессе сушки. С помощью полученных моделей осуществлено расчетно-экспериментальное исследование процесса сушки на примере единичных целлюлозосодержащих волокон. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных по сушке волокон. Проанализирована область применения предложенной модели сушки [47]. При моделировании процесса сушки волокна в период падаю-

щей скорости сушки (наиболее интересная и сложная с точки зрения математики) построено следующее математическое описание.

Схема, иллюстрирующая период падающей скорости сушки, представлена на рис. 4. Расчет по предложенной модели проводили до тех пор, пока влагосодержание материала не достигло заданного значения.

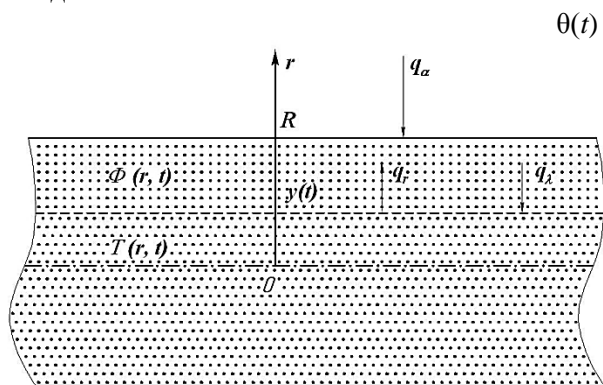


Рис. 4. Схема тепловых потоков в периоде падающей скорости сушки

Fig. 4. Scheme of heat flows in the period of decreasing drying rate

Поместим начало координат на центральной оси цилиндра, и будем считать распределение температур четной функцией r . Математическая постановка задачи о сушке волокна во втором периоде при указанных выше условиях сводится к сопряженной задаче теплопроводности для неограниченного цилиндра с подвижной границей фазового перехода, при соответствующих краевых условиях (задача Стефана):

$$\frac{\partial \Phi(r, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \Phi(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi(r, t)}{\partial r} \right), \quad t > 0, y(t) < r < R; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial \Phi(R, t)}{\partial r} = \alpha(\theta(t) - \Phi(R, t)) \quad (4)$$

$$\Phi(y(t), t) = T(y(t), t); \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial \Phi(y(t), t)}{\partial r} + \varepsilon \rho r^* \frac{dy}{dt} = 0; \quad (6)$$

$$-\varepsilon \rho \frac{dy}{dt} = K_P \left(\exp \left(M_2 - \frac{M_1}{T(y(t), t)} \right) - P(t) \right); \quad (7)$$

$$y(0) = R; \quad (8)$$

$$T(r, t) = f_1(r), 0 \leq r \leq y(t). \quad (9)$$

Требуется найти $y(t)$, $\Phi(r, t)$ при $t > 0$, $y(t) \leq r \leq R$.

Здесь $\Phi(r, t)$ – поле температур высушенного слоя (К); $P(t)$ – парциальное давление водяного пара в воздухе (Па); $f_1(r)$ – симметричное

относительно центральной оси цилиндра, распределение температуры во влажном материале в момент начала второго периода сушки; ρ – плотность воды ($\text{кг}/\text{м}^3$); ε – пористость материала ($\text{м}^3/\text{м}^3$); r^* – теплота парообразования ($\text{кДж}/\text{кг}$);

$1/K$ – общее сопротивление массопередаче ($\text{с}/\text{м}$);

K – коэффициент массопередачи, выраженный по газовой фазе и отнесенный к разности концентраций пара ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг}/\text{м}^3)$);

$R_{II}^* = 462 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – газовая постоянная водяного пара;

β – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентраций пара ($\text{кг}/\text{м}^3$);

D_0 – эффективный коэффициент диффузии пара в пористой среде (высохшем слое) ($\text{м}^2/\text{с}$);

$\theta(t)$ – температура среды (К).

Данная задача Стефана (3)-(9) решена аналитически с использованием метода дифференциальных рядов. Распределение температур внутри высушенного слоя в любой момент времени можно представить выражением (дифференциальным рядом), удовлетворяющим уравнению (3):

$$\Phi(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r^{2n}}{(n!)^2 2^{2n} a^n} \frac{d^n}{dt^n} B(t), \quad (10)$$

где $B(t)$ – произвольная функция, вид которой должен обеспечить сходимость ряда (10). В выражении (10) отражена указанная выше симметрия тепловых полей в нашей задаче.

Получена расчетная формула для нахождения текущего влагосодержания материала по известному закону перемещения границы испарения $y(t)$, если известно исходное значение влагосодержания, рис. 5. На рис. 6 представлены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных для целлюлозного льняного волокна. Из графиков видно хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных. Относительная погрешность, в среднем, не превосходит 15%.

На основе принципов системно-структурного анализ построены структурные модели решения в изображения по Лапласу задач прогрева твердых тел канонической формы (сферы, пластины, цилиндра) в потоке газа переменной температуры с учетом внутренних источников теплоты различной физической природы [48-50]. Структурная модель прогрева твердого тела представляет собой наглядную блок-схему решения задачи теплопроводности, составленную из операторных функций. Она позволяет осуществлять визуальный анализ взаимодействия и преобразования тепловых потоков, как на границе раздела фаз, так и внутри тела.

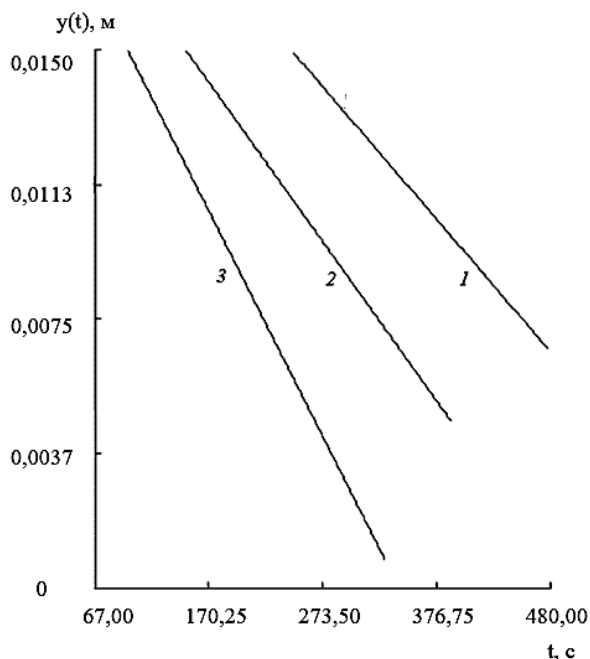


Рис. 5. Закон перемещения границы испарения в льняном волокне при температуре среды θ , °C: 1 = 40; 2 = 50; 3 = 60 ($P = 3000$ Па, $r = 1,5$ мм)

Fig. 5. The law of movement of the evaporation boundary in linen fiber at medium temperature θ , °C: 1 = 40; 2 = 50; 3 = 60 ($P = 3000$ Pa, $r = 1.5$ mm)

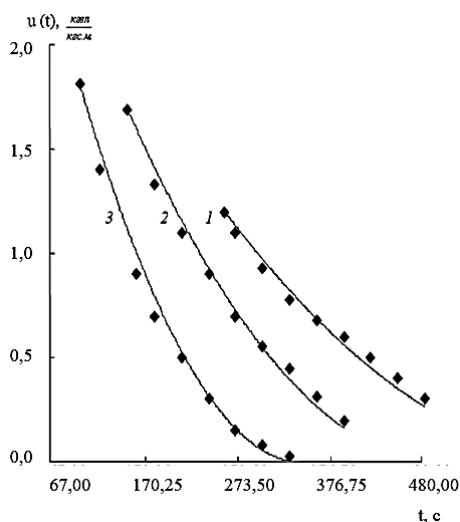


Рис. 6. Изменение влагосодержания в льняном волокне, рассчитанного по модели (—), экспериментально определенного (◆◆) при температуре среды θ , °C: 1 = 40; 2 = 50; 3 = 60 ($P = 3000$ Па, $r = 1,5$ мм)

Fig. 6. Change in moisture content in flax fiber, calculated by the model (—), experimentally determined (◆◆) at medium temperature θ , °C: 1 = 40; 2 = 50; 3 = 60 ($P = 3000$ Pa, $r = 1.5$ mm)

На базе структурной модели решения задач теплопроводности в случае переменной температуры среды предложен способ идентификации коэффициента теплоотдачи. Построены структурные схемы идентификации значений ко-

эффициента теплоотдачи, использование которых позволяет грамотно поставить соответствующий теплофизический эксперимент.

Значительная часть работ посвящена математическому моделированию процесса сушки, который осуществляется с целью кинетического расчета сушильного аппарата, поиска путем численного анализа процесса желаемого технологического и конструктивного решения [51-54]. Математические (аналитические) методы не требуют предварительного (перед расчетом) опытного исследования процесса сушки в лабораторных условиях, а оперируют только теплофизическими характеристиками материала [55, 56]. Разработаны математические модели кинетики осциллирующей инфракрасной сушки [57], основанные на решении задач комбинированного тепломассопереноса для пластины [58, 59], сферической частицы [60], цилиндра [61].

Применение зонального метода позволило определить значение коэффициента массопроводности для коллоидных капиллярно-пористых материалов (семян различных овощных культур), причем не постоянное, а его концентрационную зависимость $k = f(u)$, это дает возможность точнее рассчитывать кинетику процесса [62-64]. На рис. 7 в качестве примера приведены полученные в [63] данные по коэффициенту массопроводности зерна кукурузы в процессе сушки, которые демонстрируют зависимость коэффициента массопроводности от влагосодержания материала.

Исследовано равновесное влагосодержание ряда растительных материалов, опытные данные по равновесному влагосодержанию описаны уравнением Гендерсона [65-67].

На кафедре разрабатываются математические методы оценки качества геотекстильных материалов. Установлена взаимосвязь между выполняемыми функциями геосинтетического нетканого полотна, применяемого в нижних слоях дорожной одежды, и технологическими воздействиями, оказываемыми на него с применением экспертных методов.

Спроектирована, реализована и исследована конструкция композитного теплоизоляционного материала, содержащего в качестве основы пенополистирольные плиты, а также тканые и нетканые текстильные полотна, предназначенного для утепления стен с переменной геометрией. Предложена и исследована методика с применением методов аппроксимации для прогнозирования единичных показателей качества на основе анализа ассортиментной политики [68-70].

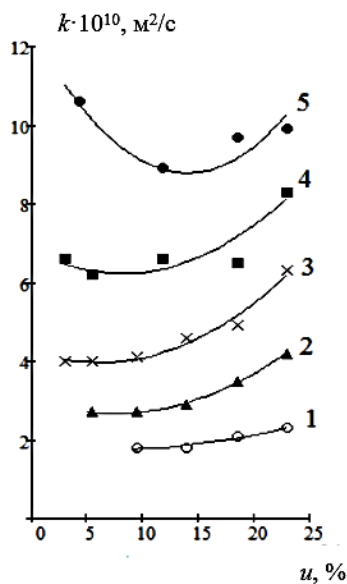


Рис. 7. Зависимости $k = f(u)$ при сушке зерна кукурузы сорта ПР-7709 Пионер FAO-160: 1 - $t_c = 40$ °C; 2 - 50 °C; 3 - 60 °C; 4 - 70 °C; 5 - 80 °C

Fig. 7. Dependences $k = f(u)$ during drying of grain of corn variety PR-7709 Pioneer FAO-160: 1 - $t_c = 40$ °C; 2 - 50 °C; 3 - 60 °C; 4 - 70 °C; 5 - 80 °C

ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСБЕ- РЕГАЮЩИМИ МНОГОПРОДУКТОВЫМИ РЕАКТОРНЫМИ СИСТЕМАМИ

Многие промышленно важные продукты и полупродукты в химической промышленности производятся путем реализации сложных многостадийных многопродуктовых реакций. Реконструкция действующих и создание новых многопродуктовых производств непрерывного типа, основной стадией которых часто является реакторная подсистема, обладающая свойством гибкости, предполагает решение проблемы оптимального аппаратно-технологического оформления и организации оптимального функционирования химико-технологической системы в изменяющихся условиях, т.е. проблемы оптимального синтеза ресурсосберегающих многопродуктовых реакторных систем [71-75] и разработки эффективных систем управления ХТП на стадии проектирования [76-87].

Проблема синтеза систем управления, обеспечивающих поддержание оптимальных режимов их работы, остается до конца не решенной [88, 89]. Это объясняется основной особенностью химических реакторов как объектов управления: многомерностью, нелинейностью и многосвязностью.

Выходом из данной ситуации является развитие физической теории управления и, в частности, синергетической теории управления,

основные положения которой сформулированы в работах [90, 91].

Пусть математическая модель реактора задана в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений $dx/d\tau = f(x, u)$. Задача синергетического синтеза системы управления формулируется следующим образом: необходимо найти закон управления $u = (u_1, \dots, u_m)^T$ как нелинейную функцию переменных состояния объекта $u_1(x_1, \dots, x_n), \dots, u_m(x_1, \dots, x_n)$, которая переводит изображающую точку (ИТ) системы в фазовом пространстве из произвольного начального состояния в окрестность задаваемых инвариантных многообразий $\psi_S(x_1, \dots, x_n) = 0, S = 1, \dots, m$ и дальнейшее движение вдоль пересечения многообразий в некоторую стационарную точку или в некоторый динамический режим. В приведенных выражениях n – размерность вектора состояния, m – число внешних управлений. На траектории движения должен достигаться минимум критерия оптимальности системы (J) и гарантироваться ее устойчивость:

$$J = \int_0^{\infty} \left[\sum_{S=1}^m \left(T_S^2 \dot{\psi}_S^2 + \psi_S^2 \right) \right] d\tau \quad (11)$$

Движение ИТ в фазовом пространстве подчиняется функциональному уравнению

$$T_S \dot{\psi}_S + \psi_S = 0, S = 1, \dots, m, \quad (12)$$

где T_S – постоянная времени, $\dot{\psi}_S$ – полная производная инвариантного многообразия по времени. Это уравнение устойчивой экстремали, доставляющей минимум оптимизирующему функционалу (11). Условие асимптотической устойчивости системы в целом имеет вид $T_S > 0$.

Основным этапом процедуры синтеза алгоритма управления является запись системы (12) в развернутом виде в силу уравнений модели объекта

$$T_S \sum_{j=1}^n \frac{\partial \psi_S}{\partial x_j} \cdot \frac{dx_j}{d\tau} + \psi_S = 0, \quad (13)$$

где x_j – переменная состояния объекта. Из совместного решения системы уравнений (13) находится закон управления как функция переменных состояния.

Второй эффективный способ синтеза систем управления базируется на использовании многомерной, многосвязной, но линеаризованной модели объекта в виде системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений в пространстве состояний $dx/d\tau = Ax + Bu$.

В этом случае применяют принцип управления по вектору состояния, основанный на ис-

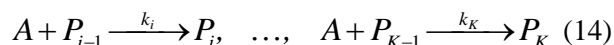
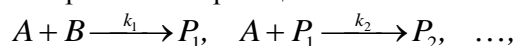
пользовании безынерционных регуляторов состояния (РС), либо комбинированных РС, включающих гибкие обратные связи по производным координат состояния или интегралам координат состояния [85-87, 92]. Управляющее воздействие формируется как линейная функция от координат состояния $u = kx$, где k – вектор параметров алгоритма. При выбранной структуре системы управления с РС особое значение для обеспечения ее робастности приобретает метод параметрического синтеза системы. Наиболее часто используется для решения этой задачи метод модального управления [86, 92].

Базируясь на идеях интегро-гипотетического подхода к синтезу ХТС [93] в работах [71-75, 94] предложена обобщенная структура реакторного узла и двухуровневая процедура технико-экономической оптимизации реакторной системы.

На верхнем уровне производится оптимизация взаимодействия системы с внешней средой – рынком. На нижнем уровне решается задача аппаратно-технологической и режимной оптимизации системы с учетом целевых показателей эффективности, определенных на верхнем уровне.

Оптимизация взаимодействия с рынком. Задача формулируется следующим образом. При заданной мощности по переработке исходного “ведущего” реагента определить теоретически возможные значения потоков продуктов реакции, т.е. селективностей по продуктам, обеспечивающих верхнюю границу возможного дохода от их реализации в сложившихся или прогнозируемых условиях рынка. Рассмотрим пример постановки и решения задачи верхнего уровня.

Пусть в системе реализуется последовательно-параллельная реакция:



где A и B – исходные реагенты; P_i – продукты реакции $i = \overline{1, K}$, K – количество продуктов.

Необходимо определить производительность ХТС по продуктам реакции, обеспечивающую максимальный доход и минимизирующую различие между предложением и спросом потребителей на различные продукты.

Сформулируем критерий оптимальности в виде:

$$R = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L [S_{i,j} (\Pi_{i,j} - \hat{m}_{i,j})]^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

где Π_{ij} – спрос на $i^{\text{тый}}$ продукт у $j^{\text{го}}$ потребителя, S_{ij} – цена единицы $i^{\text{го}}$ продукта у $j^{\text{го}}$ потребителя, $\hat{m}_{i,j}$ – предложение $i^{\text{го}}$ продукта $j^{\text{му}}$ потребителю, которое может обеспечить рассматриваемая ХТС. Π_{ij} и $\hat{m}_{i,j}$ выражены в молях. Объем $i^{\text{го}}$ продукта, произведенного в реакторной системе, определяется соотношением $\hat{m}_i = \sum_{j=1}^L \hat{m}_{i,j}$, $i = \overline{1, K}$. В каче-

стве ограничения выступает мощность установки по переработке исходного реагента $A - F_{0A}$ (моль), либо исходного реагента $B - F_{0B}$ (моль). Такая формулировка ограничений позволяет использовать стехиометрию реакции для записи ограничений:

$$F_{0B} = \sum_{i=1}^K \hat{m}_i \quad \text{или} \quad F_{0A} = \sum_{i=1}^K i \hat{m}_i. \quad (16)$$

Таким образом, имеем задачу на условный экстремум:

$$m_{i,j}^* = \arg \min m_{i,j}^* = \arg \min_{\hat{m}_{i,j}} R(\hat{m}_{i,j}), \quad (17)$$

$$\hat{m}_{i,j} = \left\{ \hat{m}_{i,j} \in E_{K \times L}, \quad \varphi = \left(F_{0A} - \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L \hat{m}_{i,j} \right) = 0, \quad \Pi_{i,j} \geq \hat{m}_{i,j} \geq 0 \right\}$$

Решение задачи осуществляется методом неопределенных множителей Лагранжа и имеет вид:

$$\lambda^* = \frac{F_{0A} - \sum_{i=1}^K i \sum_{j=1}^L \Pi_{i,j}}{\sum_{i=1}^K i^2 \sum_{j=1}^L \frac{1}{S_{i,j}^2}}; \quad m_{i,j}^* = \Pi_{i,j} + \frac{i}{S_{i,j}^2} \cdot \lambda^*. \quad (18)$$

Оптимальные количества продуктов, полученные в реакторной системе и оптимальные значения селективностей по продуктам реакции определяются соотношениями:

$$m_i^* = \sum_{j=1}^L m_{i,j}^*, \quad \sigma_i^* = \frac{m_i^*}{F_{0A}}, \quad i = \overline{1, K}. \quad (19)$$

Значения оптимальных селективностей процесса по продуктам реакции выступают в качестве целевых показателей эффективности на стадии аппаратно-технологической оптимизации системы.

Аппаратно-технологическая оптимизация. На этом этапе решается задача определения размеров аппаратов, оптимальных режимов и структуры реакторного узла, обеспечивающих минимальное расхождение между оптимальными с экономической точки зрения значениями селек-

тивностей по продуктам – σ_i^* и реально возможными значениями – $\hat{\sigma}_i$. Очевидно, что обеспечить равенство $\sigma_i^* = \hat{\sigma}_i$ для всех продуктов невозможно, т.к. на процесс накладываются ограничения в виде: кинетических закономерностей реакции, макрогидродинамической структуры потоков в отдельных модулях и системе в целом, уровня микросмешения элементов жидкости (максимальная смешенность, полная сегрегация).

Содержательная формулировка задачи выглядит следующим образом: определить значения режимно-технологических переменных (объемы аппаратов, температурный режим, концентрации исходных реагентов и т.п.), структуру системы и величины потоков между элементами, значения рециркуляционных потоков продуктов со стадии разделения, обеспечивающих экстремум некоторого критерия оптимальности при заданной мощности по переработке исходного «ведущего» реагента и заданной степени превращения этого реагента. В качестве критерия оптимальности предлагается использовать величину:

$$R = \sum_{i=1}^k b_i (\sigma_i^* - \hat{\sigma}_i)^2 \rightarrow \min \quad \text{или} \\ R = \sum_{i=1}^k b_i \left(1 - \frac{\hat{\sigma}_i}{\sigma_i^*}\right)^2 \rightarrow \min, \quad (20)$$

где: k – число продуктов, пользующихся спросом на рынке, b_i – весовой множитель, пропорциональный вкладу того или иного продукта в общий доход от реализации всех продуктов. Величина R характеризует потери производителя при реализации продуктов, обусловленные несовершенством процесса.

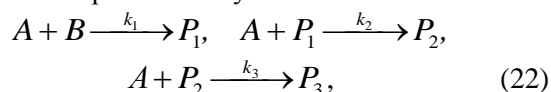
Задача оптимизации заключается в минимизации (20):

$$\{\alpha^*, \bar{U}^*\} = \arg \min_{\alpha, \bar{U}} R(\alpha, \bar{U}) = \arg \min_{\alpha, \bar{U}} \sum_{i=1}^k b_i \left(1 - \frac{\hat{\sigma}_i(\alpha, \bar{U})}{\sigma_i^*}\right)^2, \quad (21)$$

где: α^* – оптимальные значения структурных переменных, \bar{U}^* – вектор оптимальных режимно-технологических управляющих переменных.

Математическая модель системы состоит из двух частей: моделей отдельных блоков или элементов и модели структуры системы. Поиск экстремума функционала (21) осуществляется посредством алгоритма, основная идея которого заключается в том, что исходная задача оптимизации высокой размерности с использованием некоторых эвристических соображений делится на ряд подзадач меньшей размерности.

В качестве примера рассмотрим задачу синтеза реакторной системы для проведения жидкофазной реакции оксиэтилирования бутилового спирта в изотермических условиях:



где: A – оксид этилена; B – бутиловый спирт; P_1 , P_2 , P_3 – продукты реакции.

Спрос потребителей на продукты реакции и соответствующие цены продуктов на планируемый период приведены в таблице. Мощность установки по переработке исходного реагента $F_{0A} = 530$ кмоль, что соответствует нагрузке по исходному веществу 4,75 моль/мин. Объем аппаратов $V < 1000$ л. Оптимальные количества произведенных продуктов за планируемый период и соответствующие значения селективностей приведены в таблице.

Таблица

Оптимальная селективность процесса по продуктам реакции
Table. Optimal process selectivity for reaction products

Спрос на продукты $\{P_{ij}\}$ (кмоль)	Матрица цен $\{S_{ij}\}$ (денежн. ед.)	Оптимальное количество наработанных продуктов m_i^* (кмоль)	Селективность σ_i^*
$\begin{bmatrix} 22 & 15 & 19 \\ 39 & 57 & 52 \\ 25 & 18 & 20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6 & 7 & 6 \\ 8 & 9 & 7 \\ 10 & 12 & 10 \end{bmatrix}$	$m_1^* = 54,37$ $m_2^* = 145,92$ $m_3^* = 61,26$	$\sigma_1^* = 0,10$ $\sigma_2^* = 0,28$ $\sigma_3^* = 0,12$ $\sigma_3^* = 0,116$

Оптимальная структура реакторного узла, значения потоков веществ определены путем решения задачи структурной и аппаратурно-технологической оптимизации реакторной системы (рис. 8).

На рис. 8 обозначено: РИС, РИВ – реактор идеального смешения и вытеснения, соответственно.

Синтезированная реакторная система обеспечивает следующие значения селективностей по продуктам: $\hat{\sigma}_1 = 0,102$, $\hat{\sigma}_2 = 0,275$, $\hat{\sigma}_3 = 0,115$, которые практически совпадают с оптимальными.

При решении более общей задачи создания гибкой многопродуктовой реакторной системы в качестве итоговой может быть рекомендова-

на система, которая получится в результате объединения оптимальных вариантов аппаратно-технологического оформления процесса, найденных для всех прогнозируемых временных периодов.

Методология интегрированного проектирования ХТП и ХТС [93] предполагает этап синтеза алгоритмов управления аппаратами, входящими в реакторную систему. В качестве примера рассмотрим реактор идеального смешения, в кото-

ром реализуется многостадийная последовательно-параллельная реакция: $A + B \xrightarrow{k_1} P_1$, $A + P_1 \xrightarrow{k_2} P_2$, $A + P_2 \xrightarrow{k_3} P_3$, где A и B – исходные реагенты, P_1 , P_2 , P_3 – продукты реакции, k_1 , k_2 , k_3 – константы скоростей стадий. Целевым компонентом является вещество P_2 . Исходные реагенты A и B подаются в аппарат отдельными потоками.

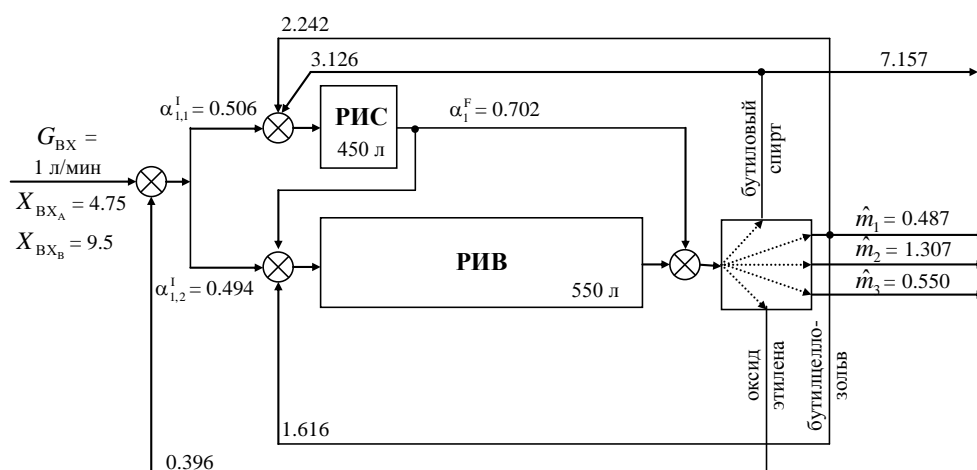


Рис. 8. Оптимальная структура реакторного узла: числа – величины мольных потоков (моль/мин) и значения структурных параметров

Fig. 8. Optimal structure of the reactor unit: numbers – values of mole flows (mol/min) and values of structural parameters

Математическая модель химического реактора при постоянной температуре реакционной смеси и переменном уровне (объеме) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + \frac{v_1 x_1^{ex}}{x_5} - \frac{v x_1}{x_5}, & \frac{dx_2}{d\tau} &= \\ &= R_2 + \frac{v_2 x_2^{ex}}{x_5} - \frac{v x_2}{x_5}, & \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - \frac{v x_3}{x_5}, & (23) \\ \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - \frac{v x_4}{x_5}, & \frac{dx_5}{d\tau} &= v_1 + v_2 - v, \end{aligned}$$

где $R_1 = -k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$, $R_2 = -k_1 x_1 x_2$, $R_3 = k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3$, $R_4 = k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$ – скорость реакции по компонентам, x_1^{BX} , x_2^{BX} – концентрации исходных реагентов; v_1 , v_2 – расход исходных реагентов; v – расход реакционной смеси на выходе из аппарата; x_1 , x_2 , x_3 , x_4 – концентрации компонентов A , B , P_1 , P_2 в реакторе; $V = x_5$ – объем реакционной смеси в аппарате.

Задача управления химическим реактором формулируется следующим образом: необходимо синтезировать закон управления, обеспечивающий перевод аппарата с одной производи-

сти $G = \bar{x}_4 v$ на новую производительность $\bar{G} = \bar{x}_4 \bar{v}$ и стабилизацию концентрации целевого компонента на заданном уровне \bar{x}_4 в условиях действия возмущений. Изменение выходного потока во времени со значения v на значение \bar{v} может происходить по какому-либо закону, в том числе и ступенчато.

Переход на новую производительность \bar{G} с обеспечением заданной концентрации \bar{x}_4 возможен путем подбора определенного значения среднего времени пребывания реакционной смеси в аппарате – $\bar{\tau}$. При заданных \bar{G} , \bar{x}_4 , \bar{v} необходимое среднее время пребывания можно обеспечить путем изменения объема смеси в аппарате.

Каналы управления концентрацией целевого компонента и объемом смеси в аппарате запишутся: $u_1 \rightarrow x_1 \rightarrow x_4$, $u_2 \rightarrow x_5$, где $u_1 = v_1$, $u_2 = v_2$.

Поскольку математическая модель объекта (23) содержит два внешних управляющих воздействия $u_1 = v_1$ и $u_2 = v_2$, используем метод АКАР на основе параллельно-последовательной сово-

купности инвариантных многообразий [76, 91]. Выражения для закона управления в соответствии с (13) имеют вид:

$$u_1 = -\frac{(x_1 + v_1)x_5}{T_1 x_1^{ex}} - \frac{R_1 x_5}{x_1^{ex}} + \frac{\bar{v} x_1}{x_1^{ex}} - \frac{\partial v_1}{\partial x_4} \frac{(R_4 x_5 - x_4 \bar{v})}{x_1^{ex}},$$

$$u_2 = -\frac{(x_5 - \bar{x}_5)}{T_2} + \bar{v} - u_1. \quad (24)$$

«Внутреннее» управление v_1 определяется соотношением:

$$v_1 = \frac{x_4 - \bar{x}_4}{T_3(k_2 x_3 - k_3 x_4)} - \frac{x_4 \bar{v}}{x_5(k_2 x_3 - k_3 x_4)}. \quad (25)$$

Для проверки работоспособности синтезированного закона управления химическим реактором было проведено компьютерное моделирование замкнутой системы «объект–регулятор».

На рис. 9 приведен пример переходных процессов управления при переходе с производительности $G = \bar{x}_4 v$ на производительность $\bar{G} = \bar{x}_4 \bar{v}$ путем изменения нагрузки v . Здесь же представлен вариант, когда процесс переключения осуществляется в ручном режиме.

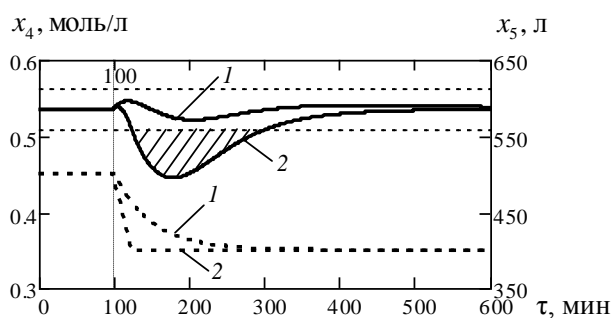


Рис. 9. Изменение регулируемой переменной x_4 (сплошная линия) и объема смеси в аппарате x_5 (пунктирная линия) при уменьшении нагрузки v на 20% (1 – система управления, 2 – ручной режим)

Fig. 9. Change in the controlled variable x_4 (solid line) and the volume of mixture in the unit x_5 (dashed line) when the load v is reduced by 20% (1 – control system, 2 – manual mode)

Как видно из рис. 9, большим недостатком ручного способа перехода на новую производительность является большое перерегулирование по концентрации целевого компонента (заштрихованная область), что ведет к потере продукта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кафедрами факультета техники, управления и цифровой инфраструктуры ИГХТУ ТМиО, ВиПМ, ТКиА разрабатываются теоретические основы аппаратурного оформления энерго- и ресурсосберегающих процессов интенсивного действия, моделирование гетерогенных химико-

технологических процессов, управление ресурсосберегающими многопродуктовыми реакторными системами.

На способы и конструкции аппаратов получены патенты на изобретения РФ. Разработки кафедр внедрены в производства предприятий РФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22–29–01368.

Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

This work was supported by the Russian Science Foundation grant N 22–29–01368. The studies were carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, grant No. 075-15-2021-671).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

- Кафаров В.В., Мешалкин В.П. // Итоги науки и техники. Сер.: «Проц. и апп. хим. технологии». 1987. Т. 15. С. 85–159. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. // Results of science and technology. Series: "Processes and apparatuses of chemical technology". 1987. V. 15. P. 85–159 (in Russian).
- Кафаров В.В. Принципы создания безотходных химических производств. М.: Химия. 1982. 288 с. Kafarov V.V. Principles of creating non-waste chemical production. M.: Khimiya. 1982. 288 p. (in Russian).
- Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгарген М.Г. Общая химическая технология. М.: ИКЦ Академкнига. 2003. 528 с. Kutepov A.M., Bondareva T.I., Berengarten M.G. General chemical technology. M.: IKTs Akademkniga. 2003. 528 p.
- Блиничев В.Н., Колобов М.Ю., Чагин О.В. // Соврем. наукоемк. технологии. Регионал. прилож. 2021. № 1. С. 58–65. DOI: 10.6060/snt.20216501.0007. Blnichev V.N., Kolobov M.Yu., Chagin O.V. // Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie. 2021. N 1. P. 58–65 (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20216501.0007
- Повтарев И.А., Блиничев В.Н., Чагин О.В., Кравчик Я. // Хим. и нефтегаз. машиностр. 2008. № 3. С. 12–13. Povtarev I.A., Blnichev V.N., Chagin O.V., Kravchik Ya. // Khim. Neftegaz. Mashinost. 2008. N 3. P. 12–13 (in Russian).
- Чагин О.В., Блиничев В.Н., Колобов М.Ю. // Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож. 2021. № 2. С. 89–93. DOI: 10.6060/snt.20216602.00012. Chagin O.V., Blnichev V.N., Kolobov M.Yu. // Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie. 2021. N 2. P. 89–93 (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20216602.00012.
- Сиволецкий М.О., Чагин О.В., Крупин С.А. // Хим. пром-сть. 2014. Т. 91. № 2. С. 55–58. Sivolotsky M.O., Chagin O.V., Krupin S.A. // Khim. Prom. 2014. V. 91. N 2. P. 55–58 (in Russian).

8. Алиев Э.К., Володин В.В., Голуб В.В., Микушкин А.Ю., Тимербаев Г.Г., Чагин О.В. // *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естествов. науки.* 2019. № 4 (85). С. 4–21. Aliev E.K., Volodin V.V., Golub V.V., Mikushkin A.Yu., Timerbayev G.G., Chagin O.V. // *Vest. MG TU im. N.E. Bauman. Ser. Estesst. Naiki.* 2019. N 4 (85). P. 4–21 (in Russian). DOI: 10.18698/1812-3368-2019-4-4-21.
9. Сиволоцкий М.О., Чагин О.В., Блиничев В.Н., Колобов М.Ю. // *Рос. хим. ж.* 2019. Т. 63. № 3–4. С. 80–85. DOI: 10.6060/rcj.2019633.11. Sivolotsky M.O., Chagin O.V., Blinichev V.N., Kolobov M.Yu. // *Ross. Khim. Zhurn.* 2019. V. 63. N 3–4. P. 80–85 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2019633.11.
10. Сиволоцкий М.О., Чагин О.В., Блиничев В.Н., Постникова И.В. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2018. № 4. С. 84–92. Sivolotsky M.O., Chagin O.V., Blinichev V.N., Postnikova I.V. // *Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie.* 2018. N 4. P. 84–92 (in Russian).
11. Неробелов А.О., Полянский А.В., Ворошин А.В., Чагин О.В. // *Матем. методы в технике и технологиях – ММТТ.* 2013. № 6 (56). С. 39–41. Nerobelov A.O., Polyansky A.V., Voroshin A.V., Chagin O.V. // *Matem. Metody Nekh. Tekhnol. - MMTT.* 2013. N 6 (56). P. 39–41 (in Russian). DOI: 10.5771/0340-0425-2013-1-39.
12. Миронов Е.В., Миронов В.П., Блиничев В.Н. // *Теор. основы хим. технологии.* 2010. Т. 44. № 4. С. 384–395. Mironov E.V., Mironov V.P., Blinichev V.N. // *Teoret. Osnovu Khim. Tekhnol.* 2010. V. 44. N 4. P. 384–395 (in Russian).
13. Миронов В.П., Миронов Е.В., Блиничев В.Н. // *Теор. основы хим. технологии.* 2009. Т. 43. № 5. С. 595–602. Mironov V.P., Mironov E.V., Blinichev V.N. // *Teoret. Osnovu Khim. Tekhnol.* 2009. V. 43. N 5. P. 595–602 (in Russian).
14. Натареев С.В. Ионный обмен из ограниченного объема раствора. Иваново: ИГХТУ. 2006. 136 с. Natareev S.V. Ion exchange from a limited volume of solution. Ivanovo: IGKhTU. 2006. 136 p. (in Russian).
15. Натареев С.В., Быков А.А., Захаров Д.Е., Натареев О.С. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2015. Т. 58. Вып. 10. С. 73–76. Natareev S.V., Bykov A.A., Zakharov D.E., Natareev O.S. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2015. V. 58. N 10. P. 73–76 (in Russian).
16. Натареев С.В., Быков А.А., Захаров Д.Е. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2018. № 2 (54). С. 84–91. Natareev S.V., Bykov A.A., Zakharov D.E. // *Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie.* 2018. N 2 (54). P. 84–91 (in Russian).
17. Натареев С.В., Кокина Н.Р., Натареев О.С., Дубкова Е.А. // *Теор. основы хим. технол.* 2015. Т. 49. № 1. С. 74–78. Natareev S.V., Kokina N.R., Natareev O.S., Dubkova E.A. // *Teoret. Osnovu Khim. Tekhnol.* 2015. V. 49. N 1. P. 74–78 (in Russian). DOI: 10.7868/S0040357115010091.
18. Натареев С.В., Быков А.А., Натареев О.С., Захаров Д.Е. // *Журн. прикл. химии.* 2017. Т. 90. Вып. 2. С. 180–186. Natareev S.V., Bykov A.A., Natareev O.S., Zakharov D.E. // *Zhurn. Prikl. Khim.* 2017. V. 90. Iss. 2. P. 180–186 (in Russian). DOI: 10.1134/S1070427217020070.
19. Лапшин Н.А., Натареев С.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 12. С. 105–111. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6698. Lapshin N.A., Natareev S.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 12. P. 105–111 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6698.
20. Натареев О.С., Кокина Н.Р., Натареев С.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2015. Т. 58. Вып. 2. С. 67–72. Natareev O.S., Kokina N.R., Natareev S.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2015. V. 58. N 2. P. 67–72 (in Russian).
21. Натареев С.В., Захаров Д.Е., Сироткин А.А., Беляев С.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 1. С. 107–113. DOI: 10.6060/ivkkt.20196201.5783. Natareev S.V., Zakharov D.E., Sirotkin A.A., Belyaev S.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2019. V. 62. N 1. P. 107–113 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196201.5783
22. Nikiforova T., Natareev S., Kozlov V. // *Technical transactions. Czasopismo techniczne.* 2017. V. 5 (114). P. 163–183.
23. Захаров Д.Е., Натареев С.В., Снегирев Д.Г. // *Современ. пробл. граждан. защиты.* 2020. № 4 (37). С. 56–61. Zakharov D.E., Natareev S.V., Snegirev D.G. // *Sovrem. Probl. Grazhdan. Zashchity.* 2020. N 4 (37). P. 56–61 (in Russian).
24. Блиничев В.Н., Постникова И.В., Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Зуева Г.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 109–115. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357. Blinichev V.N., Postnikova I.V., Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Zueva G.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 1. P. 109–115 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357.
25. Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Постникова И.В., Блиничев В.Н. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2021. № 1 (65). С. 72–77. DOI: 10.6060/snt.20216501.0009. Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Postnikova I.V., Blinichev V.N. // *Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie.* 2021. N 1 (65). P. 72–77 (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20216501.0009
26. Воробьев С.В., Козлов А.М., Постникова И.В., Блиничев В.Н. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2020. № 2 (64). С. 97–102. Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Postnikova I.V., Blinichev V.N. // *Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie.* 2020. N 2 (64). P. 97–102 (in Russian).
27. Воробьев С.В., Постникова И.В., Блиничев В.Н. // *Рос. хим. ж.* 2019. Т. LXIII. № 3–4. С. 31–41. DOI: 10.6060/rcj.2019633.4. Vorobyov S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. // *Ross. Khim. Zhurn.* 2019. V. LXIII. N 3–4. P. 31–41 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2019633.4.
28. Воробьев С.В., Постникова И.В., Блиничев В.Н. // *Хим. волокна.* 2019. № 4. С. 96–102. Vorobyov S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. // *Khim. Volokna.* 2019. N 4. P. 96–102 (in Russian).
29. Воробьев С.В., Беляев И.А., Постникова И.В. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2018. № 4 (56). С. 15–19. Vorobyov S.V., Belyaev I.A., Postnikova I.V. // *Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie.* 2018. N 4 (56). P. 15–19 (in Russian).
30. Козлов А.М., Блиничев В.Н., Комаров С.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2010. Т. 53. Вып. 3. С. 122–124. Kozlov A.M., Blinichev V.N., Komarov S.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2010. V. 53. N 3. P. 122–124 (in Russian).
31. Козлов А.М., Блиничев В.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 6. С. 96–102. Kozlov A.M., Blinichev V.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2018. V. 61. N 6. P. 96–102 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20186106.5650.

32. Колобов М.Ю., Колобова В.В., Сахарова С.Е. // *Научное обозрение*. 2012. № 5. С. 305-308. **Kolobov M.Yu., Kolobova V.V., Sakharova S.E.** // *Nauch. Obozr.* 2012. N 5. P. 305-308 (in Russian).
33. Колобов М.Ю., Сахарова С.Г. // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2013. № 3. С. 20-21. **Kolobov M.Yu., Sakharova S.G.** // *Trenie Smazka Mash. Mekhan.* 2013. N 3. P. 20-21 (in Russian).
34. Колобов М.Ю., Сахаров С.Е., Колобова В.В., Бойцова В.В. // *Аграр. вест. Верхневолжья*. 2014. № 3 (8). С. 22-24. **Kolobov M.Yu., Sakharov S.E., Kolobova V.V., Boitsova V.V.** // *Agrar. Vest. Verkhvolzhya*. 2014. N 3 (8). P. 22-24 (in Russian).
35. Сахаров С.Е., Колобов М.Ю., Колобова В.В. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2015. № 2. С. 152-155. **Sakharov S.E., Kolobov M.Yu., Kolobova V.V.** // *Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie*. 2015. N 2. P. 152-155 (in Russian).
36. Колобов М.Ю., Сахаров С.Е. // *Аграр. вестн. Верхневолжья*. 2016. № 3 (15). С. 105-110. **Kolobov M.Yu., Sakharov S.E.** // *Agrar. Vest. Verkhnev.* 2016. N 3 (15). P. 105-110 (in Russian).
37. Колобов М.Ю., Сахарова С.Г., Сахаров С.Е. // *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2017. № 1. С. 9-12. **Kolobov M.Yu., Sakharova S.G., Sakharov S.E.** // *Remont, Vosstanovl., Modern.* 2017. N 1. P. 9-12 (in Russian).
38. Колобов М.Ю., Козловский А.Э., Сахаров С.Е. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2017. № 3. С. 80-85. **Kolobov M.Yu., Kozlovsky A.E., Sakharov S.E.** // *Modern science-intensive technologies. Regional application*. 2017. N 3. P. 80-85 (in Russian).
39. Колобов М.Ю., Колобова В.В. // *Аграр. вестн. Верхневолжья*. 2019. № 1 (26). С. 75-78. **Kolobov M.Yu., Kolobova V.V.** // *Agrar. Vest. Verkhnevolzhya*. 2019. N 1 (26). P. 75-78 (in Russian).
40. Колобов М.Ю., Чагин О.В., Блиничев В.Н. // *Рос. хим. ж.* 2019. Т. LXIII. № 3-4. С. 40-44. DOI: 10.6060/rcj.2019633.5. **Kolobov M.Yu., Chagin O.V., Blinichev V.N.** // *Ross. Khim. Zhurn.* 2019. V. LXIII. N 3-4. P. 40-44 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2019633.5.
41. Гущина Т.В., Гущина Е.А., Колобов М.Ю., Блиничев В.Н. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2020. № 3. С. 54-59. **Gushchina T.V., Gushchina E.A., Kolobov M.Yu., Blinichev V.N.** // *Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie*. 2020. N 3. P. 54-59 (in Russian).
42. Колобов М.Ю., Сахаров С.Е., Чагин О.В., Абалихин А.М., Колобова В.В. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2021. № 2. С. 108-117. DOI: 10.6060/snt.20216602.00015. **Kolobov M.Yu., Sakharov S.E., Chagin O.V., Abalikhin A.M., Kolobova V.V.** // *Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie*. 2021. N 2. P. 108-117 (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20216602.00015.
43. Колобов М.Ю. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2013. Т. 56. Вып. 11. С. 85-87. **Kolobov M.Yu.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2013. V. 56. N 11. P. 85-87 (in Russian).
44. Колобова В.В., Колобов М.Ю. // *Аграр. вестн. Верхневолжья*. 2015. № 1 (10). С. 46-49. **Kolobova V.V., Kolobov M.Yu.** // *Agrar. Vest. Verkhnevolzhya*. 2015. N 1 (10). P. 46-49 (in Russian).
45. Колобов М.Ю., Козловский А.Э., Колобова В.В. // *Аграр. вестн. Верхневолжья*. 2019. № 3 (28). С. 83-88. DOI 10.35523/2307-5872-2019-28-3-83-88. **Kolobov M.Yu., Kozlovsky A.E., Kolobova V.V.** // *Agrar. Vest. Verkhnevolzhya*. 2019. N 3 (28). P. 83-88 (in Russian). DOI 10.35523/2307-5872-2019-28-3-83-88
46. Зуева Г.А. Аналитическое решение задач тепло- и массопереноса для областей с подвижными границами методом дифференциальных рядов. Иваново: ИГХТУ. 2017. 92 с. **Zueva G.A.** Analytical solution of problems of heat and mass transfer for regions with moving boundaries by the method of differential series. Ivanovo: IGKhtU. 2017. 92 p. (in Russian).
47. Падохин В.А., Зуева Г.А., Кокурина Г.Н., Кочкина Н.Е., Федосов С.В. // *Теор. основы хим. технологии*. 2015. Т. 49. № 1. С. 54-64. **Padokhin V.A., Zueva G.A., Kokurina G.N., Kochkina N.E., Fedosov S.V.** // *Teoret. Osnovy Khim. Tekhnol.* 2015. V. 49. N 1. P. 54-64 (in Russian). DOI: 10.7868/S0040357115010108.
48. Зуева Г.А., Падохин В.А., Кокурина Г.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2013. Т. 56. Вып. 12. С. 114-118. **Zueva G.A., Padokhin V.A., Kokurina G.N.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2013. V. 56. N 12. P. 114-118.
49. Зуева Г.А., Кокурина Г.Н., Мельников А.А. // Матем. методы в технике и технологиях - ММТТ27: сб. тр. XXVII Междун. научн. конф. Саратов. 2014. Т. 9. С. 51-52. **Zueva G.A., Kokurina G.N., Melnikov A.A.** Mathematical methods in engineering and technology - ММТТ27: Sat. tr. XXVII Intl. scientific conf. Saratov. 2014. V. 9. P. 51-52.
50. Зуева Г.А. Системно-структурный анализ процесса переноса теплоты в твердом теле. Иваново: ИГХТУ. 2021. 59 с. **Zueva G.A.** System-structural analysis of the heat transfer process in a solid body. Ivanovo: IGKhtU. 2021. 59 p. (in Russian).
51. Рудобашта С.П., Зуева Г.А. // *Drying Technol.* 2020. 38 (1-2). P. 6-18. DOI: 10.1080/07373937.2019.1591436.
52. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зайцев В.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 12. С. 94-100. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6064. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaitsev V.A.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 12. P. 94-100 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6064.
53. Рудобашта С., Зуева Г.А. // *Drying Technol.* 2016. V. 34. N 5. P. 505-515. DOI: 10.1080/07373937.2015.1060997.
54. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 7. С. 72-77. DOI: 10.6060/tcct.2017607.5556. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2017. V. 60. N 7. P. 72-77 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.2017607.5556.
55. Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А. // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2019. V. 92. N 4. P. 899-906. DOI: 10.1007/s10891-019-02001-w.
56. Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А. // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2020. V. 93. N 6. P. 1394-1401. DOI: 10.1007/s10891-020-02244-y.
57. Рудобашта С., Зуева Г., Зев Н.А. // *Drying Technol.* 2014. V. 32. N 11. P. 1352-1359. DOI: 10.1080/07373937.2014.892508.
58. Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А. // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. V. 55. N 2. P. 261-269. DOI: 10.1134/S0040579521020093.
59. Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А. // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2022. V. 95. N 2. P. 357-365. DOI: 10.1007/s10891-022-02489-9.

60. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M. // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2016. 50 (5). P. 718–729. DOI: 10.1134/S0040579516050365.
61. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M. // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2018. V. 91. N 1. P. 227–236. DOI: 10.1007/s10891-018-1740-0.
62. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Зуев Н.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2014. Т. 57. Вып. 1. С. 103–107. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M., Zuev N.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2014. V. 57. N 1. P. 103–107 (in Russian).
63. Rudobashta S.P., Muravleva E.A., Zueva G.A., Dmitriev V.M. // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2018. V. 91. N 4. P. 845–853. DOI: 10.1007/s10891-018-1808-x.
64. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Кочетков В.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 5. С. 80–87. DOI: 10.6060/ivkkt.20216405.6337. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M., Kochetkov V.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 5. P. 80–87 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216405.6337.
65. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 68–71. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zuev N.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2015. V. 58. N 1. P. 68–71 (in Russian).
66. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kuteinikov V.I. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 9. N 6. P. 1–4.
67. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Столбова А.С. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 75–80. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6567. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Stolbova A.S. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 75–80 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6567.
68. Кусенкова А.А., Грузинцева Н.А., Лысова М.А., Гусев Б.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология. Промышл.* 2021. № 6. С. 303–307. Kusenкова A.A., Gruzintseva N.A., Lysova M.A., Gusev B.N. // *Izv. Vuzov. Tehnol. Text. Prom.* 2021. N 6. P. 303–307 (in Russian). DOI: 10.47367/0021-3497_2021_6_303.
69. Лысова М.А., Гойс Т.О., Грузинцева Н.А., Гусев Б.Н. // *Изв. вузов. Технология текстил. промышл.* 2022. № 4. С. 47–51. Lysova M.A., Gois T.O., Gruzintseva N.A., Gusev B.N. // *Izv. Vuzov. Tekhnol. Text. Prom.* 2022. N 4. P. 47–51 (in Russian).
70. Лысова М.А., Грузинцева Н.А., Гусев Б.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 98–103. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6654. Lysova M.A., Gruzintseva N.A., Gusev B.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 98–103 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6654.
71. Лабутин А.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 1999. Т. 42. Вып. 1. С. 117–122. Labutin A.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 1999. V. 42. N 1. P. 117–122 (in Russian).
72. Лабутин А.Н., Гриневич П.В., Хализов Р.Л., Сучков М.Е. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 1999. Т. 42. Вып. 3. С. 134–141. Labutin A.N., Grinevich P.V., Khalizov R.L., Suchkov M.E. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 1999. V. 42. N 3. P. 134–141 (in Russian).
73. Лабутин А.Н., Исаенков А.Е., Волкова Г.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2010. Т. 53. Вып. 12. С. 125–127. Labutin A.N., Isaenkov A.E., Volkova G.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2010. V. 53. N 12. P. 125–127 (in Russian).
74. Лабутин А.Н., Чешинский М.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2012. Т. 55. Вып. 11. С. 108–113. Labutin A.N., Cheshinsky M.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2012. V. 55. N 11. P. 108–113 (in Russian).
75. Алексеев Е.А., Головушкин Б.А., Лабутин А.Н., Ерофеева Е.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 65–68. Alekseev E.A., Golovushkin B.A., Labutin A.N., Erofeeva E.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2015. V. 58. N 1. P. 65–68 (in Russian).
76. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. // *Теорет. основы хим. технологии.* 2014. Т. 48. № 3. С. 318–322. Labutin A.N., Nevinitstyn V.Yu. // *Teoret. Osnovy Khim. Tekhnol.* 2014. V. 48. N 3. P. 318–322 (in Russian). DOI: 10.7868/S0040357114_030105.
77. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Загаринская Ю.Н., Волкова Г.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 7. С. 104–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20216407.6443. Nevinitstyn V.Yu., Labutin A.N., Zagarinskaya Yu.N., Volkova G.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 7. P. 104–110 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216407.6443.
78. Labutin A.N., Vaško M., Kuric I., Nevinitstyn V.Y., Sága M., Zagarinskaya Y.N., Volkova G.V. // *Processes*. 2021. V. 9. N 4. 644. DOI: 10.3390/pr9040644.
79. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В., Панасенкова А.В., Зайцев В.А. // *Вестн. ИГЭУ.* 2019. № 3. С. 41–48. Labutin A.N., Nevinitstyn V.Yu., Volkova G.V., Panasenkov A.V., Zaitsev V.A. // *Vestn. IGEU*. 2019. N 3. P. 41–48 (in Russian). DOI: 10.30987/article_5d8d113e130732.69448232.
80. Невиницын В.Ю., Загаринская Ю.Н., Волкова Г.В., Лабутин А.Н. // *Изв. СПбГТИ (ТУ).* 2019. № 50 (76). С. 115–120. Nevinitstyn V.Yu., Zagarinskaya Yu.N., Volkova G.V., Labutin A.N. // *Izv. SPbGTI (TU)*. 2019. N 50 (76). P. 115–120 (in Russian).
81. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Зайцев В.А., Бодров А.А. // *Изв. вузов. Сер.: Экономика, финансы и управление производством.* 2019. № 4 (42). С. 158–164. Nevinitstyn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V., Zaitsev V.A., Bodrov A.A. // *Izv. VUZov. Ser. Ekonomika, Finansy, Upravl. Proizvod.* 2019. N 4 (42). P. 158–164 (in Russian).
82. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В., Панасенкова А.В. // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении.* 2019. № 3 (5). С. 41–48. Labutin A.N., Nevinitstyn V.Yu., Volkova G.V., Panasenkov A.V. // *Avtomatiz. Model. Proekt. Upravl.* 2019. N 3 (5). P. 41–48 (in Russian). DOI: 10.30987/article_5d8d113e130732.69448232.
83. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Зайцев В.А., Волкова Г.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 12. С. 129–136. DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5914. Labutin A.N., Nevinitstyn V.Yu., Zaitsev V.A., Volkova G.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 61. N 12. P. 129–136 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5914.
84. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В. // *Информатика и системы управления.* 2018. № 3 (57). С. 115–123. Labutin A.N., Nevinitstyn V.Yu., Volkova G.V. // *Inform. Syst. Upravl.* 2018. N 3 (57). P. 115–123 (in Russian).
85. Лабутин А.Н., Алексеев Е.А. // *Современ. наукоемк. технологии. Регионал. прилож.* 2021. № 3 (67). С. 63–69.

- DOI: 10.6060/snt.20216703.0009. **Labutin A.N., Alekseev E.A.** // *Sovrem. Naukoemkie Tekhnol. Region. Prilozhenie*. 2021. N 3 (67). P. 63–69 (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20216703.0009.
86. **Лабутин А.Н., Загаринская Ю.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В., Зайцев В.А.** // *Вестн. ИГЭУ*. 2020. № 2. С. 57–64. **Labutin A.N., Zagarinskaya Yu.N., Nevinitsyn V.Yu., Volkova G.V., Zaitsev V.A.** // *Vestn. IGEU*. 2020. N 2. P. 57–64 (in Russian). DOI: 10.17588/2072-2672.2020.2.057-064.
87. **Лабутин А.Н., Загаринская Ю.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В.** // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2019. № 4 (6). С. 4–11. **Labutin A.N., Zagarinskaya Yu.N., Nevinitsyn V.Yu., Volkova G.V.** // *Avtom. Model. Proekt. Upravl.* 2019. N 4 (6). P. 4–11 (in Russian).
88. Автоматическое управление в химической промышленности. Под ред. Е.Г. Дудникова. М.: Химия. 1987. 368 с. *Automatic control in the chemical industry*. Ed. by E.G. Dudnikov. M.: Khimiya. 1987. 368 p. (in Russian).
89. **Красовский А.А.** В кн.: Синергетика и проблемы теории управления. М.: Физматлит. 2004. С. 13. **Krasovsky A.A.** In: *Synergetics and problems of control theory*. M.: Fizmatlit. 2004. P. 13 (in Russian).
90. **Кольцова Э.М., Гордеев Л.С.** Методы синергетики в химии и химической технологии. М.: Химия. 1999. 256 с. **Koltsova E.M., Gordeev L.S.** *Methods of synergetics in chemistry and chemical technology*. M.: Khimiya. 1999. 256 p. (in Russian).
91. **Колесников А.А.** Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат. 1994. 344 с. **Kolesnikov A.A.** *Synergetic control theory*. M.: Energoatomizdat. 1994. 344 p. (in Russian).
92. **Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.** Робастное модальное управление технологическими объектами. Иваново: ИГЭУ. 2006. 256 с. **Tyutikov V.V., Tararykin S.V.** *Robust modal control of technological objects*. Ivanovo: IGEU. 2006. 256 p. (in Russian).
93. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М.** // *Теорет. основы хим. технологии*. 2008. Т. 42. № 1. С. 29–39. **Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I., Ostrovsky G.M.** // *Teoret. Osnovy Khim. Tekhnol.* 2008. V. 42. N 1. P. 29–39 (in Russian).
94. **Гордеев Л.С., Лабутин А.Н., Гордеева Е.Л.** // *Теорет. основы хим. технологии*. 2014. Т. 48. № 5. С. 580–587. **Gordeev L.S., Labutin A.N., Gordeeva E.L.** // *Teoret. Osnovy Khim. Tekhnol.* 2014. V. 48. N 5. P. 580–587 (in Russian). DOI: 10.7868/S0040357114050042.

Поступила в редакцию 15.03.2023

Принята к опубликованию 20.03.2023

Received 15.03.2023

Accepted 20.03.2023