

УДК 658.26:66.013

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК И ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

¹Лаптев А.Г., ²Башаров М.М.¹ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
Казань, e-mail: tvt_kgeu@mail.ru;²ОАО «ТАНЕКО», Нижнекамск, e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Рассмотрены способы и примеры повышения энергоэффективности теплообменных установок на предприятиях нефтегазохимического комплекса. Представлен научный подход к решению данной проблемы. Описаны методы математического моделирования явлений переноса и определения эффективности промышленных аппаратов с учетом масштабного перехода. Для этого используется вариационная формулировка законов сохранения импульса, массы и энергии. Отмечены способы энергосбережения и методы повышения энергоэффективности промышленных установок. Особое внимание уделяется модернизации колонных аппаратов с использованием новых отечественных контактных устройств, что обеспечивает импортозамещение. Даны сравнительные характеристики контактных насадок. Отмечен ряд примеров внедрения насадок в промышленных теплообменных и сепарационных аппаратах с большим энергосберегающим эффектом. Кроме энергосбережения также решаются задачи повышения качества продукции и экологической безопасности производств.

Ключевые слова: импортозамещение, энергоэффективность, модернизация, теплообмен, нефтехимия, насадка, ректификация, сепарация

IMPROVING SYSTEMS ENERGY EFFICIENCY AND IMPORT SUBSTITUTION IN PETROCHEMICAL COMPLEX

¹Laptev A.G., ²Basharov M.M.¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: tvt_kgeu@mail.ru;²JSC «TANECO», Nizhnekamsk, e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Energy efficiency improving ways and examples in heat and mass transfer setting at enterprises petrochemical complex are considered. A scientific approach to solve this problem is presented. The methods of transport phenomena's mathematical modeling and determining of the industrial devices efficiency with the scale transition are described. Various formulation of the momentum, mass and energy conservation laws are used. Power save methods and ways of industrial plants energy efficiency improving are noted. Particular attention is paid to the modernization of columns using the new national contact devices, that provides import substitution. The comparative characteristics of nozzles are given. A number examples of nozzles introduction in industrial machines with a large energy-saving effect are noted. In addition to energy savings also problems of increasing product quality and environmental safety are solved.

Keywords: import substitution, energy efficiency, modernization, heat and mass transfer, petrochemicals, nozzle, distillation, separation

Европейский союз (ЕС) принял стратегический план («План – 20-20-20»), в соответствии с которым к 2020 г. необходимо снизить энергопотребление всех стран Союза на 20% по сравнению с 2008 г., уменьшить на 20% выбросы парниковых газов и заменить на 20% традиционные источники возобновляемыми. В России также принята программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» [15, 16, 20]. Предполагается снижение энергоёмкости ВВП РФ на 40%.

Основными потребителями природного топлива (нефти, включая газовый конденсат, природного горючего газа, угля) в России являются организации промышленного производства (34–37%), транспорта и связи (22–27%) и население (32–36%). По потреблению тепловой энергии

лидирующие позиции также занимают промышленные предприятия (43–47%) и население (38–40%).

Одними из основных производителей тепловых ресурсов являются тепло- и электрогенерирующие станции (ТЭЦ, ТЭС, ГРЭС), а потребителями тепловой и энергетической энергии – нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность.

Нефтегазохимический комплекс входит в число основных отраслей РФ и включает в себя несколько видов производственной деятельности: производство нефтепродуктов, химическое и нефтехимическое производство, производство резиновых и пластмассовых изделий и др. Предприятия нефтегазохимического комплекса размещены практически во всех субъектах Российской Федерации. Стратегической целью развития нефтегазохимического комплекса

является повышение его производительности и снижение энергозатрат на единицу выпускаемой продукции за счет технологической модернизации. Основные проблемы заключаются в следующем [8]:

- низкая глубина переработки нефти;
- большая зависимость от зарубежных поставщиков оборудования и длительные сроки поставок;
- значительное превышение стоимости проектов от исходной величины;
- повышенные энергозатраты по сравнению с зарубежными производствами.

Известно, что отечественные нефтеперерабатывающие и нефтехимические производства весьма энергоемки по сравнению с зарубежными, что свидетельствует о больших возможностях снижения энергозатрат. Затраты на энергетические ресурсы в нефтехимии составляют около 50% от затрат на сырьевые ресурсы.

В процессах переработки нефти и нефтехимии фактический расход энергоресурсов значительно превышает теоретически необходимый. Фактические затраты энергоресурсов примерно в 1,7–2,6 раза превышают теоретически необходимый минимум. Так как в промышленности РФ около 40–45% энергоресурсов расходуется полезно, а остальное количество либо трансформируется в различного вида потоки, энергию которых невозможно использовать, либо же теряется.

Большинство промышленных установок на предприятиях нефтегазохимического комплекса и энергетики проектировались еще в СССР, и поэтому энергетический и производственный потенциал России в настоящее время устарел и является энергозатратным. В результате энергоемкость ВВП России в 2,5 раза выше среднего мирового уровня и в 2,5–3,5 раза выше уровня развитых стран. В связи с этим повышение энергоэффективности и энергосбережение является актуальным и важным направлением будущего экономического роста России.

Энергоэффективность – эффективное (рациональное) использование энергетических ресурсов, т.е. использование меньшего количества энергии для обеспечения технологического процесса и выпуска продукции на производстве. При этом должно обеспечиваться достижение экономически оправданной эффективности использования топливно-энергетических ресурсов при соблюдении требований к качеству выпускаемой продукции и экологической безопасности производства. В отличие от энергосбережения энергоэффективность направлена на полезное расходование энергии на промышленных установках. Известно, что энергоэффективность и энерго-

сбережение входит в пять стратегических направлений приоритетного технологического развития РФ.

Объекты для повышения энергоэффективности широко представлены на предприятиях нефтегазохимического комплекса (теплоиспользующие и теплопередающие установки). В первую очередь такими промышленными объектами являются установки и аппараты с большими тепловыми нагрузками и различное вспомогательное оборудование. Это установки ректификации, выпарные установки, абсорберы, аппараты охлаждения (или нагрева) газов (паров) и жидкостей через разделяющую стенку или при непосредственном контакте фаз. Эти установки работают с различным вспомогательным оборудованием – отстойники, фильтры, циклоны, газосепараторы и т.д. Поэтому системный анализ и комплексное рассмотрение процессов в таких установках являются важной и актуальной задачей современной науки на предприятиях нефтехимии и ТЭК.

Под энергосбережением понимают реализацию организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на более эффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Эти меры могут иметь пассивный, активный и организационный характер. Пассивные меры, например использование новой теплоизоляции, как правило, дают относительно небольшую экономию энергоносителей по сравнению с активными. Пассивные меры более актуальны при передаче теплоты на большие расстояния, а также при больших перепадах температур. На предприятиях нефтегазопереработки к активным мерам можно отнести изменение технологии, оптимизацию режима установок, использование более эффективных катализаторов и контактных устройств. Совокупность таких мер (научно-технических решений) может дать снижение потребляемой энергии на производственный процесс в несколько раз. Так, например, замена ректификационных аппаратов в производстве этаноламинов на более эффективные и оптимизация технологического режима позволили снизить затраты на единицу выпускаемой продукции почти в четыре раза [1]. Аналогичный подход по модернизации установки выделения товарного фенола с повышением качества до высшего сорта дает также значительный энергосберегающий эффект (снижение расхода греющего пара на 40%) [2].

Научный подход к проблеме энерго- и ресурсосбережения приводит к рассмотрению задачи на различных иерархических

уровнях, которые классифицируются следующим образом [17]:

- 1) наномасштаб (молекулы);
- 2) микромасштаб (частицы, капли, пузыри);
- 3) мезомасштаб (основные процессы и аппараты);
- 4) макромасштаб (агрегат, установка, завод);
- 5) мегамасштаб (рынок, окружающая среда).

В данной статье рассматриваются задачи, связанные со вторым, третьим и четвертым уровнями.

Математическое моделирование в задачах повышения энергоэффективности

Для решения проблем импортозамещения и повышения эффективности процессов при проектировании или модернизации промышленных установок на предприятиях нефтегазохимического комплекса разработан метод сопряженного физического и математического моделирования тепломассообменных процессов в промышленных аппаратах [5, 6, 9, 10, 14].

Метод позволяет значительно сократить этапы экспериментальных исследований при модернизации или проектировании новых аппаратов и основан на построении математического описания элементарных явлений, где влияние масштаба устройства и других возмущений (подвижная поверхность раздела фаз, кривизна и шероховатость поверхности, процессы испарения и конденсации, закрученное движение фаз) учитывается параметрически на основе удовлетворения интегральному балансу импульса через межфазную поверхность, используя известные свойства консервативности законов трения в пристенной турбулентности.

На основе описания элементарных актов – построение замкнутых математических моделей тепломассопереноса в двухфазных средах газ-(пар)-жидкость, жидкость-жидкость на контактных устройствах колонных аппаратов различных конструкций и масштабов; алгоритмов вычисления полей скоростей, концентраций температур для определения эффективности тепломассообмена в двухфазных средах; а также выбор вариантов реконструкции колонных аппаратов для повышения их эффективности и производительности.

Основные свойства элементарного акта переноса – это инвариантность структуры математического описания к масштабу аппарата и к взаимодействию с другими явлениями. Влияние этих факторов не изменяет

структуру математического описания, а учитывается параметрически [5, 6, 9, 10, 14].

Для определения параметров пограничного слоя в одно- и двухфазных средах предложено использовать известные свойства консервативности законов трения к возмущающим факторам. Поэтому в качестве теоретической основы для определения средних значений коэффициентов массо- и теплоотдачи применяется математическое описание плоского пограничного слоя без наличия возмущений, а влияние различных возмущений (градиент давления, шероховатость поверхности, поперечный вдув и т.д.) учитывается в интегральном соотношении баланса импульса через межфазную поверхность, используя результаты физического моделирования. При физическом моделировании исследуется гидродинамика потока и измеряется перепад давления на контактном устройстве. Вводятся эквивалентные параметры градиентных (возмущенных) и безградиентных потоков, такие как среднее касательное напряжение и скорость обтекания. Среднее касательное напряжение находят, используя известное значение перепада давления на контактном устройстве, полученное при физическом моделировании. На основе соотношения баланса импульса в пограничном слое производится коррекция параметров модели и учитывается неоднородность полей, вызванная различными возмущениями.

Известно, что в промышленных аппаратах возникают гидродинамические неоднородности (масштабные эффекты), которые снижают эффективность проводимых процессов. Поэтому предложен переход от моделирования элементарных явлений к процессам переноса на промышленных контактных устройствах. В этом случае двухфазный поток условно разбивается на зоны, где в пределах погрешности эксперимента можно допустить равномерное распределение фаз. Определение параметров модели выполняется для каждой зоны с учетом реальной гидродинамической обстановки. Для этого используется вариационная формулировка законов сохранения [5, 6].

Способы энергосбережения и повышения эффективности процессов

Известно, что существуют четыре группы способов уменьшения энергетических затрат и повышения энергоэффективности:

- 1) увеличение поверхностей контакта фаз в аппаратах, времени протекания реакции, применение более активных катализаторов и т.п. Все эти способы позволяют приблизиться к равновесию при

выходе из аппарата, но часто являются очень дорогостоящими и не всегда дают возможность снизить энергозатраты;

2) изменение технологического режима, оптимизация существующих производств, что не связано с изменением технологической схемы;

3) поиск новых, более совершенных теплотехнологических схем, возможно, включающих подсистемы рекуперации вторичных энергоресурсов. Идеальным вариантом организации производства является энергообеспечение за счет экзотермических процессов;

4) применение совмещенных процессов, которые позволяют сократить не только энергетические, но и капитальные затраты.

Энергетическая эффективность производства определяется тем, насколько полностью используется подаваемая извне и производимая внутри энергия, т.е. насколько низки потери энергии.

Энергетические потери принято разделять на две группы с точки зрения их распределения:

- внешние, связанные с условиями взаимодействия системы с окружающей средой;
- внутренние, связанные с необратимостью любых реальных процессов, протекающих внутри системы.

Значения внешних и внутренних потерь вычисляются на основании первого и второго начала термодинамики соответственно.

К внешним потерям относят потери через тепловую изоляцию; с продуктами, энергия которых не используется внутри системы, например с дистиллятом и кубовым остатком ректификационной колонны, охлаждающей водой и т.д.

Основные подходы и методы энергоэффективности и энергосбережения, используемые авторами, заключаются в следующем [1, 2, 14]:

1. Замена устаревших контактных устройств в промышленных аппаратах на отечественные более эффективные, что обеспечит интенсификацию тепло- и массообменных процессов, повышение качества выпускаемой продукции, снижение энергозатрат на единицу продукции.

2. Выбор энергоэффективного технологического режима с точки зрения минимизации энергетических затрат при заданном качестве выпускаемой продукции и экологической безопасности.

3. Модернизация или замена вспомогательного оборудования на теплообменными установками для обеспечения высокой степени энергоэффективной очистки теплоносителей, технологических потоков, газовых и жидких выбросов.

4. Изменения в теплотехнических схемах с целью энергоэффективного распределения тепловых нагрузок.

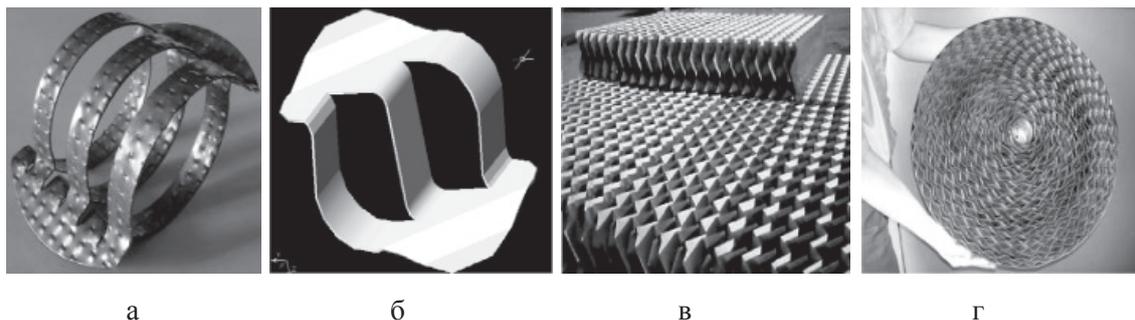
Импортозамещение заключается прежде всего в использовании отечественных контактных устройств (теплообменников насадок, тарелок, сепарирующих элементов и т.д.), не уступающих по теплогидравлической, массообменной и сепарационной эффективности зарубежным аналогам, а также технологичным в изготовлении и монтаже.

Критерии энергоэффективности. Для решения задач повышения энергоэффективности промышленных теплоиспользующих установок можно применять известные методы оптимизации с использованием критериев оптимальности. В качестве таких критериев могут быть различные КПД и энергетические комплексы и коэффициенты. К таким КПД относятся: тепловой и энергетический КПД, термический цикла Карно, относительный КПД теплоэнергетической установки, утилизаторов теплоты – эффективности теплообмена, предложенный Кейсом и Лондоном, коэффициент использования теплоносителя и др. [3].

Важным критерием оценки эффективности использования топливно-энергетических ресурсов служит энергоемкость потребляемой продукции, т.е. отношение потребляемых топливно-энергетических ресурсов (приведенных к условному топливу) к количеству выпускаемой продукции. Естественно, использование любых критериев энергоэффективности имеет смысл, если промышленная установка (производство) обеспечивает заданное качество выпускаемой продукции в заданном интервале нагрузок по исходному сырью.

В работах [1, 3, 14] для выбора энергоэффективных и энергосберегающих научно-технических решений по модернизации теплоиспользующих промышленных установок используются тепловой и энергетический к.п.д., энергетические коэффициенты Кирпичева и Ануфьева, коэффициенты эффективности массообмена и очистки газов и жидкостей. Конечной целью является снижение энергозатрат на единицу выпускаемой продукции в нефтегазохимическом комплексе и энергосберегающие схемы и аппараты очистки газов и жидкостей в энергетике.

Контактные насадки. Одним из приоритетных направлений по повышению эффективности процессов и энергосберегающей модернизации теплообменников аппаратов является разработка и внедрение новых регулярных и нерегулярных контактных насадок.



а

б

в

г

Насадки:

а – «Инжехим-2000»; б – «Инжехим-2002»; в – регулярная блочная;
г – регулярная рулонная гофрированная насадка «Инжехим» [7, 14]

Сравнительные характеристики промышленных насадок размером 50×50 мм [14]

Тип насадки	$\varepsilon_{св}$, м ³ /м ³	a_v , м ² /м ³	Потеря напора, % отн	Пропускная спо- собность, % отн	Эффективность, % отн
Кольца Рашига	0,95	110	100	100	100
Кольца Палля	0,96	100	63	120	125
Хай – Пэк	–	–	65	120	150
Кольца Бялецкого	–	–	85	100	125
Седла Инталокс	–	–	32	144	132
Насадка Лева	0,97–0,98	118	47	–	158
Насадка ГИАП	0,96	101	47	133	137
Инжехим-2000	0,96	103	16–22	180–210	153

Наиболее широкое применение получили следующие теплообменные нерегулярные и регулярные контактные устройства: насадки «Инжехим-2000» [7, 14] (рисунок), керамические и стальные кольца Рашига, стальные кольца Палля, кольца ZulzerC-Ring № 2.5 [7, 14, 18], регулярная насадка Mellapak фирмы «Zulzer Chemtech» 125Y [18], регулярная рулонная насадка «Инжехим»; спиральная насадка с косым гофром, насадка «зиг-заг» и плоскопараллельная насадка.

Отечественная нерегулярная насадка «Инжехим-2000» и ее аналоги являются современной альтернативой кольцам Палля, Рашига и другим зарубежным насадкам. При равной высоте слоя они обеспечивают большую производительность, меньшее удельное гидравлическое сопротивление и более высокое качество разделения смесей.

У регулярной рулонной гофрированной насадки «Инжехим» (рисунок) гофры смежных листов расположены перекрестно по отношению друг к другу и образуют каналы для потока паровой фазы с интенсивной турбулентностью. Нерегулярные и регулярные насадки выполняются с элементами шероховатости, что повышает коэффициент массоотдачи в жидкой фазе. Насадки

«Инжехим» технологичны в изготовлении и монтаже в колонну. Характеристики насадок даны в таблице.

Основные результаты и выводы

Пример модернизации массообменных колонн с импортозамещением можно привести по установке газоразделения в производстве этилена на щелочной очистке пирогаза от CO₂ водным раствором щелочи. Замена контактных устройств – колец Рашига на новую насадку «Инжехим-2000» (рисунок) позволила снизить гидравлическое сопротивление колонн в 3–4 раза и значительно повысить эффективность процесса хемосорбции. Уменьшились энергозатраты на подачу пирогаза, понизился расход щелочи и сократились потери товарного этилена из-за превышения CO₂. Энергетический коэффициент повысился в 4 раза. Кроме этого, решена задача повышения эффективности установки охлаждения пирогаза водой [14]. Также данная насадка нашла успешное применение в колоннах для разделения этаноламина и этиленгликолей. На установке разделения этаноламинов снижены энергозатраты почти в 2 раза за счет повышения эффективности ректификации и оптимизации флегмовых чисел в колоннах [1].

Решена задача проектирования новой ректификационной колонны получения фенола с использованием современных отечественных контактных устройств на ОАО «Казаньоргсинтез». В качестве контактных устройств в колонне используются регулярная и нерегулярная насадки «Инжехим». Насадочный вариант новой массообменной колонны выделения фенола обеспечил повышенное качество выпускаемой продукции и снизил расход греющего пара в кипятильнике на 30% за счет снижения расхода флегмы [2]. Экономический эффект за счет энергосбережения составляет более 500 тысяч евро в год, а за счет повышения качества фенола – в несколько раз больше.

Модификация насадки «Инжехим-2000» внедрена в термическом деаэраторе на Казанской ТЭЦ-3. В результате эффективность удаления растворенного кислорода из воды повысилась в 2 раза по сравнению с работой струйного деаэратора до модернизации [11]. Энергетический коэффициент повысился в 2,5 раза.

С использованием регулярных и нерегулярных насадок «Инжехим» разработана конструкция газосепаратора аэрозолей. Несколько десятков сепараторов внедрено на установках газоразделения в производстве этилена и на установках очистки природного газа (Газпром, Новатэк и др.). Эффективность сепарации составляет не менее 98–99% [4, 12, 13, 19] и обеспечивается стабильность работы компрессорных установок и энергосбережение.

Таким образом, приведенные примеры показывают, что энергосберегающие модернизации и разработку новых энергоэффективных промышленных установок можно выполнять без привлечения зарубежных фирм.

Статья выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности. Заявка № 13.405.2014/К.

Список литературы

1. Башаров М.М., Лаптева Е.А. Модернизация промышленных установок разделения смесей в нефтегазохимическом комплексе / под ред. А.Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013. – 293 с.
2. Башаров М.М., Лаптев А.Г. Энергосбережение на ректификационных установках в производстве фенола и ацетона // Химическая промышленность сегодня. – 2014. – № 4. – С. 48–52.
3. Башаров М.М., Лаптев А.Г. Комплексная оценка теплообменных и энергетических характеристик контактных устройств // Надежность и безопасность энергетики. – 2014. – № 4 (27). – С. 50–54.
4. Башаров М.М., Тараскин М.М. Очистка газов от дисперсной фазы в нефтегазохимическом комплексе и энергоресурсосбережение / под ред. А.Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2014. – 206 с.

5. Дьяконов С.Г., Елизаров В.В., Елизаров В.И. Теоретические основы проектирования промышленных аппаратов химической технологии на базе сопряженного физического и математического моделирования. – Казань: Изд-во Казанск. гос. технол. ун-та, 2009. – 452 с.

6. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Теоретические основы и моделирование процессов разделения веществ. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1993. – 438 с.

7. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов / под ред. Лаптева А.Г. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.

8. Капустин В.М. Модернизация нефтепереработки и нефтехимии в России // Химагрегаты. – 2013. – № 4 (декабрь). – С. 12–16.

9. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет теплообменных процессов. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. – 500 с.

10. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования теплообменных процессов: учебно-справочное пособие. – Казань: Теплотехник, 2011. – 285 с.

11. Лаптев А.Г., Силов И.Ю., Долгов А.Н., Фарахов М.М. Модернизация термических деаэраторов на ТЭЦ // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 2 (82). – С. 12–14.

12. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Башаров М.М. Повышение эффективности установок газоразделения в производстве этилена // Химическое нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 8. – С. 27–30.

13. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Энерго- и ресурсосберегающие модернизации промышленных установок на предприятиях нефтегазохимического комплекса // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2011. – № 2(9). – С. 150–158.

14. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация теплообменных установок в нефтехимии. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 574 с.

15. Министерство энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс] URL: <http://www.minenergo.gov.ru>.

16. Проект: энергоэффективная Россия. [Электронный ресурс] URL: http://www.energy2020.ru/energy_russia/about.

17. Саркисов П.Д. Проблемы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии // Химическая промышленность. – 2008. – № 11. – С. 14–17.

18. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранова Д.А. Насадки массообменных колонн. – М.: «Галилея-принт», 2009. – 358 с.

19. Фарахов М.И., Лаптев А.Г. Энергоэффективное оборудование разделения и очистки веществ в химической технологии // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 9. – С. 152–158.

20. Энергоэффективность и конкурентность экономики России. [Электронный ресурс] URL: http://www.ru.abaut/what_we_do/drecnenergy/energoeffect/economy.

References

1. Basharov M.M., Lapteva E.A. Modernizatsiya promyshlennykh ustanovok razdeleniya smesei v neftegazokhimicheskom komplekse. [Modernization of industrial mixtures separation apparatus of petrochemical complex]. Kazan: Fatherland, 2013. 293 p.
2. Basharov M.M., Laptev A.G. Khimicheskaya promyshlennost segonya, 2014, no.4, pp. 48–52.
3. Basharov M.M., Laptev A.G. Nadezhnost i bezopasnost energetiki, 2014, no. 4 (27), pp. 50–54.

4. Basharov M.M., Taraskin M.M. Oчистka gasov ot dispersnoy fazy v neftegazokhimicheskom komplekse I energoresursosberezhenie. [Gases purification from the dispersed phase in the petrochemical complex and energy and resource saving]. Kazan: Fatherland, 2014. 206 p.
5. Dyakonov S.G., Elizarov V.V., Elizarov V.I. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya promyshlennykh apparatov khimicheskoy tekhnologii na baze sopryazhennogo fizicheskogo I matematicheskogo modelirovaniya. [Theoretical foundations of industrial machines designing in chemical technology on the basis of the dual physical and mathematical modeling]. Kazan: state. tehnol. univ., 2009. 452 p.
6. Dyakonov S.G., Elizarov V.V., Laptev A.G. Teoreticheskie osnovy i modelirovanie protsessov razdeleniya veschestv [Theoretical foundations and simulation of substances separation]. Kazan: Publishing House of Kazan. Univ., 1993. 438 p.
7. Kagan A.M., Laptev A.G., Pushnov A.S., Farakhov M.I. Kontaktnye nasadki promyshlennykh teplomassoobmennykh apparatov [Contact nozzle of industrial heat and mass transfer devices]. Kazan: Fatherland, 2013. 454 p.
8. Kapustin V.M. Khimagregaty, 2013, no. 4, pp. 12–16.
9. Laptev A.G. Modeli pogranichnogo sloya i raschet teplomassoobmennykh protsessov. [Boundary-layer model and calculation of heat and mass transfer processes]. Kazan: Publishing House of Kazan. univ., 2007. 500 p.
10. Laptev A.G., Nikolaev N.A. Basharov M.M. Metody intensivatsii I modelirovaniya teplomassoobmennykh protsessov [Intensification methods and modeling of heat and mass transfer processes]. Kazan: Heating engineer, 2011. 285 p.
11. Laptev A.G., Silov I.Yu., Dolgov A.N., Farakhov M.M. Energosberezhenie i vodopodgotovka, 2013, no. 2 (82), pp. 12–14.
12. Laptev AG, Farakhov M.I., Basharov M.M. Khimicheskoe neftegazovoe mashinostroenie, 2014, no. 8, pp. 27–30.
13. Laptev A.G., Farakhov M.I., Mineev N.G. Vestnik Kazan. Tekhnolog. Univ., 2011, no.2 (9), pp. 150–158.
14. Laptev A.G., Farakhov M.I., Mineev N.G. Osnovy rascheta I modernizatsiya teplomassoobnennykh ustanovok v neftekhimii [Calculation and modernization foundations of heat and mass transfer installations in the petrochemical industry]. Kazan: Kazan. State power engin. univ., 2010. 574 p.
15. The Ministry of Energy of the Russian Federation. [Electronic resource] URL: <http://www.minenergo.gov.ru>.
16. Project: Energy Efficient Russia. [Electronic resource] URL: http://www.energy2020.ru/energy_russia/about.
17. Sarkisov P.D. Khimicheskaya promyshlennost, 2008, no. 11, pp. 14–17.
18. Sokol B.A., Chernyshev A.K., Baranova D.A. Nasadki massoobmennykh kolonn [Nozzles of mass transfer columns]. M.: Galileo-print, 2009. 358 p.
19. Farakhov M.I., Laptev A.G. Vestnik Kazan. Tekhnolog. Univ., 2011, no. 9, pp. 152–158.
20. Energy efficiency and competitiveness of the Russian economy. [Electronic resource] URL: http://www.abaut.ru/what_we_do/drecnenergy/energoeffect/economy.

Рецензенты:

Зиннатуллин Н.Х., д.т.н., профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань;

Гурьянов А.И., д.т.н., профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.

Работа поступила в редакцию 24.02.2015.