

## ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ МОДЕРНИЗАЦИИ АППАРАТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ

А.Г. ЛАПТЕВ, М.И. ФАРАХОВ, доктора техн. наук, М.М. БАШАРОВ, соиск.

Рассмотрены проблемы и задачи по модернизации колонного оборудования на предприятиях нефтегазохимического комплекса. Отмечена особая роль отечественных разработок в решении задач повышения эффективности процессов и аппаратов. Приведены данные по массообменной и энергетической эффективности различных контактных устройств в газо(паро)- жидкостных средах. Представлены сравнительные характеристики массообменных насадок.

*Ключевые слова:* насадочные и барботажные аппараты, гидродинамические и массообменные характеристики, модернизация колонных аппаратов.

## BASES OF ENERGY-SAVING MODERNIZATION OF SUBSTANCES SEPARATION DEVICES

A.G. LAPTEV, Doctor of Engineering, M.I. FARAKHOV, Doctor of Engineering, M.M. BASHAROV, Applicant

The authors consider problems and challenges of column equipment modernization at the enterprises of the petrochemical complex. The article emphasizes the particular role of domestic developments in solving the problems of increasing processes and devices efficiency. The authors present the data on the mass transfer and energy efficiency of different contact devices in the gas (vapor)- liquid areas. The comparative characteristics of mass-transfer attachments are given.

*Key words:* nozzle and bubble apparatuses, hydrodynamical and mass-transfer characteristics, column equipment modernization.

**Введение.** На предприятиях нефтегазохимического и топливно-энергетического комплекса большинство действующего оборудования проектировалось и вводилось в эксплуатацию в 60–80-е гг. прошлого столетия. За прошедшие 10–15 лет изменились рыночные отношения, сырьевая база и требования к качеству продукции и энергоресурсосбережению.

Поставленная Президентом и Правительством РФ задача по модернизации экономики и промышленности предполагает повышение качества выпускаемой продукции, снижение энергозатрат и экологическую безопасность производств.

На предприятиях нефтегазохимического комплекса эти задачи стали все более интенсивно решаться с привлечением зарубежных и отечественных научных, проектных и производственных фирм. Особенно ценными и перспективными являются случаи, когда одна фирма осуществляет эффективные решения всех перечисленных задач.

Следует согласиться, что большинство научных организаций (вузы, НИИ, КБ и т.д.) не в состоянии выполнять крупные проектные работы и тем более заниматься изготовлением собственных научно-технических разработок (нестандартных изделий). Аналогично, проектные организации далеко не всегда способны разработать наукоемкий проект, связанный с математическим моделированием, численными и экспериментальными исследованиями выбранных новых технических решений. Тем более промышленные предприятия, специализирующиеся на выпуске оборудования для нефтехимии,

изготавливают стандартные изделия на протяжении многих лет. Таким образом, существующий разрыв между фундаментальными и прикладными исследованиями, проектировщиками и изготовителями оборудования затрудняет быстрое внедрение высокоэффективных технологий и аппаратов. Ситуация осложняется еще и тем, что некоторые зарубежные поставщики оборудования первоначально искусственно занижают цены, участвуя в тендерах, чтобы максимально убрать с рынка отечественную науку и производителей. Кроме этого, качество такого оборудования, особенно поставляемого из развивающихся стран, часто ниже отечественного.

Для поддержки отечественных научно-производственных и внедренческих фирм нужна законодательная база, обеспечивающая приоритет в решении наукоемких инновационных проектов с внедрением собственных разработок в промышленность.

**Модернизация колонных аппаратов.** Модернизация тепло- и массообменных аппаратов с использованием высокоэффективных контактных устройств является все более актуальным направлением в различных отраслях промышленности. В колонных аппаратах с газо(паро)- жидкостными средами используются контактные устройства как зарубежных, так и отечественных фирм [1, 2].

Решением задач модернизации оборудования в нефтегазохимическом комплексе активно занимается инженерно-внедренческий центр «Инжехим» (инженерная химия), который образован и работает с 1991 г. В его состав входят профессора, доценты, аспиранты

и научно-технические работники ряда ведущих вузов г. Казани. Имеется собственное производство по изготовлению инновационных научно-технических разработок (контактных устройств теплообменных аппаратов, сепарирующих элементов аппаратов очистки газов и жидкостей и другого оборудования).

Одним из приоритетных направлений деятельности ИВЦ «Инжехим» является разработка и внедрение высокоэффективных регулярных и нерегулярных насадок для колонных аппаратов, а также барботажных тарелок.

При выборе типа насадки и расчете режимных и конструктивных характеристик насадочных и барботажных аппаратов важное значение имеет достоверное определение эффективности массопередачи и затрат энергии на проведение процесса.

Ниже рассмотрены сравнительные массообменные характеристики различных насадочных контактных устройств. Приведены данные по энергетическому комплексу и сделаны выводы для нерегулярных и регулярных массообменных насадок.

Расчет коэффициентов массоотдачи выполнялся по уравнениям математических моделей для соответствующих конструкций регулярных и нерегулярных насадок [2–4]. Для расчета гидравлического сопротивления использовались как эмпирические выражения, так и экспериментальные данные [1, 2].

Рассмотрены следующие массообменные нерегулярные и регулярные контактные устройства: насадка «Инжехим-2000» [2] (рис. 2), керамические кольца Рашига 50×50, стальные кольца Палля 50×50, кольца Zulzer C-Ring No.2.5 [1], стальные кольца Рашига 50×50, регулярная насадка Mellapak фирмы «Zulzer Chemtech» 125Y [1], регулярная рулонная насадка «Инжехим» [2]; спиральная насадка с косым гофром, насадка «зиг-заг» и плоскопараллельная насадка [5].

На рис. 1 показаны зависимости высоты единиц переноса  $h_{ог}$  от скорости газа в колонне для различных регулярных и нерегулярных насадок. Анализ полученных результатов показывает, что наибольшую эффективность (т.е. меньшее значение  $h_{ог}$ ) обеспечивают нерегулярные насадки «Инжехим-2000». Регулярная гофрированная насадка «Инжехим» [2] с элементами шероховатости поверхности не уступает аналогичным контактным устройствам и имеет меньшее гидравлическое сопротивление.

Нерегулярная насадка «Инжехим-2000» является современной альтернативой кольцам Палля, Рашига и другим аналогичным насадкам. При равной высоте слоя она обеспечивает большую производительность, меньшее удельное гидравлическое сопротивление и более высокое качество разделения смесей.

У регулярной рулонной гофрированной насадки «Инжехим» (рис. 2) гофры смежных листов расположены перекрестно по отношению друг к другу и образуют каналы для потока паровой фазы с интенсивной турбулентностью. Кроме того, насадка выполняется с элементами шероховатости, что повышает коэффициент массоотдачи в жидкой фазе. Насадка характеризуется высокой разделяющей способностью при низком гидравлическом сопротивлении. Насадки «Инжехим» технологичны в изготовлении и монтаже в колонну.

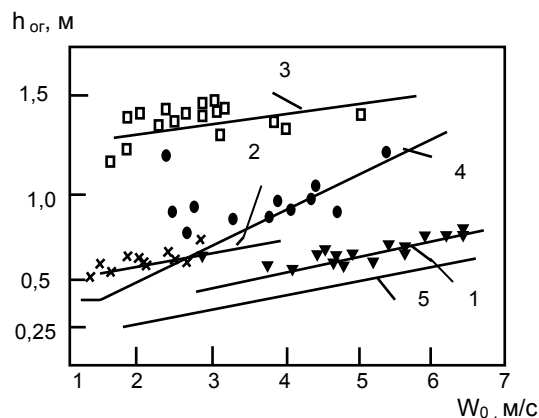


Рис. 1. Эффективность массообменных насадок при ректификации смеси метанол-вода [5] (модельная установка с колонной диаметром 400 мм; концентрация метанола 30–45 % (мол.);  $P = 101,3$  кПа): 1 – спиральная насадка с прямым гофром,  $d_s = 12$  мм; 2 – насадка «зиг-заг»,  $d_s = 30$  мм; 3 – плоскопараллельная насадка,  $d_s = 30$  мм; 4 – регулярная рулонная гофрированная насадка «Инжехим»,  $d_s = 15$  мм; 5 – насадка «Инжехим-2000»,  $d_s = 25$  мм

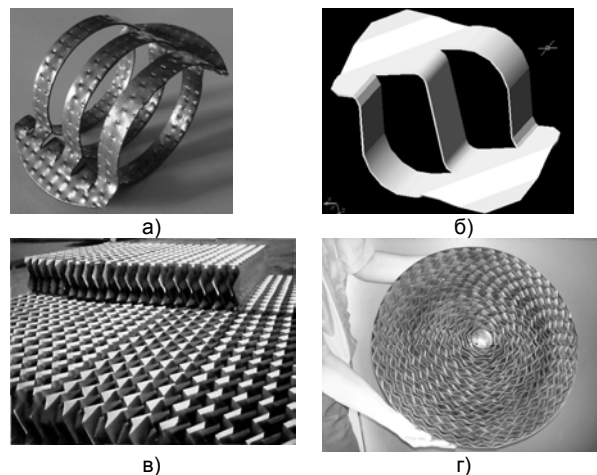


Рис. 2. Насадки: а – «Инжехим-2000»; б – «Инжехим-2002»; в – регулярная блочная и г – регулярная рулонная гофрированная насадки «Инжехим»

**Факторы интенсивности и энергозатрат.** Для совместной оценки гидродинамических и массообменных характеристик насадок в колонных аппаратах иногда используется энергетический комплекс

$$E = \frac{\Delta p_{оп} \cdot h_{ог}}{H}, \quad (1)$$

где  $\Delta p_{op}$  – перепад давления в колонне, Па;  $H$  – высота слоя насадки, м.

Комплекс  $E$  характеризует энергозатраты и массообменную эффективность контактных устройств.

Чем меньше гидравлическое сопротивление и больше коэффициент массопередачи (т.е. ниже значение  $h_{ог}$ ), тем меньше комплекс  $E$  и, следовательно, эффективнее насадка.

Для оценки интенсивности массообменных аппаратов используется фактор

$$i = \frac{M}{V} = \frac{K_c F \overline{\Delta C}}{V}, \quad (2)$$

где  $M$  – масса компонента, переходящего из одной фазы в другую, кг/с;  $V$  – рабочий объем аппарата, м<sup>3</sup>;  $K_c$  – коэффициент массопередачи, м/с;  $\overline{\Delta C}$  – средняя движущая сила массопередачи.

Аналогично для теплообменных процессов:

$$i = \frac{Q}{V} = \frac{K_T F \overline{\Delta T}}{V}, \quad (3)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $K_T$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\overline{\Delta T}$  – средний температурный напор.

Выбор конструктивных и режимных характеристик нового или модернизируемого аппарата необходимо выполнять как с использованием энергетического комплекса (1) (по минимальному значению), так и по фактору интенсивности (2) (по максимальному значению). Естественно, массообменный аппарат в любом случае должен удовлетворять требованиям технического задания по качеству разделения смеси, интервалу устойчивой работы, ограничениям по перепаду давления и т.д.

Установлено, что для нерегулярных насадок комплекс  $E$  (1), фактор  $i$  (2) принимают экстремальные значения с контактными устройствами «Инжехим-2000» и с их аналогами [2].

Для регулярных насадок экстремальные значения  $E$  и  $i$  обеспечивает регулярная рулонная насадка «Инжехим» с шероховатой поверхностью [2].

Для наиболее энергоемких процессов (например, ректификация) может использо-

ваться термодинамический анализ теплотехнологической схемы с вычислением теплового и эксергетического коэффициентов полезного действия (использования теплоты).

Сравнительные характеристики насадок приведены в таблице, где  $\varepsilon_{св}$  – удельный свободный объем;  $a_v$  – удельная поверхность.

**Внедрение в промышленность.** Замена устаревших контактных устройств на действующих предприятиях на новые высокоэффективные может быть выполнена во время плановых капитальных ремонтов оборудования в течение 10–15 дней. При этом, как правило, сохраняется существующая технологическая схема установки с основным и вспомогательным оборудованием.

За последние несколько лет насадки «Инжехим» внедрены в нескольких десятках массообменных аппаратов и газосепараторов:

- ректификационная колонна выделения фенола (2007 г.);
- две ректификационные колонны выделения гексена (2008 г.);
- пять ректификационных и две абсорбционные колонны получения формальдегида и изопрена-мономера (2006–2009 г.);
- две абсорбционные колонны в производстве бутилкаучука (2008 г.);
- две колонны водной отмывки и охлаждения пирогаза (2008 г.);
- колонны получения товарного диоксида углерода (2007–2008 г.);
- четыре ректификационные колонны разделения этаноламинов (2006 г.);
- газосепараторы и отстойники в производстве этилена (более 15 аппаратов) (2007–2008 г.);
- газосепараторы и отстойники при очистке природного газа (2008–2010 г.).

Результатами выполненных модернизаций является повышение качества продукции, увеличение производительности и снижение удельных энергозатрат [2].

Так, например, в производстве фенола снижены энергозатраты на ректификацию (по греющему пару) на 40 %, а в производстве этаноламинов – более чем в два раза. При этом повышено качество продукции до мирового уровня [2].

**Сравнительные характеристики промышленных насадок размера 50×50 мм**

Тип насадки	$\varepsilon_{св}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$a_v$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	Потеря напора, % отн	Пропускная способность, % отн	Эффективность, % отн
Кольца Рашига	0,95	110	100	100	100
Кольца Пала	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

Кроме уже отмеченных преимуществ отечественные научно-технические разработки имеют еще ряд других преимуществ: меньшая стоимость; более короткие сроки изготовления и поставки; участие коллектива авторов во внедрении и опытно-промышленной эксплуатации.

#### Список литературы

1. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А. Насадки массообменных колонн. – М.: Галилея-принт, 2009.

Лаптев Анатолий Григорьевич,  
Казанский государственный энергетический университет,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии воды и топлива на ТЭС и АЭС,  
адрес: г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, КГЭУ, каф. ТВТ,  
тел./факс (843) 519-42-54,  
e-mail: juliet-zls@yandex.ru

Фарахов Мансур Инсафович,  
Инженерно-внедренческий центр «Инжехим»,  
доктор технических наук, профессор, директор,  
тел./факс (843) 519-42-54,  
e-mail: juliet-zls@yandex.ru

Башаров Марат Миннихметович,  
ОАО «ТАНЕКО»,  
главный механик,  
тел./факс (843) 519-42-54,  
e-mail: juliet-zls@yandex.ru

2. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии. – Казань: Изд-во Казанск. гос. энерг. ун-та, 2010.

3. Холпанов Л.П., Шкадов В.Я. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела. – М.: Наука, 1990.

4. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. – Казань: Изд-во Казанск. гос. энерг. ун-та, 2007.

5. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура / под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1988.