

# Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах с насадкой

А.С. Пушнов, А.С. Севрюков, М.Г. Беренгартен

(Институт инженерной экологии и химического машиностроения МГМУ),

И.О. Микуленок (НТУ Украины «Киевский политехнический институт»)

Колонные аппараты с насыпной и регулярной насадкой широко используются в химической и нефтеперерабатывающей промышленности, криогенной технике, теплоэнергетике, атомной технике, пищевой и других отраслях промышленности. Совершенствование колонных аппаратов связано в первую очередь с совершенствованием существующих и разработкой новых эффективных насадок для проведения тепломассообменных процессов.

В этой связи актуален анализ методов интенсификации процессов тепломассообмена, а также классификация конструкций существующих промышленных, и перспективных насадок.

Подходы к классификации насадок предложены в работах [1–4]. При этом рассматриваются следующие основные способы классификации насадок:

- по используемому материалу;
- по геометрической форме эле-

ментов насадки;

- по геометрическим характеристикам насадок;
- по технологическому процессу;
- по форме отверстий в стенках насадок.

В настоящей статье предлагается несколько иной подход к классификации насадок, предназначенных для осуществления процесса абсорбции в колонных аппаратах. Предлагаемый подход базируется на рассмотрении технологических



Рис. 1. Классификация насыпных насадок для колонных аппаратов по материалам

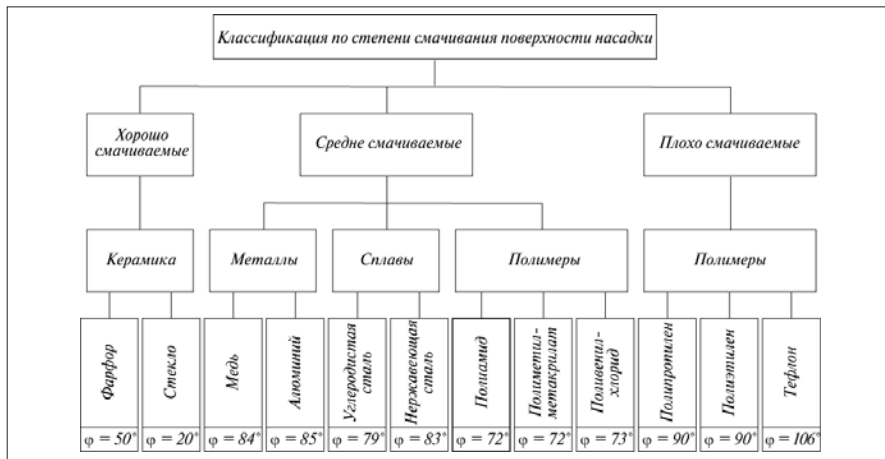


Рис. 2. Классификация материалов насадки по степени смачивания поверхности водой при температуре 20°C



Рис. 3. Коррозионная стойкость материалов насадки в различных средах: а – серная и соляная 10%-ные кислоты; б – азотная 10%-ная кислота и моноэтаноламин; в – вода; (А – отсутствие изменений, Б – незначительные изменения, В – ограниченный срок службы, Г – применять не рекомендуется; цифра при букве обозначает температуру эксплуатации)

и конструктивных способов интенсификации процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах с наиболее распространенной в промышленности категорией насыпных насадок. Основная цель предлагаемой классификации (более детальной по сравнению с известными [1-4]) – обеспечить выбор оптимального типа насадки для загрузки в конкретный технологический аппарат, а также определить перспективные направления совершенствования данного типа насадки при разработке новых конструкций.

Классификация насыпных насадок по используемым для их изготовления материалам представлена на рис. 1.

Для эффективного осуществления процессов тепло- и массообмена важное значение имеет смачивание активной поверхности

элементов насадки [5, 6]. Классификация материалов насадки по степени смачивания поверхности насадки водой при температуре  $t = 20^{\circ}\text{C}$  (по данным работы [7]) представлена на рис. 2.

Так как поверхностное натяжение целиком определяется природой разделяемой смеси, при подборе материала насадки следует стремиться к тому, чтобы зависящий от природы материала краевого угол смачивания  $\varphi$  был как можно меньше. Из данных работы [7] следует, что всего лишь замена материала насадки при сохранении ее формы позволяет увеличить эффективность процессов тепло- и массообмена на 10–12%. Коррозионная стойкость материалов насадки в различных средах представлена на рис. 3 (а, б, в) [2]. Классификация насыпных насадок по их

внешней геометрической форме показана на рис. 4, а их классификация по структуре поверхности элементов насадки – на рис. 5.

К основным геометрическим характеристикам насыпных насадок относятся удельная поверхность насадки  $a$  ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ); порозность (доля свободного объема) слоя насадки  $\varepsilon$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ); эквивалентный диаметр канала (гидравлический радиус)  $d_e = 4\varepsilon/a$  (м).

Сведения о геометрических характеристиках насадок содержатся в справочниках и каталогах фирм-производителей [1].

Классификация насыпных насадок для колонных аппаратов по геометрическим параметрам элементов насадки представлена на рис. 6.

На рис. 7 представлена классификация насыпных насадок по форме отверстий на поверхности эле-

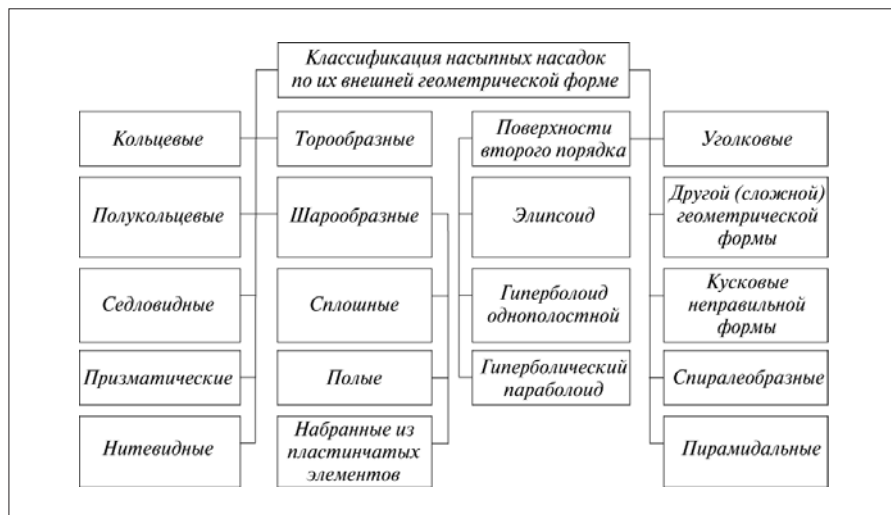


Рис. 4. Классификация насыпных насадок для колонных аппаратов по внешней геометрической форме элементов насадки



Рис. 5. Классификация насыпных насадок для колонных аппаратов по структуре поверхности элементов насадки

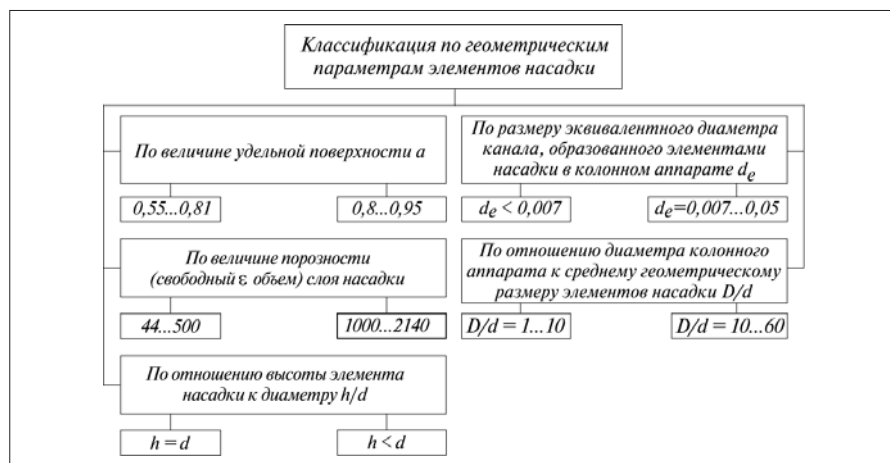


Рис. 6. Классификация насыпных насадок для колонных аппаратов по геометрическим параметрам элементов насыпной насадки

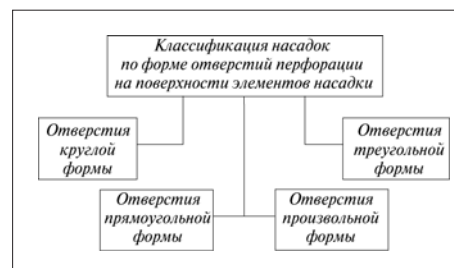


Рис. 7. Классификация насыпных насадок для колонных аппаратов по форме отверстий на поверхности элементов насадки

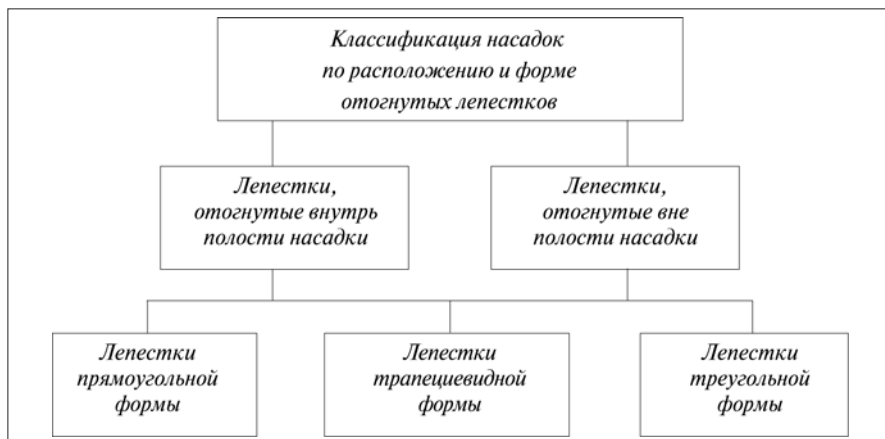


Рис. 8. Классификация насыпных кольцевых насадок для колонных аппаратов по расположению и форме отогнутых лепестков



Рис. 9. Конструктивные методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах с насыпной насадкой

ментов насадки, а на рис. 8 – классификация насыпных кольцевых насадок для колонных аппаратов по расположению и форме отогнутых лепестков.

Возможные конструктивные методы и способы интенсификации процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах применительно к процессам абсорбции с использованием контактных устройств в виде насыпных насадок представлены на рис. 9, 10. Способы интенсификации технологических процессов в известной степени определяются гидродинамической природой взаимодействующих на поверхности насадки потоков жидкости и газа.

Рассмотрим гидродинамическую структуру взаимодействия потоков жидкости и газа на поверхности единичного элемента насыпной насадки. Можно согласиться с мнением авторов работы [8] о том, что физический механизм тепломассобменных процессов в ряде случаев еще недостаточно изучен. Кроме того, интенсификация процессов обычно достигается за счет действия не одного, а нескольких факторов, что затрудняет анализ и классификацию методов интенсификации процессов тепло- и массообмена в слое насадки. В частности, по этой причине в работе [8], например, отдельно рассматривают проблему интенсификации тепло-массообмена как при многократном диспергировании жидкости, так и при ее пленочном течении.

Из рассмотрения схемы пленочно-капельного режима течения жидкой фазы в объеме аппарата

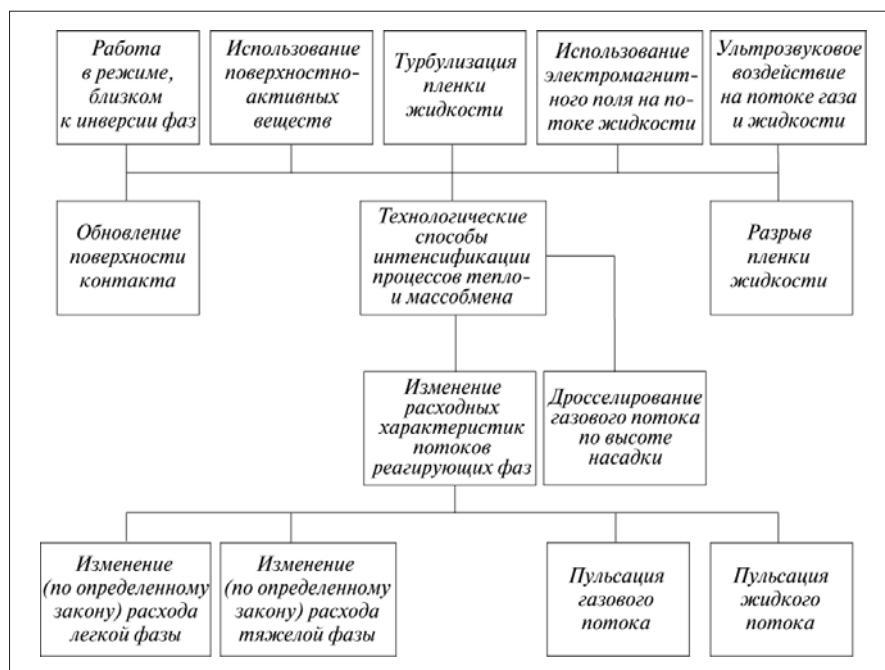


Рис. 10. Технологические способы интенсификации процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах

(рис. 11) хорошо видны особенности этого (часто встречающегося в слое насадки) случая смешанного пленочно-капельного течения, при котором имеет место совокупность как пленочного, так и капельного режимов. Понятно, что учет вклада каждого из указанных режимов течения в интегральный процесс тепло- и массообмена представляет значительные экспериментальные и теоретические трудности. Следует отметить, что по данным авторов работы [8] в некоторых конструкциях элементов насадки площадь поверхности капель может на несколько порядков (в  $10^2 \dots 10^6$  раз) превосхо-

дить поверхность пленок. При этом процессом каплеобразования можно управлять конструктивными методами, например, изменяя форму и размер микровыступов смачиваемой поверхности элементов насадки.

На рис. 12 показано влияние геометрической формы микровыступов смачиваемой поверхности элементов насадки на размеры отделяющихся от нее капель. Как следует из данных работы [9], влияние геометрической формы микровыступов весьма значительно и может составлять от 24 до 44% для выступов в форме конуса, цилиндра и сферы.

Подавляющее большинство ис-

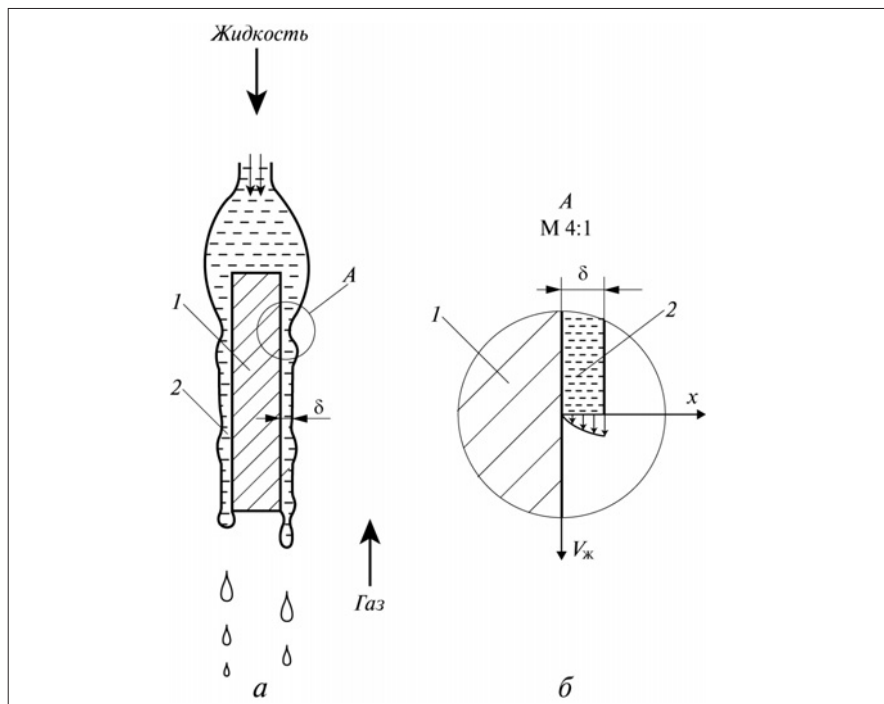


Рис. 11. Схема течения взаимодействующих потоков газа жидкости в объеме элемента насадки:  
 а – схема; б – эпюра локальных скоростей пленки жидкостей, гравитационно стекающей по поверхности насадки; 1 – элемент насадки, 2 – пленка жидкости;  $V_{ж}$  – скорость течения пленки жидкости;  $x$  – текущее расстояние от стенки насадки;  $\delta$  – толщина пленки жидкости

пользуемых в настоящее время в промышленных колонных аппаратах насыпных и регулярных насадок практически работают в чисто пленочном режиме течения [10]. Что касается работы насадок в эмульсионном режиме течения, открытом академиком Н.М. Жаворонковым [11], то этот наиболее эффективный режим наблюдается в очень узком диапазоне скоростей газа. Так, например в колонном аппарате с коль-

цами Рашига, эмульсионный режим наблюдается лишь при скорости, равной 2,0 м/с, в условиях близких или практически равных условиям захлебывания. Понятно, что поддерживать такой режим в промышленных условиях обычными средствами невозможно [11]. Представляется, что поддерживать скорость газа в подобных узких диапазонах можно лишь с использованием средств автоматизированных систем управ-

ления технологическим процессом (АСУ ТП).

Рассматривая проблему интенсификации процессов тепло- и массообмена, следует отметить целесообразность использования в колонных аппаратах АСУ ТП, которые позволяют задать определенный закон управления для максимального приближения к режиму полной (или локальной по объему) инверсии фаз в аппарате. Использование АСУ ТП также позволяет реализовать перспективный периодически-пульсирующий режим инверсии фаз [8].

Автоматизация технологического процесса, например процесса испарительного охлаждения оборотной воды в вентиляторных градирнях, может быть частичной (с функциями частотного регулирования, мониторинга и дистанционного управления) либо полной (автоматическое регулирование и управление без непосредственного участия человека).

Частичная автоматизация технологического процесса, предполагающая использование программируемого логического контроллера, обеспечивает:

- реализацию функции сбора данных;
- выработку управляющих воздействий;
- поддержание оптимального режима с целью минимизации энергетических затрат на эксплуатацию основного энергопотребляющего оборудования;
- диагностику и прогнозирование неисправностей теплотехнической и электромеханической частей системы [12].

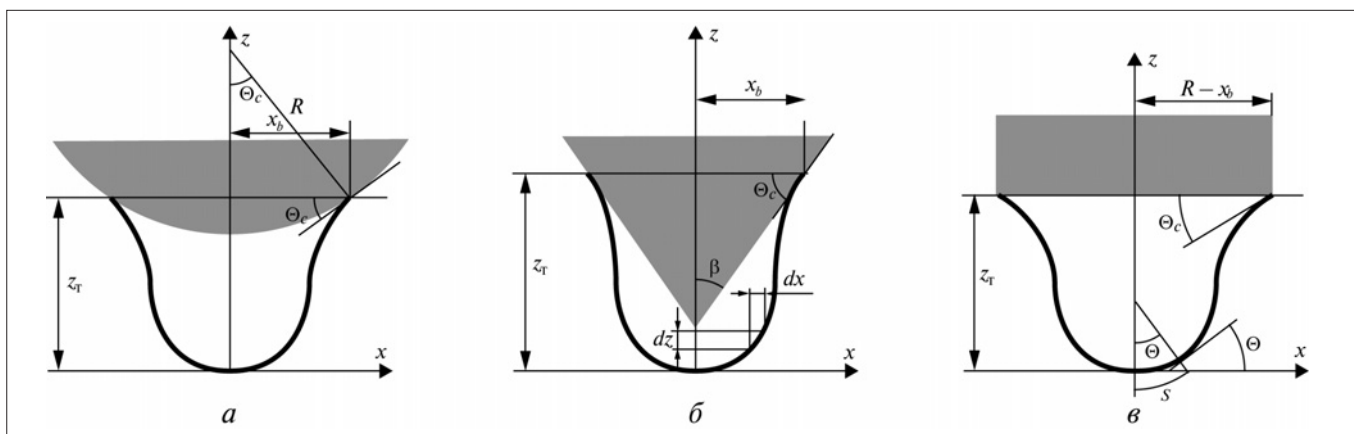


Рис. 12. Схема отделяющихся капель в зависимости от геометрической формы микровыступов смачиваемой поверхности элементов насадки по данным работы [7]:  
 а – стеклянная сфера; б – коническая металлическая поверхность; в – цилиндрическая металлическая поверхность

Полная автоматизация технологического процесса охлаждения воды предполагает осуществление комплекса мероприятий по переоснащению оборудования технологического процесса устройства защиты и/или диагностики; замену существующих исполнительных механизмов и КИПиА новыми, позволяющими проводить мониторинг, диагностику и управление в реальном времени без участия человека. Основным звеном в такой системе также является программируемый логический контроллер, связанный с верхним уровнем системы и обеспечивающий:

- автоматическое управление всеми технологическими процессами;
- передачу измерительных значений физических величин на автоматизированные рабочие места (АРМ) диспетчеров АСУ ТП;
- защиту и блокировку оборудования и исполнительных механизмов.

Для визуализации технологического процесса может быть использована система диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) с функцией диагностики состояния технологического процесса, что в конечном счете повышает надежность системы и позволяет добиться высоких показателей эффективности.

Изложенные выше способы интенсификации процессов теплообмена в слое насыпной насадки и предлагаемые классификации указанных насадок на основе развиваемых подходов могут оказаться полезными при выборе типоразмера насадки для осуществления конкретного технологического процесса, а также при разработке новых более эффективных конструкций.

Таким образом, предлагается новая, более детальная по сравнению с известными, классификация конструкций насыпных насадок.

**Список литературы**

1. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А., Беренгартен М.Г., Левин Б.В. Насадки массообменных колонн. М.: ИН-ФОХИМ, 2009. 358 с.
2. Каган А.М., Пушнов А.С., Рябушенко А.С. Материалы для изготовления насадочных контактных устройств для тепло- и массообменных процессов//Химическая технология. 2007. №5. С. 29–34.
3. Микуленок И.О. Классификация насадок массообменных аппаратов//Химическая промышленность. 2011. Т. 88. №2. С. 67–74.
4. Пушнов А.С., Каган А.М. Структура и гидродинамика колонных аппаратов с насадкой. Введение в химический инжиниринг. СПб.: Изд-во политехн. унта, 2011. 135 с.
5. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. Активная поверхность элементов нерегулярных тепло- и массообменных насадок//Теоретические основы хими-

ческой технологии. 2012. Т. 46. №2. С. 199–206.

6. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. О влиянии плотности орошения на величину активной поверхности нерегулярных тепло- и массообменных насадок//Химическая промышленность. 2011. Т. 88. №1. С. 11–14.

7. Крель Э. Руководство по лабораторной перегонке. М.: Химия, 1980. 520 с.

8. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования теплообменных процессов. Уч.-справ. пособие. М.:Теплотехник, 2011. 288 с.

9. Сафиуллин Р.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н., Николаев Н.А. Определение размеров капель, отделяющихся от смачиваемых поверхностей//Изв. вузов. Химия и химическая технология. 1998. Т. 41. Вып. 3. С. 72–77.

10. Ворошин А.В., Чагин О.В., Блиничев В.Н. Анализ конструктивного оформления ректификационных колонн//Химическая промышленность. 2013. №9. С. 23–28.

11. Жаворонков Н.М. Теоретические основы химической технологии. М.: Наука, 2007. 351 с.

12. Киянов Н., Крюков О., Лапотников С., Смирнов А., Прибытков Д. Проекты автоматизации вентиляторных градирен.//СТА 2/2007, С. 64-70. <http://www.cta.ru>

13. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет теплообменных процессов. Казань: Изд. Казанского университета, 2007. 500 с.

14. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995, 368 с.



**Уважаемые читатели!**

Подписаться на журнал «Химическая техника» на 2014 год можно по каталогам Агентства «Роспечать» (индекс 80830), АПР (индекс 42961), «Урал-пресс» (<http://www.ural-press.ru>); а также в редакции – печатная версия; в электронном формате – в редакции. Тел.: +7(495)223-66-35; e-mail: [info@chemtech.ru](mailto:info@chemtech.ru)

