

УДК 66.071.5

Современное состояние и перспективы применения микротехники в химической промышленности

Р. Ш. Абиев

РУФАТ ШОВКЕТОВИЧ АБИЕВ — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). Область научных интересов: гидродинамика многофазных сред, физические методы интенсификации тепло- и массообменных процессов, мини- и микроаппараты химических производств.

190013 Санкт-Петербург, Московский просп., 26, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), тел./факс +7(812)494-92-76, факс +7(812)712-77-91, E-mail rufat.abiev@gmail.com

Введение

В связи с бурным развитием в 90-е годы двадцатого столетия нанотехнологий возростала необходимость в оборудовании очень малого масштаба — в микро- и минитехнике. Начало разработке микроустройств положили созданные в 1970-х годах микроэлектромеханические системы (МЭМС, MEMS — Micro Electro Mechanical Systems). В настоящее время можно с уверенностью заявить о возникновении принципиально новой разновидности оборудования для многих отраслей промышленности — о микро-системной технике. Согласно определению, данному в работе [1], микро-системная техника — это совокупность научно-технических и технологических способов, обеспечивающих создание в объеме и (или) на поверхности твердого тела упорядоченной композиции микронных и субмикронных областей материалов с заданным составом, структурой и геометрией и направленных на реализацию функций восприятия, преобразования, хранения, обработки, трансляции информации, энергии, движения и выработки управляющих воздействий в требуемых режимах и условиях эксплуатации.

Основным элементом микро-системы является функциональное микроустройство, неразрывно связанное с ней конструктивно, электрически, механически и обеспечивающее выполнение заданной функции.

По принципу действия и выполняемой функции выделены следующие виды функциональных микроустройств [1]: электромеханические; оптоэлектромеханические; теплофизические; флюидные; биотехнические; микро-двигатели; микро-движители; микро-актюаторы.

Характерные для химической технологии функции выполняют теплофизические, флюидные и биотехнические микроустройства.

Теплофизическое микроустройство обеспечивает выполнение функций химической технологии за счет накопления в микрообъемах тепловой энергии и преобразования ее, в том числе обратимого, в другие виды энергии.

Флюидное микроустройство обеспечивает локализацию, течение, разделение, хранение микро- и нанокolicеств жидкости или газа, а также их физико-химические превращения под действием внешних электрических, магнитных, оптических, механических, тепловых и химических факторов.

Биотехническое микроустройство осуществляет исполнительные функции за счет интеграции с объектами и веществами биологической природы.

Помимо функционального устройства в состав микро-системы входят микро-подвесы, микро-балки (одно- и двухопорные), микро-приводы, микро-трансмиссии, микро-редукторы, микро-поршни, микро-торсионы, зубчатые микро-передачи, микро-рычаги, микро-зажимы, микро-пинцеты, микро-пружины, микро-маховики, микро-клапаны (микро-заслонки), микро-сопла, микро-дрессели, микро-насосы, микро-реакторы, микро-каналы и т.д.

Наиболее значимыми для химической технологии являются следующие элементы микро-системной техники.

Микро-клапан (микро-заслонка), выполняет функцию управления расходом жидкости, пара или газа путем управляемого изменения площади проходного сечения.

Микро-насос, выполняет функцию управляемого напорного перемещения микро-объемов жидкости, пара или газа под действием сообщенной им энергии.

Микрореактор — компонент микросистемы, в котором проходят управляемые химические реакции.

Микроканал, обеспечивает управляемое перемещение жидкостей в микрообъемах.

Бурный рост микросистемной техники начался с последней декады прошлого столетия. Так, в 1997 г. применительно к медицинской практике и для микроботов (например, в составе микровертолета) были разработаны приводы диаметром 5 и 3 мм, а в настоящее время созданы микродвигатели и микроредукторы (в том числе многоступенчатые с передаточным числом до 80) диаметром 1,9 мм [2]. В этих устройствах зубчатые колеса отдельных ступеней имеют диаметр не более 0,5 мм, модуль зацепления 30—40 мкм. Масштабный эффект в МЭМС обусловлен близостью характерных размеров структурных составляющих материала деталей, самих деталей и адсорбированных на их поверхности слоев влаги [2]. Например, модуль зацепления сверхминиатюрных зубчатых колес соизмерим с размером надмолекулярных структур и армирующих фаз из полимерных композиционных материалов, используемых для изготовления указанных деталей.

В работе [1] отмечается, что в микросистемах вследствие малости их размеров (микрометры и менее) доминирующими становятся не объемные силы (силы инерции и тяжести), пропорциональные третьей степени размера, а поверхностные силы, пропорциональные второй степени (капиллярные, электростатические и силы вязкого трения). Кроме того, меняются объемные и поверхностные свойства микрообъектов в сравнении с макрообъектами. Например, характеристики прочности и трения микрообъектов отличаются от таковых в макромире, поэтому изменение свойств микрообъектов и эффективность воздействий на них тщательно учитывают при проектировании микроустройств.

Прогрессирующим направлением в области развития микросистемной техники является разработка микроэлектронных сенсорных систем [3].

Мини- и микротехника в химической технологии

В последние два десятилетия ведутся интенсивные разработки мини- и микротехники для нужд химической технологии [4—6]. Наибольший прогресс достигнут, главным образом, в области создания микронасосов, микроклапанов, микросмесителей (для систем жидкость—жидкость), микротеплообменников, микроэкстракторов и микрореакторов.

Прежде всего остановимся на понятиях мини- и микротехника.

Характерный поперечный размер каналов микроаппаратов лежит в диапазоне от 10 мкм до 1—3 мм (редко до 4—5 мм). В некоторых работах предлагается различать микро- и минимасштаб, но четкого, обоснованного критерия границ масштабов пока нет. На основании анализа многочисленных работ за нижний предел приняты поперечный размер канала ~10 мкм. Дальнейшее уменьшение размеров приводит не только к росту гидравлического сопротивления и снижению производи-

тельности аппарата, но и к размерным эффектам, вызванным усилением вязких и поверхностных сил, а также изменением свойств среды в субмикронной области. Кроме того, технологии изготовления микроканалов (травление, микромеханическая обработка, лазерное испарение, селективная лазерная плавка) также имеют естественные ограничения. Шероховатость поверхности микроканалов составляет в пределах от десятков до нескольких микрометров [13], что сопоставимо с поперечным размером каналов. Затраты на изготовление устройства с уменьшением размеров существенно возрастают. Таким образом, размер 10 мкм стал своеобразным нижним пределом. Вместе с тем в научных публикациях появляются сообщения о разработках наноаппаратов [14, 15] (обзор о них может стать предметом отдельной статьи).

Перейдем к рассмотрению некоторых элементов микротехники для химической технологии.

В основу работы мини- и микросмесителей положены следующие физические принципы [4]:

для активного перемешивания (использование внешнего источника энергии): ультразвук; акустические колебания; электрокинетическая неустойчивость; периодические пульсации объема; слияние капель, индуцированное электрическим зарядом; пьезоэлектрические колебания мембраны; магнитогидродинамическое действие; микроимпеллеры; интегрированные микроклапаны и микронасосы;

для пассивного перемешивания (использование энергии перекачиваемой жидкости): мультиламельное течение между стержнями; сочетание разделения и рекомбинации; хаотическое перемешивание путем формирования вихрей и поворотов; вырыск компонентов в поток; столкновение струй; специальные методы, например, использование эффекта Коанды*.

Фирмой «Mgt mikroglas chemtech GmbH, Mainz» (Mgt, Германия) разработаны модульные микросмесители из стекла производительностью от 10 до 1000 л/ч, а в Институте микротехники в Майнце («Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH», IMM, Германия) созданы модульные микросмесители из нержавеющей стали производительностью от 100 до 10000 л/ч. В обоих случаях используется принцип разделения потоков сред на тонкие ламели и их слияние. Эффективность перемешивания достигается за счет сокращения диффузионного пути и больших сдвиговых напряжений. В Исследовательском центре в Карлсруэ («Forschungszentrum Karlsruhe», FZK) разработан циклонный микросмеситель, в котором осуществляется распределенный тангенциальный ввод компонентов. Кроме того, создана линейка микросмесителей, аналогичных статическим смесителям макромасштабных размеров.

* Отклонение струи жидкости, вытекающей из сопла по направлению к стенке (при определенных условиях струя прилипает к стенке). Это объясняется тем, что боковая стенка препятствует свободному поступлению воздуха с одной стороны струи, создавая вихрь в зоне пониженного давления.

Первые разработки микротеплообменников, а также методов изготовления микроканалов в металле, керамике и стекле были выполнены в 1980-х годах в Исследовательском центре Карлсруэ, а затем и в Ильменау (Германия) [13].

Микротеплообменники способны передавать энергию от одной жидкой среды к другой (теплообменники с перекрестным током), а также от электрических микронагревателей к жидкостям или газам. В первом случае аппарат представляет собой пакет спрессованных под давлением пластин, на одной из сторон которых имеются продольные микроканалки размером порядка $100 \times 100 \text{ мкм}^2$. В образовавшийся таким образом кубик входят два пучка каналов, расположенных под углом 90° друг к другу. Кубик монтируют в обойму с соединительными элементами типа Swagelok, обеспечивающими герметичное соединение с металлическими трубками. На рис. 1 представлена фотография микротеплообменника размером $20 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \times 20 \text{ мм}$, способного передавать мощность до 50 кВт.

Технические данные микротеплообменников FZK с перекрестным током:

- размер каналов $100 \times 70 \text{ мкм}^2$, $200 \times 100 \text{ мкм}^2$, $200 \times 200 \text{ мкм}^2$ и др.
- удельная внутренняя поверхность до $30000 \text{ м}^2/\text{м}^3$
- коэффициент теплопередачи до $20000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
- рабочее давление не менее 100 бар
- утечки (по гелию) 10^{-8} мбар/(л·с)
- термостойкость до 850°C
- материалы: нержавеющая сталь (DIN 1.4301, 1.4435), сплав хастеллой и др.

Другой тип микротеплообменников представляет собой массив с микроканалами, имеющий отверстия для круглых термоэлектрических нагревателей (в микроаппарат производства FZK можно установить до 15 таких нагревателей мощностью по 1 кВт).

Технические данные теплообменников с термоэлектрическими нагревателями:

- производство горячей воды температурой 45°C при подводимой электрической мощности 14 кВт и

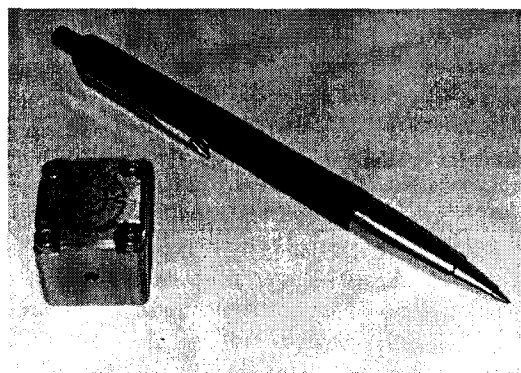


Рис. 1. Общий вид микротеплообменника размером $20 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \times 20 \text{ мм}$ (фирма изготовитель «Ehrfeld Mikro-technik», Германия)

расходе $\sim 6 \text{ л/мин}$

- полное испарение воды при расходе 5 л/ч
- нагрев потока воздуха за 1 мс от 25°C до 850°C при мощности нагревателей 400 Вт и объемной скорости потока 2000 л/ч
- коэффициент теплопередачи (для воды) $17500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
- коэффициент полезного действия более 90%
- максимальная электрическая мощность 15 кВт
- потери давления 100 мбар при расходе воды 5 л/ч
- размер канала $95 \text{ мм} \times 30 \text{ мм} \times 35 \text{ мм}$

Центральным элементом в химико-технологической системе микроразмерного масштаба является микрореактор.

Идея о микрореакторах была впервые реализована в середине 1970-х годов, когда были разработаны каталитические конвертеры для однофазных систем (очистка выхлопных газов автомобилей, селективное каталитическое восстановление NO_x , каталитические системы горения в энергетике).

Первые исследования по оценке интенсификации процессов в микрореакторах проведены, по-видимому, в 1973 г. [7] на примере биохимической реакции, протекающей в стационарном режиме (ферменты были иммобилизованы на стенке канала). В 1980-х годах изучали возможность применения монолитных катализаторов для проведения гетерогенных каталитических процессов в системе газ—твердая поверхность. В пионерских работах, выполненных в Техническом университете Чалмерса (Швеция), исследовали процессы гидрирования нитроароматических соединений [8, 9], 2-этилгексенала [10], антрахинона [11], тиофена и дибензотиофена [12].

В настоящее время микрореакторы получают все более широкое распространение в химии, нефтехимии, биотехнологии [16]. Области наиболее активного применения микротехники в химической и биохимической практике являются тонкий органический синтез, производство водородсодержащих газов, биотехнологические процессы, фармацевтика, получение наночастиц в микрореакторах, скрининг при создании катализаторов.

Что касается производительности микрореактора, то она сравнительно невысокая. Но в случае реакторного комплекса, включающего множество микрореакторов, работающих при высокой скорости течения сред, производительность его сопоставима с производительностью традиционного оборудования. По ряду показателей мини- и микромасштабное оборудование имеет существенные преимущества. Уменьшение размеров (длина реакционного канала $L \sim 10^1 \text{—} 10^3 \text{ мм}$, поперечный размер канала $d \sim 10 \text{—} 10^3 \text{ мкм}$, толщина стенки либо толщина пленки $\delta \sim 20 \text{—} 50 \text{ мкм}$) приводит к следующим эффектам:

- 1) достижение высоких коэффициентов теплопередачи, до $20 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- 2) узкое распределение времени пребывания, обуславливающее высокую селективность реакций; при необходимости может быть достигнуто чрезвычайно

малое время пребывания при малой емкости аппарата (10^{-3} с и менее);

3) низкое гидравлическое сопротивление, обусловленное малой длиной каналов и ламинарным режимом течения;

4) увеличение удельной поверхности ($10000—50000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, в обычных реакторах — не более $1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$);

5) резкое увеличение поперечных градиентов температуры и концентрации (за счет уменьшения поперечных размеров каналов);

6) интенсификация массопереноса в гетерогенных средах (циркуляционное перемешивание в тейлоровском режиме);

7) резкое уменьшение габаритов аппаратов, снижение металлоемкости;

8) снижение рисков при работе с токсичными и взрывоопасными материалами в малых объемах.

За счет сокращения времени пребывания удается 1) повысить селективность реакций и безопасность процесса; 2) перейти к непрерывному процессу.

За счет распараллеливания потоков сред в мини- и микроаппаратах обеспечивается 1) гибкость производственного процесса; 2) упрощение исследовательских работ; 3) возможность использования модульного принципа; кроме того, исключаются проблемы с масштабным переходом.

Мини- и микроаппараты могут серьезно конкурировать с химическим оборудованием обычных размеров при проведении ряда лабораторных и производственных работ.

1. При выполнении лабораторных работ в микроаппаратах повышается точность измерений. Например, при непрерывном отборе проб одной из проблем является сохранение идентичности пробы (проблема продольного перемешивания). Применение инертного газа (либо жидкости), отделяющего жидкостные снаряды в капиллярной трубке друг от друга (тейлоровский режим течения), позволяет практически исключить перемешивание, что способствует идентичности отбираемой пробы [21].

2. В производствах веществ и материалов (в том числе наноматериалов) в микроаппаратах обеспечивается тонкая дозировка реагентов, а также быстрое и эффективное перемешивание в малых объемах [22].

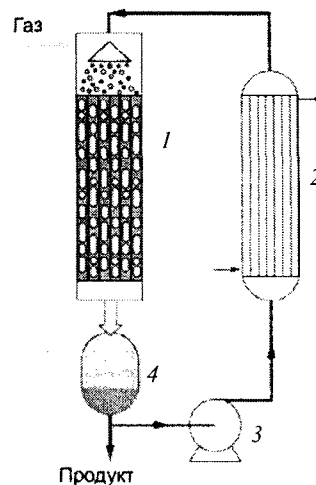


Рис. 2. Схема проведения процесса в газожидкостном моноканальном микрореакторе [16]:

1 — моноканал; 2 — теплообменник; 3 — насос; 4 — газожидкостный сепаратор

3. Возможность применения микроаппаратов в мобильных установках (снижение массогабаритных характеристик).

4. В производствах крупнотоннажной химии при использовании микроаппаратов улучшается ряд показателей: повышается качество перемешивания, эффективность тепло- и массопереноса, селективность реакций и их выход, сокращается продолжительность процесса [4—6]. При этом высокая производительность достигается как за счет очень больших скоростей течения сред в мини- и микроканалах (до 100 м/с и более), так и за счет большого количества параллельных каналов [17, 19]. Примечателен тот факт, что в микроканалах даже при столь высоких скоростях движения потока жидкости режим течения сохраняется ламинарным (!), что обуславливает очень низкие потери механической энергии.

Многообещающей альтернативой традиционным реакторам с суспендированным или неупорядоченно уложенным неподвижным катализатором являются так называемые структурированные реакторы с моноканальным катализатором [16, 17] (рис.2, таблица).

Таблица

Некоторые примеры применения моноканальных реакторов [17]

Реакция	Активный компонент/носитель	Направление потоков жидкости и газа
Гидрирование антрахинона	Силикагель	Вниз
Гидрирование α -метилстирола	$1,8\%(\text{масс.}) \text{ Pd} / \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	—"
Окисление циклогексанона	Углерод	—"
Окисление глюкозы и целлюлозы	$0,26\%(\text{масс.}) \text{ Pt} / \text{Al}_2\text{O}_3$	Вверх
Гидрирование 2-бутен-1,4-диола	$1,0\%(\text{масс.}) \text{ Pd} / \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Вниз
Гидрирование нитроароматических соединений	$\text{Co-Mo} / \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	—"
Гидрирование растительных масел	$2,0\%(\text{масс.}) \text{ Pd}$	—"
Биологическое разложение хинолина	<i>Burkholderia pickettii</i>	Вверх

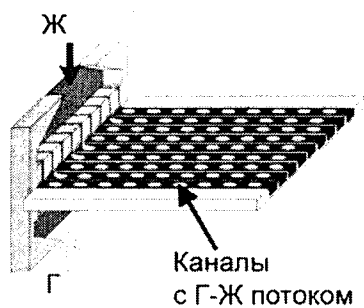


Рис. 3. Схема многоканальной газожидкостной колонны [19].
(Ж — жидкость, Г — газ)

В качестве показателя эффективности некоторых микрореакторов приведем данные об удельном выходе продукта реакции прямого фторирования толуола: в микрореакторе с падающей пленкой (falling-film microreactor, FFMR) ~ 35000 моль/($\text{м}^3 \cdot \text{ч}$), в микроколонке (micro bubble column, MBC, рис. 3) ~ 120000 моль/($\text{м}^3 \cdot \text{ч}$), в лабораторной пузырьковой колонке (laboratory bubble column, LBC) ~ 20 моль/($\text{м}^3 \cdot \text{ч}$) [18]. Таким образом, удельный выход продукта в этих микрореакторах на 2—3 порядка выше, чем в других типах аппаратов.

Проблемы химической микротехники

Хотя создан ряд микрореакторов для работы с микрочастицами (например, микрореакторы с неподвижными частицами катализатора или микрореакторы со сталкивающимися струями для получения наночастиц в реакциях осаждения, где суспензия выдувается газом), в целом микроаппараты мало приспособлены для обработки жидкостей или газов, содержащих твердые включения в связи с очевидным риском их быстрого засорения.

Вследствие пульсаций расхода потока, создаваемых при подаче жидкостей обычными насосами, может существенно ухудшиться работоспособность микроаппаратов. К настоящему времени разработаны насосы снижающие пульсацию потока, а также предпринимается попытка применения для этих целей метода, основанного на электроосмосе.

Не решены проблемы с равномерным распределением фаз по многим параллельным микроканалам (их число может достигать несколько десятков тысяч), что подтверждено высокоскоростными томографическими исследованиями (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf).

Очевидным является тот факт, что при обработке особо вязких сред в микроаппаратах возрастут потери давления (линейно) и затраты мощности (квадратично). Вместе с тем многие процессы протекают при высоких температурах, когда вязкость жидкостей существенно уменьшается, так что ограничение редко выходит на первый план.

Микрореакторы наиболее подходят для технологий сравнительно малой производительности (не более 5000 л/ч) и временем пребывания не более 5—20 мин (с увеличением которого снижается производительность,

возникает потребность в более длинных каналах, растут потери давления).

Вместе с тем резкий рост числа исследований и патентов в области химической мини- и микротехники является серьезным индикатором, прогнозирующим растущий спрос на это высокоэффективное и малоэнергоемкое оборудование в самом ближайшем будущем.

В данном выпуске журнала освещены теоретические и прикладные аспекты химической микротехники. Повышенный интерес исследователей к микросистемной технике и к возможности ее использования в различных отраслях промышленности и, в частности в химической технологии, отражается в разнообразии тем публикуемых в журнале статей. Это реакции органического синтеза и прямой синтез пероксида водорода, осуществляемые в микрореакторах, микромасштабная дистилляция, использование микрочиповых систем для молекулярно-генетического анализа, изучение кинетики химических процессов, термолинзовое детектирование, моделирование гидродинамики и массопереноса, интенсификация гетерогенных процессов в микрореакторах. Ряд статей представлен зарубежными авторами, деятельность которых связана с разработкой микрооборудования и исследованием микромасштабных процессов (перевод статей выполнен группой докт. хим. наук Б.И. Ионина).

Заключение

Микротехника, еще двадцать лет назад казавшаяся довольно специфическим научно-техническим направлением, постепенно находит все новые области применения. Микроаппараты обладают существенными преимуществами перед традиционными аппаратами, особенно при использовании в малотоннажных производствах, хотя и имеется ряд ограничений. По-видимому, уже в ближайшие годы ее применение в целях исследований, в областях тонкого органического синтеза, фармацевтики и в особенности экспресс-анализа будет интенсивно расширяться.

В России этой важнейшей проблемой занимаются лишь в нескольких организациях, в том числе в Институте катализа им. Г.К. Борескова, в Институте аналитического приборостроения РАН, в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте (техническом университете).

Цель данного номера журнала — привлечь внимание заинтересованных организаций как к проведению совместных исследований, так и к постепенному внедрению этого современного и перспективного вида оборудования в промышленность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернер В.Д., Иванов А.А., Коломенская Н.Г. и др. Нано- и микросистемная техника, 2007, № 12, с. 2—5.
2. Шалобаев Е.В., Старжинский В.Е., Шилько С.А. Там же, 2003, № 10, с. 2—5.

3. *Каляев И.А., Котов В.Н., Кливдухов В.Г., Кухаренко А.П.* Там же, 1999, № 1, с. 32—35.
4. *Hessel V., Löwe H., Müller A., Kolb G.* Chemical Micro Process Engineering, Processing and Plants. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2005, 651 p.
5. *Kreutzer M.T., Kapteijn F., Moulijn J.A., Heiszwolf J.J.* Chem. Eng. Sci., 2005, v. 60, p. 5895—5916.
6. *Бауэр Т., Шуберт М., Ланге Р., Абиев Р.Ш.* Ж. прикл. химии, 2006, т. 79, № 7, с. 1057—1066.
7. *Horvath C., Solomon B. A., Engasser J.-M.* Ind. Eng. Chem. Fundamen., 1973, v. 12, № 4, p. 431—439.
8. *Hatziantoniou V., Andersson B.* Ibid., 1984, v. 23, № 1, p. 82—88.
9. *Hatziantoniou V., Andersson B., Larsson T., Schoeoen N., Carlsson L., Schwarz S., Wideen K.* Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 1986, v. 25, № 4, p. 964—970.
10. *Irlandoust S., Andersson B.* Chem. Eng. Sci., 1988, v. 43, № 8, p. 1983—1988.
11. *Irlandoust S., Andersson B., Bengtsson E., Siverstroem M.* Ind. Eng. Chem. Res., 1989, v. 28, № 10, p. 1489—1493.
12. *Edvinsson R., Irlandoust S.* Ibid., 1993, v. 32, № 2, p. 391—395.
13. *Microreactors in Organic Synthesis and Catalysis.* Ed. T. Wirth. Wiley-VCH, 2008, 283 p.
14. *Miura K., Kawase M., Ashida R., Gerlach I., Yamamoto T.* Chem. Eng. Sci., 2007, v. 62, Iss. 18—20, p. 5655—5660.
15. *Shi D., Hu G.-H., Li R.K.Y.* Ibid., 2006, v. 61, Iss. 11, p. 3780—3784.
16. *Structured catalysts and reactors.* Eds. A. Cybulski, J.A. Moulijn. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
17. *Бауэр Т., Шуберт М., Ланге Р., Абиев Р.Ш.* Ж. прикл. химии, 2006, т. 79, № 7, с. 1057—1066.
18. *Jähnisch K., M. Baerns, Hessel V. e. a.* J. Fluorine Chem., 2000, v. 105, № 1, p. 117.
19. *Haverkamp V., Löwe H. e. a.* Chem. Eng. Technol., 2006, v. 29, № 9, p. 1015—1026.
20. *Лаврецов И.В.* Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПбГТИ(ТУ), 2011, 20 с.
21. *Kreutzer M.T., Guenther A., Jensen K.F.* Anal. Chem., 2008, v. 80, № 5, p. 1558—1567.
22. *Song H., Tice J.D., Ismagilov R.F.* Angew. Chem. Int. Ed., 2003, v. 42, № 7, p. 767—772.

ABSTRACTS

Current state and perspectives of microtechnology in the chemical industry. R. Sh. Abiev. Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva), 2011, v. 55, № 2.

A brief overview of micro technique applications, design and technologies of its manufacturing, methods of process intensification and use for diagnostic purposes is presented. Main physical factors promoting heat and mass transfer intensification are described.

Microfabrication in Metals, Ceramics and Polymers. J. J. Brandner. Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva), 2011, v. 55, № 2.

In this overview report fabrication of microstructured devices and systems out of metals, ceramics and polymers will be presented briefly as well as bonding, sealing and packaging of devices. The main objective for the systems and devices covered here is chemical process engineering, thus, metal, ceramic and polymer manufacturing techniques are considered, while silicon technology is intentionally left out, because this technology is normally not used in this topic. The text will only provide a rough overview onto the numerous techniques and technologies.

Gas-phase microreactors as a powerful tool for kinetic investigations. J. R. Hernández Carucci, K. Eränen, T. O. Salmi, D. Yu. Murzin. Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva), 2011, v. 55, № 2.

The purpose of this overview was to show the versatility of gas-phase microreactors for the determination of kinetics of chemical systems. Precise kinetic models were demonstrated for two industrially-relevant cases: a) the continuous selective catalytic NO reduction by hydrocarbons in the excess oxygen at 150–550 °C; and b) the catalytic production of ethylene oxide, one of the most important intermediates in the world.

Microwave assisted organic synthesis in microreactors. E.V. Rebrov. Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva), 2011, v. 55, № 2.

The coupling of microwave heating with microprocessing in flow-through reactors has been reviewed in various organic synthesis reactions. The fast growing field of microwave and microreactor technology has a significant impact on the development of fine chemicals industry. Both technologies offer not only the possibility of realizing many of the individual advantages integrated into one combined system but also the potential of eliminating the major hurdle of a limited microwave penetration depth for large-scale chemical synthesis. Metal-film-coated capillary microreactors allow to create local hot spots to achieve temperatures far in excess of the solvent temperature, which accelerates chemical reactions under MW heating.

Microstructured reactors/heat-exchangers on the base of new generation catalytic systems for the water-gas shift reaction. A.R. Dubrovskiy, S.A. Kuznetsov, E.V. Rebrov, J.C. Schouten. Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva), 2011, v. 55, № 2.

The catalytic systems of new generation and constructions of microstructured reactors/heat-exchangers for the water-gas shift reaction have been considered.

Micro-Scale Distillation. A. T. Sundberg, P. Uusi-Kyyny, V. Alopaeus. Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva), 2011, v. 55, № 2.

Vapor-liquid contacting is a key phenomena encountered in various separation processes, commercially the most important being distillation. Although microprocess technology has been applied on the micro scale for some time, efficient micro-scale devices applicable for separating components have not been available until past few years. These publications describing microscaled equipment for carrying out separation with distillation were reviewed. Two main operation principles were encountered; cocurrent and countercurrent.