

УДК 66.048

Микродистилляция

А. Т. Сундберг, П. Ууси-Кююню, В. Алопеус

АРНЕ Т. СУНДБЕРГ (A. T. SUNDBERG) — исследователь, магистр наук Аалто университета (Финляндия). Область научных интересов: технология микропроцессов.

ПЕТРИ УУСИ-КЮЮНЮ (P. UUSI-KYYNY) — академический научный сотрудник, доктор технологии Аалто университета (Финляндия). Область научных интересов: измерение фазовых равновесий, технология микропроцессов.

ВИЛЛЕ АЛОПЕУС (V. ALOPAEUS) — профессор, доктор технологии Аалто университета (Финляндия). Область научных интересов: процессы разделения, моделирование и разработка многофазных реакторов.

Aalto University, P.O. Box 16100, FI-00076 Aalto, Finland, E-mail Aarne.Sundberg@tkk.fi

Введение

Профессиональный инженерный подход к разработке новых концепций процесса дистилляции предусматривает проверку принятого варианта в меньших масштабах до реализации на крупномасштабном заводе. При разработке пилотной установки следует ориентироваться на тот метод процесса разделения, что запланирован для производства в коммерческих масштабах, чтобы избежать ошибок при масштабировании. Поскольку круг исследований в области микроперегонки весьма ограничен, указанное требование может затруднять минимизацию пилотной установки. На стадии пилотных исследований важно сочетать микромасштабные процессы разделения с аналогичными циклами, осуществляемыми на действующем заводе. Необходимо учитывать наличие следовых количеств побочных продуктов и примесей в сырье, которые на начальной стадии разработки дистилляционных микроустройств могут выпасть из внимания из-за того, что количество примесей ниже предела обнаружения в прямоточных реакторах. Следует иметь в виду, что примеси могут накапливаться в потоках рецикла и приводить к серьезным последствиям. С этим обстоятельством связана одна из основных причин проведения пилотной фазы при разработке производственного процесса.

В данной статье собрана информация о методах и устройствах для микродистилляции с оценкой эффективности разделения, достигаемой в единичном устройстве. Повысить эффективность разделения можно путем последовательного подключения некоторого числа таких единиц или путем возврата продукта в начальный поток, для чего необходимо включение в линию микронасосов, что используется редко. Кроме того, управление такой системой может оказаться слишком сложным.

Прямоточная (одноступенчатая) микродистилляция

Бойд и др. [1] осуществили разделение в наномасштабе. Разделяемая смесь поступает в микроканалы (ширина 30 мкм, высота 5 мкм), отлитые в полидиметилсилоксане и перекрытые стеклянной подложкой с нанесенными наночастицами золота (рис. 1). Канал нагревается лазерным лучом (длина волны 532 нм), который охватывает область диаметром 10 мкм. В точке нагрева жидкость испаряется, пары конденсируются на удалении 10—20 мкм, при этом газовый пузырек захватывается жидкостью. Газовый пузырек работает как

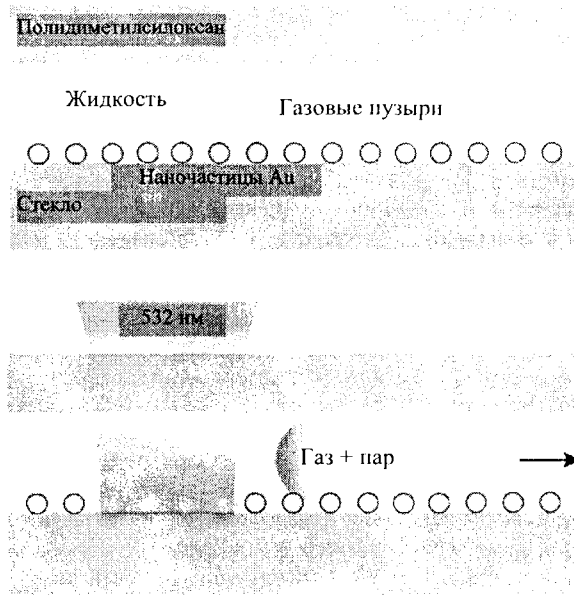


Рис. 1. Структура микроканала и принцип разделения при пузырьковом воздействии на межфазный массообмен [1]

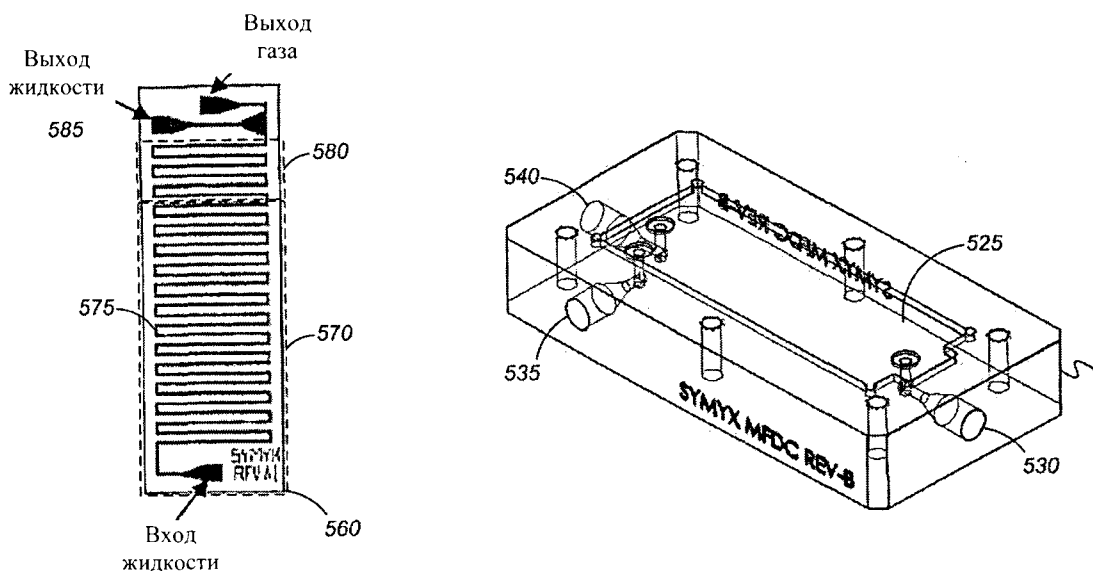


Рис. 2. Плата одноступенчатого перегонного устройства и нижняя половина несущего каркаса [2]

барьер для диффузии, хотя при этом остается возможность для испарения и конденсации через поверхность пузырька.

Работоспособность устройства была проверена на примере разделения смеси деионизированной воды и этанола с примесью кумарина-4 (хромона) с буфером HCl, содержащего трис(гидроксиметил)аминометан (красящая смесь). В ходе процесса разделения вода и этанол перемещались через газовый барьер (кумарин не перемещался). Скорость испарения составляла 0,75 мг/с. С помощью этого метода можно проводить предварительное концентрирование термочувствительных компонентов, таких как биомолекулы.

Запатентован метод одностадийной флеш-дистилляции, заключающийся в нагревании жидкой смеси в микроканале до частичного ее испарения с последующим прохождением потока через микрокапилляры для разделения насыщенного пара и жидкости [2]. Скорость потока продукта зависит от температуры.

Устройство для реализации этого метода было изготовлено путем травления на кремниевой пластине (рис. 2). Размеры основного микроканала $500 \times 280 \text{ мкм}^2$, длина канала, как минимум, 5 см, хотя допускается длина до 100 см, чтобы обеспечить достижение равновесия. Размеры капиллярных каналов $10 \times 70 \text{ мкм}^2$. Рабочая температура в устройстве задавалась электронагревателем. Для разделения можно использовать либо одно такое устройство, либо систему из многих модульных блоков, так что продукт из предыдущего блока поступает в канал питания последующего устройства. Для работы устройства необходимо, чтобы перепад давления в капилляре был

ниже 7 кПа. Это обеспечивается путем контроля расхода продуктов с помощью электромагнитного клапана с малым «мертвым» объемом, управляемого компьютером с двумя дифференциальными датчиками давления.

Работоспособность устройства была проверена на бинарной смеси пентана и октана. Эффективность разделения при питающем потоке, равном $0,5 \text{ см}^3/\text{мин}$, по сути соответствует одному идеальному шагу (теоретической ступени разделения). Устройство было также протестировано на сырой нефти. Результаты разделения, полученные при различных температурах, дают кривую истинных температур кипения.

Разработан микроканал ректификационной колонны, в котором создается сегментированный поток за счет газа-носителя (рис. 3) [3]. Устройство изготовлено методом травления на кремниевой подложке. Микроканалы прямоугольной формы, площадь поперечного сечения $0,4 \times 0,4 \text{ мм}^2$, длина канала 0,875 м. Исходная смесь

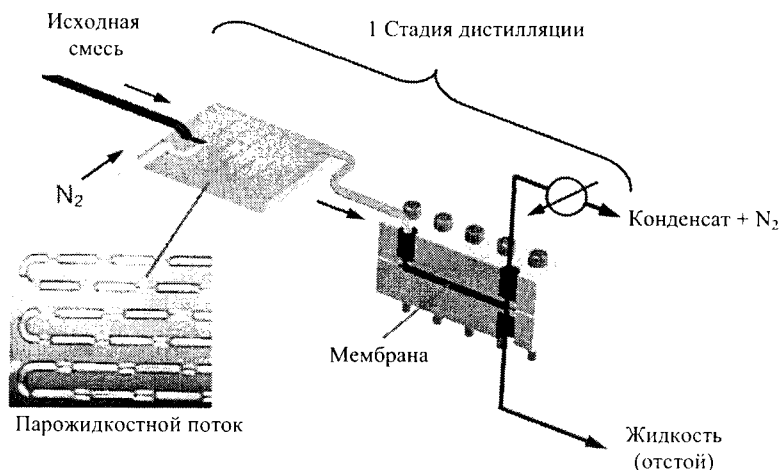


Рис. 3. Схема реализации сепарации путем сегментации парожидкостного потока [3]

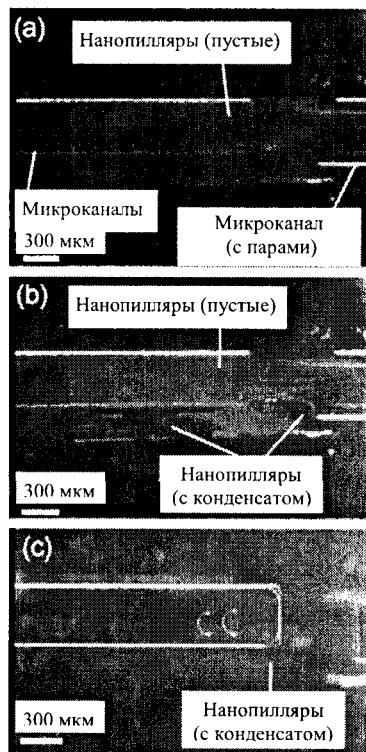


Рис. 4. Нанопиллярная структура: варианты процесса перегонки смеси воды и этанола [5]

подается в потоке азота (газ-носитель). Образуется двухфазная система (жидкость между пузырьками газа), которая нагревается в канале электрическим нагревателем с частичным вскипанием жидкости. Процесс разделения осуществляется на мембране. Эксперименты проводили с использованием бинарных смесей метанол—толуол и толуол—дихлорметан. Температура в устройстве в эксперименте задавалась в зависимости от состава исходной смеси для обеспечения желаемых потоковых скоростей. Эффективность разделения соответствует одной идеальной стадии. Демонстрировалась работа данного устройства в составе установки для многостадийного химического синтеза [4].

Реализован процесс парожидкостного разделения в наномасштабе с использованием нанопиллярных структур (наностолбики) [15]. Давление насыщенного пара в нанопиллярах ниже, чем в микроканальных устройствах, благодаря чему пар конденсируется внутри пилляра. Площадь поперечного сечения одного нанопилляра $0,9 \times 0,9 \text{ мкм}^2$, высота $0,25 \text{ мкм}$. Размер капиллярных каналов между пилля-

рами $0,3 \text{ мкм}$. Перегонке подвергали водный раствор этанола (9% масс.). Через 2 ч пиллярная структура заполнялась конденсатом с содержанием 19%(масс.) этанола (рис. 4). При расходе исходного раствора 2 мл/мин эффективность разделения составляла 0,3 относительно идеального шага. Флегмовое отношение 3,7% от потока питающей смеси.

В публикациях [6, 7] сообщается о разработке микромасштабного одноступенчатого контактного устройства, включающего каналы, созданные путем механической обработки на кремниевой пластине, которую затем скрепляли анодным методом со стеклом. Разделяемая смесь поступает в извилистый канал, где происходит частичное испарение жидкости при нагревании устройства на водяной бане. Пар и жидкость разделяются во флеш-камере. По конструкции это устройство похоже на устройство, представленное в работе [2], но разделение в устройстве [6, 7] основано на действии силы тяжести, а не капиллярных сил. Были изготовлены и испытаны каналы различного сечения, от $137 \times 137 \text{ мкм}^2$ до $500 \times 500 \text{ мкм}^2$, длина канала 70 мм . На этом устройстве проводили перегонку водного раствора метанола (70% мол.) при нагревании на водяной бане с температурой $72 \text{ }^\circ\text{C}$. При расходах питающей смеси $0,02$ и $0,1 \text{ см}^3/\text{мин}$ эффективность разделения составила $0,8$ и $0,65$ относительно идеальной стадии, соответственно.

Описано [8] одностадийное микроперегонное устройство, в котором осуществляется ламинарное течение жидкости в потоке гелия в качестве газа-носителя (рис. 5) [8]. Каналы получали гравировкой на стеклянной подложке, которую затем покрывали стеклянной пластиной и скрепляли при нагревании. Глубина каналов 50 мкм , ширина от 100 до 500 мкм . Исходная жидкая смесь в потоке газа-носителя распределяется по каналам. В зоне контакта газа и жидкости поддерживается повышенная температура ($60 \text{ }^\circ\text{C}$) с помощью электронагревателя. Образующиеся пары жидкости и газ-носитель направляются в зону конденсации, где конденсат отделяется от газа. В экспериментах в качестве исходной смеси использовали эквимольную смесь ацетонитрила и диметилформамида, расход до $0,15 \text{ см}^3/\text{мин}$.

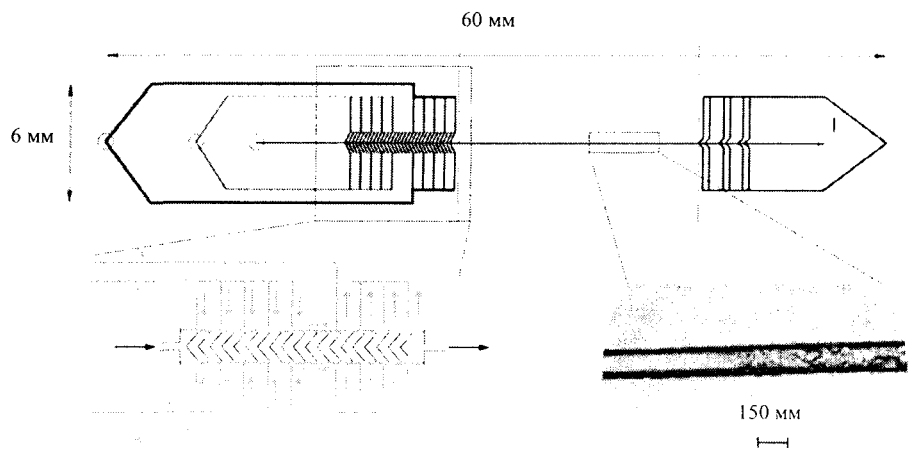


Рис. 5. Схема ламинарного одноступенчатого сепарационного устройства [8]

Прямоточные микродистилляционные устройства

Обозначения: N — число идеальных ступеней; ВЭТТ — высота, эквивалентная теоретической тарелке; τ — время пребывания жидкости в микроканале

Авторы устройства	$N/\text{ВЭТТ, м}$	Производительность, моль/с	τ , с	Форма исполнения
Boyd D.A. с. а. [1]	—	$4,2 \cdot 10^{-11}$	—	Пакет
Cypes S. с. а. [2]	1/0,05 — 1	$6,0 \cdot 10^{-5}$	9	Флеш-камера
Hartman R.L. с. а. [3]	1/0,88	$4,5 \cdot 10^{-6}$	—	То же
Hibara A. с. а. [5]	0,3/—	$1,5 \cdot 10^{-6}$	—	Пакет
Sotowa K.-I., Kusakabe K. [6, 7]	0,65 — 0,8/ 0,108 — 0,088	$(1,0 — 5,1) \cdot 10^{-5}$	11 — 53	Флеш-камера
Wootton R.C.R., deMello A.J. [8]	0,7/0,057	$3,8 \cdot 10^{-5}$	0,06	То же

Примечание. Производительность соответствует скорости потока исходной смеси.

Эффективность разделения составляет до 0,7 относительно идеального шага (теоретической ступени).

Процесс парожидкостного разделения на наноуровне пока еще далек от внедрения в практику перегонки. Так, для процессов разделения, проводимых с применением лазера [1] и в нанопиллярных структурах [5], не решены вопросы удаления одного из продуктов. Это может быть вызвано тем, что эти процессы ближе к периодической перегонке, чем к непрерывному процессу разделения в потоке.

Во всех методах микромасштабной дистилляции реализуется одинаковый подход: пар генерируется при нагревании, возможно с использованием газа-носителя, затем система жидкость—пар поступает в контактную секцию для насыщения газовой фазы и далее в секцию разделения фаз. Характеристики методов разделения с параллельными потоками демонстрируют данные, приведенные в табл. 1. Эффективность разделения по всем этим методам, выраженная через высоту, эквивалентную одной теоретической тарелке (ВЭТТ), может достигать 0,1 м или более. Но только два метода обеспечивают разделение, отвечающее одному полному идеальному шагу (теоретической ступени разделения) — флеш-метод Ципеса с сотр. [2] и метод сегментированного потока Хартмана с сотр. [3]. Для обоих методов успешно решен вопрос создания паровой фазы в стационарном процессе и, что более важно, вопрос разделения фаз. Однако оба этих метода [2, 3] требуют тщательного контроля перепада давления в устройстве, что может вызвать трудности, если требуется эффективность разделения выше одного идеального шага. В методах, в которых разделение фаз осуществляется под действием сил тяжести [6, 7] или структурированием каналов [8], эффективность разделения зависит от производительности.

Отметим, что ВЭТТ для устройства прямоточной микродистилляции может не соответствовать минимальной длине, необходимой для идеального шага, а скорее является общей длиной равновесной камеры, как в случае пиллярной конструкции Ципеса с сотр. [2] и

Хартмана с сотр. [3]. Кроме того, производительность соответствует скорости исходного потока на один канал или на одно устройство. Она может быть увеличена за счет числа параллельных операционных каналов или устройств.

Противоточная микродистилляция

Непрерывную дистилляцию с противоточным направлением потоков пара и жидкости в миллиметровом масштабе осуществили Сеок и Вонг [9]. Использовалась колонна, состоящая из адиабатической секции стеклянных трубок (длина 340 мм, внутренний диаметр 10 мм) и двух секций медных трубок (длина 100 мм) для теплообмена (рис. 6). С одного конца колонка нагревается электрическим нагревателем, а с другого — охлаждается циркулирующей водой. Слой из стекловолокна толщиной 1,2 мм внутри колонки на стенках обеспечивает возврат жидкости в испаритель за счет капиллярных сил (а не силы тяжести) и увеличивает поверхность массо- и теплопереноса. Колонка может работать в горизонтальном положении.

Устройство было протестировано на смеси вода—этанол. Скорость питающего потока от 0,8 до 6 моль/ч. При полной конденсации смесь разделялась на чистую воду и этанол (88% масс.). В непрерывном режиме работы флегмовое число поддерживалось между 2 и 10. Эффективность разделения, выраженная через высоту единицы переноса, составляла от 6 до 16 см. Рамирес-Гонсалес [10] объяснил улучшение массопереноса образованием пленки жидкости благодаря пористой среде. Черняев и др. [11] смоделировали с хорошей точностью процесс разделения многокомпонентной системы в микродистилляционной колонке, применив подход Стефана—Максвелла.

Финк и Хемп [12] провели расчетное и проектное исследование ректификационной колонки в рамках проекта микропроизводства. Ректификационная колонка состоит из соединенных путем спекания элементов, распределяющих жидкость по поверхности кольца

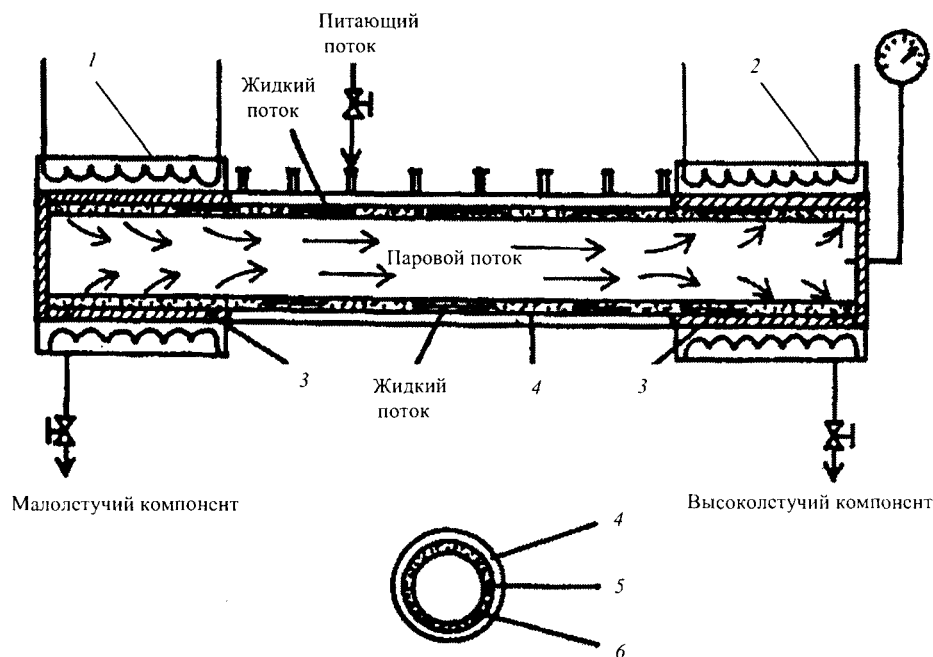


Рис. 6. Схема микродистилляционной колонки типа нагреваемой трубки [9]:

1 — нагреватель; 2 — холодильник; 3 — медные трубки; 4 — стеклянная трубка; 5 — фитиль (стеклянное волокно); 6 — проволочный экран

(внутренний диаметр 16 мм, внешний диаметр 19 мм). Общая высота устройства 40 мм, удерживаемый объем жидкости 3 см³. Колонка нагревается с помощью стальной пластины в нижней части устройства. Эффективность разделения при расходе разделяемой смеси 20 см³/ч составила 2,5 идеальных ступеней. Сообщается, что концентрация в потоке продукта очень чувствительна к изменениям температуры колонки [13].

Запатентован метод разделения жидких компонентов путем дистилляции в плоском канале (рис. 7) [14]. Канал представляет собой фитиль, по которому противотоком движутся жидкость и газ. Жидкость перемещается к горячему концу канала под действием капиллярных сил. Кроме того, в канале такой структуры толщина жидкой пленки может быть уменьшена по сравнению с падающей пленкой, что снижает сопротивление массопередаче. Пар частично генерируется на одном конце канала и конденсируется частично на другом конце. Результаты 100-часовой непрерывной перегонки представлены в работах [15, 16]. Для устройства с 15-ю па-



Рис. 7. Схема плоского микродистилляционного устройства с горизонтальной ориентацией колонки [15]

раллельными микроканалами при расходе питающей смеси 2,5 г/мин, представляющей собой топливо JP-8, флегмовое число равно 4,3, высота соответствующей теоретической тарелки 18 мм. Устройство функционирует в горизонтальном положении.

Ципес и др. [17] работали с микромасштабной колонкой стриппингового типа (колонка для отгонки легких фракций) с использованием азота в качестве стриппинг-газа. Колонка изготовлена из кремниевых пластин, обработанных травлением, которые соединены эвтектическим Au/Cr связующим (рис. 8). Каналы для газа и жидкости идентичны (длина канала 33,5 мм) с поперечным сечением в виде трапеции (площадь верха канала равна 0,92×0,33 мм², донной стенки 0,45×0,33 мм²). Контакт между фазами осуществляется че-

рез перфорированное дно верхнего канала. Питающая смесь подается в четыре канала. Поток газа движется противотоком относительно жидкости.

Устройство было протестировано на смеси воды и толуола. Эффективность разделения по сравнению с традиционными пакетными колонками указывает на 10-кратное повышение коэффициента массопереноса в микромасштабной колонке.

Тонкович и др. [18] описали устройство для перегонки, состоящее из нескольких секций разделения. Устройство имеет фитильную структуру, обеспечивающую минимизацию толщины пленки жидкости и задержку ее для предотвращения уноса. Пар и жидкость движутся в противотоке. В использованном варианте колонка имела слоистую структуру с каналами для теплообмена между дистилляционными каналами (рис. 9).

Фанелли и др. [19] рассчитали процесс разделения смеси гексан—циклогексан. Жидкость стекает в виде падающей пленки, которая стабилизируется (предот-

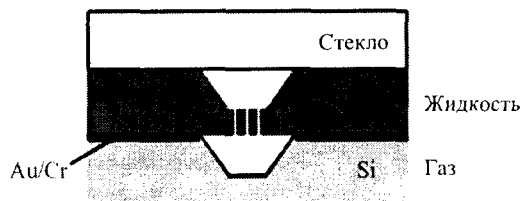


Рис. 8. Поперечное сечение микромасштабной стриппинговой колонки [17]

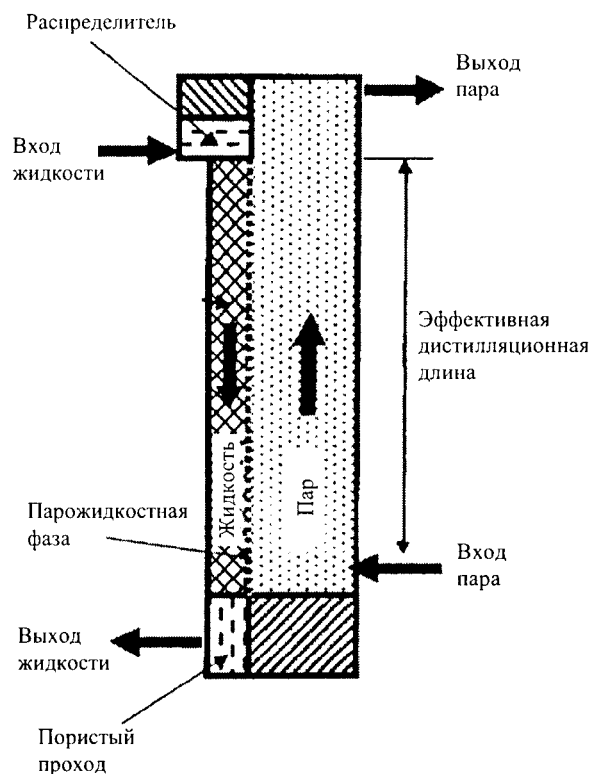


Рис. 9. Микромасштабное дистилляционное устройство по Тонковичу с сотр. [18]

вращается ее унос поднимающимся паром) внутри стальной сеткой. Поток пара движется вверх в открытом канале (толщина 1,3 мм). При расходе питающей смеси гексан—циклогексан 1 см³/мин ВЭТТ составила 21 мм. В работе [20] опубликованы результаты разделения этан—этиленовой смеси при давлении 18 бар. При флегмовом числе 2 в пределах зоны контакта микродистилляционного устройства длиной 114 мм число идеальных ступеней равно 2, что эквивалентно ВЭТТ 57 мм. Для сравнения: величина ВЭТТ традиционных С2-разделителей, как правило, составляет около 500 мм.

Сундберг с соавт. [21—24] представил дистилляционную колонку с толстыми металлическими стенками, включающую плоскую камеру, заполненную металлической пеной. В первоначальном проекте в качестве материала стен колонки рекомендовалась латунь, обеспечивающая эффективную теплопередачу от нагревателя к холодному концу колонки. Один конец колонки нагревался электрическим нагревателем, другой — охлаждался воздухом. Размеры камеры: длина 140 мм, высота 3,5 мм, толщина слоя металлической пены на дне 2 мм. Эффективность разделения смеси гексан—циклогексан при полной флегме составила 11 идеальных ступеней, что эквивалентно ВЭТТ 13 мм. В более поздней разработке длина камеры была увеличена до 290 мм при высоте камеры 5 мм и слое насадки толщиной 3 мм. Температура регулировалась посредством нагреваемых алюминиевых пластин, закрепленных вы-

ше и ниже колонки. Эффективность разделения при полной флегме составила 11 идеальных ступеней или ВЭТТ 25 мм. После устранения пустого пространства в камере с пластиной из металла эффективность разделения повысилась до 18±2 идеальных ступеней, что равно ВЭТТ 16 мм. При расходе питающей смеси 1 моль/ч и флегмовом числе 2,2 эффективность разделения соответствует ВЭТТ 80 мм. Изготовлена и испытана микродистилляционная колонка той же конструкции с площадью поперечного сечения 5×5 мм² [25, 26].

Зигас с сотр. [27] разработал колонку из плат, которые можно вынимать и вставлять другие. Устройство работает при вертикальной ориентации. Эффективность разделения — 12 идеальных ступеней по близкипящей смеси изооктана и *n*-октана, что соответствует ВЭТТ 8 мм.

Разработана новая дистилляционная установка с вращающейся спиралью, служащая микроканалом (рис. 10) [28]. Микроканал в форме спирали получали травлением на стеклянном диске, который термически скрепляли с другим диском. Размеры канала: глубина 95 мкм, ширина 250 мкм, длина 35,3 мм. Питающая смесь вводится из резервуара в середину диска с помощью трубок (внутренний диаметр 150 мкм). В ходе работы диск вращается с частотой 5000 об/мин. Вывод продуктов осуществляется через края диска в два резервуара по трубкам (диаметр 50 мкм). Работоспособность устройства была проверена на эквимольной смеси 2-метил-2-бутена и 2,2-диметилбутана. Устройство работает как стриппинговая колонна с соотношением дистиллят/куб от 1,4 до 7,7 при расходе потока питающей смеси 0,17 см³/с. ВЭТТ контактного канала 5,3 мм. Разработчики этого устройства отмечают, что для использования колонки в режиме непрерывного питания требуются контактные кольца для транспорта жидкости во вращающуюся колонку.

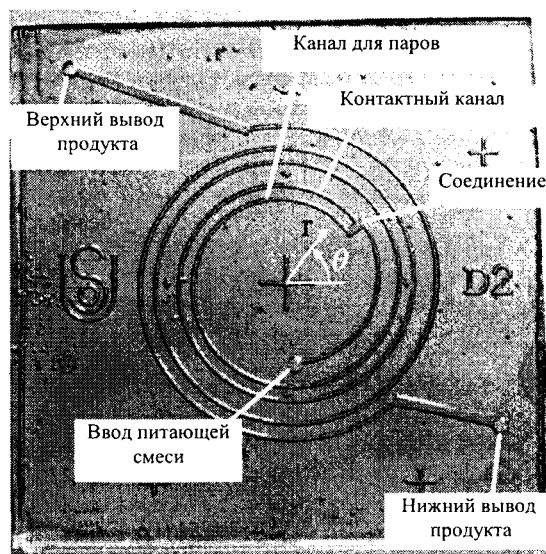


Рис. 10. Микродистилляционная колонка с вращающейся спиралью [28]

Микродистилляционные противоточные устройства

Авторы устройства	N/ВЭТТ, м	Производительность, моль/с	τ, с	Форма исполнения
Seok D.R., Hwang S.-T. [8]	—/0,06—0,16	0,013—0,1	—	Нагреваемая трубка
Fink H., Hampe M.J. [11]	2,5/0,016	—	540	Коллиматор
TeGrotenhuis W.E., Stenkamp V.S. [14]	—/0,018	1,5·10 ⁻⁴	—	Плоский канал
Cypes S. e. a. [17]	—	(0,7—32)·10 ⁻⁴	1—25	Стриппинговая колонка
Tonkovich A.L. e. a. [18]	—/0,021	—	—	Падающая пленка
Sundberg A.T. e. a. [21—26]	18/0,016 5/0,058	Полная флегма 6,3·10 ⁻⁵	180	Плата
Ziogas A. e. a. [27]	12/0,008	—	—	Плата
MacInnes J.M. e. a. [28]	6,7/0,053	2,7·10 ⁻⁵	0,13	Стриппинговая колонка

Обобщенные данные по противоточным микродистилляционным устройствам представлены в табл. 2. Отметим, что поскольку некоторые конструкционные решения опубликованы в патентах, информация о них малодоступна. Кроме того, поскольку дистилляционные колонки могут работать с разными параметрами (массовые потоки, диапазоны флегмы), сравнивать их эффективности (ВЭТТ) достаточно трудно.

Микродистилляционные колонки конструкции [8], [11] и [28] наименее пригодны для широкого применения. Круглые формы [8] трудно масштабировать без ущерба для скорости массопередачи путем диффузии. Для колонок коллиматорного типа [11] возможны проблемы неустойчивости, связанные с регулированием рабочей температуры. Колонку с вращающейся спиралью с более чем одним входом и выходом жидкости трудно соединить с внешними трубопроводами [28].

Колонка Сундберга и др. [21—26] предназначена в основном для исследовательских целей, поскольку ее производительность не достаточна для работы в промышленном масштабе. Стриппинговая колонка [17] перспективна и имеет шанс быть использованной в промышленности. Устройства [14] и [18] в принципе пригодны для промышленной дистилляции.

Заключение

Микродистилляционные колонны обеспечивают эффективное разделение с коротким временем пребывания жидкости в нагретой зоне. Однако существует еще ряд проблем — от концентрационных флуктуаций, вызываемых неустойчивостью температуры, до необходимости регулирования перепада давления в капиллярах. Регулирование флегмового числа и скорости потока продукта обычно осуществляется путем варьирования температурного профиля. Однако управление через температурный профиль может оказаться недостаточным для обеспечения управления дистилляционным устройством в целом. Необходима разработка более простого метода регулирования флегмового числа. Ра-

ботоспособный метод управления флегмой имеет решающее значение для получения стабильной концентрации продукта и для расширения рабочего окна.

Методы изготовления и материалы, используемые в одноступенчатых одностадийных контактных устройствах, схожи с применяемыми для микрореакторов. Конструкционный материал — обычно стекло или кремний, каналы изготавливают методами травления. В противоточных дистилляционных устройствах в качестве материала стенок применяется в основном сталь. Каналы изготавливаются либо механическими методами, либо путем травления.

Принцип работы всех одноступенчатых прямоточных устройств одинаков. Паровая фаза создается подогревом или с помощью газа-носителя внутри длинного извилистого канала. После контактного канала фазы разделяются и пар конденсируется. Успешность метода зависит от того, насколько хорошо достигается разделение фаз. Для разделения фаз используются либо капиллярные структуры, либо мембраны.

В большинстве работающих конструкций противоточных колонок непрерывной ректификации используются пористые материалы, усиливающие поток жидкости. Силы гравитации внутри микроканалов слишком слабы, и предпочтительны структуры с действием капиллярных сил. Кроме того, разделение фаз играет традиционно такую же важную роль в противоточных устройствах, как и в прямоточных, особенно в конструкциях с повторяющимися секциями дистилляции.

* * *

Авторы статьи выражают благодарность Финскому агентству фондов по технологиям и инновациям за финансовую поддержку. А.Т. Сундберг признателен за поддержку фонду «Фортум».

ЛИТЕРАТУРА

1. Boyd D.A., Adleman J.R., Goodwin D.G., Psaltis D. Anal. Chem., 2008, v. 80, p. 2452—2456.

2. Cypes S., Bergh S.H., Hajduk D. Microscale Flash Separation of Fluid Mixtures, WO 2007/033335 A1.
3. Hartman R.L., Sahoo H.R., Yen B.C., Jensen K.F. Lab. Chip, 2009, v. 9, p. 1843–1849.
4. Hartman R.L., Naber J.R., Buchwald S.L., Jensen K.F. Angew. Chem. Int. Ed., 2010, v. 49, p. 899–903.
5. Hibara A., Toshin K., Tsukahara T., Mawatari K., Kitamori T. Chem. Lett., 2008, v. 37, p. 1064–1065.
6. Sotowa K.-I., Kusakabe K. Development of Micro Distillation Device, 4th ECCE Conf., 2003.
7. Sotowa K.-I., Kusakabe K. Microchannels for use in Distillation Devices, IMRET-7, 2003.
8. Wootton R.C.R., deMello A.J. Chem. Commun., 2004, p. 266–267.
9. Seok D.R., Hwang S-T. AIChE J., 1985, v. 12, № 31, p. 2059–2065.
10. Ramirez-González E.A., Martinez C., Alvarez J. Ing. Eng. Chem. Res., 1992, v. 31, p. 901–908.
11. Tschernjaew J., Kenig E., Górak A. Chem. Ing. Tech., 1996, v. 68, p. 272–275.
12. Fink H., Hampe M.J. IMRET-3, 2000, p. 664–673.
13. Kockmann N. Transport Phenomena in Micro Process Engineering, Springer-verlag GmbH, 2007.
14. US Patent № 6875247B2, 2005.
15. Zheng F., Stenkamp V.S., TeGrotenhuis W.E., Huang X., King D.L. Microchannel distillation of JP-8 jet fuel for sulfur content reduction. AIChE annual meeting, 2006, Nov. 12–17.
16. Huang X., King D.A., Zheng F., Stenkamp V.S., TeGrotenhuis W.E., Roberts B.Q., King D.L. Catal. Today, 2008, v. 136, p. 291–300.
17. Cypes S.H., Engstrom J.R. Chem. Eng. J., 2004, v. 101, p. 49–56.
18. US Patent № 7610775 B2, 2009.
19. Fanelli M., Arora R., Glass R., Litt D., Silva L., Tonkovich A.L., Weidert D. Comp. Meth. Multiph. Flow, 2007, v. 56, p. 205–213.
20. Fanelli M., Arora R., Tonkovich A.L., Silva L., Marco J., Weider D., Neagle P., Hickey T., Fitzgerald S. Distillation of Ethylene in High Flux Microchannels, IMRET-10, New Orleans, USA.
21. Sundberg A. The use of micro technology in process development. Masters's thesis. Helsinki University of Technology, 2007.
22. Sundberg A., Uusi-Kyyny P., Alopaeus V. Chem. Eng. Res. Des., 2009, v. 87, p. 705–710.
23. Sundberg A., Uusi-Kyyny, Jakobsson K.P., Alopaeus V. AIChE annual meeting, November 8–13, 2009, Nashville, USA.
24. Sundberg A., Uusi-Kyyny, Jakobsson K.P., Alopaeus V. Development and modeling of micro distillation column. 9th Conf. «Distillation & Absorption», 12–15 Sept. 2010, Eindhoven, The Netherlands.
25. Manninen M., Sundberg A.T., Piili H., Salminen A. Int. Congr. on Applications of Lasers & Electro-Optics, Sept. 26–30, 2010, Anaheim, USA.
26. Manninen M. Design and manufacture of a microdistillation column. Masters's thesis. Lappeenranta University of Technology, 2009.
27. Patent WO 2009/080591, 2009.
28. MacInnes J.M., Ortiz-Osorio J., Jordan P.J., Priestman G.H., Allen R.W.K. Chem. Eng. J., 2010, v. 159, p. 159–169.

ABSTRACTS

Microfluidic chips for biological and medical researches. A. A. Evstrapov. Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva), 2011, v. 55, № 2.

The advantages of devices on a microchip platform are discussed in comparison with traditional systems. Stages and processes of creation of microfluidic chips are considered. The basic technologies of formation micro- and nanostructures on a substrate from various materials and technique of sealing of microchips are introduced. The special attention is given to microfluidic chips for separation and the analysis of nucleic acids and proteins, and also to microchips for PCR. Examples of the integrated systems on the basis of microfluidic technique are considered. A data on the commercialization of devices based on microfluidic chips are presented.

Thermal-Lens Detection in Microfluidic Chips. V. S. Dudko, A. P. Smirnova, M. A. Proskurnin, A. Hibara, T. Kitamori. Ross.

Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva), 2011, v. 55, № 2.

The main possibilities of thermal-lens microscopy as a highly sensitive method of molecular absorption spectroscopy in chemical analysis using microfluidic chips are shown.

Microchip-based systems for nucleic acids analysis. M. N. Slyadnev. Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva), 2011, v. 55, № 2.

In the review functionalities of microchip-based analytical systems for nucleic acids analysis are highlighted and driving forces for the future progress are analysed. The review shows main advantages of the microchip-based system and discusses up-to-date achievements in this area.

Among major advantages are high speed of analysis, high rates of heating and cooling, low reagents consumption and high potential to integrate several analytical processes in a single microchip device.