

химических, нефтехимических, гальванических производств и в стройиндустрии. Ресурсосбережение-90». — Куйбышев, 1990. — С. 55.

9. Марков В. А. Разделение фаз в тепломассообменных аппаратах: Дис. ... докт. техн. наук.: 05.17.08. — Минск, 1996. — 350 с.

УДК 621.928

В. А. Марков, профессор;
И. М. Плехов, профессор;
Б. М. Шишло, ассистент;
Е. В. Перминов, доцент

СЕПАРАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ

Article adduces the constructive decisions separators of various purpose for division of phases. The designs have found the wide application in industry.

Явление уноса одной фазы потоком другой, возникающее при их взаимодействии в гетерогенных системах (Г–Ж, П–Ж, Г–Т), оказывает негативное влияние не только на экологическое состояние окружающей среды, но и на эффективность протекания технологических процессов, так как требуются дополнительные материальные и энергетические затраты на проведение процесса, обусловленные снижением его движущей силы и выбросом исходных, промежуточных или конечных продуктов в окружающую среду, подлежащих утилизации.

С целью устранения уноса в инженерной практике идут по пути снижения скоростей потоков газа или пара, что неизбежно приводит к уменьшению производительности установок, или применения специально встроенных и выносных сепарационных устройств, обеспечивающих разделение фаз. Однако многообразие известных конструктивных решений [1–6] еще не всегда приводит к положительным результатам при их практическом использовании, поскольку даже при условии рациональной технологии и правильной эксплуатации сепарационных устройств последние должны быть выбраны для каждого конкретного процесса с учетом особенностей химико-физических свойств отделяемой от газового потока дисперсной фазы, условий сепарации и требуемой эффективности разделения. Например, анализ показывает, что многие конструкции сепарационных устройств не могут быть использованы в тепломассообменных аппаратах в сочетании

с контактными устройствами для проведения основных процессов при различных газожидкостных нагрузках, при интенсификации явлений тепло- и массопереноса и повышении производительности аппаратов по газовой фазе, т. к. они малоэффективны при отделении капель вязких и кристаллизующихся растворов, а также не пригодны для очистки низконапорных газовых потоков большой производительности. Кроме того, причинами неудовлетворительной работы устройств являются либо «зарастание» узла сепарации кристаллизующимися веществами, либо недостаточная эффективность разделения фаз после их взаимодействия и высокое гидравлическое сопротивление конструкций, а иногда и громоздкость установок. Таким образом, требования, предъявляемые к качеству очистки газопаровых потоков от взвешенных частиц, а также условия, при которых осуществляется процесс, хотя и привели к разработке и созданию множества конструкций сепараторов различного типа, однако для многих процессов проблема устранения или снижения уноса до минимальных значений до сих пор остается нерешенной. К тому же для некоторых способов и конструкций сепараторов до настоящего времени отсутствуют методы инженерного расчета и рекомендации по их применению.

Значительные успехи по созданию новых сепарационных устройств достигнуты в Белорусском государственном технологическом университете на кафедрах «Процессы и аппараты химических производств» и «Машины и аппараты химических и силикатных производств». Здесь на основании научного обоснования эффективных способов разделения фаз разработаны, внедрены в производство и ведутся дальнейшие исследования конструкций сепараторов, разделение фаз в которых происходит под действием инерционных сил (циклонные, инерционные, роторные).

Эти конструкции, как показал опыт их эксплуатации, более эффективны по сравнению с другими и позволяют до минимума снизить величину уноса.

Рассматривая инерционные конструкции, следует отметить, что циклонные сепараторы чаще других аппаратов применяются для отделения капельной жидкости и твердых частиц и характеризуются наибольшим разнообразием как конструкций, так и их комбинаций с различными вспомогательными эффектами. К этой группе относятся тангенциальные и осевые циклоны с противоточным (реверсивным) и прямоточным (прямым) потоками. Последние, в свою очередь, могут

быть с нисходящим, восходящим и горизонтальным движением фаз [3-13].

Целесообразность применения того или иного типа зависит от требований, предъявляемых к качеству очистки, а также условий, при которых проводится процесс. Например, в прямоточных циклонах устраняется соприкосновение осевой области закрученного потока при выходе из аппарата с отделенными примесями. Это позволяет сохранить и даже увеличить степень улавливания при повышении скорости газового потока и значительно повысить производительность этих аппаратов по сравнению с противоточными.

Оценивая работу прямоточных конструкций с нисходящим газовым потоком и восходящим, на наш взгляд, предпочтительнее сепараторы с восходящим прямотоком. Это связано с тем, что при использовании последних появляется возможность предварительного отделения крупных частиц за счет инерционных и гравитационных сил. В сепаратор поступают только мелкие частицы и, следовательно, сепарационное устройство работает при меньшей концентрации взвешенной фазы. Кроме того, использование прямоточных циклонов элементного типа, включающих несколько мультициклонов (элементов), дает возможность еще больше повысить производительность аппаратов по газовой фазе.

На рисунках схематично представлены некоторые сепараторы циклонного типа [7-14], разработанные нами и предназначенные для отделения капельной жидкости (рис. 1) и твердых частиц от газового потока (рис. 2).

Сепарационные устройства по рис. 1, а выполнены в виде цилиндрических патрубков 1, в нижней части которых размещены завихрители 2. Для оттока жидкости предусмотрены отверстия 4 или отбойный колпачок 3. Патрубки крепятся на тарелке, установленной в корпусе аппарата. Газожидкостный поток, проходя завихритель, приобретает вращательное движение. Капли жидкости отбрасываются центробежными силами на стенку патрубка и образуют пленку, которая газовым потоком транспортируется до отверстий или колпачка, где происходит ее отделение.

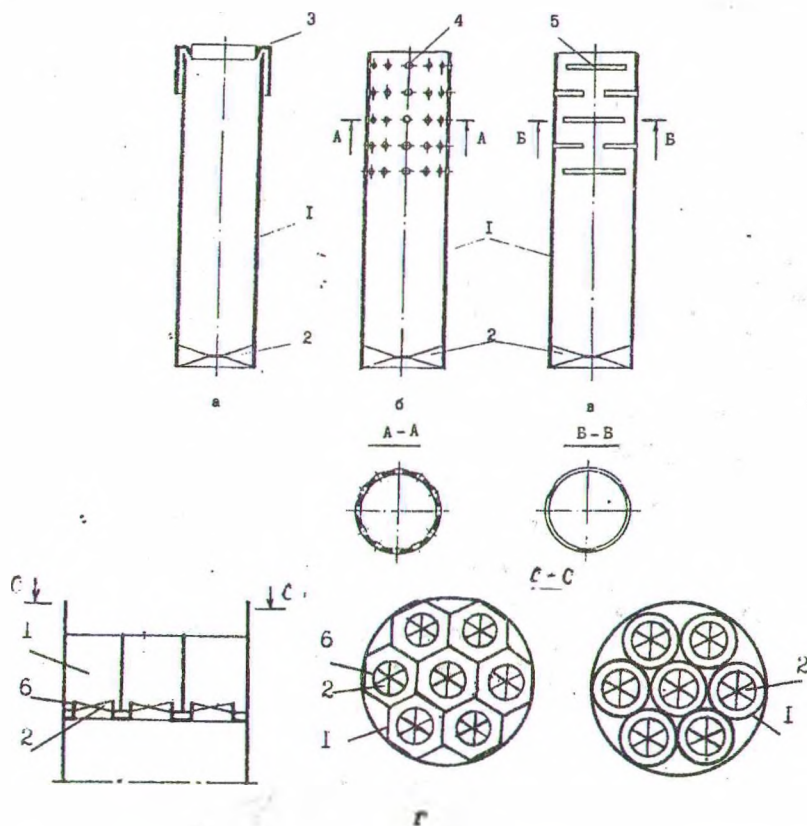


Рис. 1. Центробежные сепарационные устройства: а – с отбойным колпачком; б – с круглыми отверстиями; в – со щелями; г – с противоточным отводом жидкости; 1 – цилиндрический (или шестигранный) патрубок; 2 – завихритель; 3 – отбойный колпачок; 4 – отверстия; 5 – щели; 6 – стакан

Проведенные исследования по изучению влияния конструктивных характеристик и газожидкостных нагрузок на эффективность сепарации (η_*) на системах вода–воздух и водные растворы глицерина–воздух [8] показали, что эффективность сепарации (отношение количества отсепарированной жидкости к общему, поступающему в элемент) выше для узла сепарации, выполненного в виде щелей по сравнению с круглыми отверстиями (при одинаковой их суммарной площади); повышение нагрузок по жидкости, так же как и увеличение угла наклона лопастей завихрителя (по отношению к горизонтальной плоскости), приводит к снижению η_* . Увеличение вязкости жидкости ведет к существенному снижению эффективности сепарации. Данные конструкции обладают повышенным гидравлическим сопротивлением

вследствие работы их в режиме прямоточного движения газового потока и пленки жидкости, при котором осуществляется разделение фаз. Например, при скорости газа в элементе 25 м/с с завихрителем, угол наклона лопастей которого равен 30° , оно достигает ~ 2000 Па. Следует учесть и то обстоятельство, что доля свободного сечения для прохода газового потока (отношение суммарной площади сечения элементов к площади сечения аппарата) при установке этих элементов на полотно тарелки составляет $\sim 25\%$. При уплотнении элементов на тарелке происходит снижение эффективности сепарации из-за появления вторичного уноса.

Для устранения этих нежелательных явлений были разработаны сепарационные элементы, выполненные в виде коротких стаканов 6 с завихрителями 2 в верхней части (рис. 1, г) и патрубков 1, соосно установленных с зазором по отношению к первым [8]. Патрубки могут быть круглой формы и многогранными (например, шестигранными), позволяющие достигнуть большей доли свободного сечения для прохода газового потока (рис. 1, г). Принцип работы устройств следующий. Капли жидкости после завихрителя 2 перемещаются в поле центробежных сил к стенке патрубка 1 и после достижения поверхности сливаются в жидкую пленку, которая стекает под действием сил тяжести на тарелку и отводится из аппарата. Такое конструктивное исполнение позволило:

- устранить необходимость в достижении высоких скоростей газа в элементах для сепарации и транспортировки жидкости;
- увеличить долю свободного сечения для прохода газового потока, так как расположение элементов друг относительно друга на тарелке не влияет на эффективность сепарации и их можно располагать вплотную.

Следовательно, процесс сепарации в конструкциях данного типа будет проходить при меньших потерях давления по сравнению с прямоточными элементами. Кроме того, как показали экспериментальные исследования, при оптимальных режимах работы этих конструкций эффективность сепарации достигает $\sim 100\%$ при плотностях орошения до $q \cong 140,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Для очистки потоков газа от твердых частиц и капельной жидкости были разработаны [8,13] горизонтальные прямоточные циклонные сепараторы (рис. 2), выполненные в виде цилиндрических патрубков 1 с завихрителями различного исполнения (для конструкций а, б – тангенциальным 2, для в – коническим 3 и для

г – осевым 4). На входе газового потока в корпус аппарата 5 предусмотрены также завихрители аналогичной конструкции, на выходе – патрубки 6 меньшего диаметра.

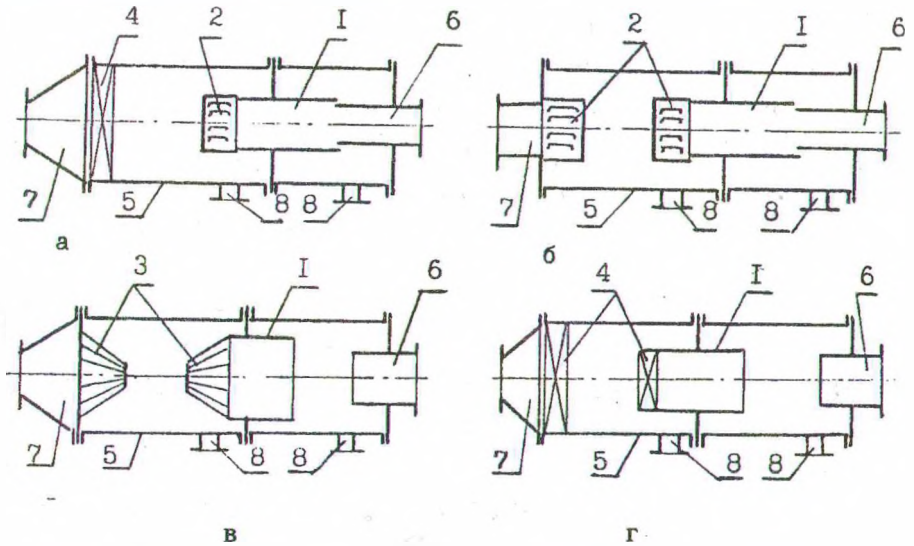


Рис. 2. Циклонные сепараторы: а – с осевым и тангенциальным завихрителями; б – с тангенциальными завихрителями; в – с коническими завихрителями; г – с осевыми завихрителями; 1 – цилиндрический патрубок; 2 – тангенциальный завихритель; 3 – конический завихритель; 4 – осевой завихритель; 5 – корпус; 6 – выходной патрубок; 7 – входной патрубок; 8 – штуцер для отвода твердой фазы

Процесс сепарации происходит следующим образом. Газ, содержащий примеси, через входной патрубок 7 поступает в корпус сепаратора и, благодаря завихрителю, приобретает вращательное движение. Под действием центробежной силы взвешенные частицы отбрасываются на стенку корпуса аппарата и через штуцер 8 отводятся из него. Затем поток, проходя завихритель непосредственно сепарационного элемента, вторично закручивается, в результате чего происходит дальнейшее отделение взвешенных частиц. Таким образом, разделение фаз осуществляется в двух зонах – грубой и тонкой очистки.

Приведенные конструкции исследовались при очистке запыленного воздуха при атмосферном давлении. В качестве твердых примесей использовался песок, поваренная соль, порошки металлов и органических веществ. При этом фракции пыли различной дисперсности (40–80, 80–125, 125–160, 160–200, 200–300 мкм) приготавливались методом просеивания на ситах, а для частиц менее 40 мкм – методом предварительного помола на вибромельнице с последующей сортировкой в воздушном классификаторе. Размеры частиц определялись с

помощью микроскопа. Твердая фаза подавалась в трубопровод на входе в аппарат и диспергировалась сжатым воздухом. Степень запыленности изменялась в пределах $(5-50) \cdot 10^{-3}$ кг/м³, плотность частиц – 1000–2000³ кг/м, скорость газового потока в аппарате – 0,5–6,5 м/с.

Как показали результаты сравнительных исследований, эффективность улавливания пыли для конструкций по рис. 2, а, б выше, чем у других вариантов, и достигает при улавливании твердых частиц диаметром > 50 мкм $\sim 99,9\%$. Заметное возрастание уноса наблюдается в аппаратах с коническими и осевыми завихрителями при скоростях газа, отнесенных к полному сечению аппарата, выше 4,0 м/с.

Параллельно с замером количества уносимой из аппарата твердой фазы определялось гидравлическое сопротивление конструкций и рассчитывался коэффициент сопротивления (ξ). Последний относился к скорости газа на полное сечение аппарата и составлял для аппарата: вариант а – $\xi = 33,25$; б – $\xi = 38,5$; в – $\xi = 35,75$; с – $\xi = 25,6$.

По совокупности численных значений гидравлического сопротивления и эффективности улавливания сепаратор варианта «а» предпочтительнее других конструкций.

Практика эксплуатации рассмотренных выше сепарационных устройств, так же как и известных жалюзийных, насадочных, циклонных и других устройств показала, что их применение нецелесообразно при разделении гетерогенных систем с кристаллизующимися примесями и загрязненными растворами (например, при выпаривании) из-за быстрого засорения (налипания твердых частиц) и забивания каналов.

Для отделения таких примесей на основе экспериментальных исследований и промышленных испытаний различных конструктивных вариантов была создана новая конструкция сепарационного устройства, представляющая собой криволинейные патрубки прямоугольного сечения, развернутые в противоположные стороны (рис. 3, а) и устанавливаемые в сепарационном пространстве над трубной решеткой греющей камеры выпарного аппарата, а также аппарат с применением горизонтальных полок треугольного профиля (рис. 3, б) с уловением жидкости в нижней части [8, 15].

Принцип разделения – инерционный, т.е. сепарация происходит в поле массовых сил, возникающих при изменении направления движения двухфазного потока в канале. При этом капли жидкости, увлекаемые потоком пара из нагревательной камеры для конструкции по рис. 3, а, достигая поверхности стенки верхней образующей канала,

сливаются в сплошную пленку, которая на выходе из канала попадает на внутреннюю поверхность объемного сепаратора и стекает по ней в приемное устройство. Очищенный от капель поток пара, омывая струи жидкой пленки, отводится из сепарационной камеры в конденсатор.

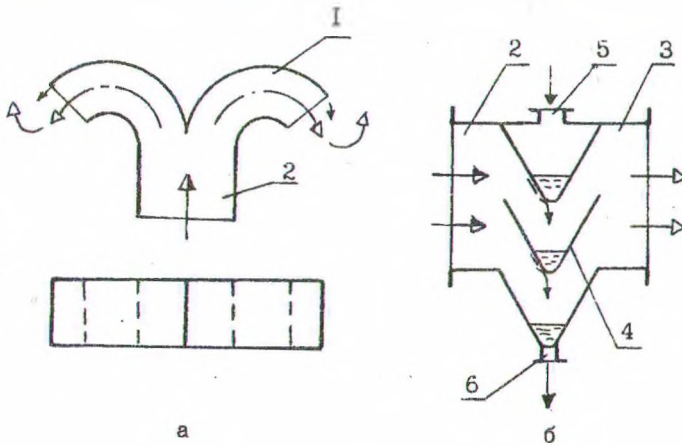


Рис. 3. Инерционные сепарационные устройства: а – с криволинейными каналами; б – с полками; 1 – криволинейные каналы; 2, 3 – патрубки для ввода и вывода смеси; 4 – полки; 5, 6 – штуцера для подвода и отвода жидкости

Для конструкции по рис. 3, б твердые частицы, соприкасаясь с пленкой жидкости, стекающей по стенкам полок треугольного профиля и образующей жидкостную завесу в пространстве между полками, отводятся вместе с жидкостью.

Опытно-промышленные испытания устройств с криволинейными каналами по определению величины уноса жидкости при выпаривании термолабильного и кристаллизующегося раствора в производстве карбамида [8] и лабораторные исследования по улавливанию пыли $NaCl$ и $(CO(NH_3)_2)$ из воздуха конструкцией по рис. 3, б [8,11] показали высокую эффективность (до 99%) и их стабильную работу при низком гидравлическом сопротивлении (в диапазоне изменения скоростей газа от 10 до 30 м/с в криволинейном канале устройства по рис. 3, а – 100–600 Па, а для конструкции по рис. 3, б в диапазоне скоростей на полное сечение аппарата от 2 до 6 м/с оно не превышало 50–100 Па).

Следует отметить, что по результатам комплексных исследований для всех приведенных выше конструкций разработаны методы их инженерного расчета.

Практическая реализация конструкций сепараторов. Разработанные сепарационные устройства по рис. 1, а нашли широкое применение в газосепараторах для отделения конденсата от природного газа и были приняты к серийному изготовлению. Газосепараторы внедрены на Пролетарском, Вуктыльском и др. газовых промыслах.

Эти конструкции использованы также для отделения капельного циклогексанола от отходящей азото-водородной смеси стадии гидрирования бензола на Гродненском и Северодонецком ПО «Азот».

Кроме того, эти устройства были использованы в массообменных аппаратах как для разделения фаз после их контакта, так и для взаимодействия газа с жидкостью (абсорбции). Проведенные промышленные испытания массообменного аппарата, включающего барботажные тарелки в сочетании с сепарационными (элементного типа), при осушке природного газа на газовом промысле УКПГ-7 месторождения «Медвежье» показали высокую эффективность массопереноса и разделения фаз после их контакта. Результатом успешных испытаний явилась разработка ЦКБН проектной документации на промышленные аппараты производительностью по газовой фазе 3–5 млн.м³/сутки, которые были приняты к серийному производству как основные варианты контакторов для осушки природного газа с присвоением им высшей категории качества.

Испытания устройств с криволинейными каналами были проведены в цехе карбамид-2 Гродненского ПО «Азот» на второй ступени ВВУ с целью реконструкции узла сепарации и устранения основных недостатков: «зарастания» кристаллами карбамида и продуктами их разложения жалюзийных сепараторов, приводящего к увеличению абсолютного давления в зоне испарителя и температуры кипения раствора; повышенного содержания влаги и биурета в готовом продукте; периодических остановок всего цеха для промывки и очистки жалюзийных сепараторов.

Результаты испытаний показали, что после установки нового сепарационного устройства взамен жалюзийного снизились капельный унос карбамида, влажность продукта и давление в аппарате. Кроме того, была достигнута стабилизация работы стадии выпаривания в целом. С этой же целью устройство было внедрено на Северодонецком и Днепродзержинском ПО «Азот».

Экономический эффект от внедрения разработанных конструкций представлен в таблице (эффекты от внедрения разработок приводятся в ценах до 1990 года).

Таблица

Тип сепаратора и его назначение	Место внедрения	Экономический эффект	Примечание
<u>Элементного типа</u>			
– очистка природного газа от конденсата	газовые промыслы	более 1,0 млн.руб.	серийное изготовление
– сепарация и контакт фаз в аппаратах для осушки природного газа	газовые промыслы	более 10 млн.руб.	серийное изготовление
– сепараторы капельного циклогексана из отходящей АВС	ПО «Азот» г. Гродно, г. Северодонецк	48,3 тыс.руб./год	
<u>С криволинейными каналами</u>			
– сепарация капель вязких и кристаллизующихся растворов	ПО «Азот» г. Гродно, г. Днепродзержинск, г. Северодонецк	290,0 тыс.руб./год	

ЛИТЕРАТУРА

1. Коузов П. А., Нальгин А. Д., Скрыбин Г. М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия, 1982. – 256 с.
2. Бретшнайдер В., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль: Пер. с англ. / Под ред. А. Ф. Туболкина. – Л.: Химия, 1989. – 288 с.
3. Старк С. В. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. – М.: Металлургия, 1977. – 328 с.
4. Пирумов А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. – М.: Стройиздат, 1961. – 122 с.
5. Родионов А. И., Клушин В. Н., Торочешников Н. С. Техника защиты окружающей среды. – М.: Химия, 1989, – 512 с.
6. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю. Подготовка промышленных газов к очистке. – М.: Химия, 1975. – 216 с.
7. Ершов А. И., Плехов И. М. Новые конструкции сепараторов для очистки промышленных газов. – Мн.: БелНИИТИ, 1973. – 35 с.
8. Марков В. А. Разделение фаз в теплообменных аппаратах: Дис. ... докт.техн.наук.: 05.17.08. – Мн., 1996. – 350 с.

9. А.с. 572273 СССР, М.Кл. В 01 D 3/26. Массообменный аппарат для проведения процессов в системах газ(пар)-жидкость / В. А. Марков, И. М. Плехов, П. И. Ромашев, А. П. Елеференко (СССР). – 2106393/26; Заявлено 17.02.75; Оpubл. 15.09.77, Бюл. № 34. – 3 с.
10. Марков В. А., Плехов И. М., Новосельская Л. В. Прямоточные ступени контакта для взаимодействия газа и жидкости // Тепло- и массообмен в двухфазных системах при фазовых и химических превращениях. – Мн., 1976. – С. 112-117.
11. Левданский Э. И., Плехов И. М., Ершов А. И. Центробежные сепараторы. – М.: НИИТЭХИМ, 1983. – № 2. – С. 57.
12. Перминов Е. В. Исследование сепараторов для улавливания пыли и жидкости: Дисс. ... канд.техн.наук: 05.17.08. – Мн., 1979. –211 с.
13. Плехов И. М., Левданский Э. И., Карпович А. И. Прямоточно-центробежные сепараторы для комплексной очистки газов // Охрана труда и техника безопасности, очистка сточных вод и отходящих газов в химической промышленности: Обзор.информ. / М.: НИИТЭХИМ, 1974. – Вып. 8.-24 с.
14. Левданский Э. И., Поддыленникова З. И., Карпович А. И. Применение центробежных сепараторов в производстве синтетического аммиака // Азотная промышленность. – М., 1974. – Вып. 3. – С. 37-39.
15. Марков В. А., Ершов А. И., Шишло Б. М. Расчет инерционного аппарата для разделения газо(паро)жидкостных систем // Теор. основы хим. технологии. – 1992. – Т. 36. – № 6. – С. 903-907.