

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

АППАРАТУРА ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 18.00.00 Химические технологии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям и направлениям подготовки УГСН 18.00.00 Химические технологии

Москва
2016

УДК 66.021.3+66.021.1
ББК 35.11:35.115
А76

Авторы: Е. А. Дмитриев, Р. Б. Комляшев, Е. П. Моргунова,
А. М. Трушин, А. В. Вешняков, Л. С. Сальникова

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор Института общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова Российской Академии Наук
Н. Н. Кулов

Доктор технических наук, профессор Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева
А. В. Беспалов

Аппаратура процессов разделения гомогенных и гетерогенных систем: учеб. пособие/ Е. А. Дмитриев, Р. Б. Комляшев, Е. П. Моргунова, А. М. Трушин, А. В. Вешняков, Л. С. Сальникова. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2016. – 104 с.
ISBN 978-5-7237-1404-5

Рассматриваются принципы работы и конструкции основных типов аппаратов, для разделения гомогенных и гетерогенных систем. Представлено аппаратное оформление процессов разделения гомогенных систем: перегонки, ректификации, абсорбции, экстракции, адсорбции, сушки; процессов разделения жидких и газовых гетерогенных систем: фильтрования, осаждения, очистки газов от пыли. Приведены принципиальные схемы и иллюстрации внешнего вида аппаратов. Указаны принцип работы, области применения, достоинства и недостатки аппаратов.

Предназначено для студентов химико-технологических вузов.

УДК 66.021.3+66.021.1
ББК 35.11:35.115

ISBN 978-5-7237-1404-5

© Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Процессы разделения гомогенных и гетерогенных систем широко используются в промышленности. На химических предприятиях до 90 % капитальных и энергетических затрат связано с этими процессами. Процессы разделения востребованы на таких ключевых стадиях производства, как подготовка сырья, переработка продуктов химической реакции (отделение основных продуктов от побочных и выделение непрореагировавшего сырья для направления на рецикл), утилизация отходов. Аппаратура процессов разделения зачастую весьма громоздка, а сами процессы обычно энергоёмки, что особенно характерно для процессов разделения гомогенных систем. Разделение гетерогенных систем менее энергозатратно.

Процессы разделения гомогенных систем относятся к массообменным, в этих процессах основную роль играет перенос вещества из одной фазы в другую. Движущей силой массообмена является разность химических потенциалов. Движущая сила характеризует степень отклонения системы от состояния динамического равновесия. В пределах фазы вещество переносится от точки с большей концентрацией к точке с меньшей концентрацией. Поэтому обычно в инженерных расчётах движущую силу основных массообменных процессов приближённо выражают через разность концентраций.

Гомогенные системы, которые на производстве подвергают разделению, очистке или концентрированию: смеси взаимно растворимых жидкостей; смеси газов и паров; растворы солей, кислот, щелочей и др. В данном пособии подробно рассмотрены крупнотоннажные процессы разделения гомогенных систем: абсорбция, перегонка и ректификация. Эти процессы связаны с перераспределением компонентов между жидкой и газовой (паровой) фазами.

Разделение гетерогенных систем относится к гидромеханическим процессам, в которых сепарация осуществляется благодаря разнонаправленному движению дисперсной фазы и дисперсионной среды под действием внешних сил (силы тяжести, силы гидростатического давления, силы инерции, электростатической силы и др.). Крупнотоннажными процессами разделения гетерогенных систем на химических предприятиях являются процессы разделения суспензий, они же – одни из самых сложных для разделения гетерогенных систем. Существенную роль в химической технологии играют также процессы очистки газов от пыли.

1. АППАРАТУРА РАЗДЕЛЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ СИСТЕМ

Разделение гомогенных систем осуществляют путём перехода одного из компонентов разделяемой системы в другую фазу. Контактующие фазы взаимно нерастворимы и образуют поверхность раздела фаз. Каждая из контактирующих фаз может находиться в одном из трёх агрегатных состояний: газовом (паровом), жидком или твёрдом. Многообразие комбинаций двух фаз в различных их агрегатных состояниях приводит к большому количеству процессов разделения гомогенных систем (рис. 1).

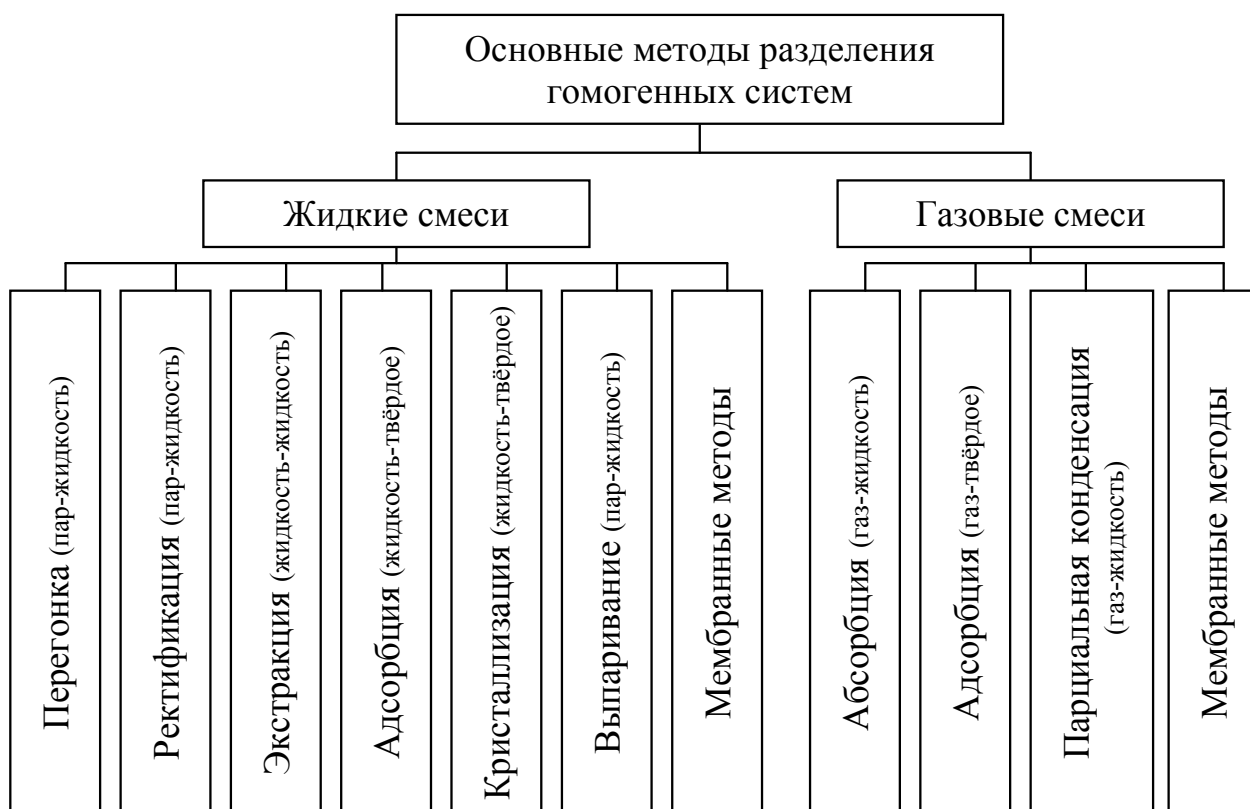


Рис. 1. Перечень основных методов разделения гомогенных систем

Процесс перехода вещества (или нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия называют **массопередачей**. В отличие от теплопередачи, которая обычно осуществляется через стенку, массопередача проходит при непосредственном соприкосновении фаз. Исключение составляют мембранные процессы, где массопередача осуществляется через мембрану – перегородку, обладающую избирательной проницаемостью.

Производительность массообменных аппаратов по разделяемым веществам определяется в первую очередь площадью поверхности контакта фаз. В

процессах с подвижной поверхностью контакта фаз, к которым относятся процессы в двухфазных системах газ (пар)-жидкость и жидкость-жидкость, площадь поверхности контакта фаз можно увеличить путём механического воздействия на фазы. Для этой цели используют **контактные устройства**, в которых происходит диспергирование (дробление) одной из фаз, приводящее к увеличению поверхности массопередачи. Классификация массообменных аппаратов по типу контактных устройств представлена на рис. 2. Массообменные аппараты, применяемые в процессах с подвижной поверхностью контакта фаз, в большинстве случаев представляют собой цилиндрические колонны.

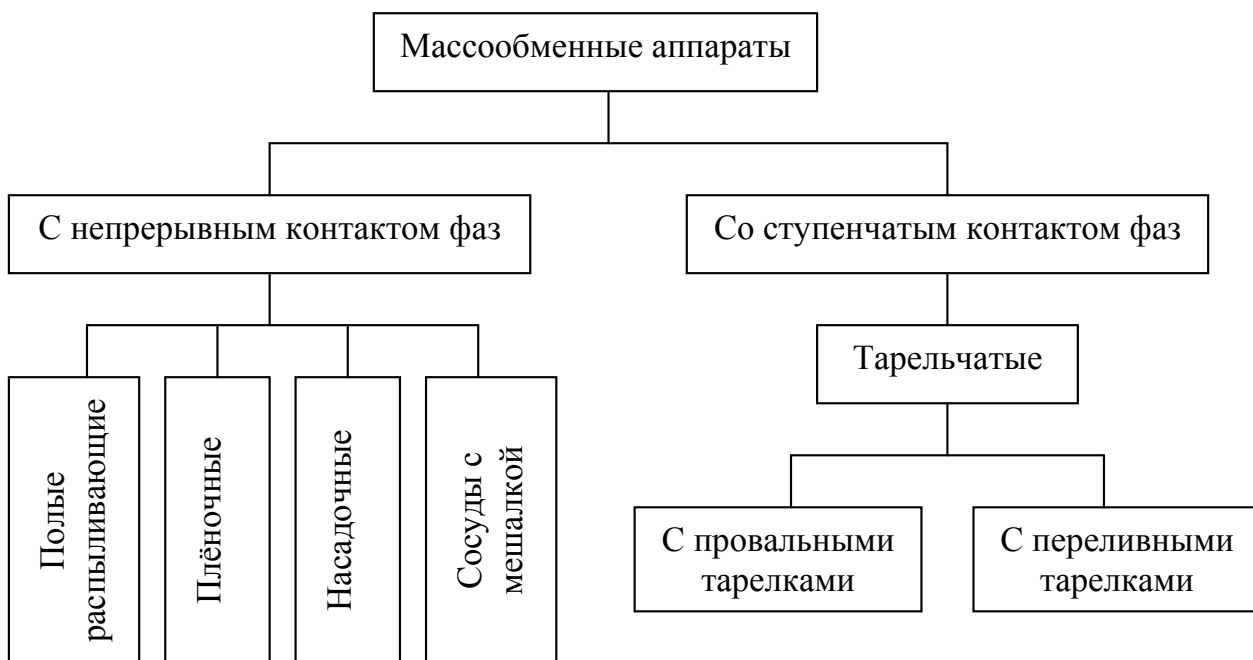


Рис. 2. Классификация массообменных аппаратов по типу и способу контакта фаз

В процессах с неподвижной поверхностью контакта фаз, к которым относятся процессы в двухфазных системах жидкость-твёрдое и газ (пар)-твёрдое, непосредственное влияние на площадь поверхности контакта фаз в ходе процесса невозможно. Твёрдая фаза в таких процессах (адсорбции, сушки и т.п.) выполнена обычно в виде гранул. В этом случае для интенсификации процесса часто применяют псевдоожижение слоя гранул, путём пропускания через него восходящего потока жидкой или газовой фазы.

В мембранных процессах повышение производительности достигается развитием поверхности мембран в единице объёма.

1.1. Насадочные контактные устройства

Насадочные колонны являются одним из самых распространённых видов массообменных аппаратов. Насадкой называют слой из контактных элементов определённой формы, обеспечивающей наличие в слое насадки каналов, по которым движутся участвующие в массообмене фазы. Одна из фаз при движении по насадке растекается по поверхности контактных элементов, благодаря этому увеличивается площадь межфазной поверхности. В насадочных колоннах плёнка жидкости стекает по каждому элементу насадки, затем разрушается и вновь образуется на следующем элементе. Таким образом, насадочная колонна работает в плёночном режиме.

Основными характеристиками насадки являются **порозность** и **удельная поверхность**. Порозность насадки ε – это доля свободного объёма в общем объёме насадки. Чем выше порозность насадки, тем легче фазам двигаться через насадку, то есть ниже её гидравлическое сопротивление, что снижает энергетические затраты на движение фаз. Удельная поверхность насадки a представляет собой суммарную площадь поверхности элементов насадки, отнесённую к объёму, занятому насадкой. Чем выше удельная поверхность насадки, тем больше площадь поверхности контакта фаз в этой насадке и, следовательно, тем эффективнее насадка. Следует учитывать, что площадь поверхности насадки не тождественна площади поверхности контакта фаз. С одной стороны, не вся поверхность насадки трансформируется в межфазную поверхность вследствие неполной смачиваемости поверхности насадки. Здесь под смачиваемостью насадки подразумевается распределение одной из фаз по поверхности насадки в виде плёнки. С другой стороны, межфазная поверхность может образовываться не только плёнкой на поверхности насадки, но и оторванными от поверхности насадки каплями и струями. Порозность и удельная поверхность насадки непосредственно связаны с формой элементов насадки. В общем случае, чем сложнее форма элементов насадки, тем выше эти характеристики. Однако следует учитывать, что сложность формы элементов насадки не должна ухудшать её смачиваемость, а также, значительно повышать стоимость изготовления. Наиболее распространённые виды элементов насадки различной формы представлены на рис. 3–11.

В зависимости от способа укладки элементов насадки в аппарат различают **упорядоченные** (регулярные) и **неупорядоченные** (нерегулярные) насадки.

Упорядоченная насадка – это насадка, элементы которой правильно уложены, что обеспечивает их лучшую смачиваемость. К регулярным относятся хордовая, кольцевая и блочная насадки. Слой насадки является неупорядоченным, если элементы насадки расположены хаотично, что получается при загрузке насадки в аппарат внавал. Такая насадка при прочих равных условиях обладает меньшей удельной поверхностью, чем упорядоченная, но её проще загружать. Нерегулярные насадки бывают кусковые, кольцевые, седлообразные, пропеллерные и витые (проволочные).

Кольцевые насадки

Элементы кольцевой насадки представляют собой цилиндрические тонкостенные кольца, наружный диаметр которых обычно равен высоте кольца. Диаметр насадочных колец изменяется от 10 до 150 мм (кольца меньшего диаметра почти не находят применения в промышленной практике). Насадочные кольца изготавливают чаще всего из керамики или фарфора, в некоторых случаях из углеграфитовых масс. Применяют также тонкостенные металлические кольца из стали или других металлов. Стальные кольца изготавливают путем разрезания стандартных труб или скручиванием стальных листов, такая насадка обладает значительной массой. Перспективно применение колец из пластических масс.

Кольца Рашига (рис. 3) представляют собой простые кольца без дополнительных устройств. Эти кольца наиболее дешевы и просты в изготовлении; они хорошо зарекомендовали себя на практике и являются самым распространённым видом насадок. Насадки из колец Рашига изготавливают как упорядоченными (при диаметре колец от 50 мм более), так и неупорядоченными (при диаметре от 10 до 50 мм). Способы укладки колец Рашига представлены на рис. 4.

Кольца Палля (рис. 5) предназначены в основном для засыпки внавал, и, по литературным данным, обладают меньшим гидравлическим сопротивлением и несколько большей эффективностью по сравнению с кольцами Рашига. Они представляют собой кольца с вырезами и внутренними выступами, такие вырезы обеспечивают лучшую смачиваемость засыпанной внавал насадки.

Находят применение и некоторые другие виды кольцевых насадок. Для увеличения поверхности применяют кольца с перегородкой (кольца Лессинга)

(рис. 6, а), кольца с крестообразной перегородкой (рис. 6, б) и спиральные кольца, имеющие внутри одну, две и три спирали (рис. 6, в). Эти кольца сложны в изготовлении, дороги и обладают малым свободным объемом.

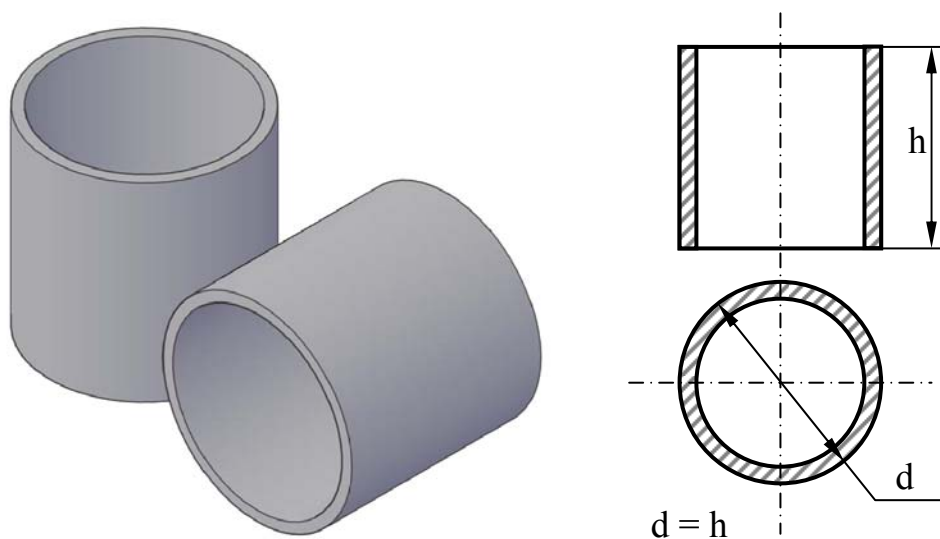


Рис. 3. Кольца Рашига

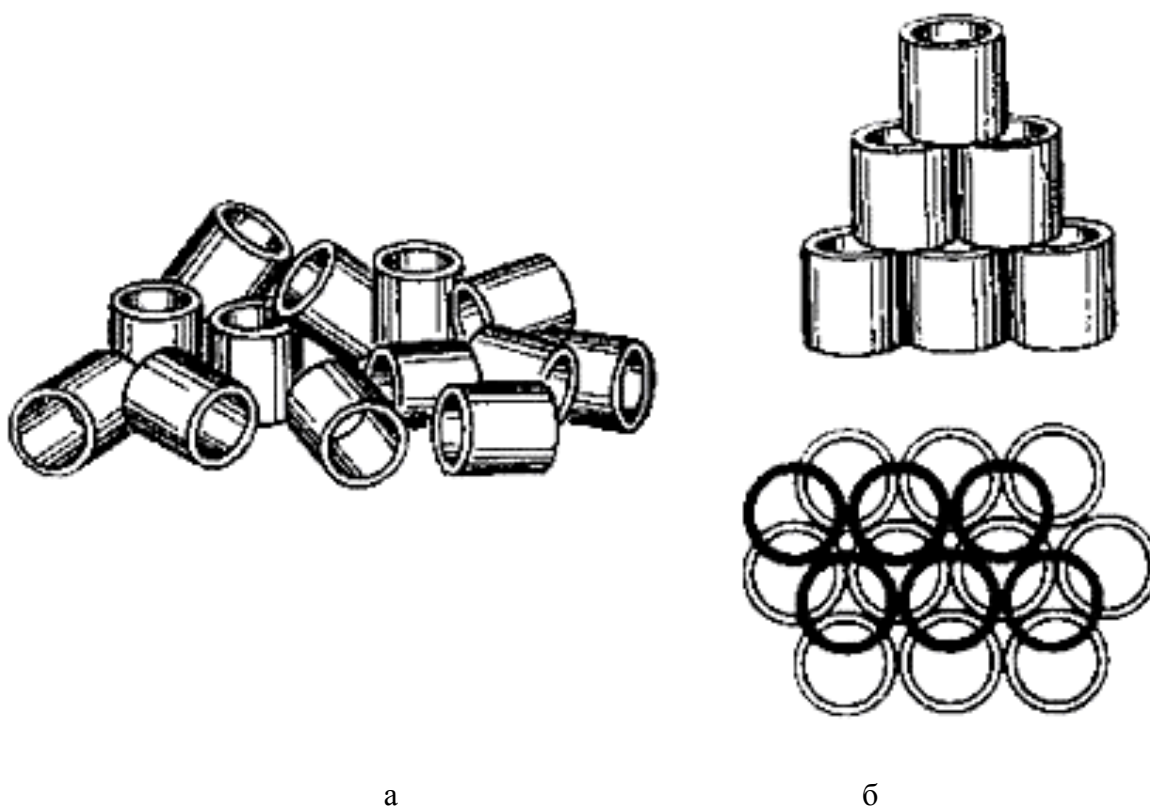


Рис. 4. Способы укладки колец Рашига:
а – внавал; б – упорядоченно

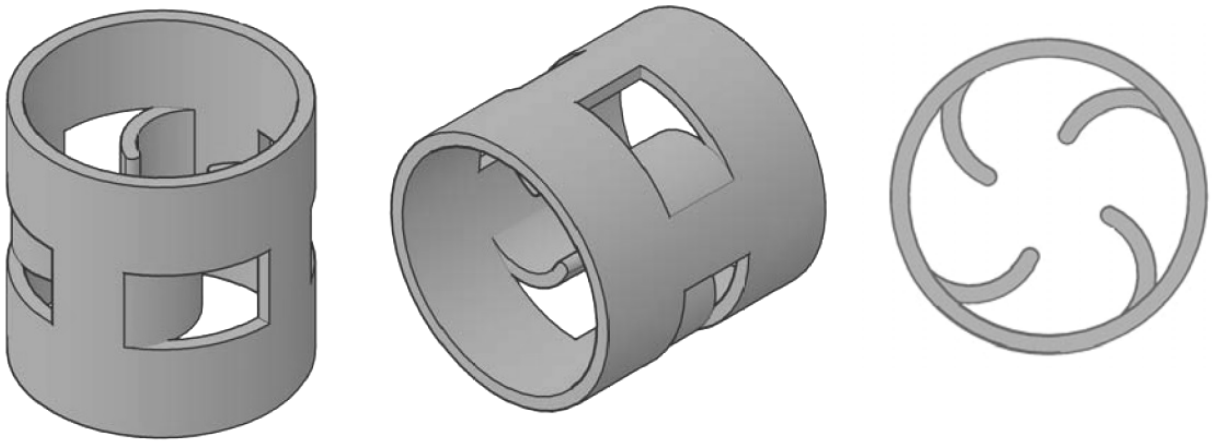


Рис. 5. Кольца Палля

Седлообразные насадки

Седлообразные насадки обладают меньшим гидравлическим сопротивлением, чем неупорядоченные кольцевые насадки, а также за счёт лучшей смачиваемости обеспечивают большую поверхность контакта фаз. Кроме того, в седлообразной насадке, благодаря её большей хаотичности, не возникает предпочтительных путей (каналов) для протекания жидкости, что способствует более равномерному орошению насадки. **Седла Берля** (рис. 7) по форме представляют собой гиперболический параболлоид и достаточно сложны в изготовлении. **Седла Инталокс** (рис. 8) представляют собой часть тора. Они проще в изготовлении, чем седла Берля.

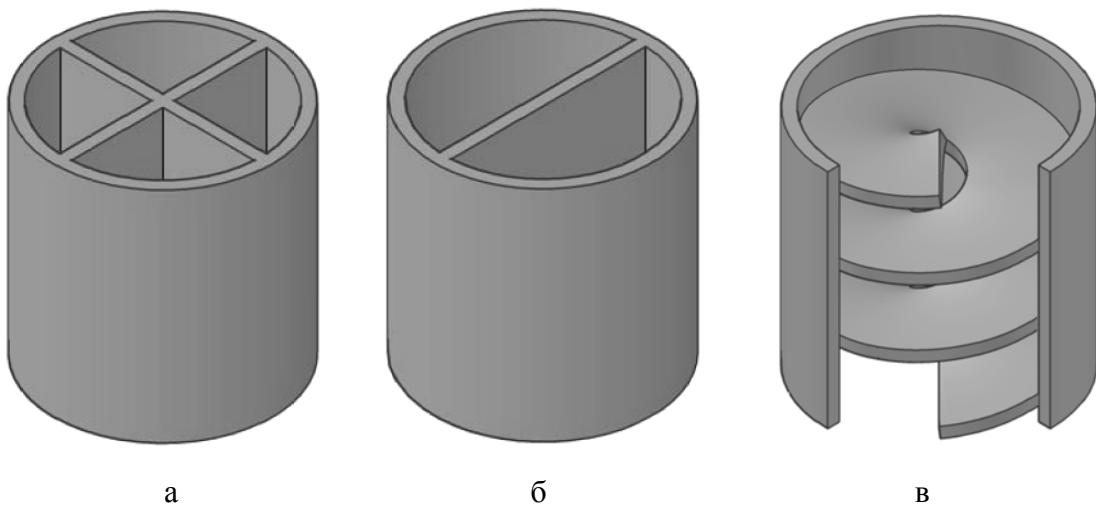


Рис. 6. Кольцевые насадки:

а – кольца с крестообразной перегородкой; б – кольца Лессинга; в – кольца с внутренними спиралями

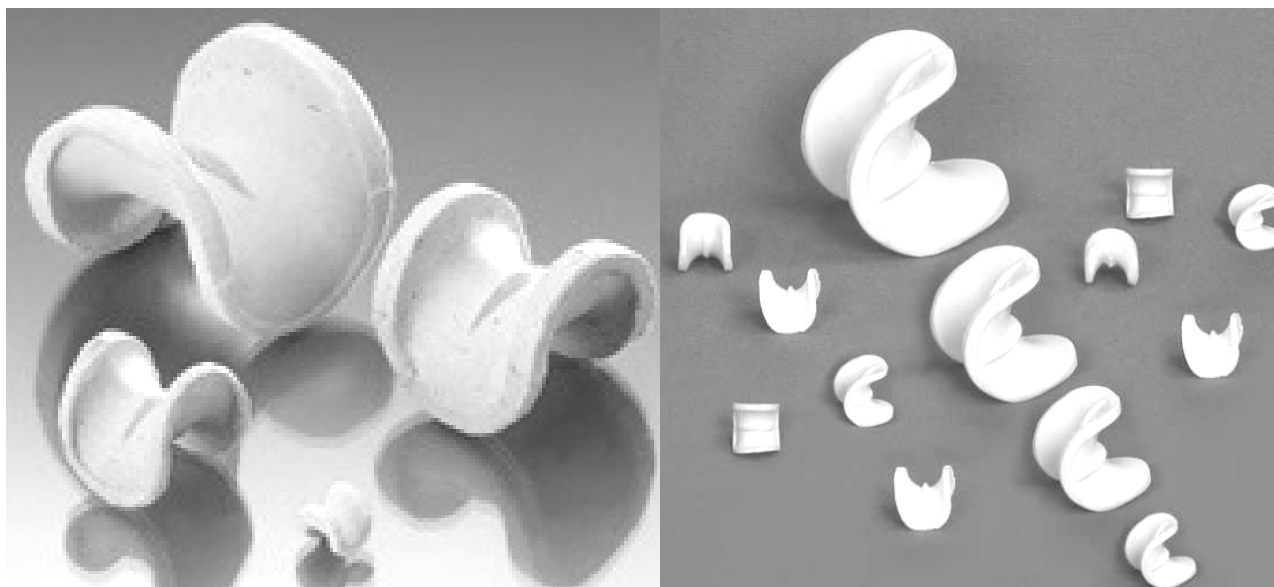


Рис. 7. Седла Берля

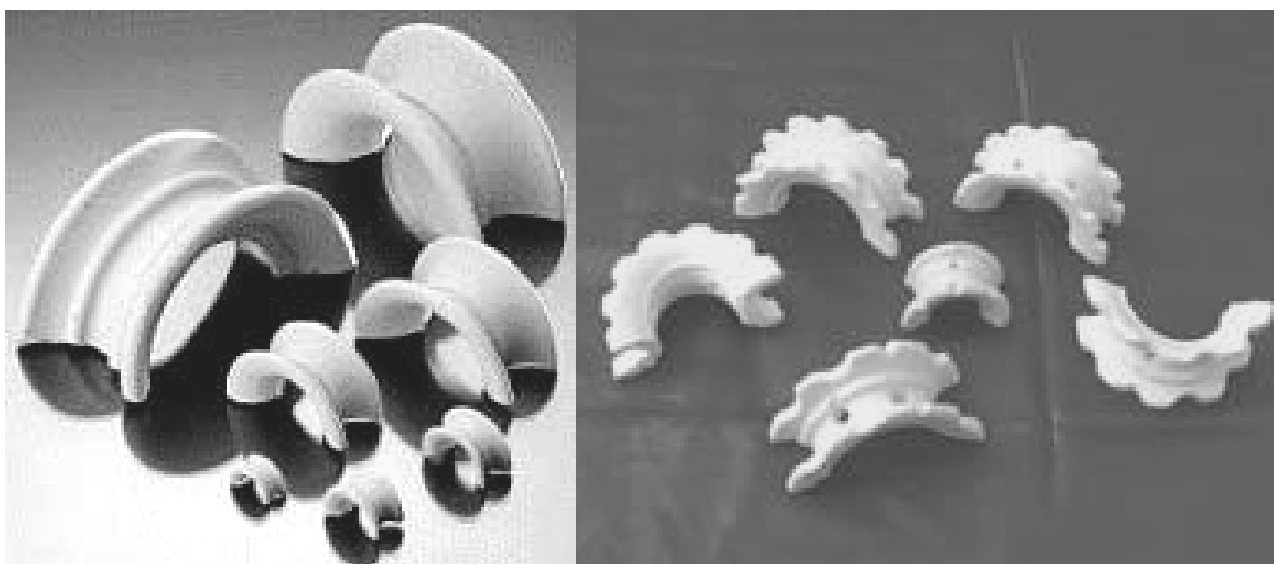


Рис. 8. Седла Инталокс

Блочные насадки

Блочная насадка собирается из блоков большого размера, имеющих внутренние каналы (рис. 9). Блоки изготавливают из керамики, металла или пластмассы (рис. 10). Преимуществом блочной насадки перед другими регулярными насадками (в частности, кольцами вкладки) является значительное упрощение работ по укладке насадки в абсорбер, которые весьма трудоёмки. По своим качествам блочная насадка не уступает другим видам регулярных насадок.

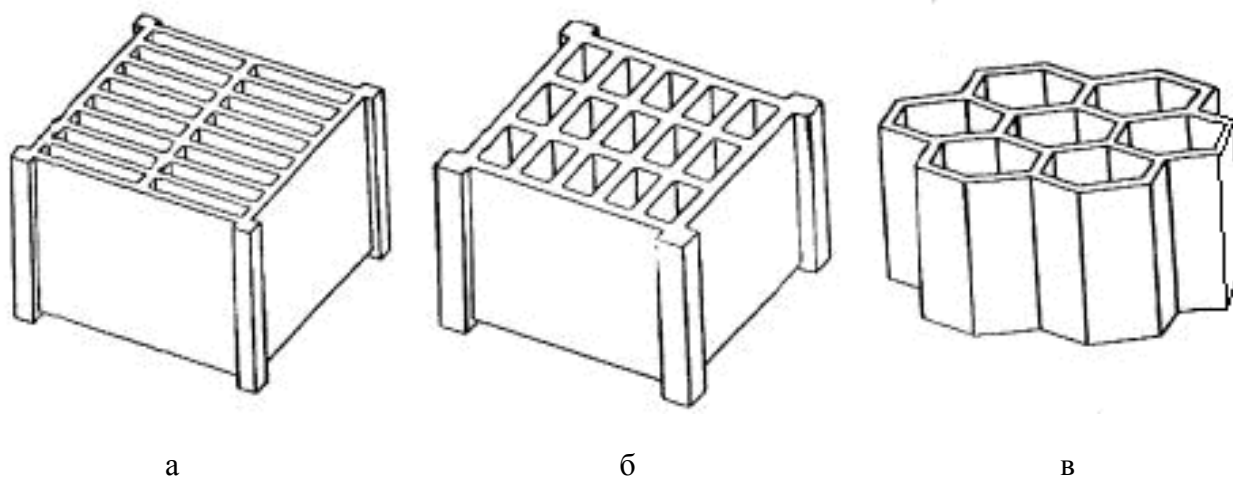


Рис. 9. Блочные насадки:
 а – щелевые блоки; б – решетчатые блоки; в – сотовые блоки

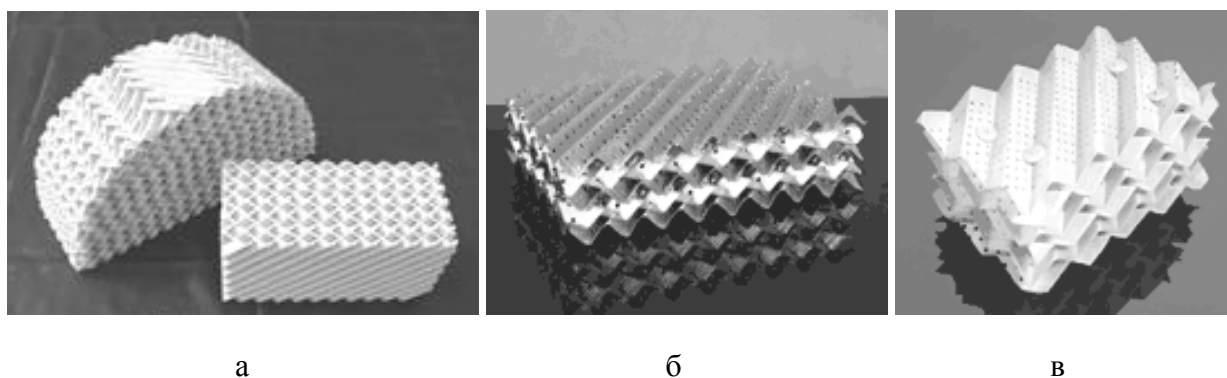


Рис. 10. Внешний вид блочных насадок:
 а – керамической; б – металлической; в – пластмассовой

Частный случай блочной насадки – рулонные насадки (рис. 11). Эти насадки изготовлены из гофрированных листов их скручиванием в рулон. Такой способ изготовления прост, дешёв и позволяет получить насадку цилиндрической формы под заданный диаметр колонны.

Хордовые и кусковые насадки

Наиболее простыми в изготовлении являются хордовые и кусковые насадки. Хордовая насадка представляет собой ряд решёток из пластин, поставленных на ребро. Хордовые насадки обычно применяются в градирнях. В качестве насадок применяют также кокс и дробленый кварц, засыпаемые в виде кусков размером 25–100 мм и образующие кусковую насадку. Хордовая и кусковая насадки обладают относительно небольшой удельной поверхностью.

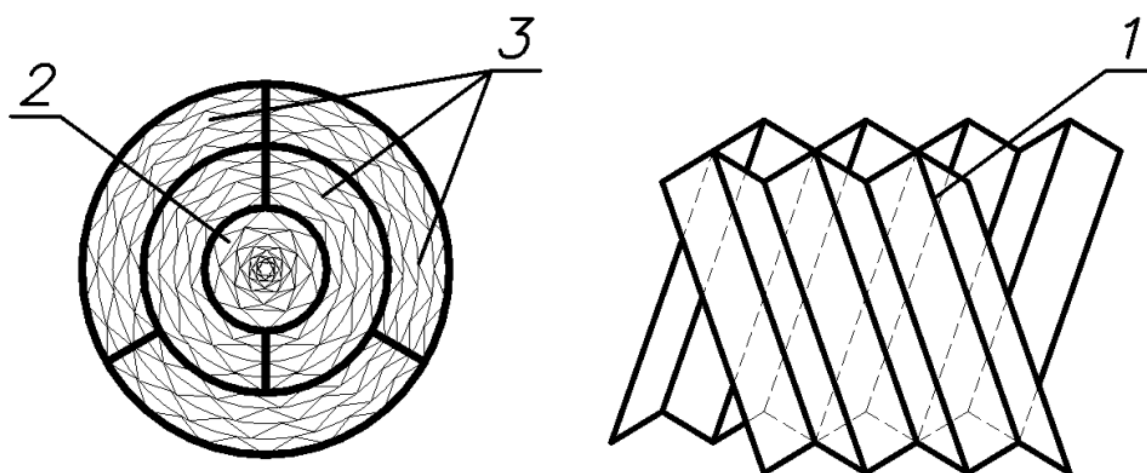
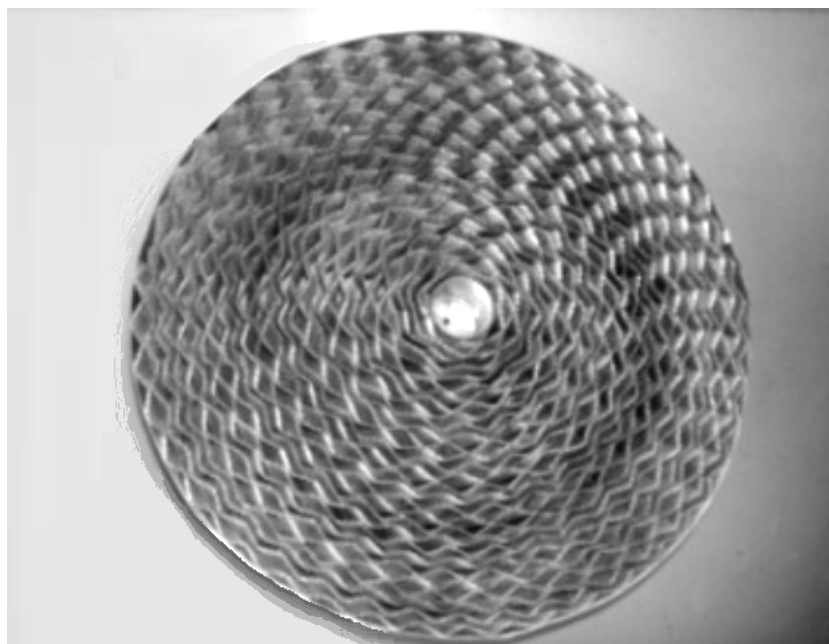


Рис. 11. Регулярная рулонная насадка «Инжехим»:
1 – гофры смежных листов; 2 – центральный пакет; 3 – остальные пакеты

Расположение насадок в колоннах

В массообменной колонне (рис. 12) (абсорбционной, ректификационной или экстракционной) насадка укладывается на опорные решётки. Для укладки насадки в колонну предусмотрены погрузочные и разгрузочные люки.

Высота слоя (секции, сегмента) насадки определяется тремя факторами.

Во-первых, необходимо равномерное орошение насадки. Равномерности орошения добиваются с помощью распределителей жидкости. Однако при значительной высоте слоя насадки эта равномерность нарушается – жидкость стремится течь преимущественно возле стенок аппарата. Поэтому высоту слоя делают относительно небольшой (3–5 м), а после каждого слоя устанавливают перераспределительное устройство (рис. 13).

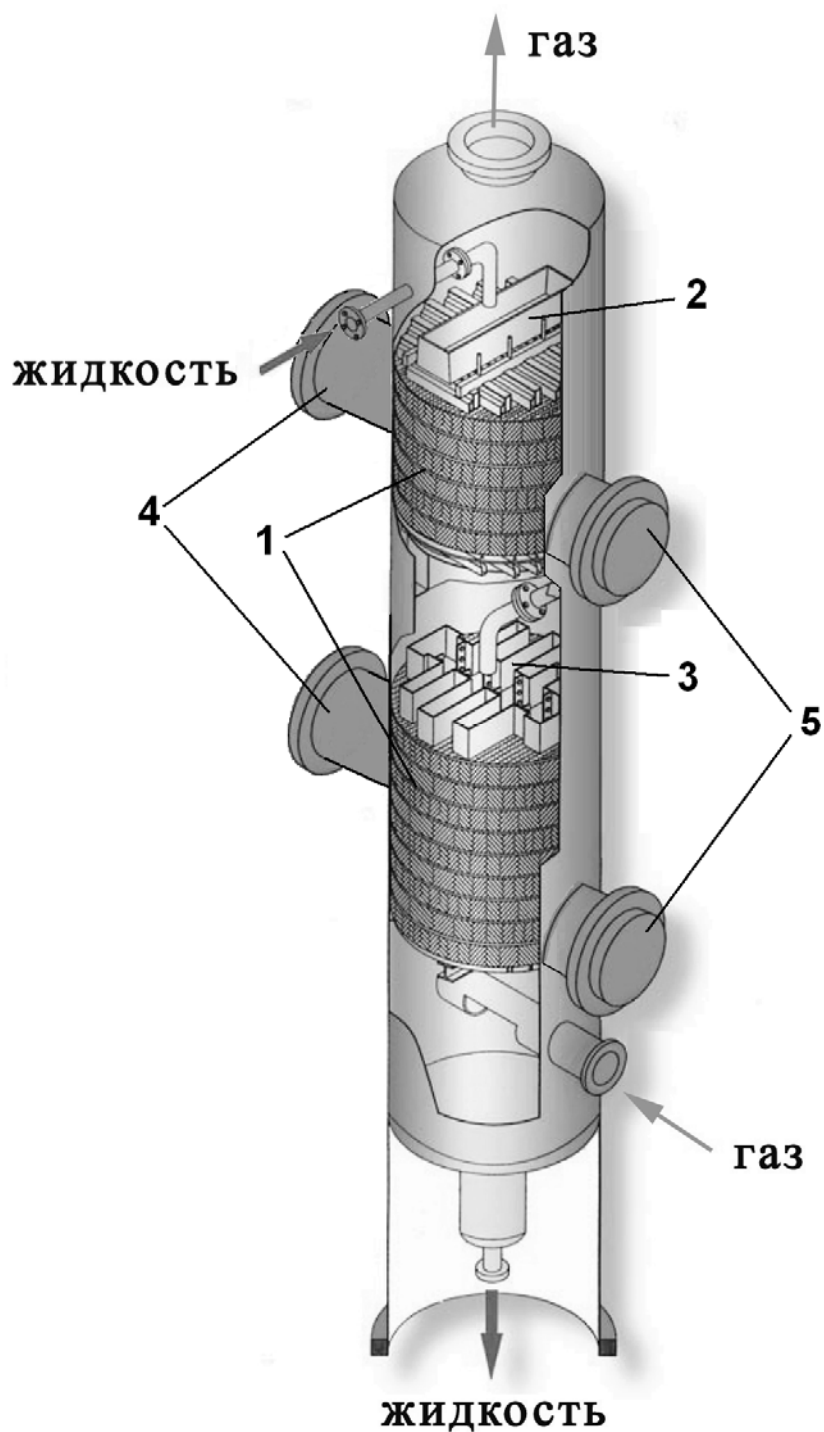


Рис. 12. Схема насадочной колонны (абсорбера):
 1 – слои насадки; 2 – распределительное устройство;
 3 – перераспределительное устройство; 4 – люки для загрузки
 насадки; 5 – люки для выгрузки насадки

Во-вторых, если насадка изготовлена из хрупких материалов (керамики, пластмассы), нижние слои насадки могут быть раздавлены весом насадки.

В-третьих, высота слоя насадки ограничена прочностью опорной решётки.

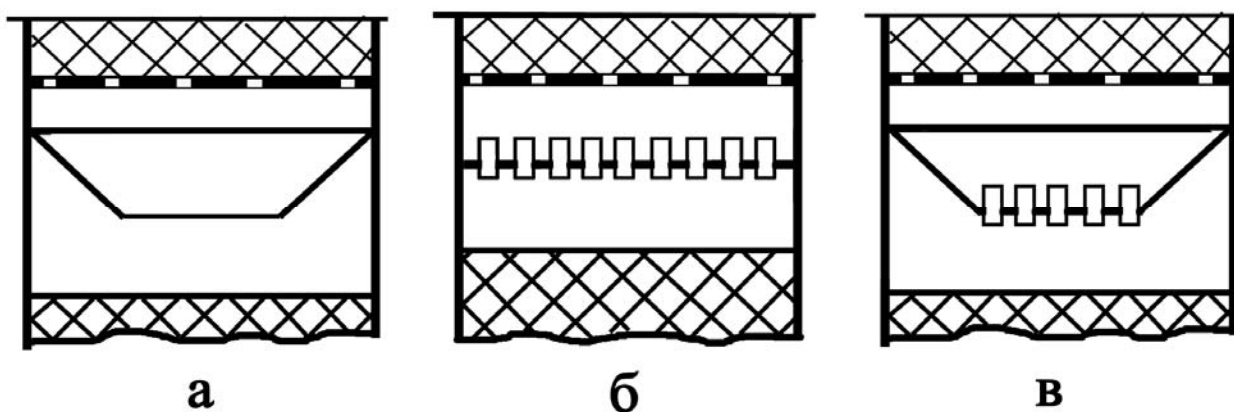


Рис. 13. Схемы перераспределительных устройств:
а – конический; б – трубковый; в – коническо-трубковый

Достоинства и недостатки насадок

К основным достоинствам насадочных массообменных аппаратов следует отнести, прежде всего, простоту устройства и низкое гидравлическое сопротивление. Именно низкое гидравлическое сопротивление по газовой фазе обуславливает преимущественное использование насадочных аппаратов в абсорбции, где на транспортировку газовой фазы через аппарат приходится значительные энергетические затраты, что ограничивает использование в абсорбции барботажных аппаратов.

Насадочные аппараты в большинстве своём противоточны со структурой потоков, близкой к модели идеального вытеснения (МИВ), что обеспечивает наибольшую движущую силу массопередачи.

К недостаткам насадочных колонн относятся большие объёмы аппаратов, по сравнению с тарельчатыми барботажными колоннами, что вызвано значительно меньшей площадью смоченной поверхности насадки по сравнению с площадью поверхности контакта фаз газожидкостного слоя на тарелке.

Второй недостаток насадочных аппаратов – плохая смачиваемость насадки при низкой плотности орошения. Поэтому при малых расходах жидкой фазы насадочные колонны не используются.

Сложность отвода теплоты в насадочных колоннах также является их существенным недостатком. При абсорбции, сопровождающейся значительным экзотермическим эффектом, приходится либо отказываться от использования насадочных аппаратов, либо организовывать рециркуляцию абсорбента, что существенно усложняет абсорбционную установку.

1.2. Тарельчатые контактные устройства

Самый распространённый в промышленности вид массообменных аппаратов – тарельчатые колонны. Тарелкой в массообменных процессах называют горизонтальную перегородку, снабжённую отверстиями для прохода фаз (рис. 14, 15). В барботажных тарелках жидкая фаза, поступающая на тарелку сверху, задерживается на ней, поскольку поднимающийся газ препятствует свободному прохождению жидкости через отверстия. Газ, проходя через отверстия, образует пузырьки, всплывающие в слое задержавшейся на тарелке жидкости. При достаточно больших расходах газа на тарелке образуется слой пены – **барботажный слой** – обладающий большой площадью поверхности контакта фаз.

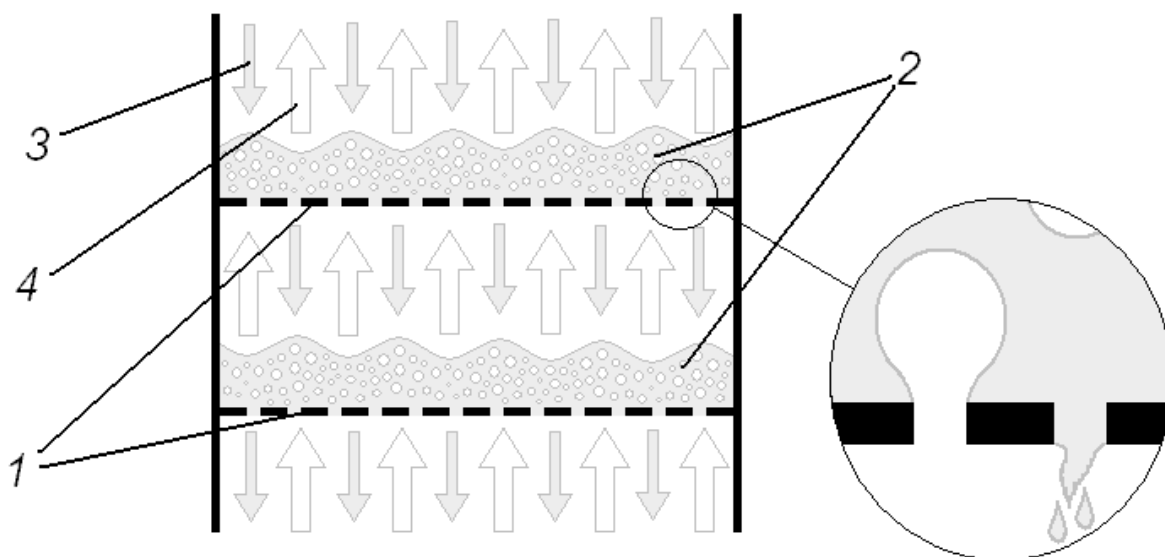


Рис. 14. Схема работы провальной тарелки:
1 – тарелки; 2 – барботажный слой (пена); 3 – поток жидкости; 4 – поток газа

Жидкость покидает тарелку, стекая на нижерасположенную тарелку либо через те же отверстия, через которые движется газ, либо через специальное переливное устройство. В первом случае тарелки называются **провальными** (рис. 14), отверстия на таких тарелках достаточно крупные, чтобы через них двигались обе фазы. Обычно эти отверстия работают периодически: в определенный момент времени одни прорезы пропускают газ, другие – жидкость; затем их роли меняются.

Во втором случае тарелки называются **переливными** (переточными) (рис. 15). У таких тарелок отверстия можно выполнить небольшими, что уменьшает размер образующихся пузырьков газа, увеличивая тем самым число

пузырьков, а это, в свою очередь, существенно повышает площадь поверхности контакта фаз.

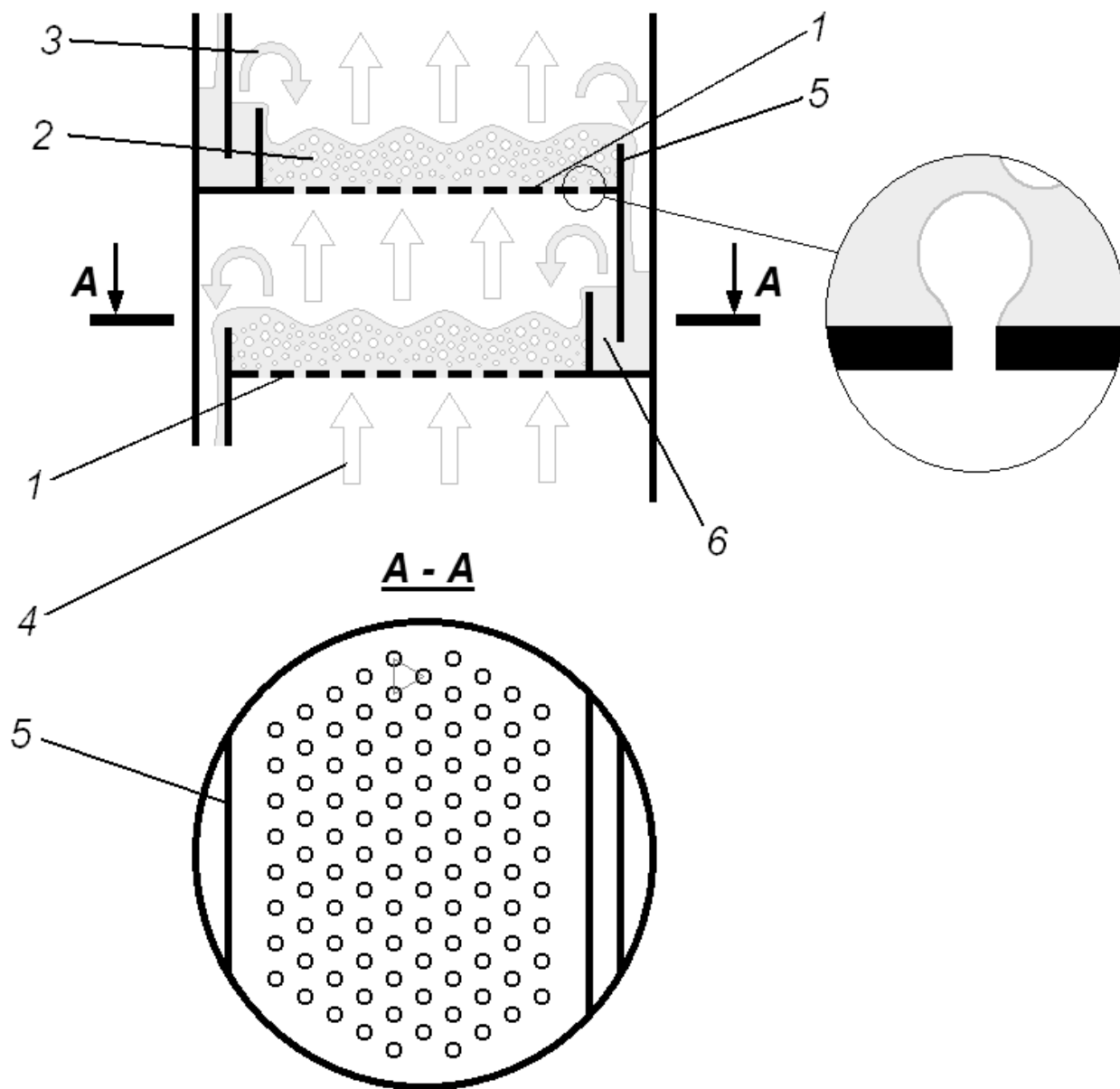


Рис. 15. Схема работы ситчатой переливной тарелки:
1 – тарелки; 2 – барботажный слой (пена); 3 – поток жидкости;
4 – поток газа; 5 – переливной порог; 6 – гидрозатвор

Переливные устройства, которыми снабжены переточные тарелки, в обязательном порядке имеют два элемента: переливной порог 5 и гидрозатвор 6. Переливной порог необходим для удерживания барботажного слоя на тарелке. При монтаже колонны высоту переливного порога можно отрегулировать, задав тем самым высоту барботажного слоя на тарелке. Гидрозатвор препятствует

движению газа через переливное устройство. В некоторых случаях роль гидрозатвора может играть сам барботажный слой.

Колонные аппараты с тарельчатыми контактными устройствами – это противоточные аппараты со ступенчатым контактом фаз. Большая поверхность массопередачи развивается на тарелках за счёт большого количества пузырей в газожидкостном слое.

Работа тарелок происходит в **пенном режиме**. Струи газа, выходящие из отверстий тарелки, на некотором расстоянии от места истечения разрушаются с образованием большого числа пузырьков. При этом на тарелке образуется газожидкостная система – пена, которая является нестабильной и быстро разрушается после прекращения подачи газа. Поверхность контакта фаз при пенном режиме наибольшая, поэтому пенный режим обычно является наиболее рациональным режимом работы тарелок. Гидродинамические режимы работы провальных тарелок специфичны тем, что нормальная их работа возможна только после достижения определённой скорости газа. При низких скоростях газа жидкость на тарелке не задерживается (проваливается) и тарелка не работает. При достижении определённой скорости газа на тарелке появляется слой жидкости, и она вступает в пенный режим работы.

Таким образом, тарелки классифицируют по способу передачи жидкости на провальные и переливные (рис. 16). В свою очередь, переливные тарелки можно подразделить по характеру взаимодействия газового и жидкостного потоков на тарелки **барботажного** и тарелки **капельного** типов. На барботажных тарелках сплошной фазой служит жидкость, а дисперсной – газ. На эжекционных тарелках дисперсная фаза – жидкость, сплошная – газ; потоки взаимодействуют в прямооточном режиме на поверхности капель и жидкостных струй, взвешенных в газовом потоке. Провальные тарелки такого разделения не имеют, все являясь барботажными, поскольку осуществить эжекционный режим на тарелках без переливных устройств затруднительно.

На отверстия в тарелках зачастую устанавливают дополнительные устройства (клапаны, колпачки и т.п.), призванные улучшить диспергирование одной из фаз либо предотвратить стекание жидкой фазы через отверстия (для переливных тарелок). По виду этих устройств, а также форме отверстий проводят классификацию тарелок (рис. 16). В химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей отраслях промышленности наиболее распространены ситчатые,

колпачковые и клапанные тарелки (переливные), а также решетчатые (провальные).

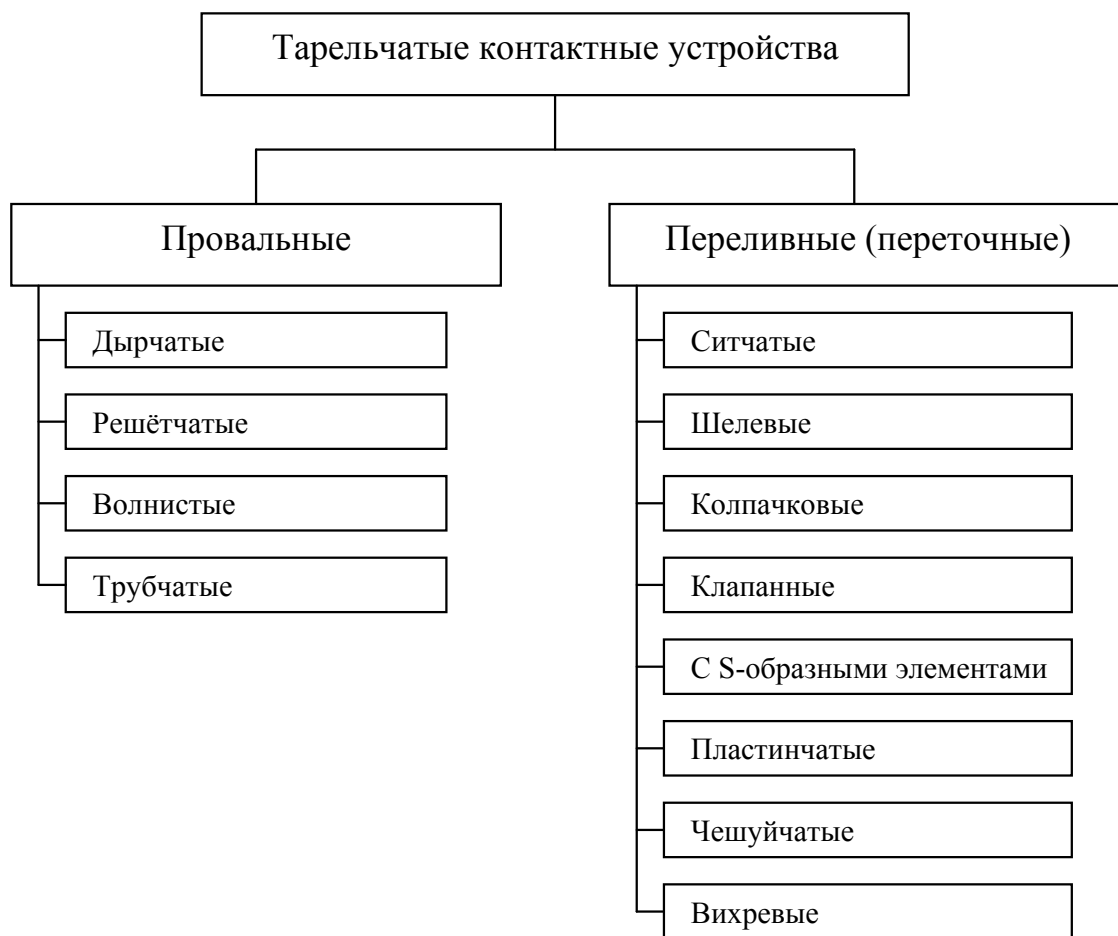


Рис. 16. Классификация тарелок

Провальные барботажные тарелки

Наиболее распространённый в промышленности вид провальных барботажных тарелок – **решетчатые** тарелки. Решетчатые тарелки (рис. 17) имеют отверстия в виде фрезерованных или штампованных щелей шириной 3–8 мм. Решетчатые тарелки малого диаметра (до 800 мм) изготавливают из одного листа (рис. 17, а), решетчатые тарелки большого диаметра (от 1000 мм) изготавливают из нескольких листов, крепящихся обычно на уголковые балки (рис. 17, б).

Достоинства решётчатых провальных тарелок:

- 1) низкая стоимость и простота изготовления, по сравнению с другими тарелками;
- 2) невысокое гидравлическое сопротивление по газовой фазе, по сравнению с переливными тарелками;

3) ограничение по минимальному расходу жидкости не столь жёсткое, как у насадочных аппаратов.

Недостатки решётчатых провальных тарелок:

1) для стабильной работы требуются значительные расходы газовой фазы, при низком расходе газа, жидкость быстро стекает через отверстия (проваливается) и барботажный слой на тарелке не образуется;

2) меньшая площадь поверхности контакта фаз, по сравнению с переливными тарелками, что вызвано большими размерами пузырьков барботажного слоя из-за большего размера отверстий.

Провальные тарелки востребованы в абсорбции в тех случаях, когда по каким-то причинам невозможно использование насадочных аппаратов.

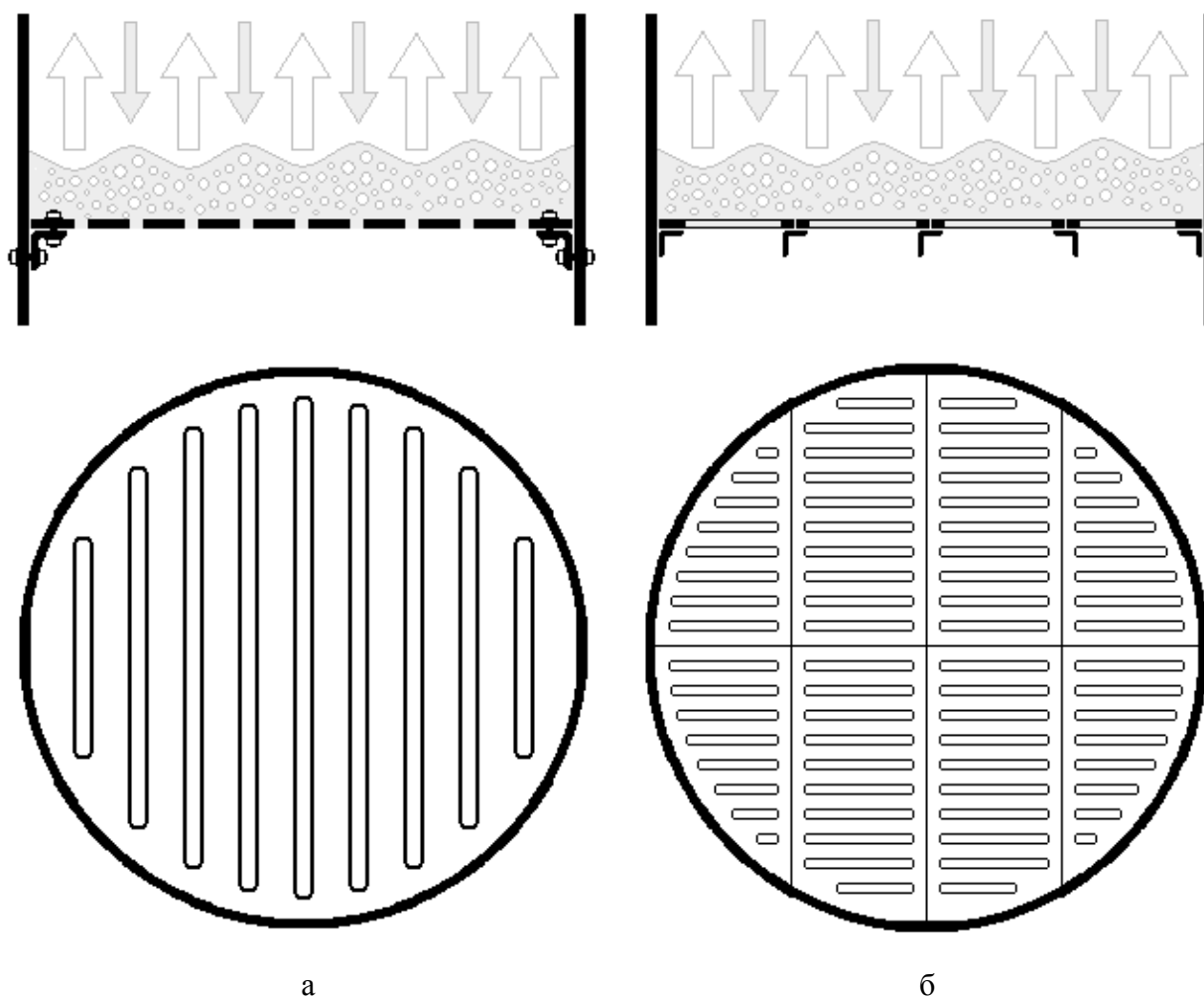


Рис. 17. Схема решётчатых провальных тарелок:
а – малого диаметра; б – большого диаметра

Ситчатые переливные тарелки

Ситчатые переливные тарелки (рис. 15, 18) являются довольно распространённым в химической промышленности типом переливных тарелок. Ситчатые тарелки имеют выштампованные отверстия диаметром 2–8 мм. Малый диаметр отверстий приводит к тому, что жидкость уже не способна двигаться через них навстречу газу, поэтому для стока жидкости предусмотрены переливные устройства. Отверстия размещены по вершинам равносторонних треугольников, что позволяет получить максимальное число отверстий на единице площади. Уровень барботажного слоя поддерживается порогом переливного устройства 5. Конструкцией тарелок обычно предусмотрена возможность регулирования высоты переливного порога при монтаже тарелок. Нижний край переливной перегородки находится ниже уровня барботажного слоя, благодаря этому возникает гидрозатвор 6, препятствующий движению газа через переливное устройство. Высота барботажного слоя не всегда бывает достаточной для образования гидрозатвора, для этого случая в конструкции некоторых тарелок предусмотрена дополнительная перегородка гидрозатвора, как это показано на рис. 15.



Рис. 18. Внешний вид ситчатых тарелок

Достоинства ситчатых переливных тарелок:

- 1) большая площадь поверхности контакта фаз, по сравнению с провальными тарелками и насадочными аппаратами;
- 2) большой интервал рабочих скоростей газа, по сравнению с провальными тарелками;

3) простота устройства, лёгкость монтажа и ремонта, по сравнению с переливными тарелками других типов, что обуславливает низкую стоимость колонн с ситчатыми тарелками;

4) наименьшее из всех переливных тарелок гидравлическое сопротивление по газовой фазе;

5) нет жёсткого ограничения по минимальному расходу жидкости, в отличие от насадочных аппаратов.

Недостатки ситчатых переливных тарелок:

1) небольшой интервал нагрузок по газовой фазе, при низком расходе газа жидкость быстро стекает через отверстия и барботажный слой на тарелке не образуется;

2) небольшой размер отверстий делает ситчатые тарелки более чувствительными к загрязнениям, чем провальные.

Высокая эффективность, низкая стоимость и невысокое (среди переливных тарелок) гидравлическое сопротивление делают ситчатые тарелки самым распространённым видом тарелок. Они находят своё применение прежде всего в процессах ректификации.

Колпачковые переливные тарелки

В аппаратах с **колпачковыми** тарелками (рис. 19, 20) газ проходит через патрубки на тарелках, прикрытые колпачками. Колпачки имеют прорези, через которые происходит барботаж газа, что увеличивает площадь поверхности контакта фаз. Кроме того, колпачки предотвращают проливание жидкости сквозь тарелку. Высота расположения колпачков над патрубками регулирует скорость движения газа. Колпачки чаще всего имеют круглую форму (диаметр 60, 80, 100 мм). Наиболее распространены капсульные колпачки (рис. 21).

Достоинства колпачковых тарелок:

1) превосходят ситчатые и решетчатые тарелки по площади поверхности контакта фаз в барботажном слое, жидкость не стекает через отверстия даже при низком расходе газа;

2) превосходят ситчатые и решетчатые тарелки по ширине интервала рабочих скоростей газа.

Недостатки колпачковых тарелок:

1) отличаются высокой стоимостью изготовления, что значительно ограничивает их использование;

2) высокое гидравлическое сопротивление по сравнению с решётчатыми и ситчатыми тарелками.

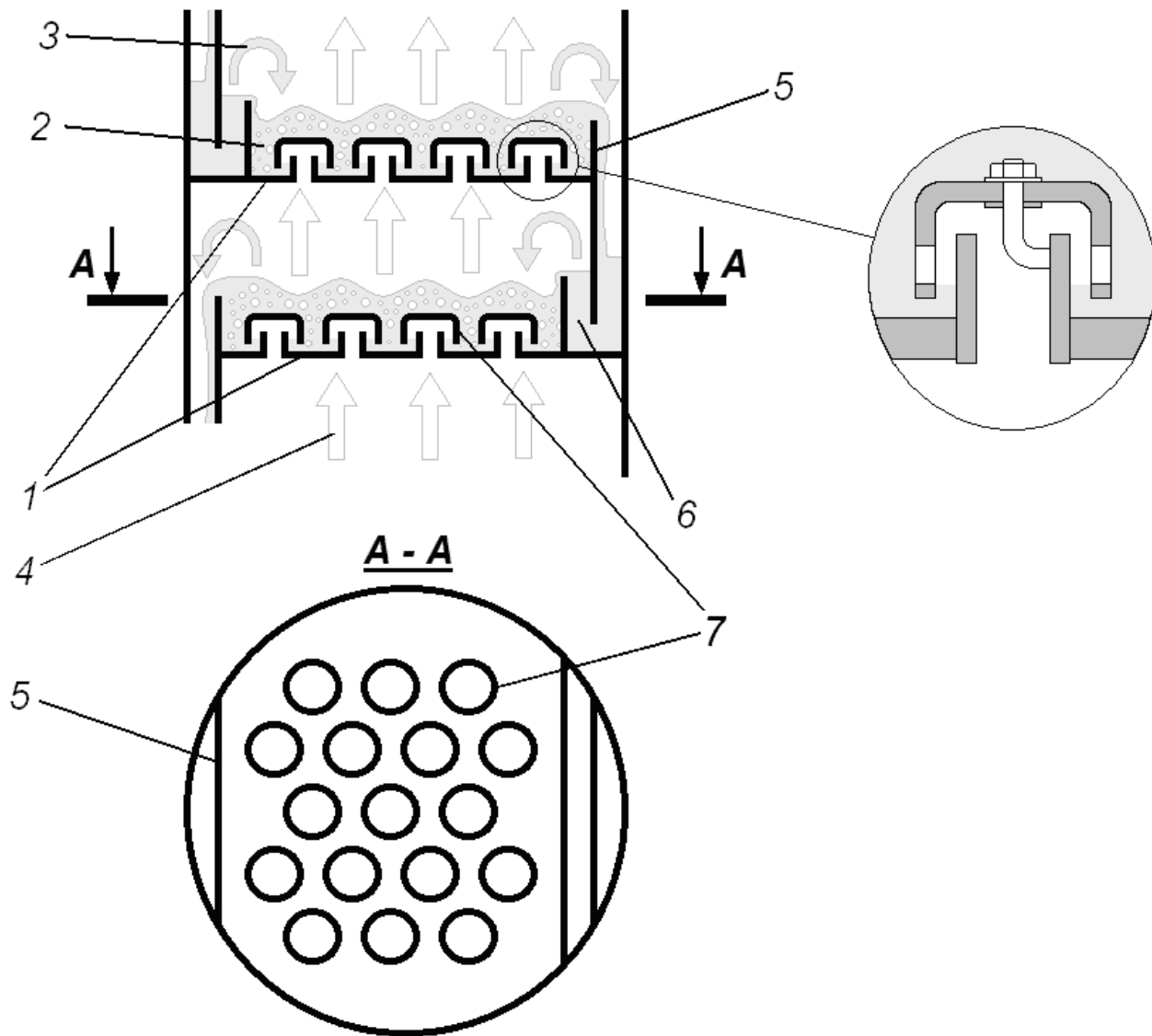


Рис. 19. Схема работы колпачковой тарелки:

- 1 – тарелки; 2 – барботажный слой (пена); 3 – поток жидкости;
4 – поток газа; 5 – переливной порог; 6 – гидрозатвор; 7 – колпачки

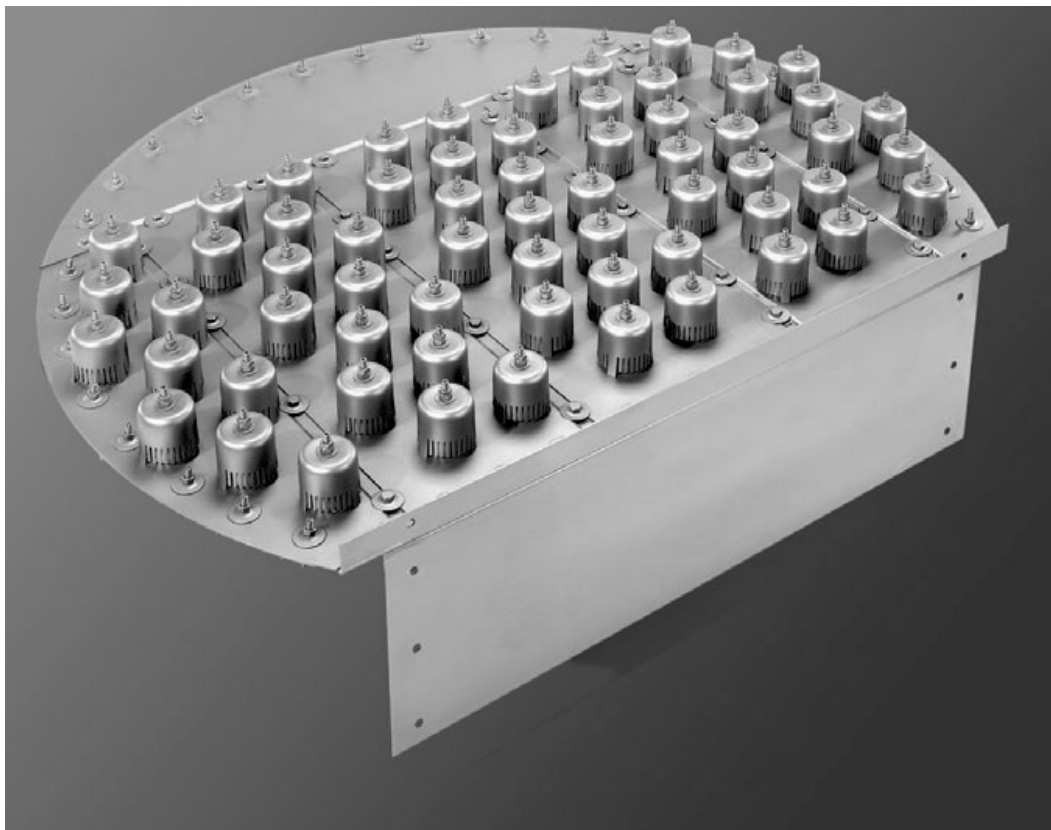


Рис. 20. Внешний вид колпачковой тарелки

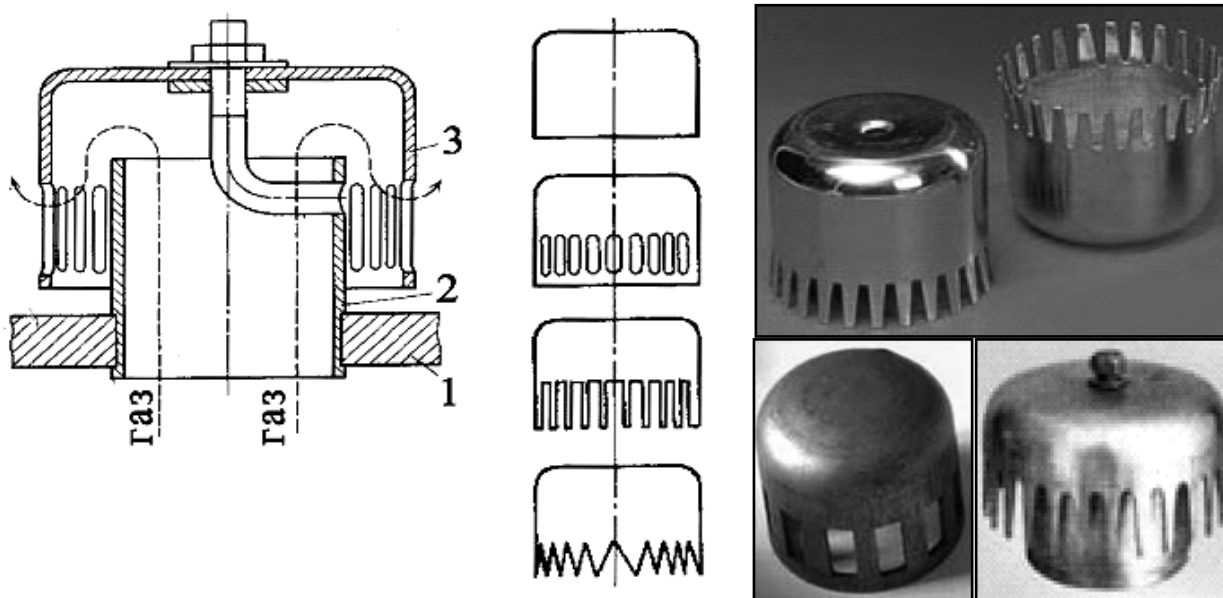


Рис. 21. Схема, формы и внешний вид капсульных колпачков:
1 – тарелка; 2 – газовые патрубки; 3 – круглые колпачки

Клапанные переливные тарелки

Стабильность работы барботажной тарелки можно повысить, если снабдить отверстия клапанами, благодаря которым предотвращается стекание жидкости с тарелки и регулируется скорость газа. Такие тарелки называют **клапанными** (рис. 22).

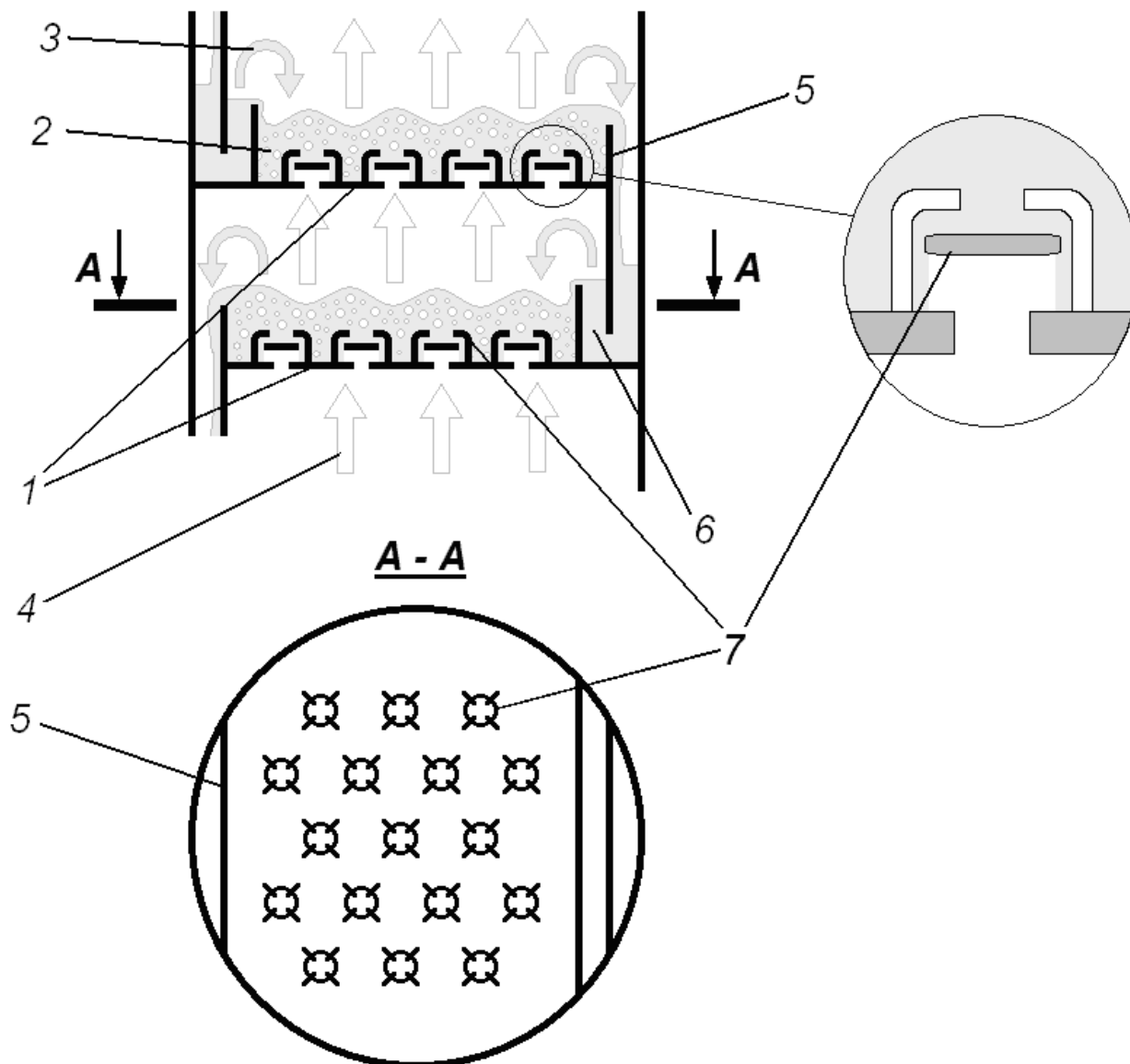


Рис. 22. Схема работы клапанной тарелки:
1 – тарелки; 2 – барботажный слой (пена); 3 – поток жидкости;
4 – поток газа; 5 – переливной порог; 6 – гидрозатвор; 7 – клапаны

Принцип работы круглого клапана состоит в том, что диск клапана, свободно лежащий над отверстием, поднимается и опускается в зависимости от скорости газа, и, таким образом, за счёт собственной силы тяжести автоматически регулирует величину зазора между тарелкой и клапаном. Максимальная

высота подъема диска определяется ограничителями. Обычно эта высота не превышает 8 мм. Клапаны имеют диаметр 45–50 мм. Ограничители круглых клапанов выполняются обычно в виде 3–4 направляющих «ножек» и крепятся либо к самому диску клапана (рис. 23, а), либо к тарелке вокруг диска (рис. 23, б).

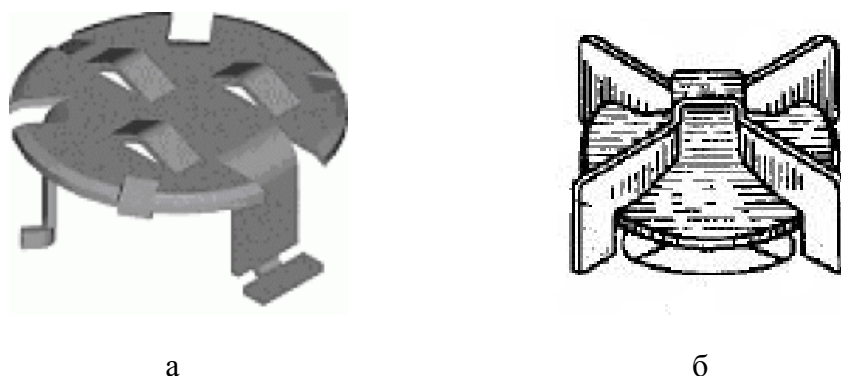


Рис. 23. Круглые клапаны:
а – с ограничителями на клапане; б – с ограничителями на тарелке

Для увеличения производительности и диапазона устойчивой работы клапанные тарелки выполняют балластными (рис. 24). Над отверстием тарелки направляющие подъема 2, а внутри них легкий клапан 1 и балласт 3. При малой производительности по газу тарелка работает как обычная с дисковыми клапанами меньшей массы; при увеличении нагрузки клапан упирается в балласт и работает совместно с ним как один утяжеленный клапан.

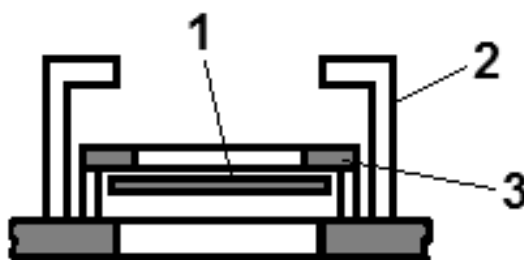


Рис. 24. Схема балластного клапана:
1 – клапан; 2 – балласт; 3 – направляющие

Самыми распространёнными клапанными тарелками являются тарелки с прямооточными клапанами (рис. 25). Эффективность работы этого вида клапанов обусловлена тем, что часть кинетической энергии газа, проходящего через клапаны, используется для ускорения движения жидкости вдоль тарелки.

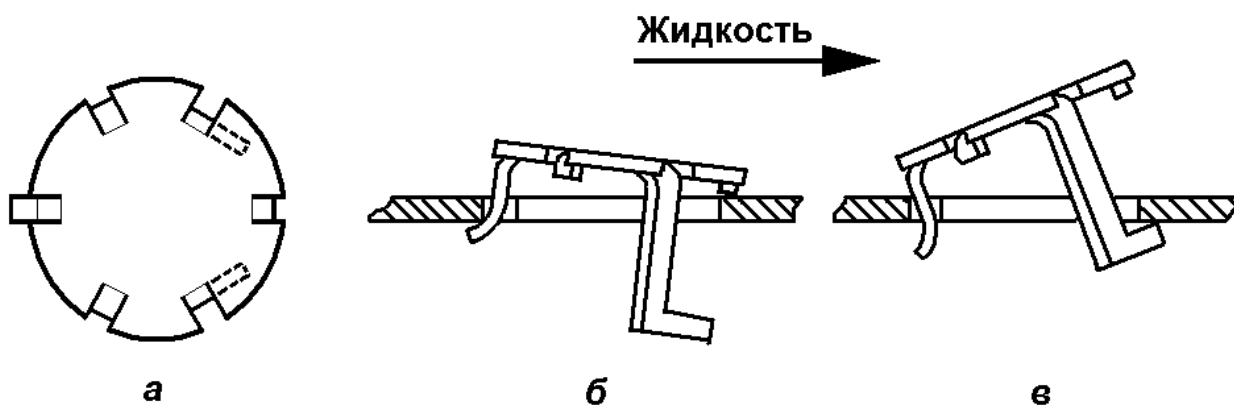


Рис. 25. Схема работы клапана прямооточной тарелки:
 а – вид клапана сверху; б – работа при малых нагрузках по газу;
 в – работа при больших нагрузках по газу

Достоинства клапанных тарелок:

- 1) превосходят ситчатые и решетчатые тарелки по площади поверхности контакта фаз в барботажном слое, жидкость не стекает через отверстия даже при низком расходе газа;
- 2) превосходят ситчатые и решетчатые тарелки по ширине интервала рабочих скоростей газа;
- 3) нет жёсткого ограничения по минимальному расходу жидкости, в отличие от насадочных аппаратов.

Недостатки клапанных тарелок:

- 1) отличаются повышенной стоимостью изготовления;
- 2) высокое гидравлическое сопротивление по сравнению с решётчатыми и ситчатыми тарелками.

Сравнительные характеристики тарелок

Большое разнообразие тарельчатых контактных устройств затрудняет выбор оптимальной конструкции тарелки. При этом наряду с общими требованиями (высокая интенсивность единицы объема аппарата, его стоимость и др.) выдвигаются требования, обусловленные спецификой производства: большой интервал устойчивой работы при изменении нагрузок по фазам, возможность использования тарелок в среде загрязнённых жидкостей, возможность защиты от коррозии и т.п. Зачастую эти характеристики становятся преобладающими, определяющими пригодность той или иной конструкции для использования в каждом конкретном процессе. Сравнительные характеристики рассмотренных

тарелок приведены в табл. 1. Тарелки, для которых одному из предъявленных требований соответствует балл 0, отвергаются; для остальных тарелок баллы суммируются. Самой пригодной можно считать тарелку с наибольшей суммой баллов, причём решение о выборе конструкции тарелок обычно является компромиссным между желательными и нежелательными характеристиками. При этом учитывают и такие факторы, как промышленный опыт эксплуатации, возможность быстрого изготовления и т.д. Окончательный выбор определяется технико-экономическим анализом.

Таблица 1

Сравнительные характеристики тарелок

Показатель	Тип тарелки				
	решетчатая провальная	ситчатая переточная	колпачковая с круглыми колпачками	клапанная	клапанная с прямоточными клапанами
Нагрузки по жидкости и газу:					
большие	4	4	2	4	4
малые	2	2	3	5	5
Большая область устойчивой работы	1	4	4	5	5
Малое гидравлическое сопротивление	4	3	0	3	2
Большая эффективность	4	4	4	4	5
Малые капитальные затраты	4	3	1	3	4
Возможность обработки взвесей	4	1	1	1	1
Возможность отвода тепла	3	3	1	2	2

Соответствие тарелки тому или иному показателю оценено по следующей шкале: 0 – непригодна, 1 – сомнительно пригодна, 2 – пригодна, 3 – вполне пригодна, 4 – хорошо пригодна, 5 – отлично пригодна.

1.3. Абсорбция

Абсорбция – процесс разделения смесей газов путём поглощения одного или нескольких компонентов газовой смеси жидким поглотителем – **абсорбентом**. Процесс основан на разной растворимости компонентов газовой смеси в поглотителе.

Если поглощаемый газ – **абсорбтив** – химически не взаимодействует с абсорбентом, то такую абсорбцию называют физической. Если же абсорбтив образует с абсорбентом химическое соединение, то такой процесс называют **хемосорбцией**. Непоглощаемую часть газовой смеси называют **инертном**.

В промышленности абсорбцию применяют для решения следующих основных задач:

1) для получения готового продукта, например, абсорбция разбавленной серной кислотой серного ангидрида в производстве серной кислоты, абсорбция водой хлороводорода при получении соляной кислоты, абсорбция водой оксидов азота в производстве азотной кислоты;

2) для выделения ценных компонентов из газовых смесей, например, абсорбция бензола из коксового газа, абсорбция ацетиленов из газов крекинга и пиролиза природного газа; при этом абсорбцию проводят в сочетании с десорбцией;

3) для очистки газов от примесей, например, очистка коксового и нефтяного газов от сероводорода, очистка азотоводородной смеси от угарного и углекислого газа при синтезе аммиака;

4) для осушки газов, например, нефтяного газа и природного газа при их переработке;

5) для очистки газовых выбросов от вредных примесей, например, очистка топочных газов от диоксида серы, очистка от фтористых соединений газов, выделяющихся при производстве минеральных удобрений.

Плёночный трубчатый абсорбер

В плёночных абсорберах поверхностью контакта фаз является поверхность жидкости, текущей по твёрдой вертикальной стенке. К этому виду аппаратов относятся: трубчатые абсорберы, абсорберы с плоскопараллельной или листовой насадкой, абсорберы с восходящим движением плёнки жидкости. Из вышперечисленных абсорберов наиболее распространены трубчатые абсорбе-

ры (рис. 26), которые по устройству аналогичны кожухотрубчатому теплообменнику.

Абсорбент поступает на верхнюю трубную решётку, распределяясь по трубам 2 и стекает по их внутренней поверхности в виде тонкой плёнки. Газ движется по трубам снизу вверх навстречу стекающей жидкой плёнке. в случае необходимости отвода теплоты при экзотермической абсорбции в межтрубное пространство абсорбера подают охлаждающую воду.

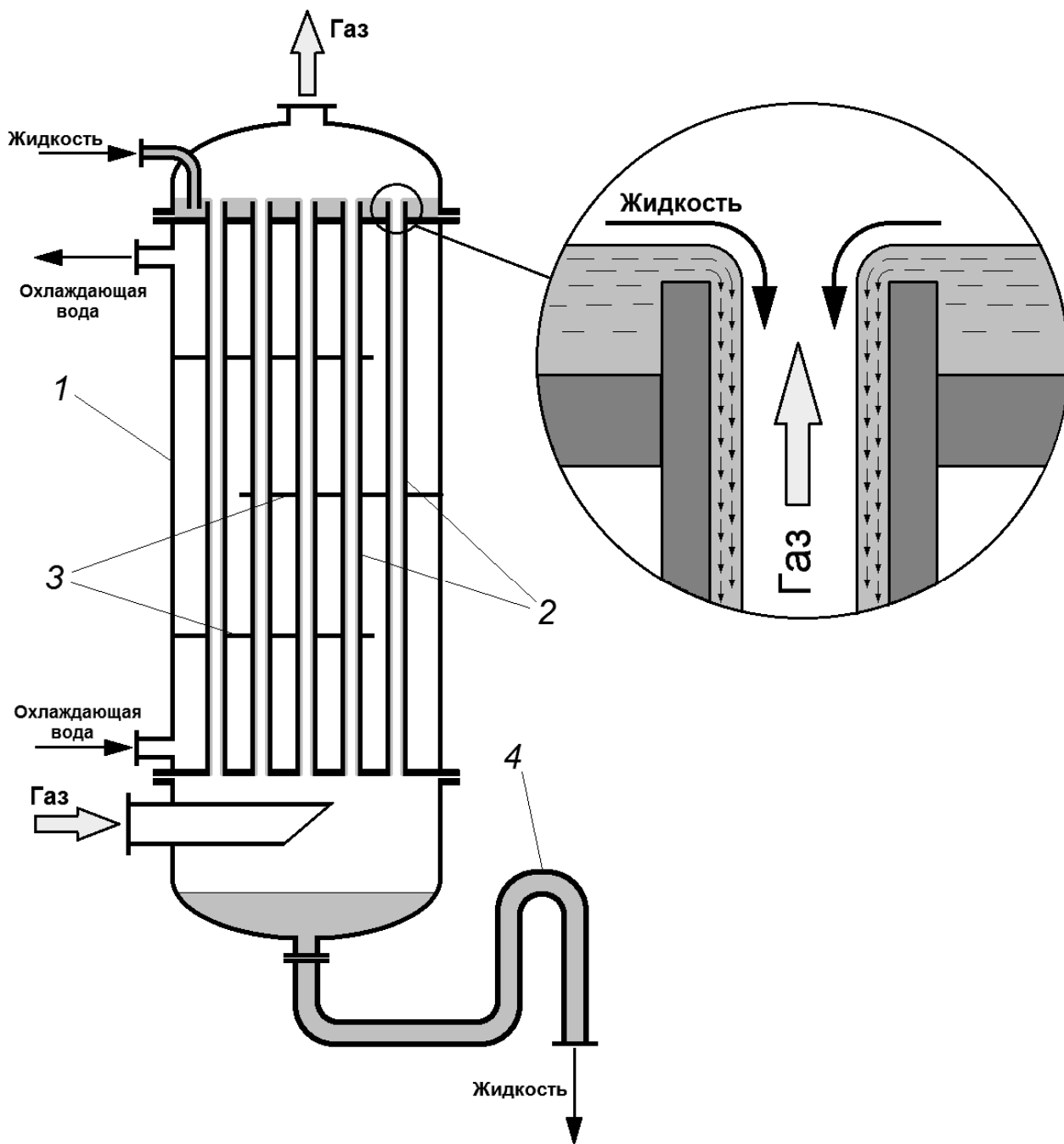


Рис. 26. Трубчатый плёночный абсорбер:
1 – корпус; 2 – трубки; 3 – сегментные перегородки; 4 – гидрозатвор

Достоинства плёночного трубчатого абсорбера:

- 1) низкое гидравлическое сопротивление, по сравнению с насадочными и тарельчатыми;
- 2) высокая движущая сила благодаря структуре потоков, близкой к МИВ;
- 3) возможность отвода теплоты.

Недостатки плёночного трубчатого абсорбера:

- 1) трудности с осуществлением равномерного распределения жидкости по трубам в виде плёнки;
- 2) низкая площадь поверхности контакта фаз, делающая использование этих абсорберов весьма редким.

Полый распыливающий абсорбер

Полые (форсуночные) распыливающие абсорберы представляют собой полые колонны (рис. 27). В этих абсорберах газ движется снизу вверх, а жидкость подаётся через расположенные в несколько горизонтальных рядов форсунки с направлением факела распыла обычно сверху вниз.

Достоинства полых распыливающих абсорберов:

- 1) простота устройства и низкая стоимость;
- 2) низкое гидравлическое сопротивление по газовой фазе, по сравнению с другими типами абсорберов.

Недостатки полых распыливающих абсорберов:

- 1) невысокая площадь поверхности контакта фаз, отнесённая к объёму аппарата, и, как следствие, громоздкость;
- 2) высокий расход энергии на распыление жидкости;
- 3) брызгоунос при высоких скоростях газа;
- 4) снижение движущей силы из-за возникновения обратного перемешивания, и, как следствие, невысокая степень разделения.

Абсорбер Вентури

Скоростные прямоточные распыливающие абсорберы отличаются тем, что в случае прямотока процесс можно проводить при высоких скоростях газа, причём вся жидкость уносится с газом и отделяется от него в сепарационном пространстве. К этому типу аппаратов относится абсорбер Вентури (рис. 28).

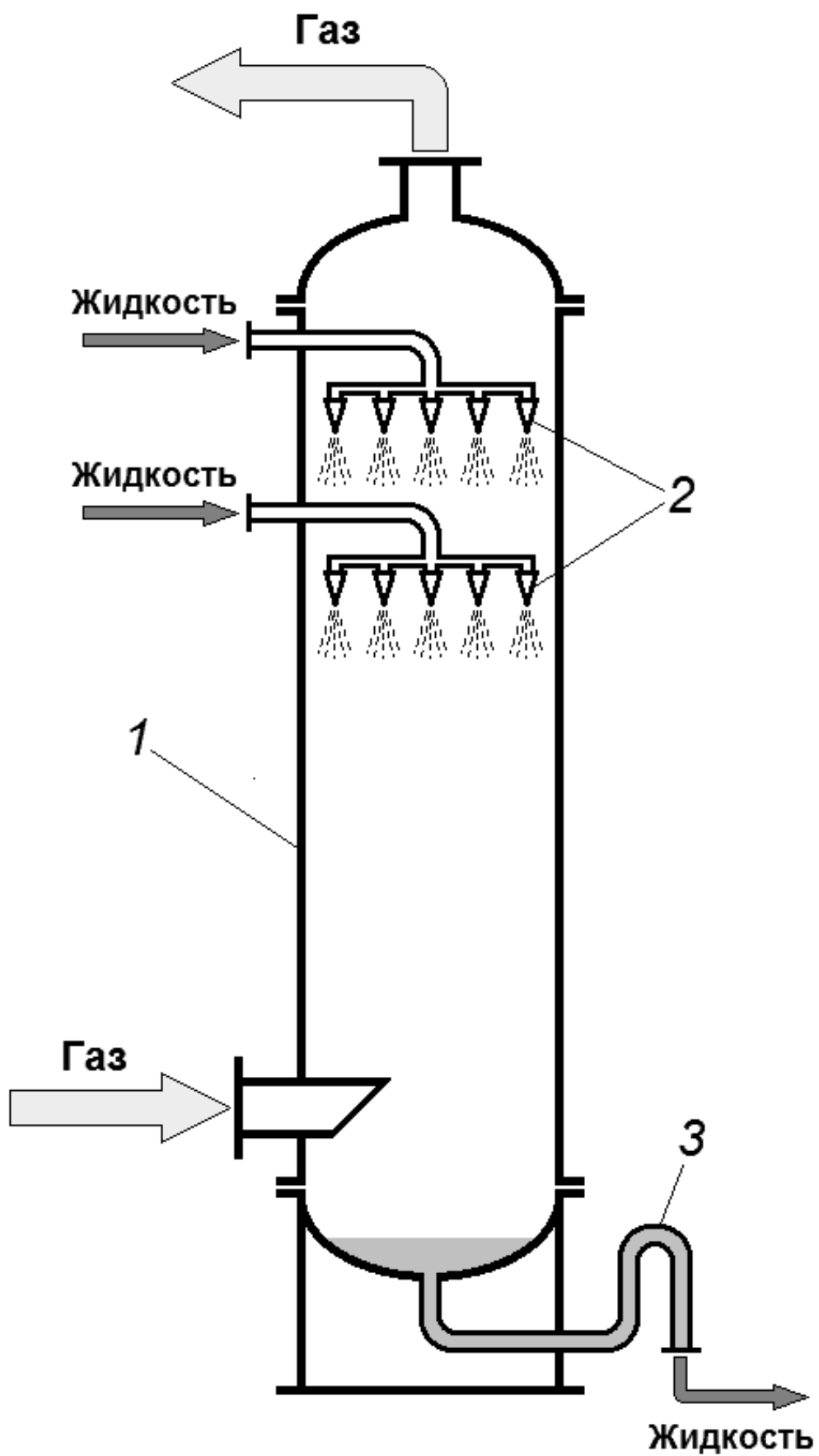


Рис. 27. Полный распыливающий абсорбер:
 1 – корпус; 2 – форсунки; 3 – гидрозатвор

Основной частью абсорбера является труба Вентури. Жидкость поступает в конфузор, течёт в виде плёнки и в горловине распыляется газовым потоком. Затем жидкость газовым потоком выносится в диффузор, в виде мелких капель, создающих поверхность контакта фаз. Отделение капель от газа происходит в сепараторе.

Достоинства абсорбера Вентури:

- 1) простота конструкции;
- 2) работа при высоких расходах газовой фазы.

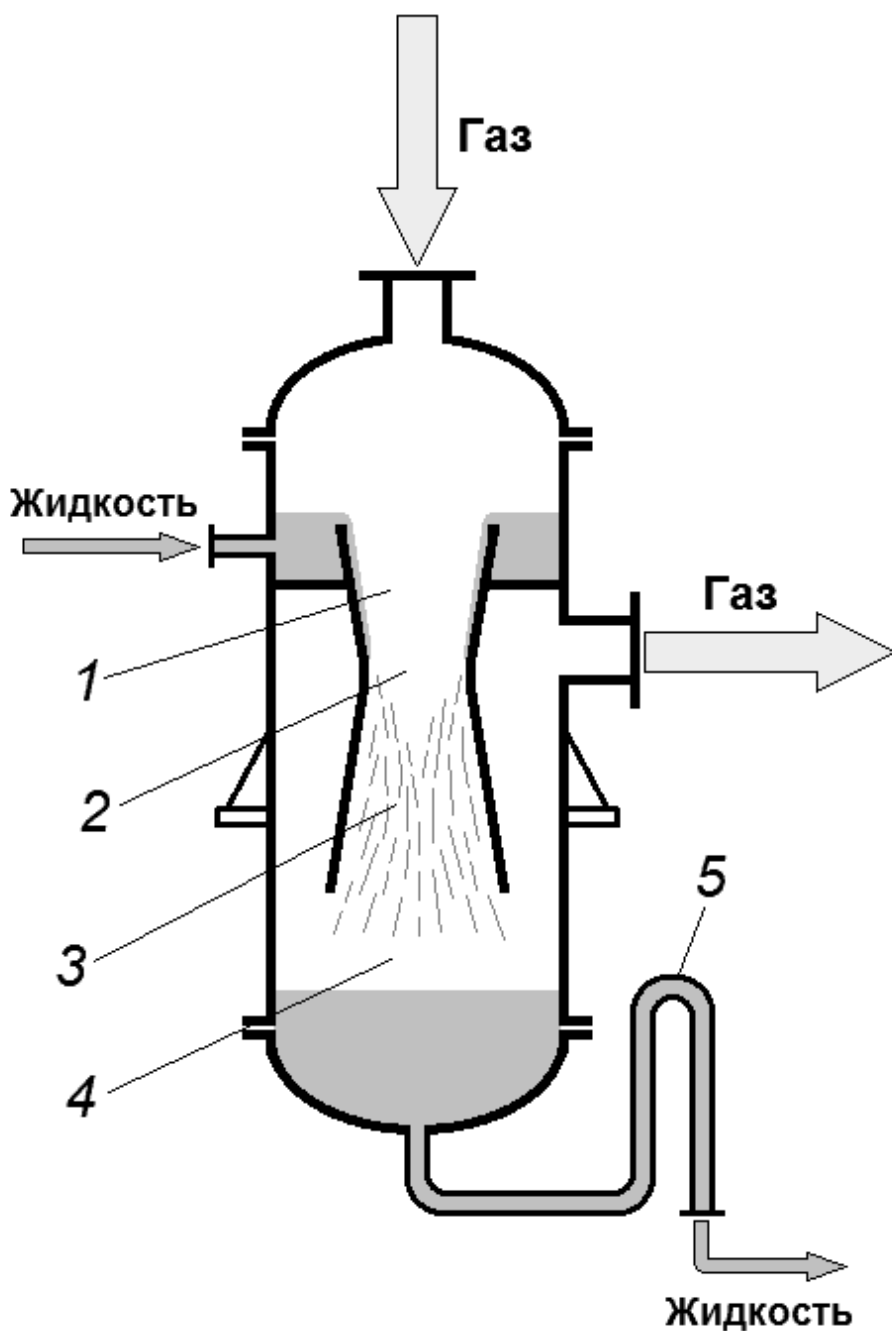


Рис. 28. Абсорбер Вентури с плёночным орошением:
1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; 4 – сепаратор; 5 – гидрозатвор

Недостатки абсорбера Вентури:

- 1) разделяющая способность вследствие прямотока фаз ограничена возможностью лишь однократного достижения равновесия между фазами;
- 2) малая площадь поверхности контакта фаз на единицу объёма аппарата;
- 3) сравнительно высокое гидравлическое сопротивление.

Насадочный плёночный абсорбер

Насадочные абсорберы, работающие в плёночном режиме (рис. 29, 30), получили наибольшее распространение в промышленности. Эти абсорберы представляют собой полые колонны, заполненные насадкой, которая уложена на опорные решётки. Для улучшения равномерности орошения насадки и предотвращения разрушения хрупких элементов насадки под её весом насадку укладывают слоями. Каждый слой опирается на свою опорную решётку, а между слоями установлены перераспределительные тарелки.

Жидкость в насадочной колонне течёт по элементам насадки в виде тонкой плёнки, поэтому площадь поверхности контакта фаз примерно равна площади смоченной поверхности насадки. Газ подаётся в колонну снизу и движется вверх через свободный объём насадки, контактируя со стекающей плёнкой жидкости.

Достоинства насадочного плёночного абсорбера:

- 1) относительно большая площадь поверхности контакта фаз, по сравнению с плёночными трубчатыми и полыми распыливающими абсорберами;
- 2) низкое гидравлическое сопротивление, по сравнению с тарельчатыми абсорберами;
- 3) высокая коррозионная стойкость контактных элементов;
- 4) более простая и менее металлоёмкая конструкция по сравнению с тарельчатыми аппаратами;
- 5) высокая движущая сила благодаря малому продольному перемешиванию.

Недостатки насадочного плёночного абсорбера:

- 1) меньшая поверхность контакта фаз, по сравнению с тарельчатыми барботажными колоннами, и, как следствие, большие объёмы аппаратов;
- 2) плохое смачивание насадки при малых расходах жидкой фазы;
- 3) сложность отвода теплоты при экзотермическом эффекте абсорбции.

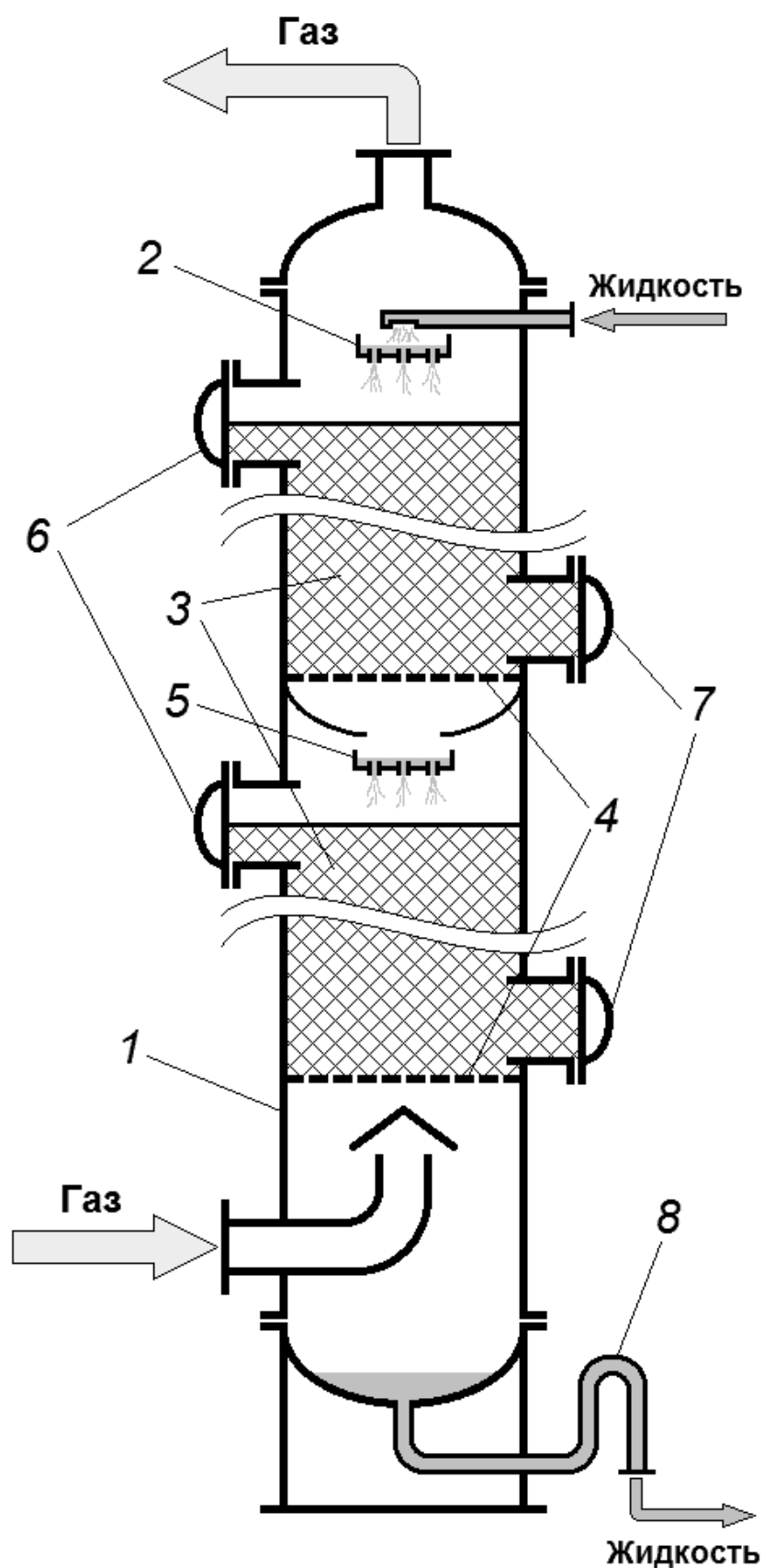


Рис. 29. Насадочный плёночный абсорбер:
 1 – корпус; 2 – распределительная тарелка; 3 – сегменты насадки;
 4 – опорные решётки; 5 – перераспределительные тарелки;
 6 – люки для загрузки насадки; 7 – люки для выгрузки насадки; 8 – гидрозатвор

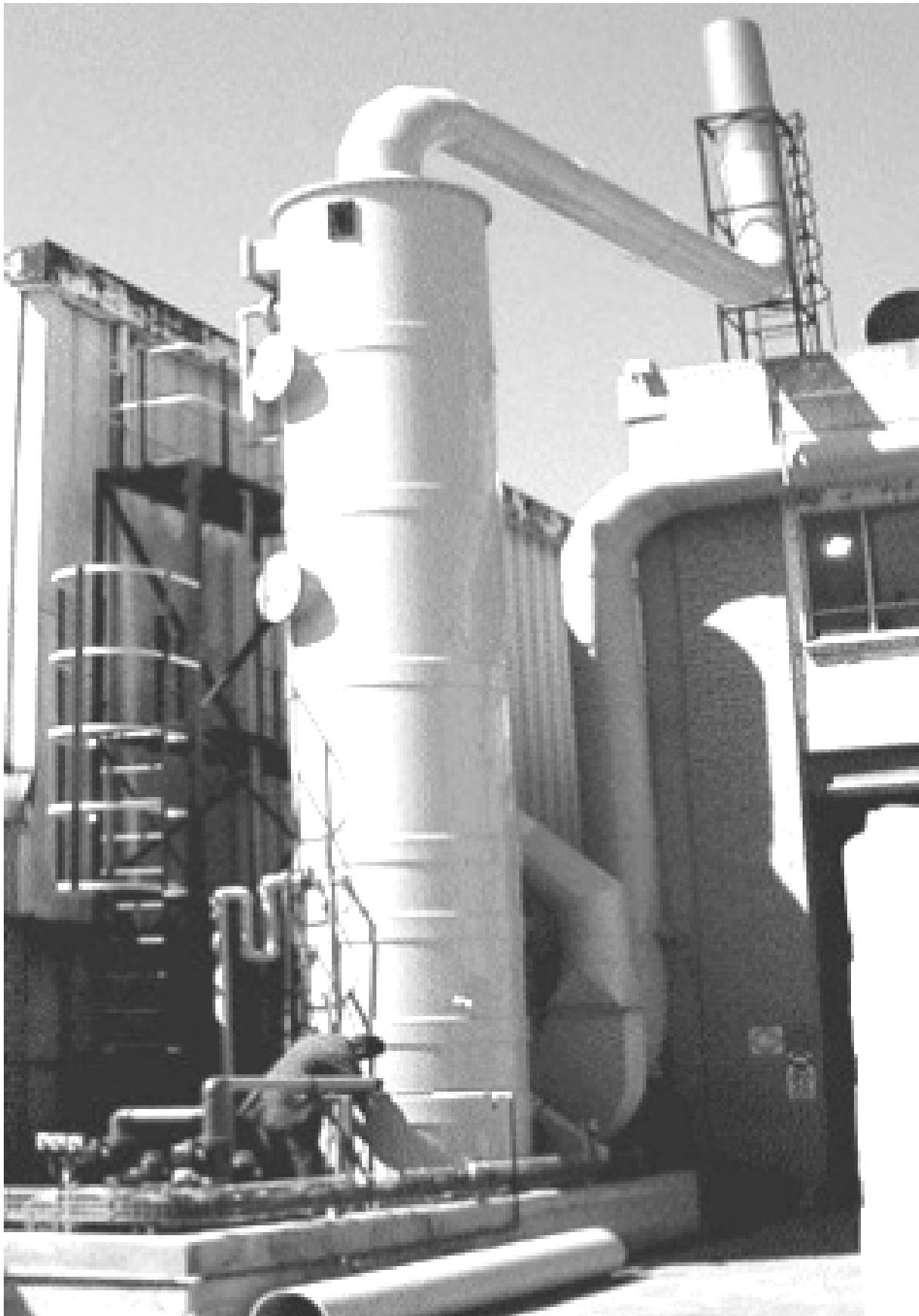


Рис. 30. Внешний вид насадочного абсорбера для очистки газовых выбросов

Эмульгационный абсорбер с затопленной насадкой

В насадочных аппаратах при больших расходах газовой фазы происходит **инверсия фаз**. До этого сплошной фазой была газовая, а жидкая фаза была дисперсной (распределённой по насадке в виде плёнки). При инверсии происходит обращение фаз – сплошной фазой становится жидкая, а газовая фаза переходит в дисперсное состояние (распределяясь в жидкости в виде пузырьков).

После инверсии фаз насадка переходит в **режим эмульгирования**. В свободном объёме насадки образуется газожидкостная дисперсная система, по внешнему виду напоминающая барботажный слой (пену). Режим эмульгирования начинается в самом узком сечении насадки, плотность засыпки которой всегда имеет некоторую неравномерность. Путём тщательного регулирования подачи газа режим эмульгирования может быть установлен по всей высоте насадки. Данный режим отличается высоким гидравлическим сопротивлением. Кроме того, режим эмульгирования сложно поддерживать, поскольку мал интервал изменения скоростей газа, при которых режим сохраняется. Всё это резко ограничивает применение режима эмульгирования на практике.

Режим эмульгирования соответствует максимальной эффективности насадочных колонн преимущественно вследствие увеличения площади поверхности контакта фаз, которая в этом режиме определяется не поверхностью насадки, а межфазной поверхностью образующейся газожидкостной дисперсии, заполняющей весь свободный объём насадки. В насадочных колоннах без специальных устройств поддерживать режим эмульгирования очень трудно, так как мал интервал изменения скоростей газа, при котором колонна работает в этом режиме. Поэтому разработана специальная конструкция эмульгационной насадочной колонны (рис. 31), в которой насадка погружена в жидкость – затоплена.

Достоинства эмульгационного абсорбера с затопленной насадкой:

1) высокая движущая сила благодаря незначительному продольному перемешиванию из-за наличия насадки;

2) возможность работы в широком интервале расходов фаз (возможность работы при низком расходе жидкой фазы является преимуществом перед насадочными плёночными абсорберами, при низком расходе газовой фазы – перед тарельчатыми абсорберами).

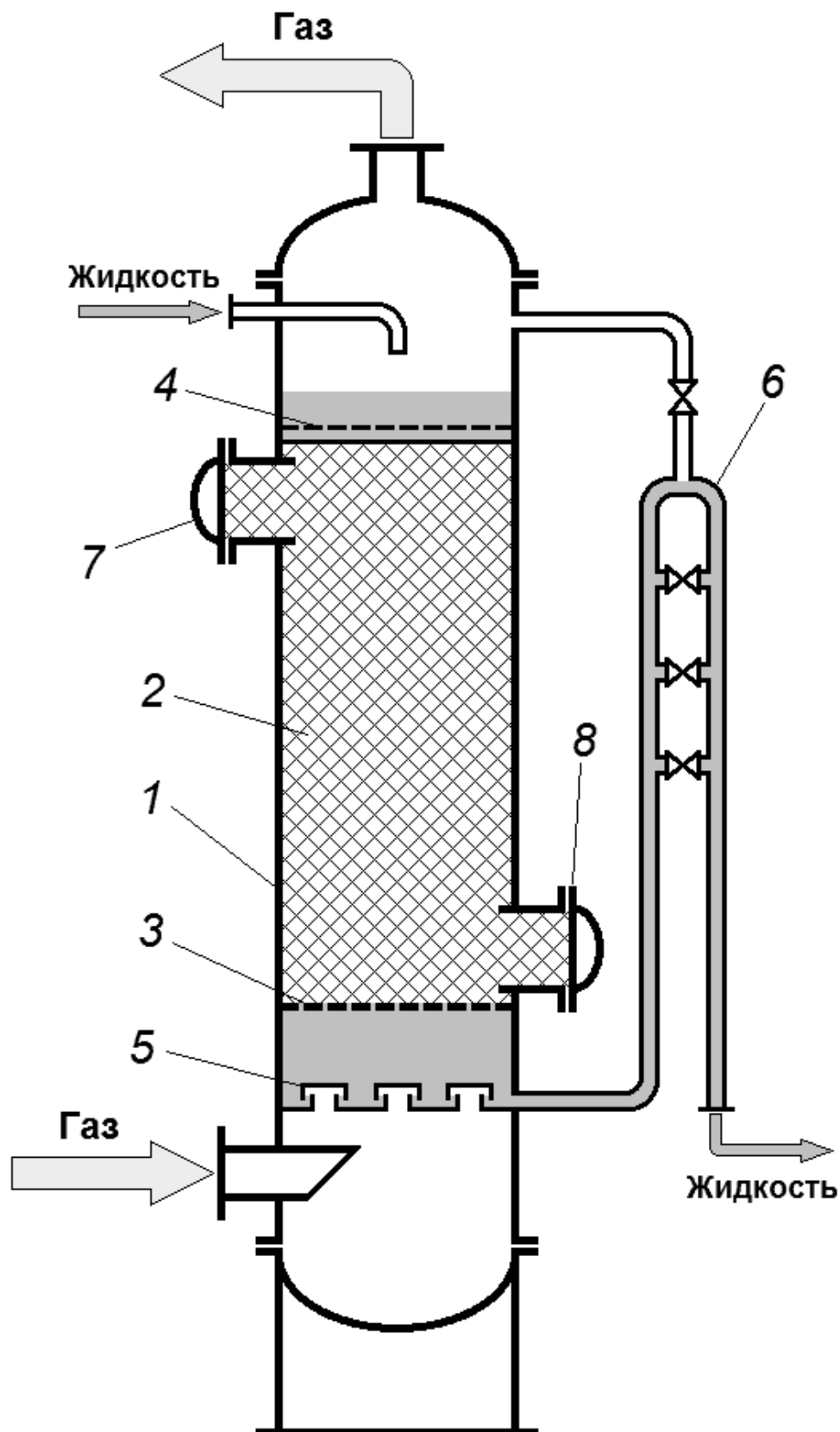


Рис. 31. Эмульгационный абсорбер с затопленной насадкой:
 1 – корпус; 2 – насадка; 3 – опорная решётка; 4 – сетка, фиксирующая насадку;
 5 – газораспределительная тарелка; 6 – гидрозатвор; 7 – люк для загрузки насадки;
 8 – люк для выгрузки насадки

Недостатки эмульгационного абсорбера с затопленной насадкой:

- 1) высокое гидравлическое сопротивление;
- 2) сложность отвода теплоты в случае высокого экзотермического эффекта абсорбции.

Тарельчатый абсорбер

В тарельчатых абсорберах поверхность контакта фаз больше, чем у других абсорберов. Однако для абсорбера большую роль играет его гидравлическое сопротивление, при высоком его значении энергетические затраты на транспортировку газа становятся недопустимо большими. Высокое гидравлическое сопротивление тарельчатых абсорберов ограничивает их применение. Поэтому из всех тарельчатых аппаратов наибольшее распространение в качестве абсорберов получили аппараты с провальными решетчатыми тарелками (рис. 32, 33), гидравлическое сопротивление которых не столь велико.

Абсорбер с провальными решетчатыми тарелками – это противоточный аппарат со ступенчатым контактом фаз, где поверхность контакта фаз образуется за счёт барботажа газа через слой жидкости на тарелках. Схема работы провальных тарелок и их устройство представлены на рис. 14 и 17.

Достоинства абсорбера с провальными решетчатыми тарелками:

- 1) большая поверхность контакта фаз на единицу объёма аппарата;
- 2) возможность работы при небольших расходах жидкости, в отличие от насадочных плёночных абсорберов;
- 3) возможность отвода теплоты путём установки на тарелках трубчатки, по которой движется охлаждающая вода.

Недостатки абсорбера с провальными решетчатыми тарелками:

- 1) высокое гидравлическое сопротивление (ниже, чем у других тарелок, но выше, чем у насадки, работающей в плёночном режиме);
- 2) невозможность работы при низких расходах газовой фазы из-за того, что при низком расходе газа жидкость не удерживается на тарелке, стекая через отверстия, и барботажный слой не образуется.

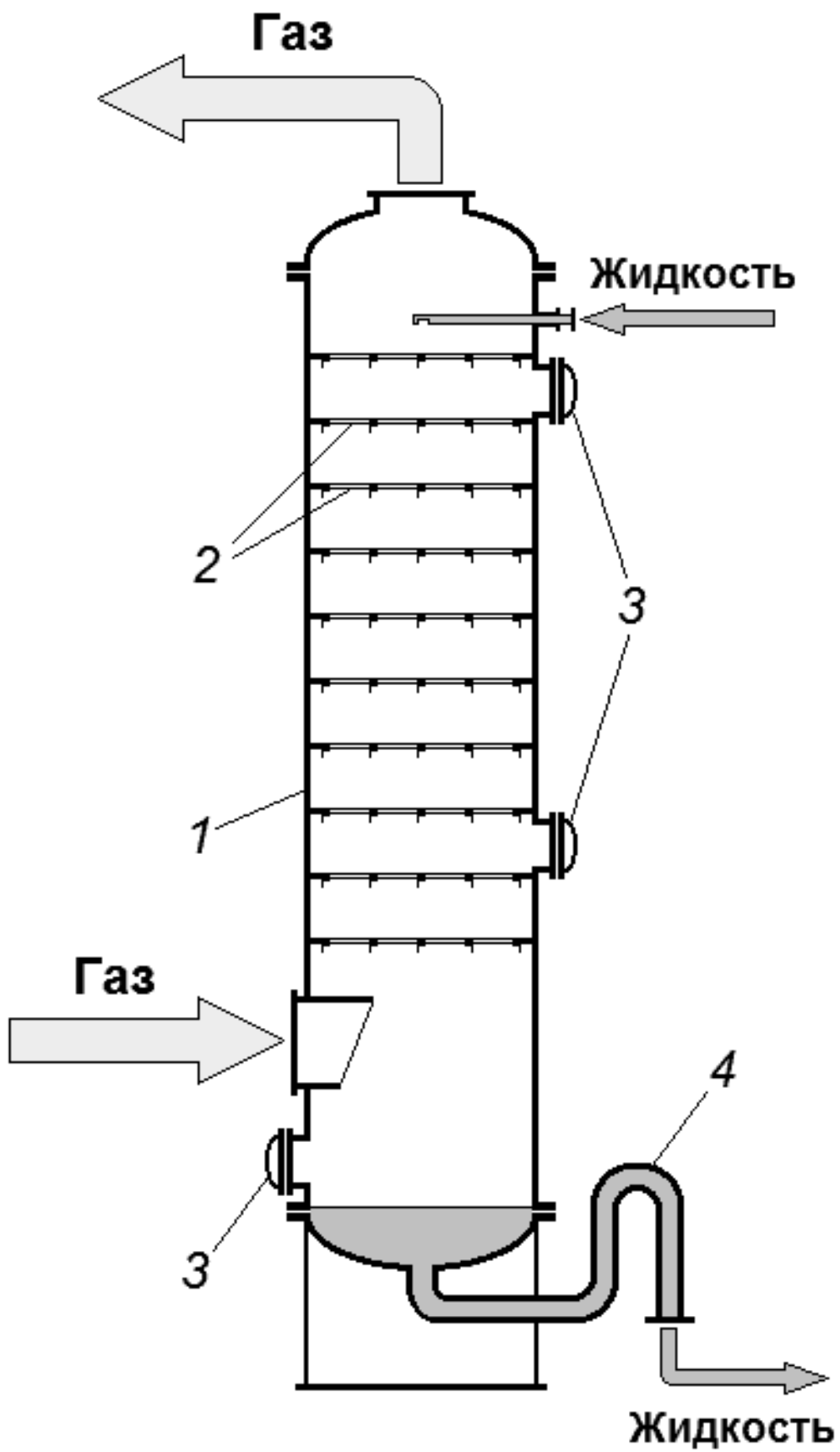


Рис. 32. Абсорбционная колонна с решетчатыми тарелками:
 1 – корпус; 2 – тарелки; 3 – люки для обслуживания; 4 – гидрозатвор



Рис. 33. Внешний вид тарельчатого абсорбера

Сравнение абсорбционных аппаратов

Выше было рассмотрено достаточно большое число различных по устройству и принципу действия абсорберов, даны их характеристики. В технике таких аппаратов, конечно же, намного больше, что затрудняет выбор наиболее рационального абсорбера для каждого конкретного случая. Условия проведения процесса и требования, предъявляемые к абсорберам в разных производствах, существенно различаются. Для того чтобы приступить к технико-экономическому расчёту, предварительно нужно выбрать наиболее вероятные типы аппаратов. Для решения данной задачи в табл. 2 рассматриваются основные условия проведения процессов и соответствие того или иного абсорбера этим условиям.

Сравнительные характеристики абсорберов

Показатель	Абсорберы							
	Плёночный трубчатый абсорбер	Полый распыливающий абсорбер	Абсорбер Вентури	Насадочный плёночный абсорбер	Абсорбер с затопленной насадкой	Абсорбер с решетчатыми тарелками	Абсорбер с ситчатыми тарелками	Абсорбер с колпачковыми тарелками
Возможность осуществления противотока в одной ступени	+	○	-	+	+	-	-	-
Возможность достижения в одном аппарате числа единиц переноса или числа теоретических тарелок:								
< 2	+	+	+	+	+	+	+	+
2 – 5	+	○	○	+	+	+	+	+
5 – 10	-	-	-	+	+	+	+	+
> 10	-	-	-	○	+	+	+	+
Возможность работы с соотношением объёмного расхода жидкости к объёмному расходу газа								
< 10 ⁻³	-	-	+	-	+	+	+	+
1 · 10 ⁻³ – 5 · 10 ⁻³	+	-	+	○	+	+	+	+
5 · 10 ⁻³ – 2 · 10 ⁻²	+	+	+	+	+	+	+	+
> 2 · 10 ⁻²	-	+	+	+	○	○	○	-
Возможность отвода тепла	+	-	-	-	-	+	+	+
Низкое гидравлическое сопротивление	+	+	+	+	-	-	-	-
Возможность широкого изменения нагрузок по газу и жидкости	+	+	+	+	○	-	○	○
Большое время пребывания жидкости	-	○	○	+	+	-	○	+
Возможность работы при наличии загрязнений	○	-	-	-	-	+	+	+
Количество перерабатываемого газа								
< 1000 м ³ /ч	+	+	+	+	+	+	+	+
1 000 м ³ /ч – 10 000 м ³ /ч	+	+	+	+	○	+	+	+
10 000 м ³ /ч – 100 000 м ³ /ч	○	○	○	+	-	+	+	+
Простота конструкции	○	-	-	+	○	+	○	-
Возможность работы в агрессивных средах	○	○	○	+	+	○	○	○

Соответствие аппарата тому или иному показателю оценено по следующей шкале: «-» – непригодна, «○» – сомнительно пригодна, «+» – пригодна.

1.4. Простая перегонка

Простая перегонка – процесс разделения смесей взаимно растворимых жидкостей путём однократного испарения части разделяемой смеси и последующей конденсации образовавшихся паров. Процесс основан на различии составов кипящей многокомпонентной жидкости и равновесного с ней пара, что является следствием различной летучести компонентов.

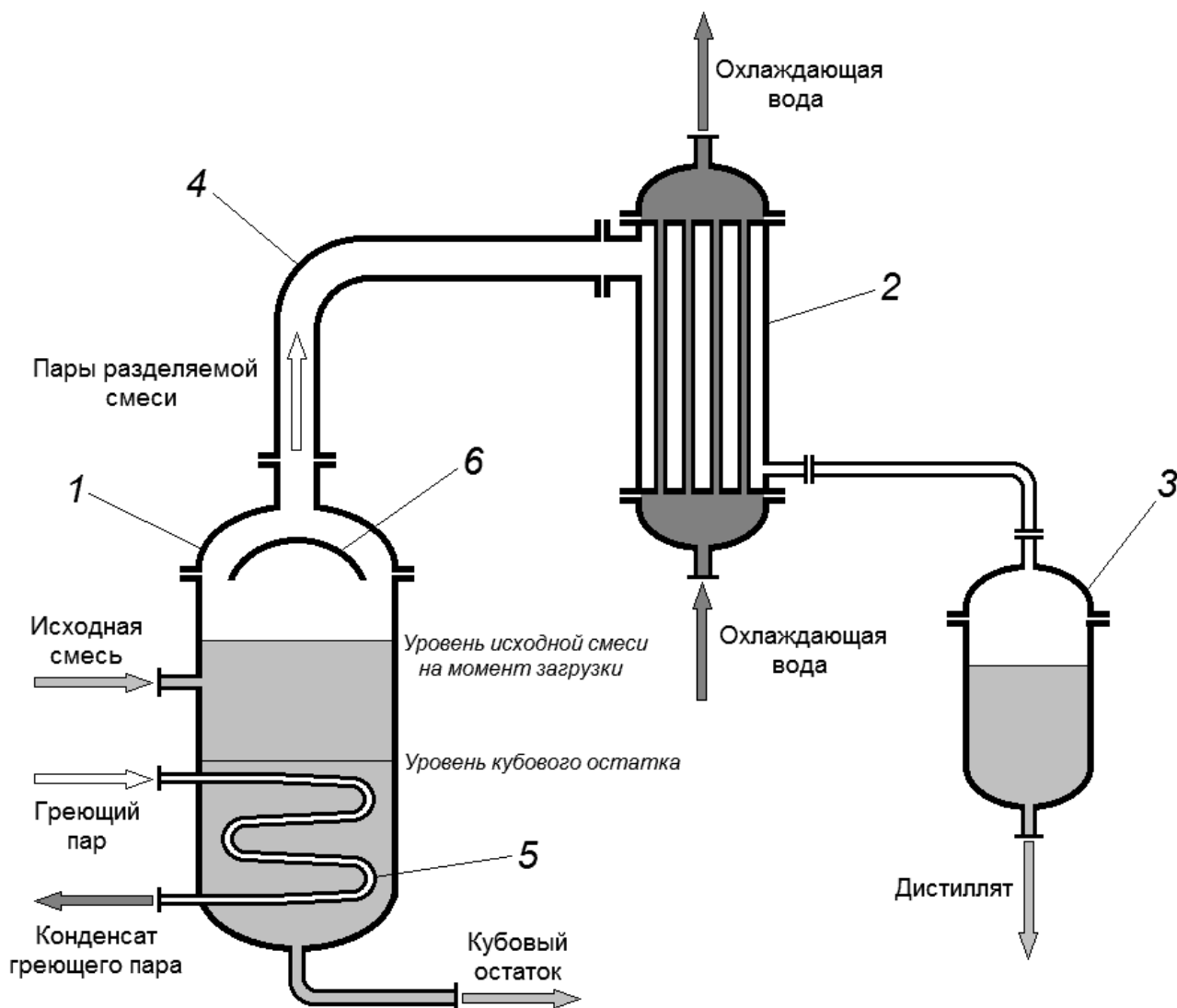


Рис. 34. Установка периодической перегонки:
1 – куб-кипятильник; 2 – конденсатор-холодильник; 3 – сборник дистиллята;
4 – паропровод; 5 – змеевик нагревателя; 6 – брызгоотбойник

Обычно процесс перегонки проводят периодически (рис. 34, 35), хотя в принципе этот процесс можно организовать и непрерывно. При периодической перегонке жидкость постепенно испаряется; образующиеся при этом пары не-

прерывно отводятся из куба-кипятильника и конденсируются с получением дистиллята. Доля низкокипящего компонента в равновесном с кипящей жидкостью паре выше, чем в жидкости, поэтому получаемый при конденсации пара дистиллят отличается по составу от исходной жидкости. При периодической перегонке содержание низкокипящего компонента в кубовой жидкости уменьшается, в результате содержание низкокипящего компонента в паре, а, следовательно, и в дистилляте также постепенно уменьшается. Благодаря этому при периодической перегонке можно получить различные по составу фракции дистиллята. Наиболее чистыми (обогащёнными низкокипящим компонентом) будут первые фракции дистиллята.



Рис. 35. Внешний вид установки простой перегонки

Степень разделения компонентов в условиях простой перегонки может быть повышена применением **дефлегмации** (рис. 36). В этом случае пары из куба-кипятильника поступают в дефлегматор, где они частично конденсируются. В конденсат при дефлегмации переходит преимущественно высококипящий компонент, и доля низкокипящего компонента в парах и в образующемся из паров дистилляте повышается. Таким образом, применение дефлегматора приводит к уменьшению количества получаемого дистиллята, но повышению его качества. Полученный в дефлегматоре конденсат, возвращаемый в куб-кипятильник, называют флегмой.

При разделении термически нестойких веществ простую перегонку проводят под вакуумом, благодаря чему температура кипения снижается. Снижения температуры кипения можно достичь, проводя перегонку с водяным паром или другими носителями, например, азотом. Перегонка с водяным паром дешевле перегонки под вакуумом, однако имеет дополнительное ограничение – разделяемые вещества должны быть нерастворимы в воде.

Достоинства и недостатки простой перегонки

Установки простой перегонки отличаются простотой конструкции и низкой стоимостью, по сравнению с ректификационными установками. Энергетические затраты при простой перегонке также ниже, чем при ректификации. Однако степень разделения при простой перегонке невысока, особенно при близкой летучести разделяемых компонентов. Это значительно ограничивает применение простой перегонки, поэтому, как правило, она применяется для предварительного (грубого) разделения жидких смесей.

Периодическая перегонка отличается низкой производительностью, по сравнению с аппаратами непрерывного действия. При этом периодическая перегонка обеспечивает несколько лучшее разделение компонентов, чем непрерывная, а также позволяет собирать различные по составу фракции дистиллята.

Перегонка с дефлегмацией даёт более тщательное разделение компонентов, однако является и более энергоёмким процессом. Фактически, перегонка с дефлегмацией занимает промежуточное положение между простой перегонкой и ректификацией по качеству дистиллята и энергоёмкости процесса.

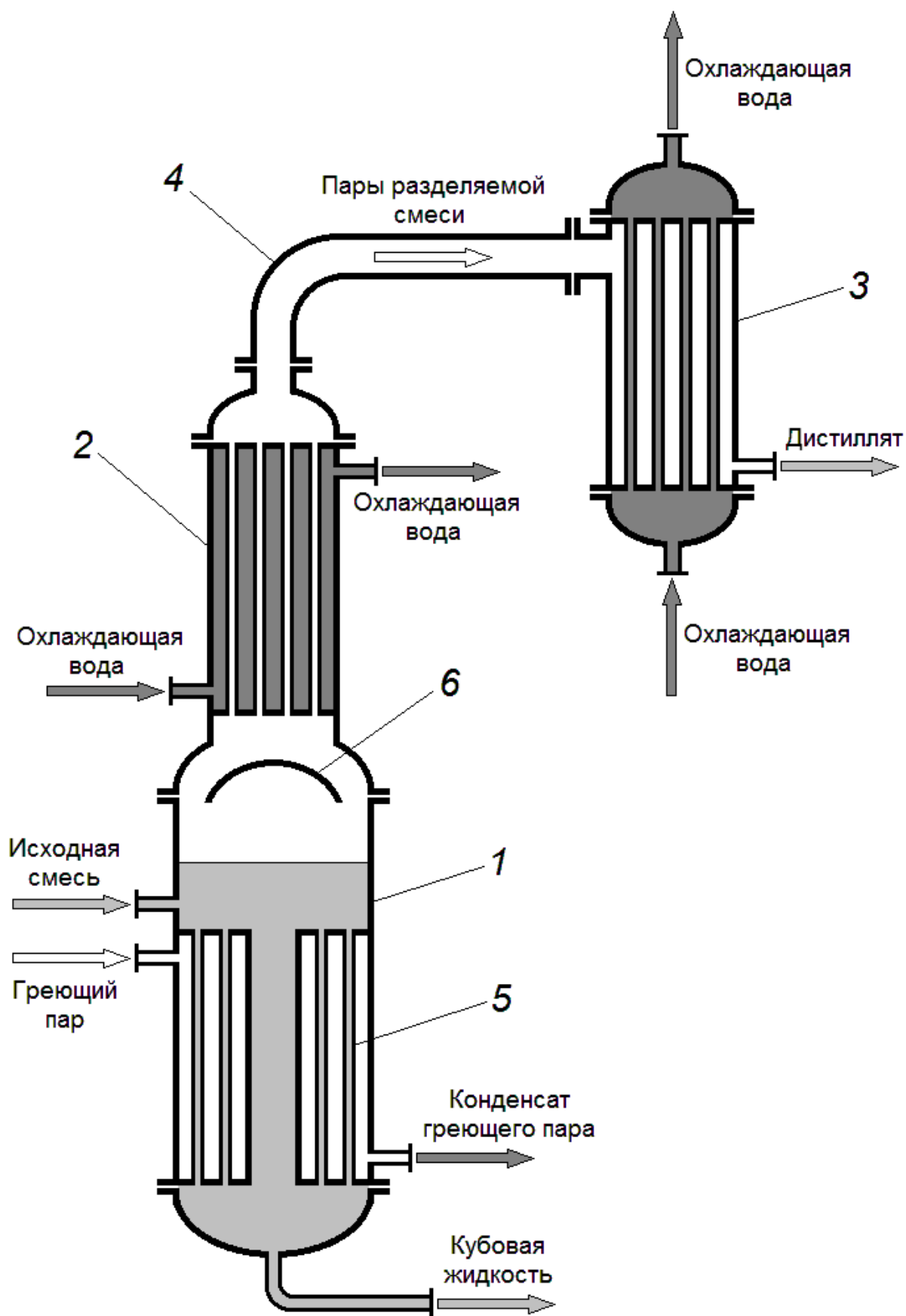


Рис. 36. Установка непрерывной перегонки с дефлегматором:
 1 – куб-кипятильник; 2 – дефлегматор; 3 – конденсатор-холодильник;
 4 – паропровод; 5 – трубчатка греющей камеры; 6 – брызгоотбойник

1.5. Ректификация

Ректификация – процесс разделения смесей взаимно растворимых жидкостей путём испарения части разделяемой смеси и последующей конденсации образовавшихся паров с организацией противоточного массо- и теплообмена между жидкой и паровой фазами. Процесс основан на различии составов кипящей многокомпонентной жидкости и равновесного с ней пара, что является следствием различной летучести компонентов.

Процесс ректификации проводится в противоточных колонных аппаратах, снабженных контактными устройствами, и фактически сводится к одновременно протекающим, многократно повторяемым актам частичного испарения и конденсации разделяемой смеси на поверхности раздела фаз. При каждой частичной конденсации преимущественно конденсируется высококипящий компонент. Выделившаяся при конденсации теплота приводит к частичному испарению жидкости, при этом преимущественно испаряется низкокипящий компонент. Благодаря чему жидкость обогащается высококипящим компонентом, а пар – низкокипящим. В результате многократного повторения этих процессов из верха колонны выходит пар, содержащий преимущественно низкокипящий компонент, а снизу колонны выходит жидкость, содержащая преимущественно высококипящий компонент.

Процесс ректификации осуществляют при атмосферном давлении, повышенном давлении и под вакуумом. Под давлением обычно проводят ректификацию сжиженных газов. Так, разделение кислорода и азота, проводимое при повышенном давлении и низкой температуре, относится к процессам **криоректификации**. Под вакуумом проводят ректификацию высококипящих и нетермостойких веществ. Изменением давления также смещают азеотропную точку при разделении азеотропных смесей.

Ректификацию обычно проводят в установках непрерывного действия. Периодическую ректификацию используют в случае часто меняющихся по составу разделяемых смесей и при небольших производительностях. Ректификация играет ключевую роль в нефтеперерабатывающей промышленности (выделение бензинов, керосинов и других фракций из нефти, разделение продуктов крекинга, риформинга, пиролиза) и является самым распространенным процессом разделения в химической и смежных отраслях промышленности. На рис. 37

представлены ректификационные колонны нефтеперерабатывающей промышленности.



Рис. 37. Промышленные ректификационные колонны

Тарельчатая ректификационная колонна

Тарельчатые контактные устройства обеспечивают наибольшую площадь поверхности контакта фаз. Кроме того, тарельчатые колонны позволяют производить отбор фракций жидкости с разных тарелок (например, при переработке нефти с верхних тарелок отбирают бензиновые и лигроиновые фракции, со средних – керосиновые фракции, с нижних – газойлевые фракции). Это приводит к преимущественному использованию в ректификации тарельчатых колонн.

Тарельчатые ректификационные колонны по устройству принципиально не отличаются от тарельчатых абсорбционных колонн. Основной отличительной особенностью ректификационных колонн является то, что для проведения ректификации они должны быть снабжены соответствующей теплообменной аппаратурой (в первую очередь кипятильником и конденсатором-дефлегматором, а также холодильниками дистиллята, кубового остатка и подогревателем исходной смеси).

На рис. 38 изображена ректификационная установка с тарельчатой колонной, в которой установлены ситчатые тарелки, снабжённые переливными устройствами. Колонна состоит из двух частей: верхней (укрепляющей) и нижней (исчерпывающей). К нижней части колонны относится тарелка питания, на которую подаётся исходная смесь, и все нижерасположенные тарелки. Тарелки, находящиеся выше точки ввода исходной смеси, образуют верхнюю часть колонны.

Жидкость, стекая по тарелкам колонны в итоге попадает в нижнее сепарационное пространство колонны, откуда поступает в кипятильник (испаритель), обогреваемый обычно водяным паром. В кипятильнике происходит испарение жидкости. При расчёте ректификационных колонн испарение обычно принимают полным, однако на практике наблюдается испарение с образованием парожидкостной смеси. Парожидкостная смесь поступает в нижнее сепарационное пространство колонны, где из неё выделяется пар, который под собственным давлением начинает движение через тарелки колонны.

Пар, проходя через тарелки колонны, барботирует через находящийся на тарелках слой жидкости; при этом происходит тепло- и массообмен между жидкостью и паром, принимаемый обычно адиабатическим, в ходе которого пар обогащается низкокипящим компонентом из жидкости, отдавая взамен высококипящий компонент. Достигший верха колонны пар направляется в

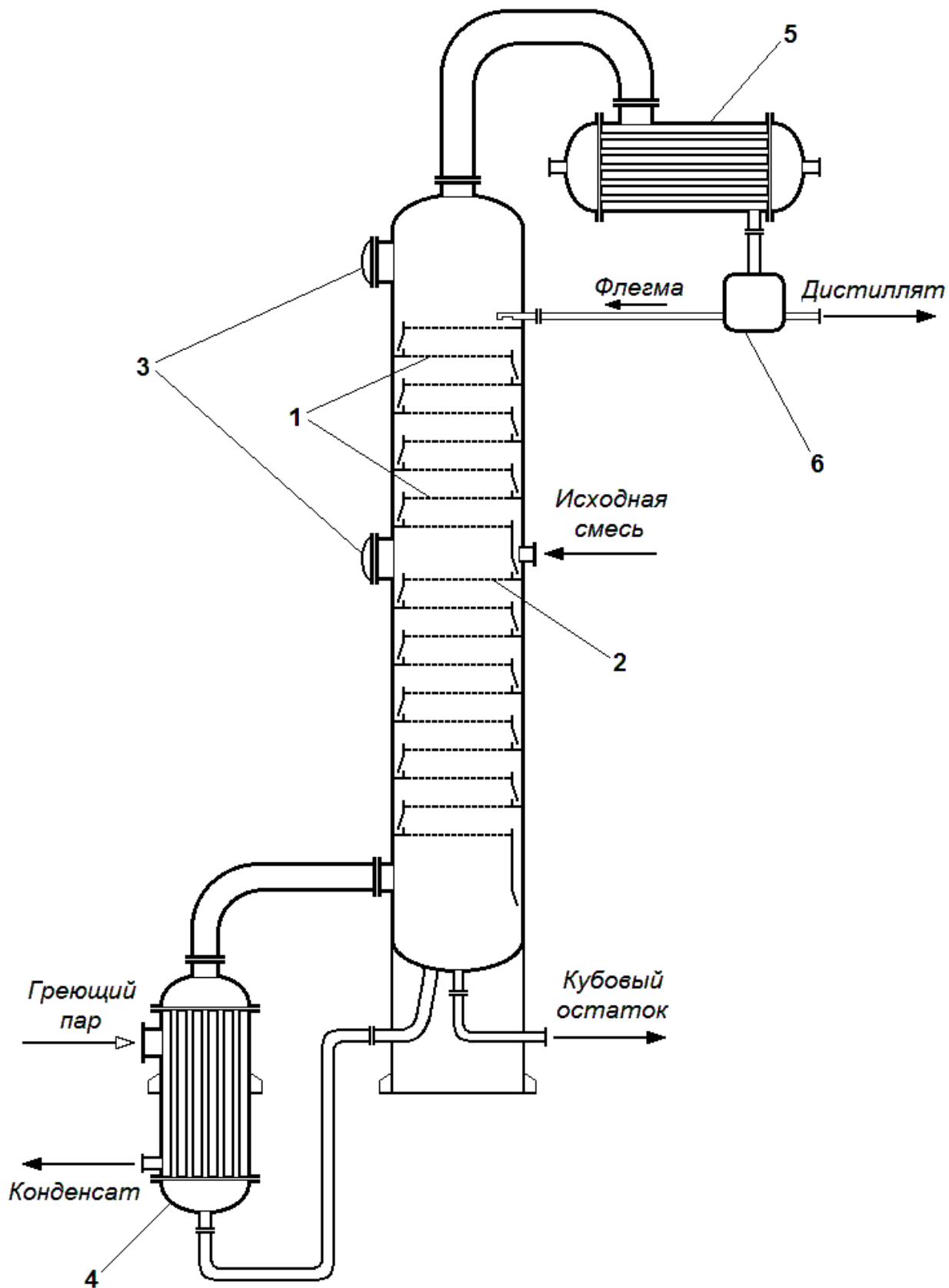


Рис. 38. Тарельчатая ректификационная колонна с кипятыльником и дефлегматором:
 1 – ситчатые переливные тарелки; 2 – тарелка питания; 3 – люки для обслуживания;
 4 – кипятыльник; 5 – дефлегматор; 6 – флегмоделитель

дефлегматор, обычно охлаждаемый водой. В дефлегматоре происходит конденсация паров, и полученный конденсат делят на два потока: флегму и дистиллят. Называемая флегмой часть конденсата возвращается в колонну, поступая на верхнюю тарелку.

Обычно дефлегматор устанавливают выше верха колонны, для того чтобы флегма стекала в колонну самотёком. Если высота колонны велика, то для удобства её обслуживания и снижения высоты установки дефлегматор устанавливают ниже и используют насос для подачи флегмы. При ректификации с частичной дефлегмацией паров дефлегматор встроен в верхнюю часть колонны. В этом случае флегма образуется непосредственно в колонне из части паров, а оставшиеся пары отводятся из колонны и превращаются в дистиллят в дополнительном конденсаторе.

Флегма, орошая тарелки колонны, образует необходимую для организации барботажа жидкую фазу. На тарелке питания жидкая фаза пополняется исходной смесью. Таким образом, верхняя часть колонны орошается жидкой фазой, образованной флегмой, а нижняя часть – жидкой фазой, образованной совместно флегмой и исходной смесью.

Кубовый остаток отводится в качестве одного из продуктов ректификации либо из нижнего сепарационного пространства колонны, либо из ответвления трубы, по которой жидкость направляется в куб-кипятильник. Вторым продуктом ректификации (дистиллят) отводят из ёмкости для промежуточного сбора конденсата.

Насадочная ректификационная колонна

Насадочные ректификационные колонны менее эффективны, по сравнению с тарельчатыми. При равенстве рабочих объёмов колонн, площадь поверхности контакта фаз в насадочной колонне будет меньше, чем в тарельчатой. Кроме того, неравномерность стекания жидкости по насадке ограничивает диаметр насадочных колонн (диаметр насадочных колонн не превышает 2,8 м, диаметр тарельчатых колонн достигает 4 м). Всё это существенно ограничивает использование насадочных колонн в ректификации. Однако при небольших производительностях насадочные колонны востребованы из-за своей простоты изготовления и низкой стоимости.

На рис. 39. изображена ректификационная установка с насадочной колонной. Принцип работы этой установки аналогичен принципу работы установки с тарельчатой колонной. Отличие заключается в том, что создание поверхности контакта фаз происходит не за счёт барботажа пара через жидкость на тарелках, а за счёт плёночного течения жидкости по насадке.

Жидкая фаза, образованная флегмой в верхней части колонны, и совместно исходной смесью и флегмой в нижней части колонны, стекает по насадке, взаимодействуя с движущейся противотоком паровой фазой. Для увеличения равномерности орошения насадки она разбита на слои, каждый из которых опирается на свою опорную решётку, что также предотвращает разрушение хрупких элементов насадки под её весом. Между слоями насадки установлены перераспределительные тарелки, обеспечивающие равномерность орошения сегментов насадки. Для доступа к насадке каждый её слой снабжён загрузочным и разгрузочным люком.

Экстрактивная и азеотропная ректификация

Уровень трудности разделения смесей может быть оценён с помощью относительной летучести, для идеальных растворов равной отношению давлений насыщенных паров компонентов. Если относительная летучесть незначительно превышает единицу, смесь является трудно разделяемой. Для разделения такой смеси целесообразно использование методов, основанных на введении в разделяемую смесь дополнительного компонента, называемого разделяющим агентом, который позволяет изменять относительную летучесть компонентов.

При **экстрактивной ректификации** добавляемый компонент лучше растворяет (связывая) один из компонентов разделяемой смеси с близкими летучестями. При этом понижается давление насыщенных паров лучше растворимого в разделяющем агенте компонента. Второй компонент разделяемой смеси, плохо растворимый в разделяющем агенте, в результате будет иметь большее давление насыщенных паров. Благодаря этому увеличивается относительная летучесть в системе. Резкое увеличение относительной летучести при этом облегчает разделение исходных компонентов. Добавляемый компонент остаётся в кубовой жидкости вместе с менее летучим компонентом, что влечёт за собой необходимость дополнительного разделения кубовой жидкости для извлечения из неё добавляемого компонента.

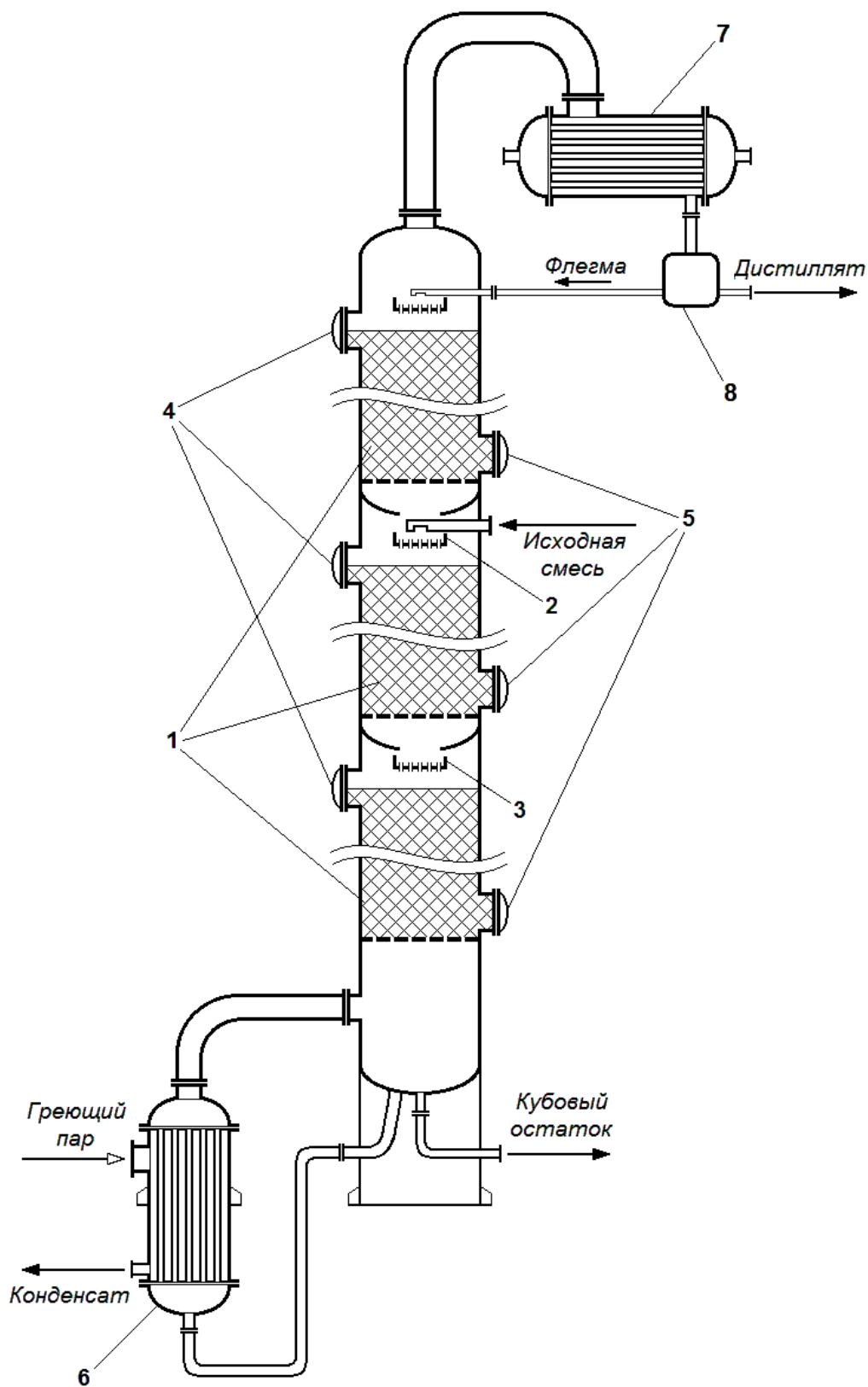


Рис. 39. Насадочная ректификационная колонна с кипятыльником и дефлегматором:

- 1 – сегменты насадки; 2 – тарелка питания; 3 – перераспределительная тарелка;
 4 – люки для загрузки насадки; 5 – люки выгрузки насадки; 6 – кипятыльник;
 7 – дефлегматор; 8 – флегмоделитель

При **азеотропной ректификации** добавляемый компонент образует с компонентами разделяемой смеси один или несколько азеотропов. Поскольку смеси азеотропного состава обычно более летучи, чем образующие их компоненты, то добавляемый компонент уходит в дистиллят, унося с собой преимущественно один из разделяемых компонентов. Полученный таким путём дистиллят в дальнейшем разделяют, выделяя из него добавляемый компонент.

Наиболее сложной задачей при использовании методов экстрактивной и азеотропной ректификации является выбор добавляемого компонента, который должен удовлетворять следующим условиям:

1) обеспечивать возможно большее повышение относительной летучести разделяемых компонентов;

2) достаточно легко регенерироваться (извлекаться из кубовой жидкости при экстрактивной ректификации и из дистиллята при азеотропной ректификации);

3) обладать достаточной растворимостью в разделяемой смеси для предотвращения расслаивания жидкости при температурном режиме в колонне;

4) быть безопасным в обращении, доступным и дешёвым, термически стабильным.

Если в качестве добавляемого компонента используют растворимые твёрдые вещества, то такой процесс разделения называют **солевой ректификацией**.

1.6. Жидкостная экстракция

Жидкостная экстракция – процесс разделения смесей взаимнорастворимых жидкостей путём перехода одного или нескольких компонентов смеси из одной жидкой фазы в другую, практически не растворимую или плохо растворимую в первой фазе. Процесс протекает при непосредственном контакте двух жидких фаз и основан на различии растворимости извлекаемого компонента в этих фазах.

Процессы жидкостной экстракции применяют в химической, нефтехимической, фармацевтической, гидрометаллургической и других отраслях промышленности при получении редких элементов, извлечении ценных или токсичных веществ из растворов, в том числе из сточных вод.

Жидкостная экстракция, наряду с перегонкой и ректификацией, является одним из основных методов разделения однородных жидких смесей. При малой концентрации извлекаемого компонента процесс экстракции обычно экономически более выгоден, чем перегонка и ректификация, поскольку при экстракции нет необходимости испарять значительную часть жидкой смеси. Кроме того, экстракцию целесообразно применять в случае, если смесь невозможно или трудно разделить ректификацией, или разделяемые компоненты разлагаются при нагревании.

Экстрагирующую жидкость, в которую переходит извлекаемый компонент, называют **экстрагентом**, или растворителем. Раствор извлечённых веществ в экстрагенте называют **экстрактом**, а раствор, из которого удалены экстрагируемые компоненты, – **рафинатом**.

По принципу взаимодействия и способу контакта фаз экстракторы подразделяют на две группы: **ступенчатые (смесительно-отстойные)** и **дифференциально-контактные**. Ступенчатый экстрактор представляет собой несколько последовательно соединённых ступеней, каждая из которых состоит из аппарата смешения и отстойника эмульсий. Такие аппараты громоздки, и обычно не используются, если для эффективного разделения требуется более трёх ступеней.

Из дифференциально-контактных экстракторов наибольшее распространение получили: полые колонные экстракторы, насадочные, тарельчатые, роторно-дисковые и центробежные экстракторы.

Полые (распылительные) колонные экстракторы

Наиболее простыми по устройству дифференциально-контактными экстракторами являются распылительные колонны. Они относятся к гравитационным экстракторам – аппаратам, где движение диспергированной фазы через сплошную происходит вследствие разности их плотностей. В зависимости от того, какую фазу диспергируют, конструкция экстрактора несколько различается (см. рис. 40). Эти экстракторы представляют собой полые колонны с устройствами для диспергирования тяжёлой (рис. 40, а) или лёгкой (рис. 40, б) фазы (исходного раствора или экстрагента). Сплошная и дисперсная фазы перемещаются противотоком. Капли диспергированной фазы, пройдя через столб сплошной фазы, коалесцируют в сплошной слой, после чего выводятся из ко-

лонны. Тяжёлая фаза уходит через гидрозатвор, с помощью которого регулируют уровень раздела фаз в колонне.

Полые колонные экстракторы просты в устройстве и дешёвы в изготовлении. Важным достоинством этих аппаратов является возможность обработки в них загрязнённых твёрдыми частицами жидкостей. Иногда эти аппараты используют для экстрагирования из пульп и суспензий.

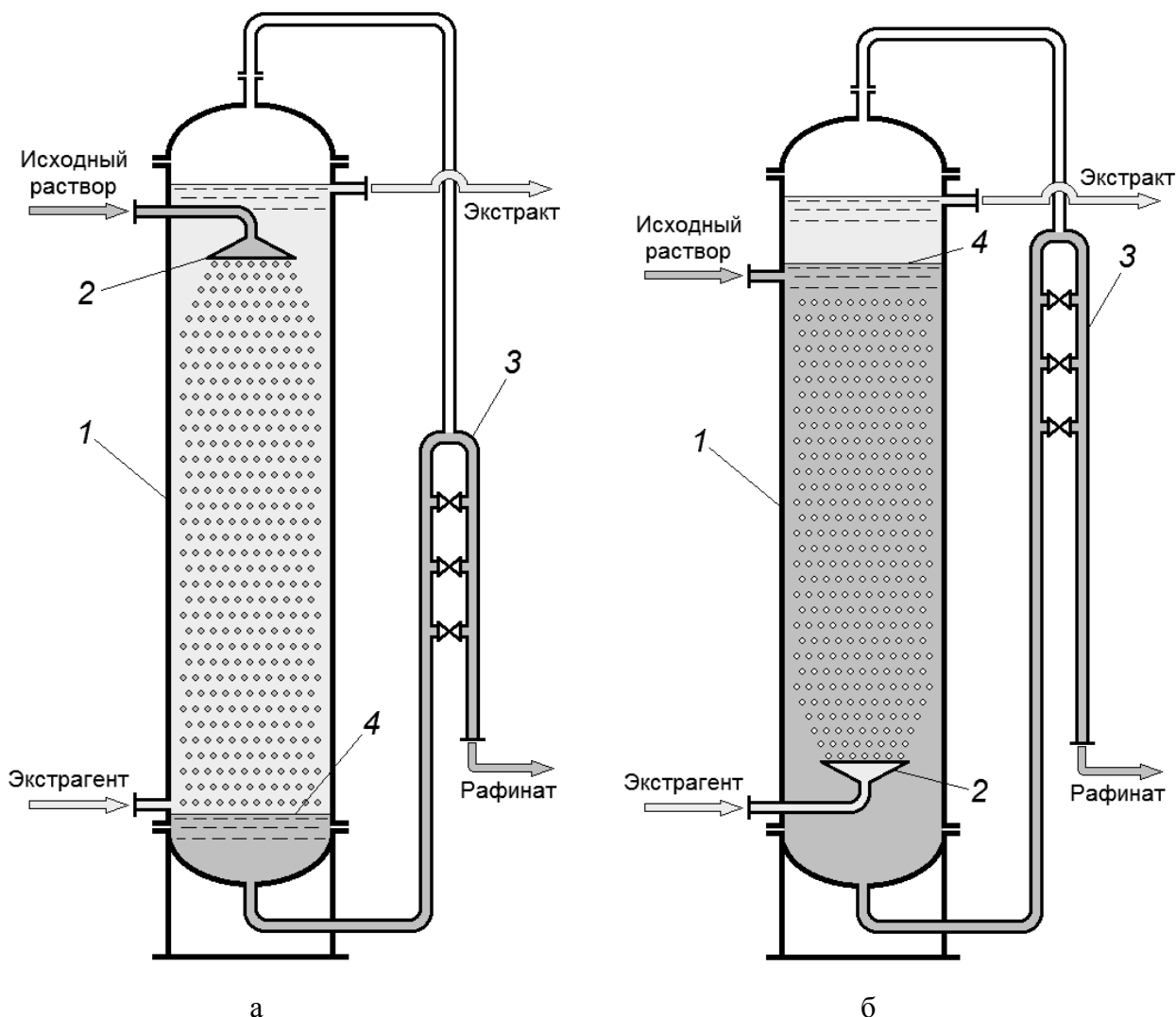


Рис. 40. Полые колонные экстракторы с распылением тяжёлой фазы (а) и лёгкой фазы (б):
1 – корпус; 2 – распределительное устройство; 3 – гидрозатвор; 4 – поверхность раздела фаз

Полые колонные экстракторы отличаются невысокой эффективностью, что является следствием возникающего в них продольного перемешивания, снижающего движущую силу массопередачи. При большой доле дисперсной фазы снижается сечение для движения сплошной фазы и увеличивается унос капель, что может привести к захлёбыванию экстрактора.

Насадочный экстрактор

Достаточно широкое распространение в промышленности получили насадочные экстракторы (рис. 41), которые по конструкции во многом аналогичны насадочным абсорберам. В качестве насадки используют в основном кольца Рашига. Насадку располагают на опорных решётках сплошным слоем или секциями, между которыми происходит перемешивание фаз. Одну из фаз диспергируют с помощью распределительного устройства в потоке сплошной фазы. В слое насадки капли диспергированной фазы могут многократно коалесцировать, а затем дробиться, что повышает эффективность процесса. Очень важным вопросом является выбор материала насадки. Она должна предпочтительно смачиваться сплошной фазой, поскольку при этом устраняется возможность прилипания капель диспергированной фазы к поверхности насадки. Разделение фаз происходит в отстойных зонах, часто имеющих больший диаметр, чем диаметр экстрактора, что улучшает сепарацию фаз.

Ввиду малого различия плотностей фаз в системе жидкость-жидкость, по сравнению с системой газ-жидкость, скорость их взаимного перемещения под действием гравитационных сил незначительна, что снижает скорость массопереноса. Чтобы устранить этот недостаток, в контактирующие фазы вводят дополнительную механическую энергию.

Эффективность массообмена можно повысить введением механической энергии за счёт пульсации фаз. Пульсации в колонне генерируются наружным механизмом (пульсатором) гидравлически. В качестве пульсаторов используют в основном поршневые бесклапанные, мембранные, сильфонные и пневматические насосы. Применение пульсаций способствует лучшему диспергированию, интенсивному обновлению поверхности контакта фаз, увеличению времени пребывания диспергированной фазы в экстракторе. Насадочный экстрактор, снабжённый пульсатором, относится к механическим экстракторам, без пульсатора – к гравитационным.

Насадочные экстракторы несколько сложнее по устройству и выше по стоимости, чем полые, но отличаются более высокой эффективностью. Движущая сила в насадочных экстракторах выше, поскольку затруднено обратное перемешивание фаз. По сравнению с полыми экстракторами также выше площадь поверхности контакта фаз и время пребывания диспергированной фазы в аппарате, что способствует улучшению массопереноса. Однако проблема захлёбыва-

ния аппарата при большой доле дисперсной фазы ещё более усугубляется, поскольку часть сечения занята насадкой.

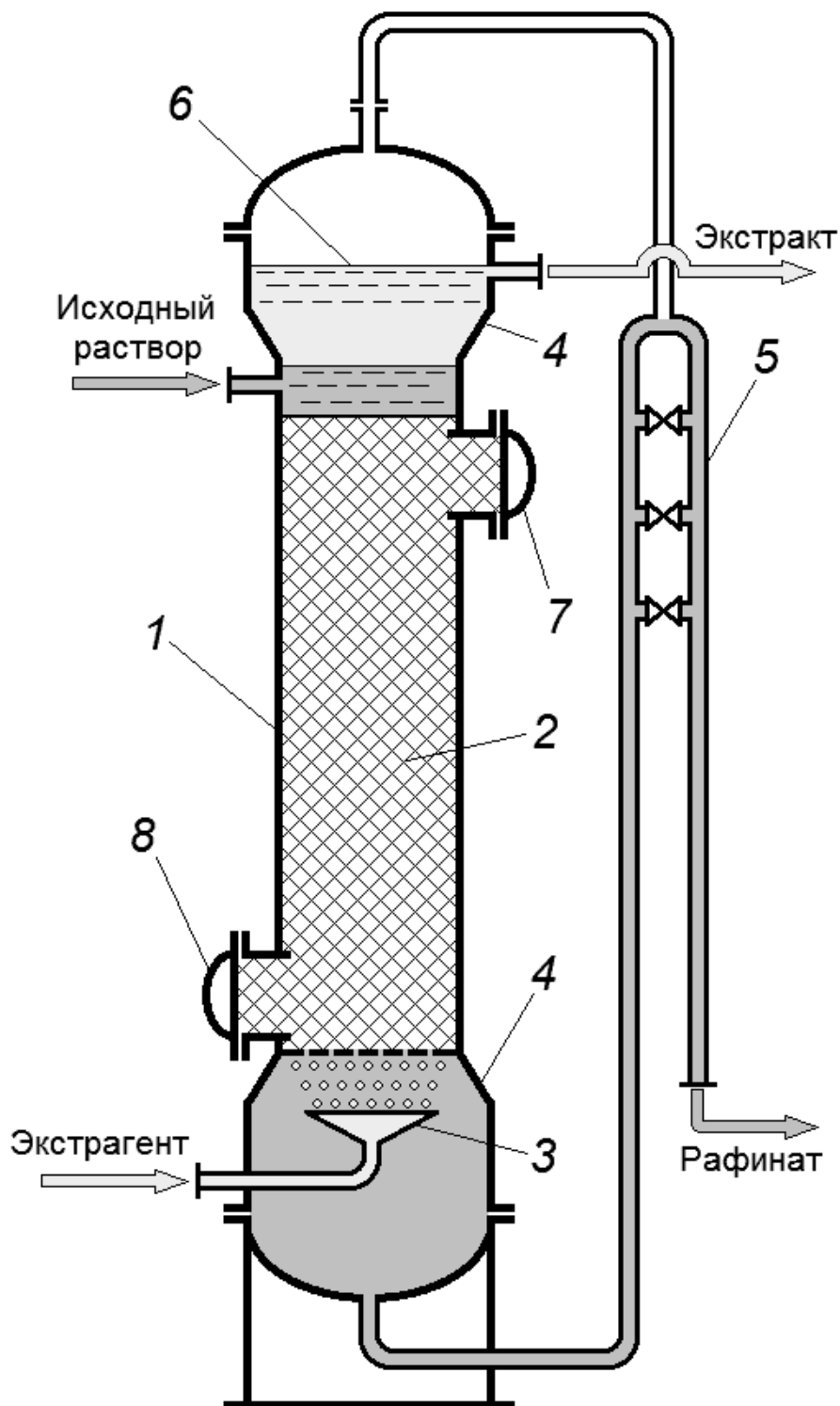


Рис. 41. Насадочный экстрактор:

- 1 – корпус; 2 – насадка; 3 – распределительное устройство; 4 – отстойники;
5 – гидрозатвор; 6 – поверхность раздела фаз; 7 – люк для загрузки насадки;
8 – люк для выгрузки насадки

Тарельчатый экстрактор

Из тарельчатых экстракторов наибольшее применение нашли экстракторы с ситчатыми тарелками (рис. 42). В этих аппаратах одна из жидких фаз многократно диспергируется и коалесцирует, проходя через большое число отверстий в тарелке, скорость процесса экстракции при этом возрастает. После взаимодействия со сплошной фазой капли коалесцируют и образуют слой фазы возле тарелки. Если диспергируется лёгкая фаза, то её слой образуется под тарелкой, если тяжёлая фаза – над тарелкой. Эти слои называют подпорными, они обеспечивают секционирование колонны по высоте и предотвращают движение сплошной фазы через отверстия тарелок. Сплошная фаза перетекает с тарелки на тарелку через переливные устройства. Кроме того, эти слои создают гидростатический напор, необходимый для преодоления сопротивления тарелок и диспергирования жидкости.

Тарельчатый экстрактор, как и насадочный, может быть снабжён пульсатором, повышающим эффективность работы аппарата. Обычный тарельчатый экстрактор относят к гравитационным аппаратам, снабжённый пульсатором – к механическим.

Ситчатые экстракторы просты по устройству, имеют достаточно высокую производительность и менее подвержены захлёбыванию, чем насадочные. Вследствие секционирования колонны тарелками продольное перемешивание в таких аппаратах незначительно, что повышает движущую силу.

Ситчатые экстракторы применяют в производстве синтетического каучука для экстракции дивинила, в нефтехимии – для экстракции сероводорода из сжиженных газов, в фармацевтической и других отраслях промышленности.

Роторно-дисковый экстрактор

Одним из распространенных в технике механических экстракторов является роторно-дисковый экстрактор (рис. 43). В этом экстракторе на внутренней стенке корпуса колонны на равном расстоянии друг от друга укреплены неподвижные кольцевые перегородки (статоры), делящие колонну на ряд секций небольшого объёма. По оси колонны на валу располагаются гладкие горизонтальные диски (роторы). Диаметр дисков ротора несколько меньше диаметра отверстий колец статора.

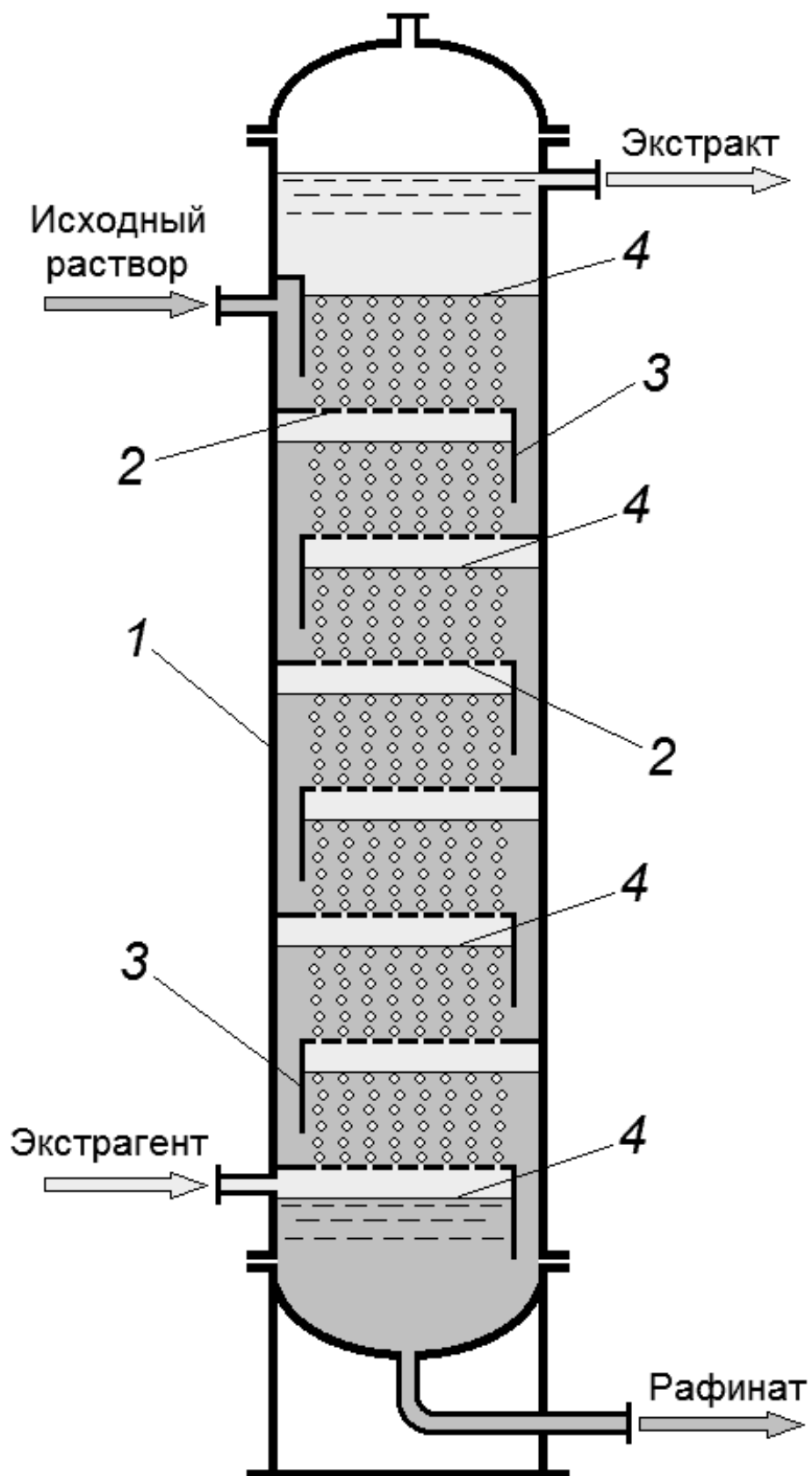


Рис. 42. Тарельчатый экстрактор:
 1 – корпус; 2 – ситчатые тарелки; 3 – перегородки тяжёлой фазы
 между тарелками; 4 – граница раздела расслаивающихся фаз

При вращении вала с дисками под действием сил трения и центробежных сил возникает движение сплошной фазы к стенкам аппарата, достигнув которых, жидкость движется вверх и вниз вдоль стенок и отражается кольцами статора. На это движение жидкости накладывается осевое. Диспергируемая лёгкая фаза движется противотоком к сплошной и дополнительно дробится ротором.

В результате в каждой секции возникают тороидальные замкнутые потоки сплошной фазы, приводящие к интенсивному перемешиванию фаз. При этом дисперсная фаза многократно дробится дисками при столкновении со стенками и под действием турбулентных пульсаций. После перемешивания при обтекании кольцевых перегородок, ограничивающих секции колонны, фазы частично разделяются вследствие разности плотностей. В отстойных зонах колонны фазы расслаиваются и затем выходят из аппарата.

Роторные экстракторы различаются в основном конструкцией перемешивающих устройств. Так вместо гладких дисков применяют различного вида мешалки, иногда секции заполняют насадкой.

К основным достоинствам роторных экстракторов относятся высокая эффективность массообмена, малая чувствительность к твёрдым примесям в фазах, возможность создания аппаратов большой единичной мощности.

Вместе с тем роторным экстракторам присущ серьёзный недостаток – так называемый масштабный эффект, т.е. существенное увеличение высоты единицы переноса с увеличением диаметра аппарата. Причина этого явления заключается в неравномерности поля скоростей по высоте и поперечному сечению аппарата, в образовании застойных зон, байпасировании, способствующих усилению продольного перемешивания и нарушению равномерной структуры потоков в аппарате.

1.7. Адсорбция

Адсорбция – процесс разделения газовых, паровых и жидких смесей путём поглощения одного или нескольких компонентов смеси поверхностью или объёмом пор твёрдого тела – **адсорбента**. Поглощаемое вещество, находящееся в объёмной фазе (газе, паре или жидкости), называется **адсорбтивом**, а поглощённое – **адсорбатом**.

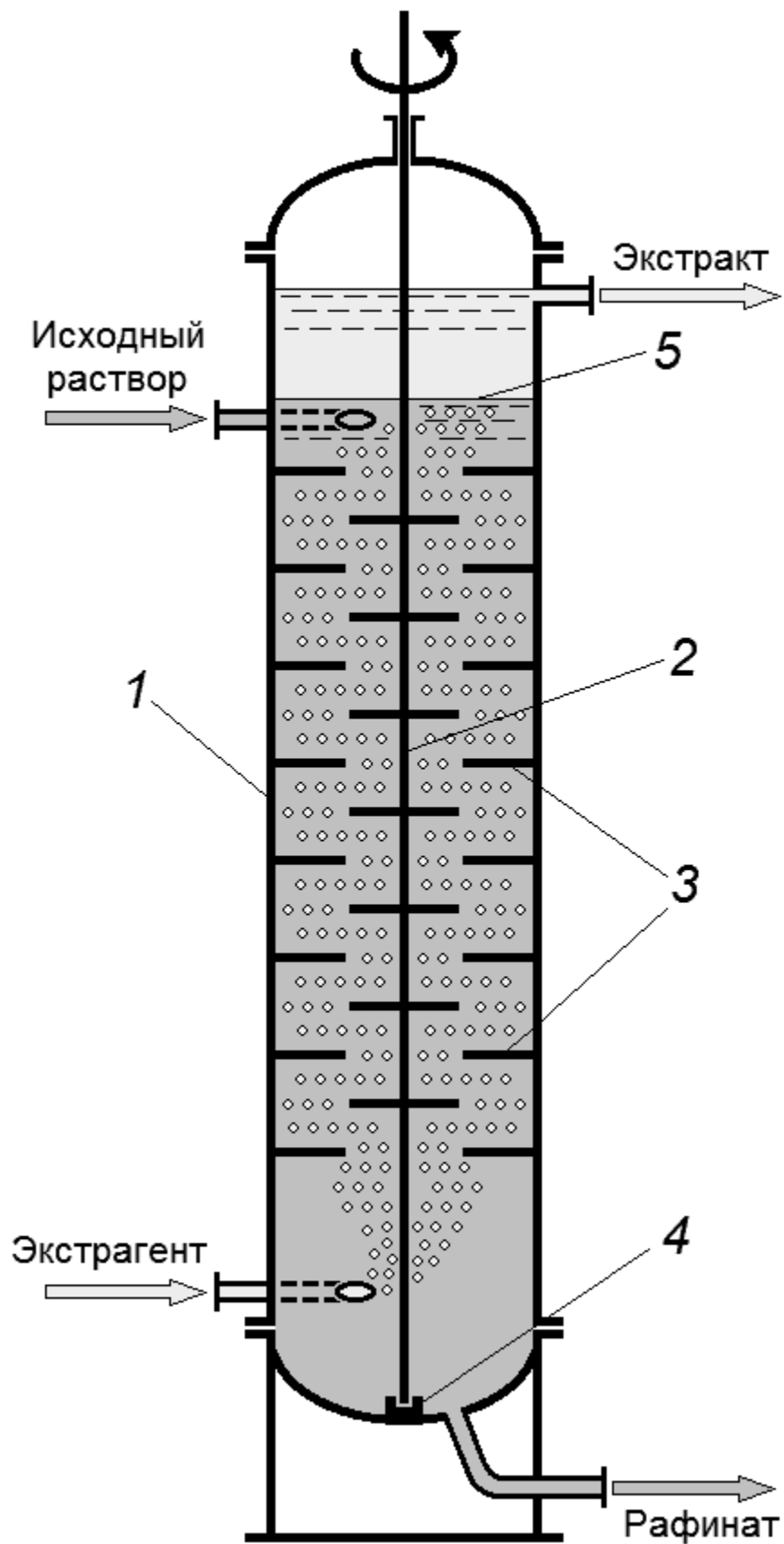


Рис. 43. Роторно-дисковый экстрактор:
 1 – корпус; 2 – вал ротора с плоскими дисками; 3 – кольцевые перегородки;
 4 – опорный подшипник ротора; 5 – граница раздела фаз

Адсорбцию подразделяют на два вида: физическую и химическую. Физическая адсорбция в основном обусловлена поверхностными ван-дер-ваальсовыми силами, которые проявляются на расстояниях, значительно превышающих размеры адсорбируемых молекул, поэтому на поверхности адсорбента обычно удерживаются несколько слоёв молекул адсорбата. При химической адсорбции поглощаемое вещество вступает в химическое взаимодействие с адсорбентом с образованием на его поверхности химических соединений.

Процессы физической адсорбции избирательны и обратимы. Обратный процесс называют **десорбцией**, которую используют для выделения поглощённых веществ и регенерации адсорбента. При регенерации активированных углей используют водяной пар, при регенерации силикагелей и цеолитов – горячие газы.

Наиболее рационально адсорбцию применять для обработки смесей с низкой концентрацией извлекаемых веществ. В этом случае увеличивается продолжительность работы адсорбционного аппарата на стадии собственно адсорбции до его переключения на десорбцию. Иногда адсорбцию применяют для тонкой очистки газов и жидкостей от остаточных содержаний компонентов после других методов разделения.

Типичными примерами адсорбции являются осушка газов и органических жидкостей, разделение смесей углеводов, рекуперация растворителей, очистка вентиляционных выбросов и сточных вод.

Адсорбер с неподвижным слоем

Наибольшее распространение в промышленности находят вертикальные и горизонтальные адсорбционные аппараты с неподвижным слоем адсорбента. На рис. 44 изображён вертикальный цилиндрический адсорбер периодического действия. В корпусе аппарата расположена горизонтальная опорно-распределительная решётка, на которой размещён зернистый слой адсорбента. Исходная смесь проходит через слой сверху вниз, при этом адсорбируемый компонент – адсорбтив – поглощается адсорбентом. Очищенная от адсорбтива (обработанная) смесь проходит через опорную решётку и покидает аппарат. Для извлечения поглощённого вещества слой адсорбента обрабатывают водяным паром, пропуская его через слой снизу вверх. Часть пара конденсируется,

образовавшийся конденсат отводится через нижний штуцер аппарата. Остальная часть пара с содержащимся в ней адсорбтивом выходит из аппарата сверху.

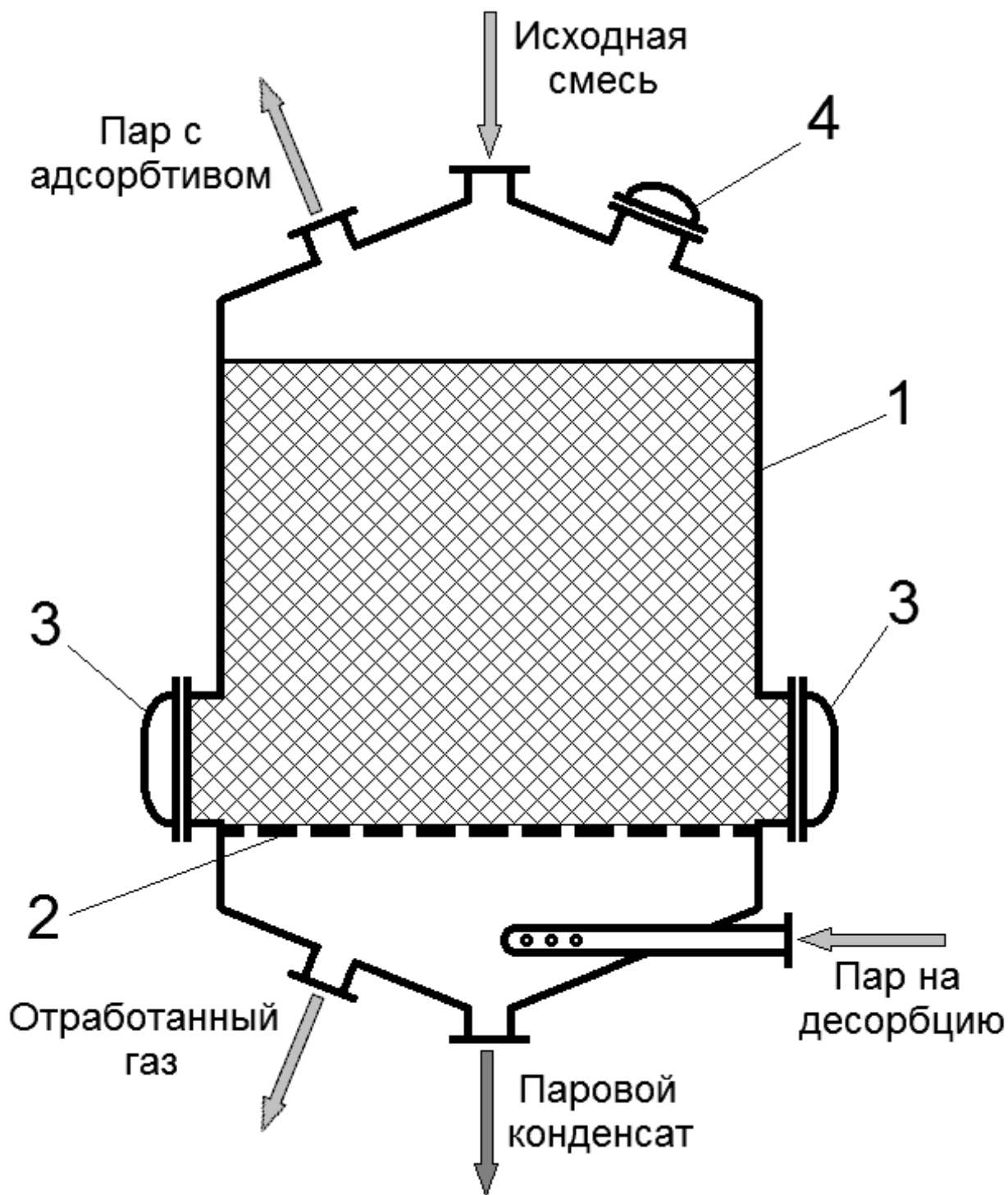


Рис. 44. Вертикальный цилиндрический адсорбер с неподвижным слоем адсорбента:
1 – корпус; 2 – опорно-распределительная решётка;
3 – люки для выгрузки адсорбента; 4 – люк для загрузки адсорбента

Несмотря на периодичность работы аппаратов с неподвижным слоем, адсорбционные установки работают непрерывно, в них включают несколько адсорберов, причём их число определяется соотношением продолжительности процессов адсорбции и десорбции.

Достоинством таких аппаратов является возможность глубокого разделения смесей с концентрацией адсорбтива в выходящем газе порядка одной молекулы на миллион и высокая степень насыщения адсорбента, что уменьшает число стадий регенерации.

Адсорбер с псевдооживленным слоем

Адсорберы с псевдооживленным слоем позволяют упростить адсорбционную установку и снизить гидравлическое сопротивление аппарата. Внедрение этих установок часто ограничено недостаточной прочностью гранул адсорбентов, которые в псевдооживленном слое подвержены механическому истиранию.

На рис. 45 изображён односекционный аппарат с псевдооживленным слоем адсорбента. Он представляет собой цилиндрический вертикальный корпус, внутри которого смонтированы газораспределительная решётка и пылеотделяющее устройство. Адсорбент загружается и выводится из аппарата через соответствующие трубы, находящиеся в его нижней и верхней частях. Исходная газовая смесь вводится в адсорбер через нижний патрубок и, пройдя через газораспределительную решётку, псевдооживляет слой гранул адсорбента. Пройдя через слой гранул, газовая смесь поступает в пылеосадительное устройство, где очищается от пыли, образующейся в результате постепенного истирания гранул.

Главным недостатком таких адсорберов является невысокая степень разделения из-за перемешивания адсорбента, структура потока которого близка к модели идеального смешения, что не позволяет получить низкие концентрации поглощаемого вещества на выходе и достичь высокой степени насыщения зерен адсорбента. Этот недостаток можно частично устранить применяя многосекционные адсорберы с псевдооживленным слоем, работающие по принципу тарельчатых аппаратов. Вместо жидкости в этом случае с тарелки на тарелку перетекает псевдооживленный слой зернистого адсорбента. Главная трудность при осуществлении такого процесса – предотвращение заторов зерен в переточных устройствах.

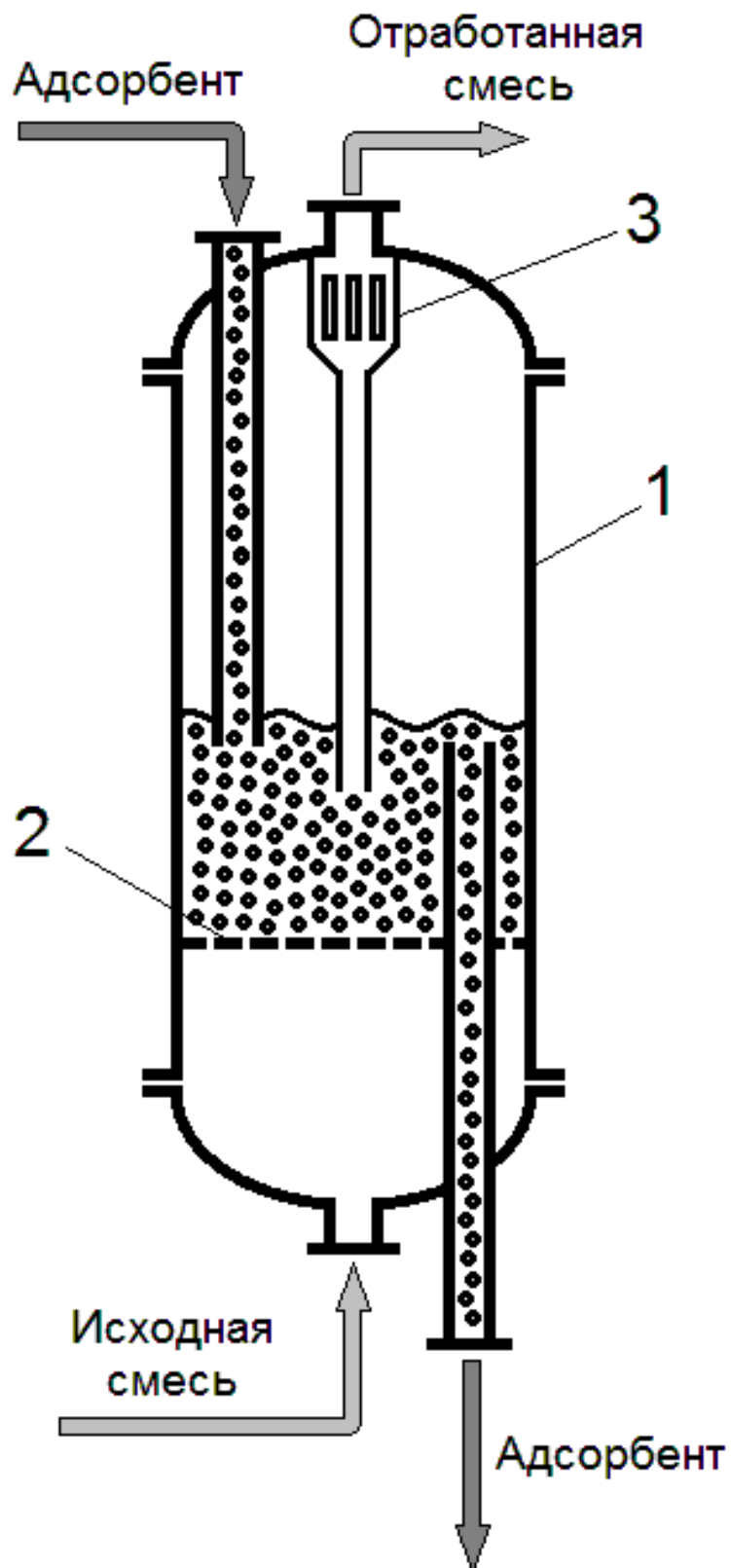


Рис. 45. Адсорбер с псевдооживленным слоем:
 1 – корпус; 2 – распределительная решётка;
 3 – пылеотделяющее устройство

2. АППАРАТУРА РАЗДЕЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ

Неоднородными, или гетерогенными, называют системы, состоящие, по меньшей мере, из двух фаз. При этом одна из фаз является **сплошной**, а другая – **дисперсной**, распределённой в первой в раздробленном состоянии: в виде капель, пузырей, мелких твёрдых частиц и т.д. Сплошную фазу часто называют **дисперсионной средой**. В зависимости от физического состояния фаз различают следующие бинарные гетерогенные системы (рис. 46): суспензии, эмульсии, пены, пыли, дымы и туманы.

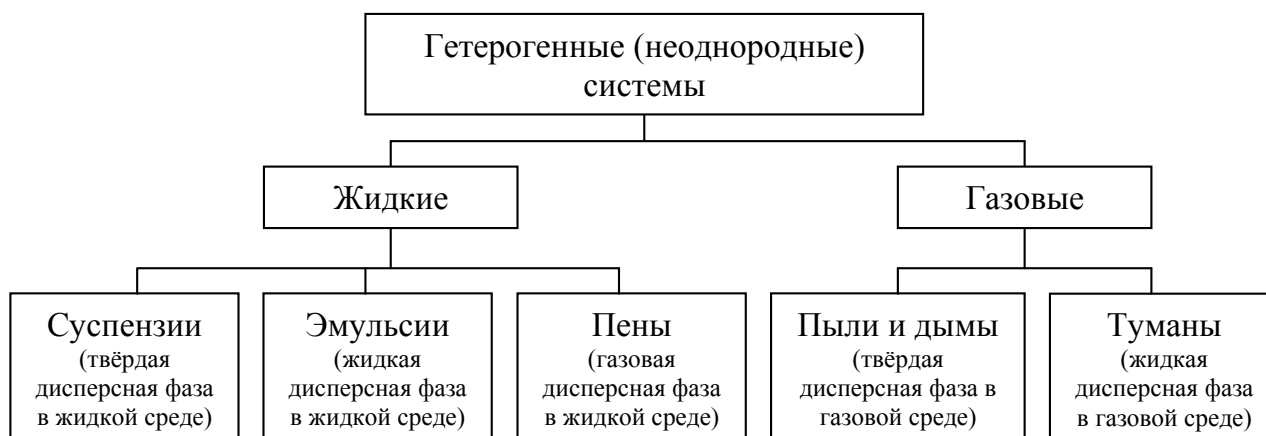


Рис. 46. Виды гетерогенных систем

Суспензия – гетерогенная бинарная система, состоящая из жидкости и взвешенных в ней твёрдых частиц. В зависимости от размеров частиц суспензии условно подразделяют на грубые (с частицами размером более 100 мкм), тонкие (с частицами размером 0,1–100 мкм) и коллоидные растворы (с частицами менее 0,1 мкм).

Эмульсия – гетерогенная бинарная система, состоящая из жидкости и взвешенных в ней капель другой жидкости, не растворяющейся в первой.

Пена – гетерогенная бинарная система, состоящая из жидкости и распределённых в ней пузырьков газа.

Пыль – гетерогенная бинарная система, состоящая из газа и распределённых в нём твёрдых частиц размером 5–100 мкм. В процессах химической технологии пыль образуется преимущественно при дроблении, смешивании и транспортировке твёрдых материалов.

Дым – гетерогенная бинарная система, состоящая из газа и распределённых в нём твёрдых частиц размером менее 5 мкм; образуется при горении.

Туман – гетерогенная бинарная система, состоящая из газа и распределённых в нём капель жидкости размером менее 3–5 мкм.

Суспензии, эмульсии и пены представляют собой гидродисперсные системы и носят общее название – **лиозо́ли**. Пыли, дымы и туманы представляют собой аэродисперсные системы и носят общее название – **аэрозóли**.

Гетерогенные системы характеризуются концентрацией дисперсной фазы и размерами образующих её частиц. Для эмульсий и пен при определённых концентрациях дисперсной фазы возможен её переход в сплошную; при этом фаза, бывшая сплошной, становится дисперсной. Этот переход называют **инверсией фаз**.

В большинстве случаев дисперсные системы содержат частицы, различающиеся по размеру, такие системы называют **полидисперсными**. Они характеризуются фракционным (дисперсным) составом, т.е. долей частиц определённого размера. Иногда встречаются системы, в которых все частицы имеют практически одинаковый размер, их называют **монодисперсными**.

Большинство дисперсных систем имеют тенденцию к укрупнению частиц путём их слипания или слияния. Слияние капель и пузырей называют **коалесценцией**, а слипание твёрдых частиц – **коагуляцией**.

Процессы разделения гетерогенных систем играют большую роль в химической технологии при подготовке сырья и очистке готовых продуктов, при очистке сточных вод и газовых выбросов, а также при выделении из них ценных компонентов.

Для разделения гетерогенных систем в химической технологии применяют в основном процессы осаждения и фильтрования (рис. 47). Кроме того, для разделения газовых гетерогенных систем применяют так называемую мокрую очистку газов.

Осаждение – процесс разделения гетерогенных систем, в котором взвешенные в жидкости или газе твёрдые или жидкие частицы отделяются от сплошной фазы под действием сил тяжести, инерции, центробежных или электростатических сил.

Фильтрование – процесс разделения гетерогенных систем с помощью пористой перегородки или пористого слоя, способных пропускать жидкость

или газ, но задерживать взвешенные частицы. Движущей силой процесса фильтрации является разность давлений, которая создаётся избыточным давлением перед фильтром или вакуумом после фильтра, а также может возникнуть под действием силы тяжести или центробежной силы.

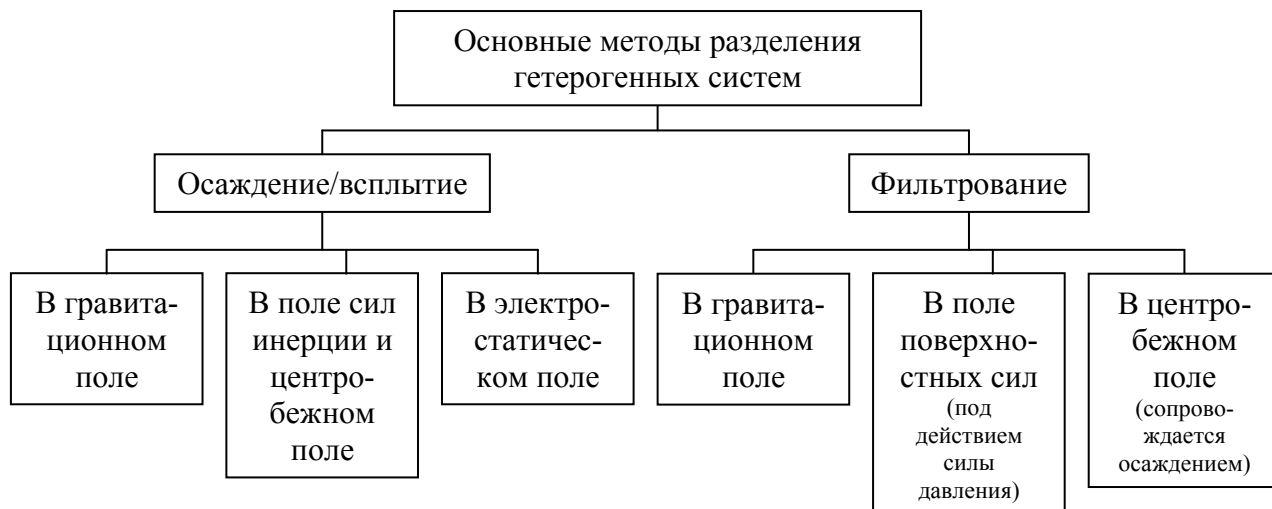


Рис. 47. Перечень методов разделения гетерогенных систем

Мокрая очистка газов – процесс разделения газовых гетерогенных систем, основанный на улавливании взвешенных в газе частиц жидкостью. Улавливание частиц осуществляется, как правило, под действием сил инерции.

Выбор метода разделения зависит от концентрации дисперсных частиц, их размера, требований к качеству разделения, а также от разницы плотностей дисперсной и сплошной фазы и вязкости сплошной фазы.

2.1. Разделение жидких гетерогенных систем

Наиболее распространёнными процессами разделения гетерогенных систем являются процессы разделения суспензий, образующихся в ходе химических реакций с выпадением осадка, в процессе кристаллизации твёрдых веществ из их насыщенных растворов, в результате мокрой очистки газов и во многих других процессах.

Грубые суспензии с невысокой долей твёрдой фазы, имеющие сравнительно крупные частицы, плотность которых заметно выше плотности жидкости, способны разделяться под действием силы тяжести – седиментировать. Эти системы разделяют обычно отстаиванием в таких аппаратах, как одноярусные и многоярусные отстойники непрерывного действия. Пульпы и шламы, имеющие

высокую долю твёрдой фазы и часто являющиеся продуктом процесса отстаивания грубых суспензий – осадком, разделяют обычно фильтрованием на вакуум-фильтрах (открытом нутч-фильтре, карусельном или ленточном фильтре).

Взвеси являются трудноразделяемыми суспензиями, они характеризуются невысоким содержанием твёрдой фазы и довольно устойчивы либо из-за небольших размеров частиц, либо из-за небольшого различия плотностей твёрдой и жидкой фазы. К взвесям можно отнести образующуюся в ходе отстаивания грубой полидисперсной суспензии осветлённую жидкость, в которой остались лишь самые мелкие, не осевшие частицы. Для разделения взвесей силы тяжести уже недостаточно, их разделение проводят под действием центробежной силы на гидроциклонах и осадительных центрифугах. Разделение взвесей со сравнительно крупными частицами осуществляют также фильтрованием (на открытом нутч-фильтре, барабанном фильтре, дисковом фильтре). Для отделения мелких частиц требуется фильтровальная перегородка с мелкими порами. Гидравлическое сопротивление такой перегородки и образующегося на ней осадка иногда велики настолько, что использование вакуум-фильтров неэффективно, требуется фильтрование под избыточным давлением на рамных пресс-фильтрах и закрытых нутч-фильтрах.

Разделение коллоидных растворов обычными гидромеханическими методами невозможно без добавления коагулянтов. Для их разделения часто используют методы, аналогичные массообменным, обычно мембранные.

Разделение эмульсий встречается в химической технологии гораздо реже разделения суспензий и производится, как правило, отстаиванием.

Одноярусный отстойник непрерывного действия

Отстаивание суспензий проводят в аппаратах, называемых **отстойниками**. Отстойники для сгущения суспензий называют **сгустителями**, а для классификации твёрдых частиц на фракции – **классификаторами**. Широко распространены отстойники непрерывного действия с гребковой мешалкой (рис. 48, 49). Они представляют собой цилиндрический резервуар с коническим днищем. В резервуаре расположена мешалка, снабжённая гребками, которые непрерывно перемещают осадок к центральному разгрузочному штуцеру. Кроме того, гребки мешалки разрушают слой осадка, способствуя удалению из него макрообъёмов жидкости, то есть способствуют обезвоживанию осадка.

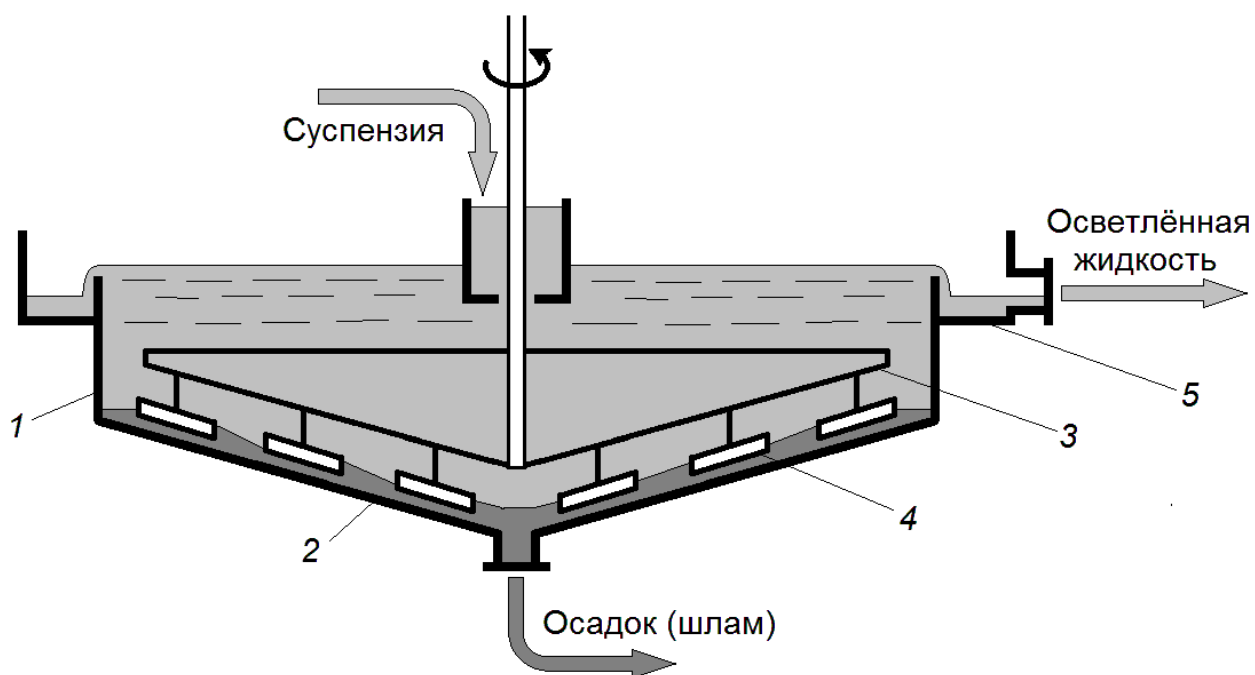


Рис. 48. Отстойник непрерывного действия:
 1 – корпус; 2 – днище; 3 – гребковая мешалка; 4 – нож (гребок);
 5 – кольцевой желоб для стока осветлённой жидкости



Рис. 49. Внешний вид промышленных отстойников

Частота вращения мешалки незначительна (менее половины оборота в минуту), поэтому процесс осаждения не нарушается. Суспензия непрерывно поступает по трубе в середину резервуара. Осветлённая жидкость переливается в кольцевой желоб и удаляется через штуцер. Осадок (шлам), представляющий собой сгущённую суспензию, удаляется через штуцер в коническом днище.

Отстойники с гребковой мешалкой обеспечивают однородность осадка и позволяют освободить его от воды до концентрации твёрдой фазы 35–55 %. Работа таких отстойников полностью автоматизирована. К недостаткам этих аппаратов следует отнести их громоздкость; диаметр нормализованных аппаратов от 1,8 до 30 м, в отдельных случаях применяются отстойники диаметром до 100 м. На рис. 49 представлены промышленные отстойники большого диаметра, применяемые для очистки сточных вод.

Многоярусный отстойник непрерывного действия

Для уменьшения площади, занимаемой отстойниками, применяют многоярусные отстойники. Они несложны по конструкции и обладают большой поверхностью. Многоярусный отстойник непрерывного действия с коническими полками представлен на рис. 50. Поступающая в аппарат суспензия распределяется по каналам между коническими полками, на поверхности которых осаждаются твёрдые частицы. Осадок сползает по наклонной поверхности к стенкам корпуса и перемещается в нижнюю часть аппарата, откуда выводится. Осветлённая жидкость поступает в центральную трубу и выводится из верхней части аппарата.

Помимо большой поверхности осаждения к достоинствам отстойников этого типа относятся отсутствие движущихся частей и простота обслуживания. Однако влажность пульпы в них больше, чем влажность шлама в отстойниках с гребковой мешалкой.

Отстойник для разделения эмульсий

На рис. 51 показан отстойник непрерывного действия для разделения эмульсий. Он представляет собой горизонтальный резервуар с перфорированной перегородкой, которая предотвращает возмущение жидкости в отстойнике струёй эмульсии, поступающей в аппарат. Поперечное сечение отстойника вы-

бирают таким, чтобы скорость течения жидкости в корпусе не превышала несколько миллиметров в секунду и режим течения был ламинарным, что предупреждает смешение фаз и улучшает процесс отстаивания. Расслоившиеся легкая и тяжелая фазы выводятся с противоположной стороны отстойника. Трубопровод для вывода тяжелой фазы соединён с атмосферой для предотвращения засифонивания.

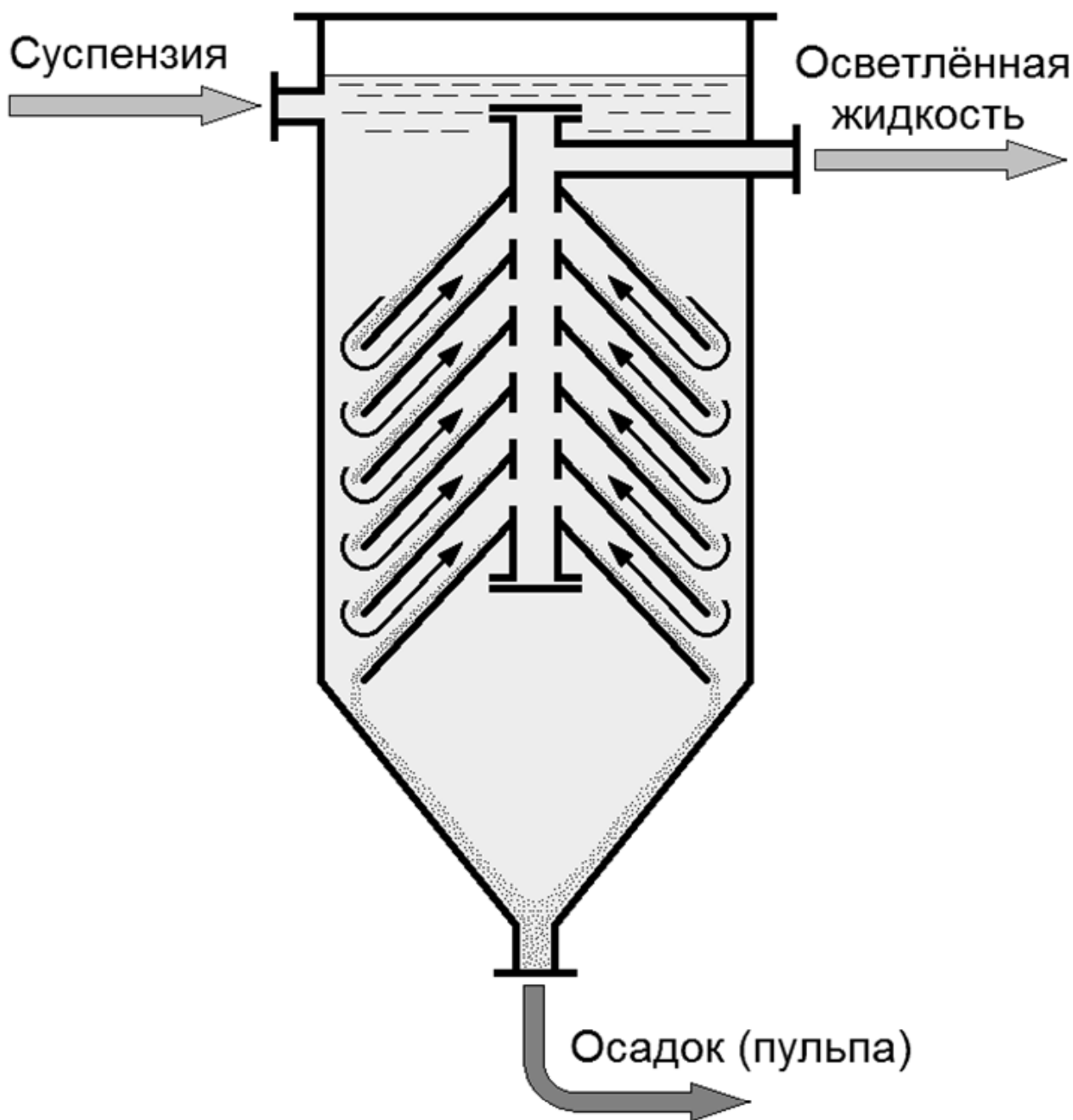


Рис. 50. Многоярусный отстойник непрерывного действия с коническими полками

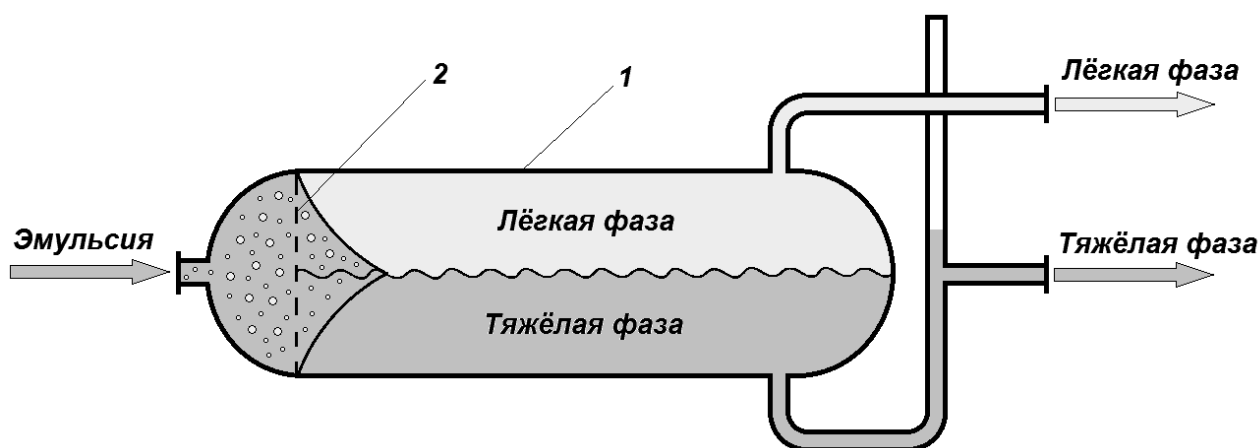


Рис. 51. Отстойник непрерывного действия для разделения суспензий:
1 – корпус; 2 – перфорированная перегородка

Гидроциклон

На рис. 52 изображён гидроциклон (центробежный сепаратор) – аппарат, предназначенный для сгущения шламов и продуктов флотации, осветления оборотных вод, классификации пульпы и разделения грубых и тонких суспензий. Разделение происходит в центробежном поле, создаваемом в результате вращения потока жидкой гетерогенной системы. Величина скорости сепарирования частицы в центробежном поле гидроциклона может превышать скорость осаждения частиц в поле гравитации в сотни раз. В последнее время все чаще в технологии обогащения применяют кластер из гидроциклонов небольшого диаметра (10–15 мм), работающих параллельно, что позволяет существенно повысить производительность.

К основным преимуществам гидроциклонов можно отнести:

- 1) высокую удельную производительность по обрабатываемой суспензии;
- 2) простоту устройства и сравнительно низкую стоимость аппарата;
- 3) отсутствие вращающихся механизмов, предназначенных для генерирования центробежной силы;
- 4) возможность разделения токсичных и химически агрессивных сред.

Основными недостатками гидроциклонов являются существенное (по сравнению с отстойниками) гидравлическое сопротивление, сложность разделения тонких суспензий с частицами менее 10 мкм и чувствительность к колебаниям нагрузки.

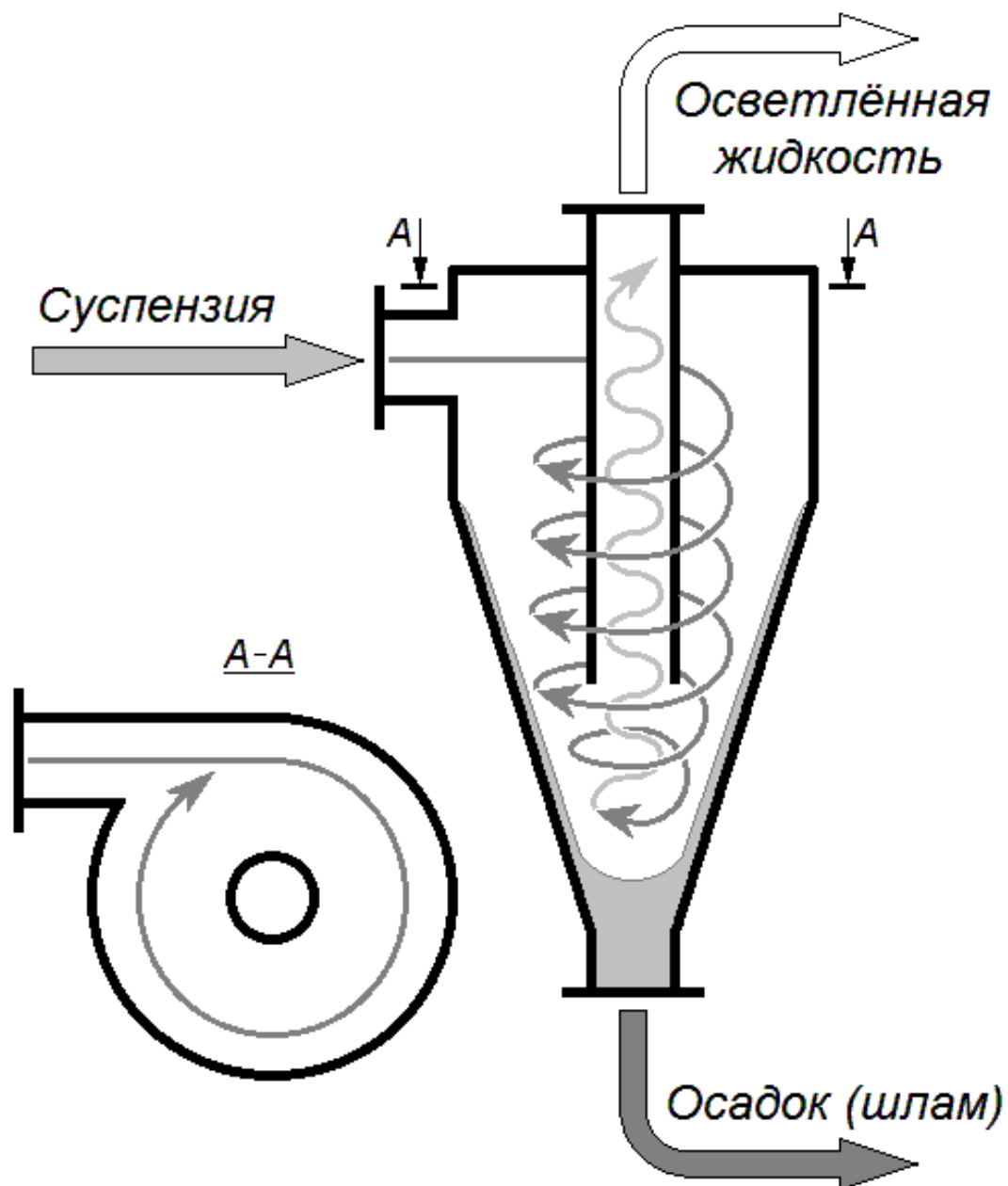


Рис. 52. Гидроциклон

Отстойная центрифуга

Отстойные (осадительные) центрифуги применяют для разделения суспензий и эмульсий путём осаждения дисперсных частиц под действием центробежной силы. Схема простейшей отстойной центрифуги периодического действия показана на рис. 53. Основной частью центрифуги является сплошной барабан, насаженный на вращающийся вал. Под действием центробежной силы твёрдые частицы из суспензии отбрасываются к стенкам барабана, образуя осадок. Осветлённая жидкость (фугат) переливается в неподвижный корпус (кожух) и удаляется через патрубок в его нижней части. После остановки центрифуги осадок выгружают вручную.

Из всех осадительных аппаратов центрифуга обеспечивает наибольшее качество разделения, так как в мощном центробежном поле способны осаждаться даже очень мелкие частицы. К недостаткам периодических отстойных центрифуг относятся невысокая производительность и необходимость ручного труда.

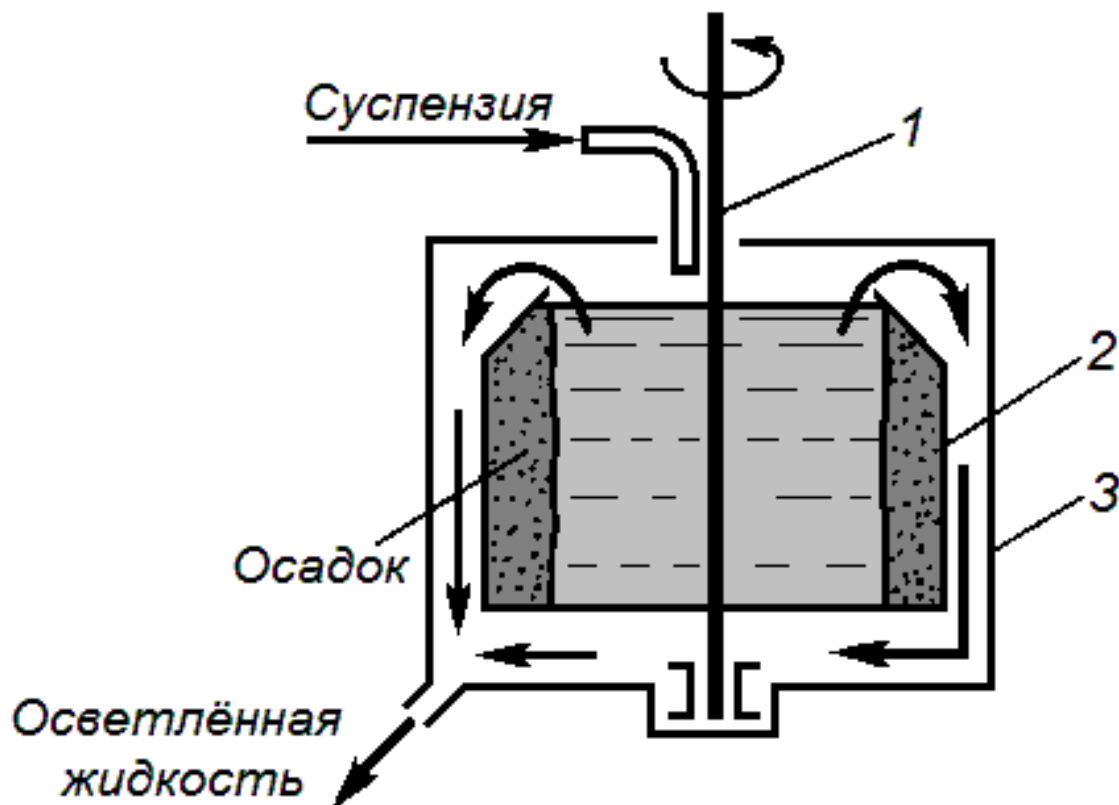


Рис. 53. Схема отстойной центрифуги:
1 – вал; 2 – барабан; 3 – корпус

Нутч-фильтр

Нутч-фильтр представляет собой простейший фильтр периодического действия, работающий под вакуумом или под избыточным давлением. Направления силы тяжести и движения фильтрата в нём совпадают. На рис. 54 и 55 изображён закрытый нутч-фильтр, работающий под давлением (иногда закрытый нутч-фильтр называют друк-фильтром). Нутч-фильтр состоит из корпуса (иногда снабжаемого обогревающей рубашкой) со съёмной крышкой. В корпусе расположена опорная решётка, на которой помещается фильтровальная ткань. Нутч-фильтр снабжён штуцерами для подачи суспензии, сжатого воздуха, промывной жидкости и удаления фильтрата. На корпусе расположен люк для ручной выгрузки осадка.

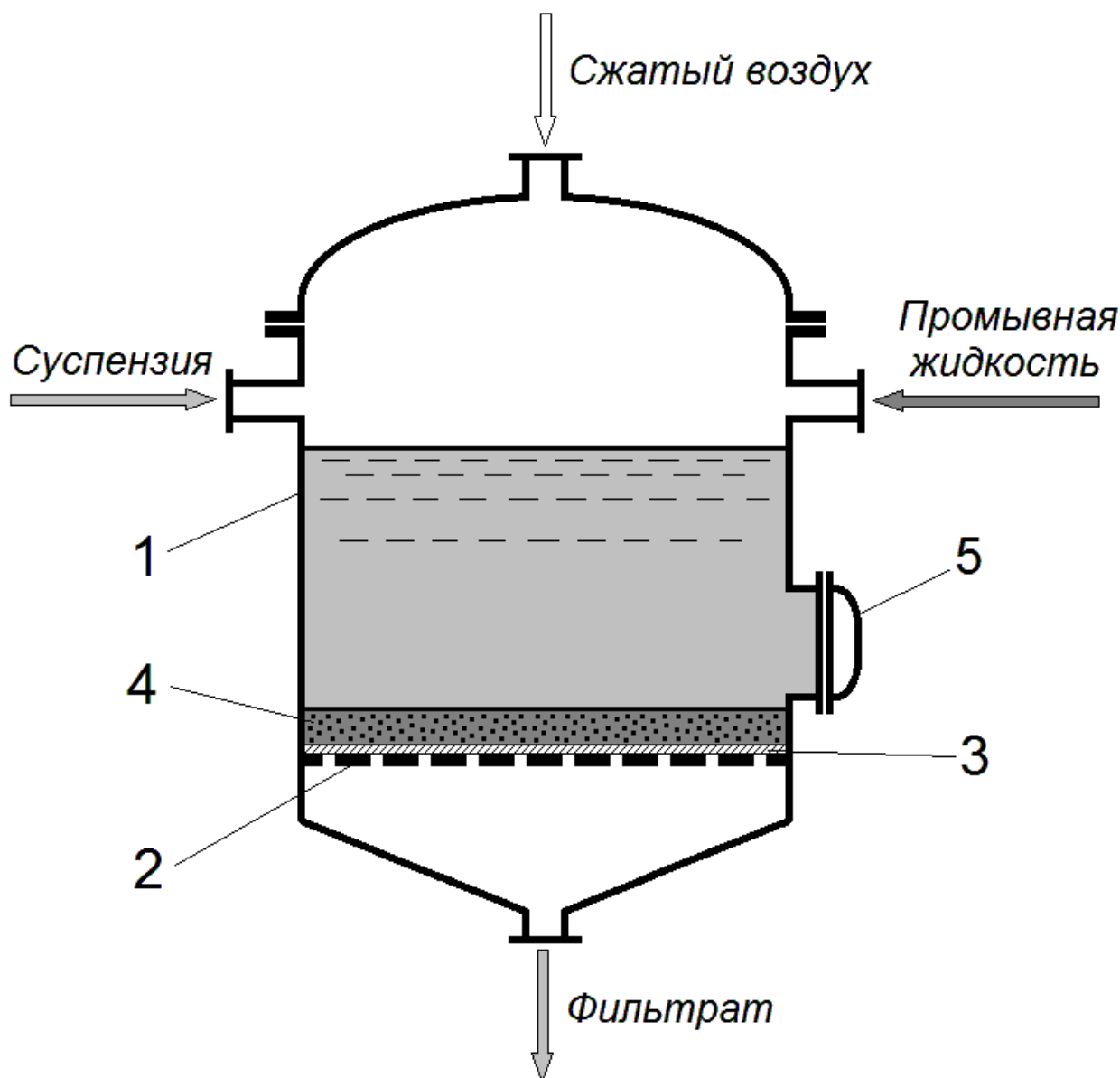


Рис. 54. Схема закрытого нутч-филтра:
 1 – корпус; 2 – опорная решётка; 3 – фильтровальная ткань;
 4 – осадок; 5 – люк для выгрузки осадка

Цикл работы нутч-филтра обычно состоит из следующих стадий: заполнение филтра суспензией, филтрование под давлением сжатого воздуха, просушка осадка от филтрата, заполнение филтра промывной жидкостью, промывка осадка, просушка осадка от промывной жидкости, удаление осадка с фильтровальной ткани, регенерация фильтровальной ткани.

Основными достоинствами нутч-филтров являются простота и надёжность в работе, возможность тщательной промывки осадка. К вышеперечисленным достоинствам для закрытых нутч-филтров добавляются большая движу-

шая сила (разность давлений) и пригодность для разделения токсичных веществ (благодаря герметичности конструкции).

К недостаткам относятся относительно небольшая площадь поверхности фильтрования при громоздкости аппарата и ручная выгрузка осадка.



Рис. 55. Внешний вид закрытого нутч-фильтра

Попыткой автоматизировать работу открытых нутч-фильтров является карусельный фильтр, который представляет собой несколько нутч-фильтров, размещённых по кругу на вращающейся раме. При вращении рамы каждый из нутч-фильтров последовательно проходит стадии заполнения суспензией, фильтрования, промывки осадка, его сушки, удаления осадка, регенерации фильтрующей ткани. Удаление осадка осуществляется опрокидыванием нутч-фильтра. Карусельные фильтры отличаются громоздкостью и металлоемкостью и в настоящее время практически не используются.

Рамный пресс-фильтр

Рамный пресс-фильтр (рис. 56 и 57) относится к фильтрам периодического действия, работающим под давлением. Направления силы тяжести и движения фильтрата в них взаимно перпендикулярны.

Фильтр представляет собой сборку из чередующихся плит и рам, между которыми закрепляется фильтровальная ткань (рис. 58). Плиты имеют вертикальные рифления, предотвращающие прилипание фильтровальной ткани к плитам и обеспечивающие дренаж фильтрата. Полая рама пресс-фильтра помещается между двумя плитами, образуя камеру для осадка. Отверстия в плитах и рамах совпадают, образуя каналы для прохода суспензии, фильтрата и промывной жидкости. Между плитами и рамами зажимаются фильтровальные перегородки. Сжатие плит и рам производится посредством винтового или гидравлического зажимов. Для извлечения осадка необходимо ослабить зажим и раздвинуть плиты и рамы.

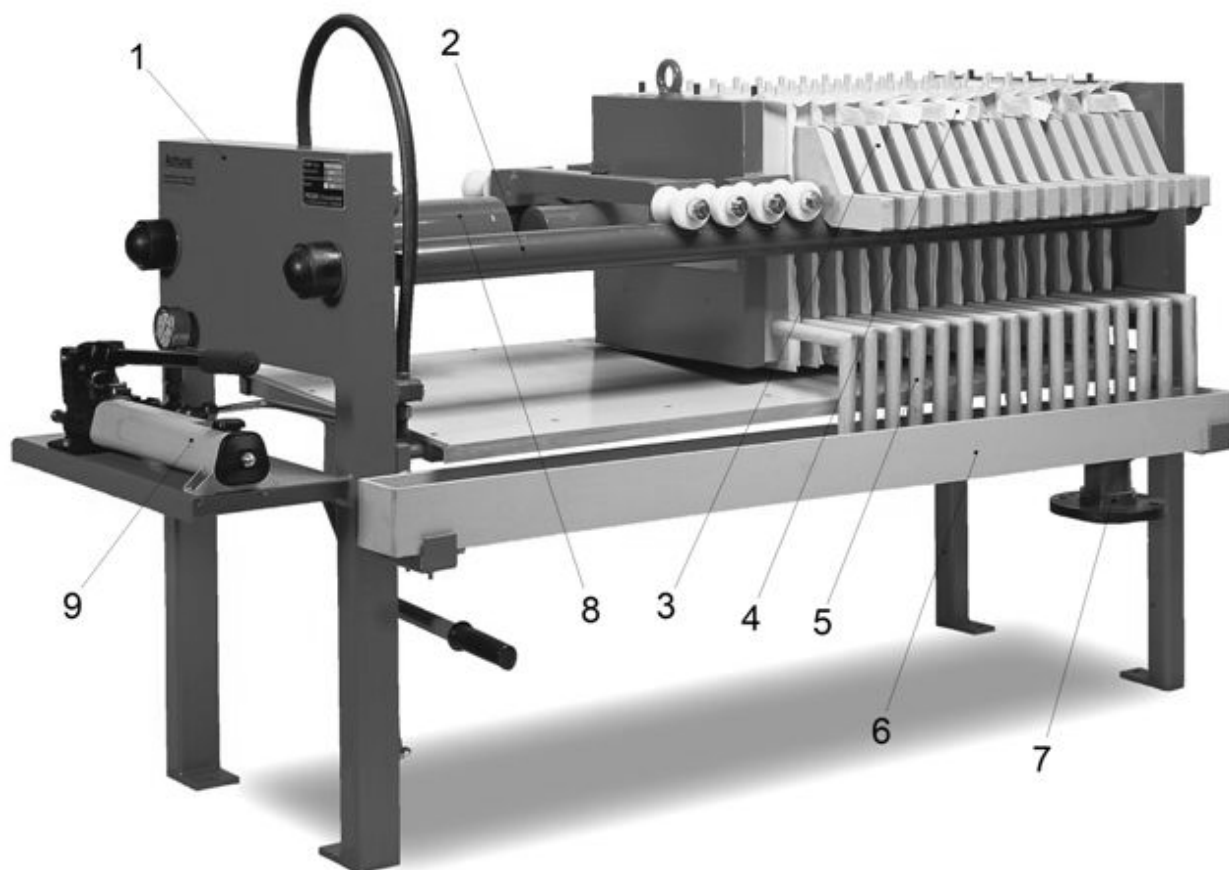


Рис. 56. Внешний вид пресс-фильтра:

- 1 – рама пресс-фильтра; 2 – боковая опора плит; 3 – фильтровальная плита Lenser;
- 4 – фильтровальная салфетка Marsyntex; 5 – слив фильтрата; 6 – поддон для сбора фильтрата;
- 7 – отвод фильтрата; 8 – гидравлический цилиндр; 9 – насос

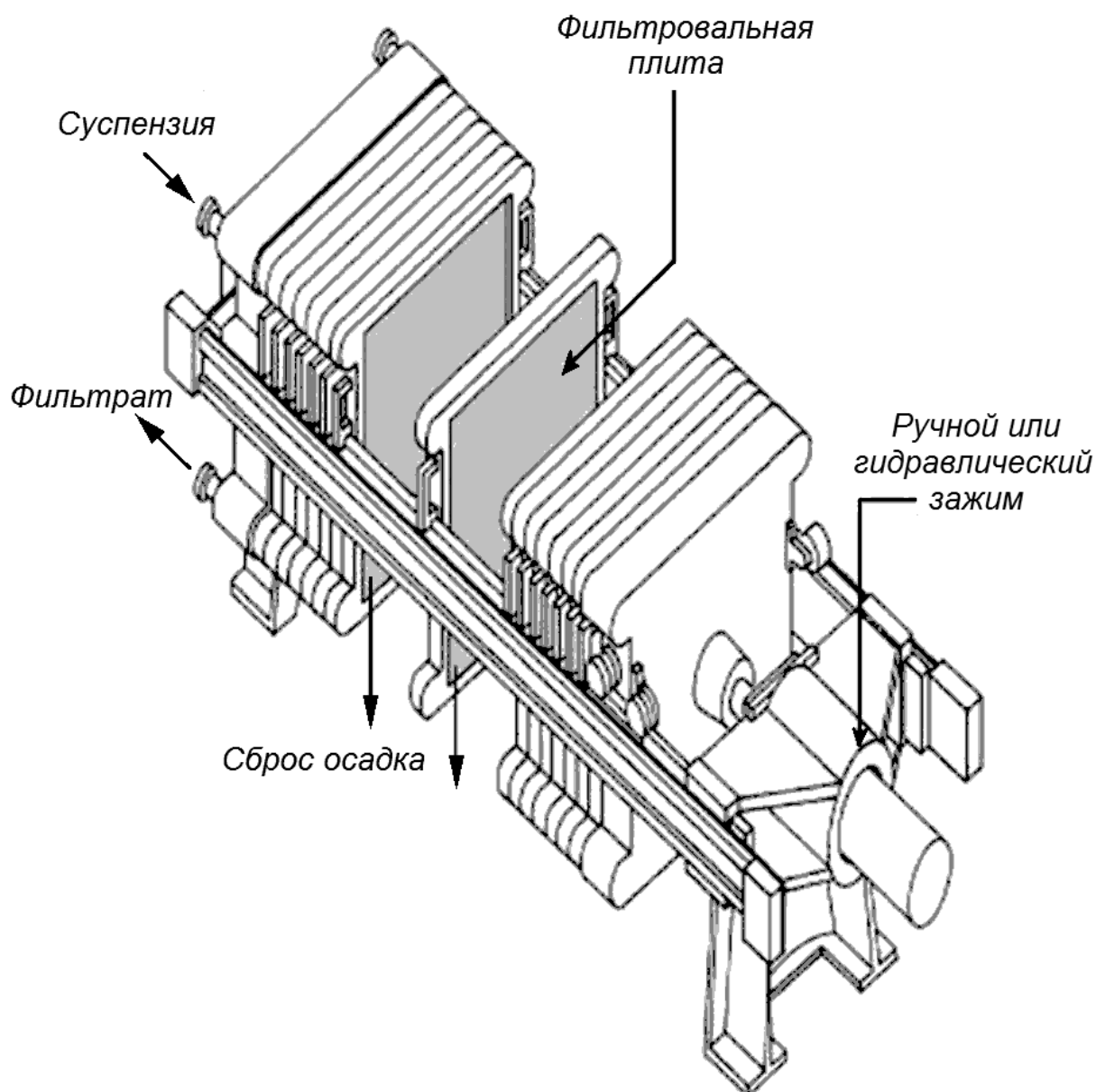


Рис. 57. Рамный пресс-фильтр

На стадии фильтрования суспензия по каналам распределяется по камерам внутри рам. Под давлением жидкость проходит через фильтровальные перегородки и, двигаясь по желобкам рифлений плит вниз, выходит в итоге через отверстия в плитах в канал фильтрата. После заполнения камер рам осадком подачу суспензии прекращают и вместо неё подают промывную жидкость. По окончании промывки осадок обычно продувают сжатым воздухом для удаления остатков промывной жидкости. Удаление осадка производят вручную, раздвинув плиты и рамы.

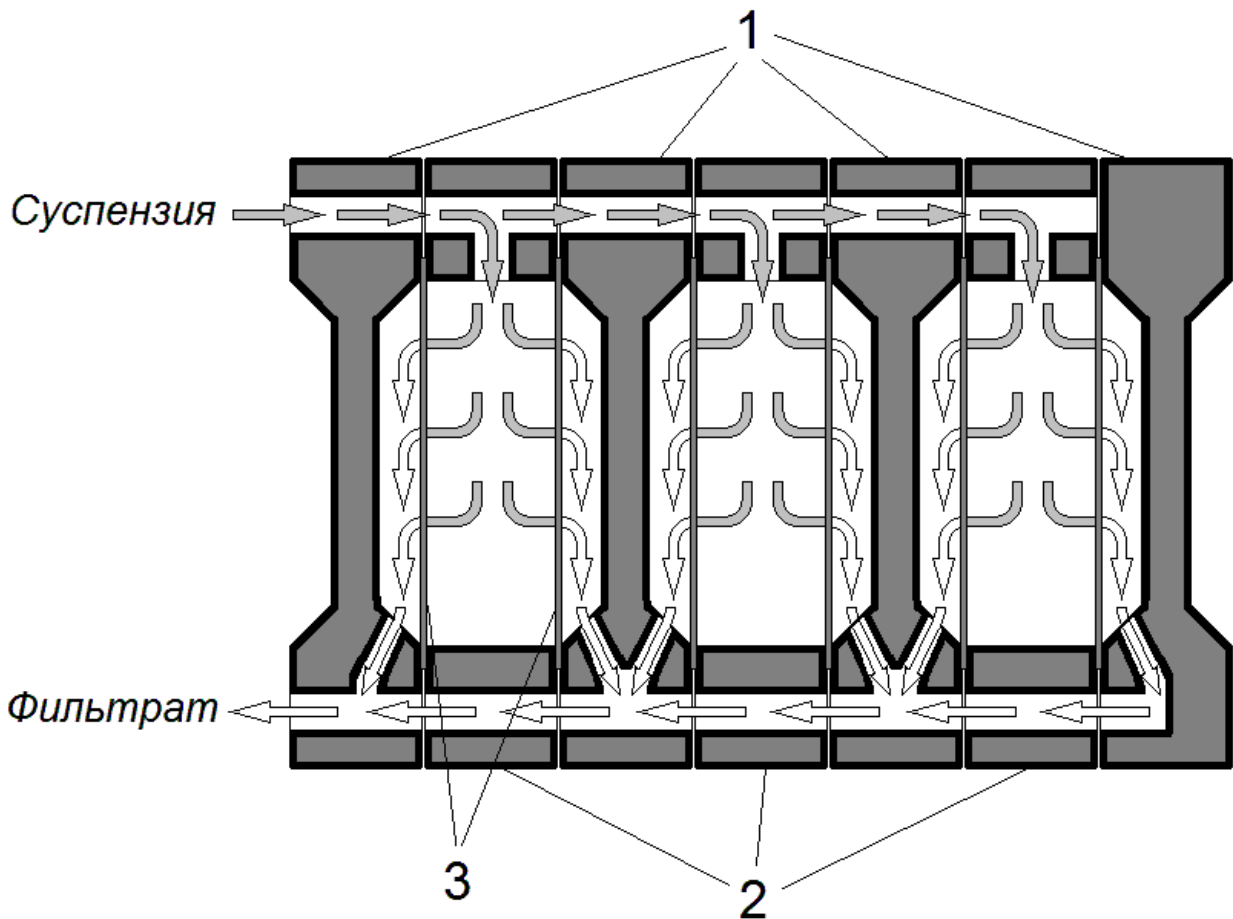


Рис. 58. Схема работы пресс-фильтра в стадии фильтрования:
 1 – плиты; 2 – рамы; 3 – фильтровальные перегородки

К достоинствам пресс-фильтров относятся большая площадь поверхности фильтрования, возможность проведения процесса при высоких давлениях (до 1,5 МПа), простота конструкции, отсутствие движущихся частей, возможность отключения отдельных неисправных плит закрытием выходного канала. Подача суспензии в пресс-фильтр с помощью плунжерного насоса позволяет проводить фильтрование при постоянной скорости, при этом возрастает давление (движущая сила).

Недостатками являются ручное обслуживание, невозможность фильтрования густых суспензий из-за быстрого заполнения рам осадком.

Пресс-фильтры обычно применяют для тщательной очистки тонких суспензий с невысоким содержанием твёрдой фазы, используя при этом фильтровальную ткань с мелкими порами. Гидравлическое сопротивление такой фильтровальной перегородки довольно велико, несмотря на это производительность фильтра остаётся хорошей из-за высокой движущей силы и большой площади поверхности фильтрования.

Ленточный фильтр

Ленточный фильтр (рис. 59) представляет собой работающий под вакуумом аппарат непрерывного действия, в котором направления силы тяжести и движения фильтрата совпадают. Схематически фильтр изображён на рис. 60.

Перфорированная резиновая лента перемещается по замкнутому пути с помощью приводного и натяжного барабанов. Фильтрующая ткань прижимается к ленте с помощью натяжного ролика. Из лотка на фильтрующую ткань подаётся суспензия. Фильтрат отсасывается в вакуум камеры, находящиеся под лентой, и выводится из аппарата. Отложившийся на ткани осадок промывается жидкостью, подаваемой из форсунок. Промывная жидкость отсасывается в другие вакуум-камеры и также отводится из аппарата. Осадок при перегибе ленты через валик отделяется от ткани и сбрасывается в бункер. На обратном пути к натяжному ролику ткань обычно регенерируется: очищается с помощью механических щёток, пропаривается или промывается жидкостью.

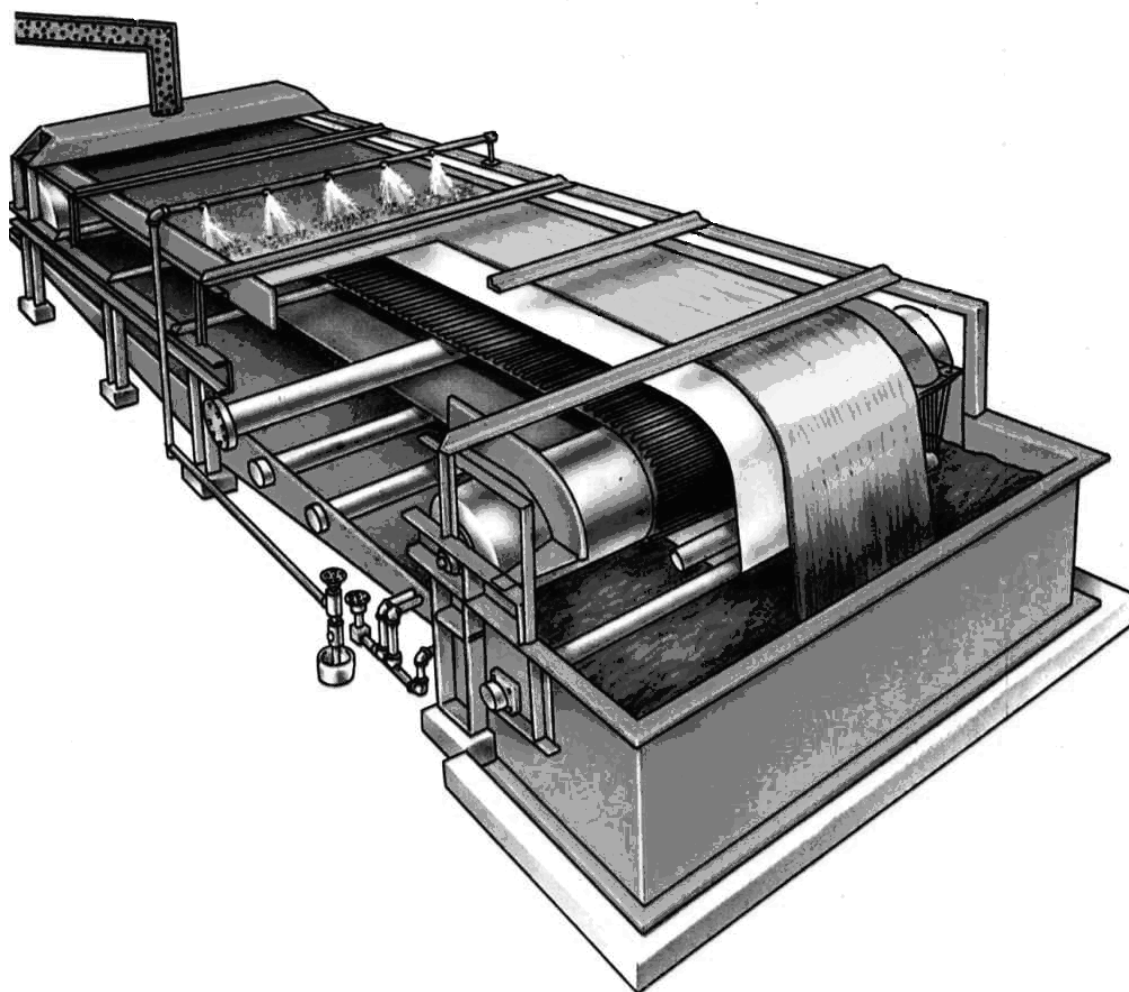


Рис. 59. Внешний вид ленточного фильтра

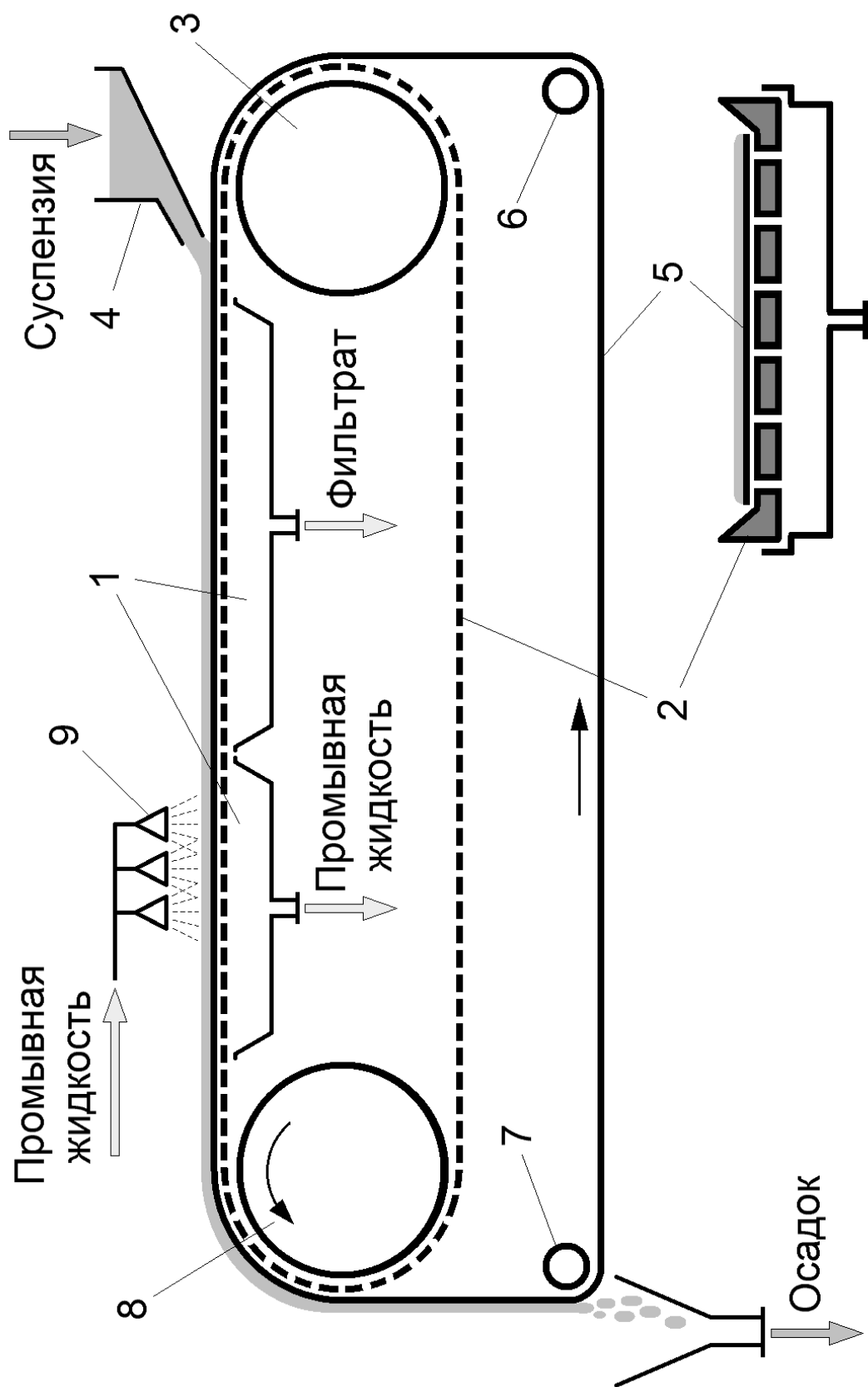


Рис. 60. Схема ленточного вакуум-фильтра:

- 1 – лоток для подачи суспензии; 2 – перфорированная лента; 3 – натяжной барабан;
- 4 – лоток для подачи суспензии; 5 – фильтровальная ткань; 6 – натяжной ролик;
- 7 – валик для перегиба ленты; 8 – приводной барабан; 9 – форсунки промывной жидкости

К достоинствам ленточных фильтров относятся непрерывность работы, хорошие условия для промывки и просушки осадка, компактность аппарата при относительно высокой производительности, возможность фильтрования суспензий с высоким содержанием твёрдой фазы.

Недостатками являются довольно быстрый износ фильтровальной ткани, опасность её перекосов при движении, сложность организации герметичности между вакуумными камерами и движущейся лентой, громоздкость фильтра.

Барабанный фильтр

Среди фильтров непрерывного действия наиболее распространены барабанные вакуум-фильтры. Схема такого фильтра представлена на рис. 61, внешний вид – на рис. 62. Фильтр имеет вращающийся цилиндрический перфорированный барабан, покрытый металлической сеткой, на которой располагается фильтровальная ткань. Барабан на 30–40 % своей поверхности погружен в суспензию, находящуюся в корыте, повторяющем форму барабана. Поскольку в данном фильтре направление фильтрования противоположно силе тяжести, возможно осаждение частиц на дно корыта, что нежелательно. Для предотвращения осаждения в корыте установлена качающаяся мешалка, совершающая маятниковые движения в зазоре между барабаном и корытом. Ввод суспензии возможен в любой точке корыта и производится непрерывно для поддержания постоянного уровня.

Барабан разделён радиальными перегородками на ряд изолированных друг от друга камер. Каждая камера соединяется трубой с различными полостями неподвижной части распределительной головки. Трубы объединяются во вращающуюся часть распределительной головки (рис. 63). Благодаря этому при вращении барабана камеры в определённой последовательности присоединяются к источникам вакуума и сжатого воздуха. В результате при полном обороте барабана каждая камера проходит несколько зон, в которых осуществляются различные стадии работы фильтра.

Первая зона – зона фильтрования и отвода фильтрата. Здесь камера соприкасается с суспензией и соединена с источником вакуума. Под действием вакуума фильтрат проходит через фильтровальную ткань, сетку и перфорацию барабана внутрь камеры и через трубку выводится из аппарата. На наружной поверхности барабана образуется осадок.

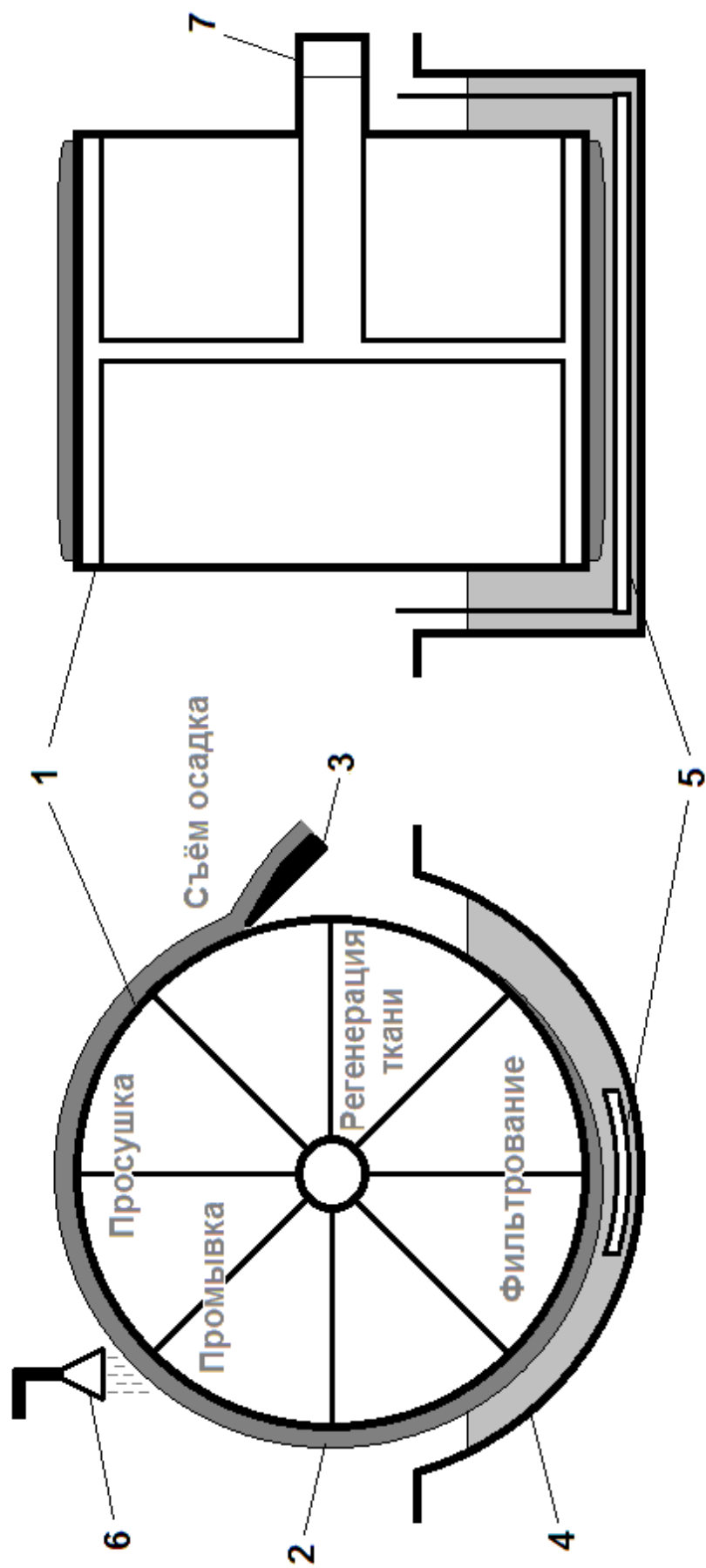


Рис. 61. Схема барабанного вакуум-фильтра:

1 – перфорированный барабан; 2 – осадок; 3 – нож для съёма осадка; 4 – корыто для суспензии; 5 – качающаяся мешалка; 6 – устройство для подвода промывной жидкости; 7 – распределительная головка

Вторая зона – зона промывки осадка и отвода промывных вод. Здесь камера, вышедшая из корыта с суспензией, также соединена с источником вакуума, а на осадок подаётся промывная жидкость.

Третья зона – зона съёма осадка. Попав в эту зону, осадок сначала подсушивается вакуумом, а затем камера соединяется с источником сжатого воздуха, который не только сушит, но и разрыхляет осадок, что облегчает его последующее удаление. Снятие осадка с барабана осуществляется с помощью ножа, который также служит направляющей плоскостью для слоя осадка, отделившегося от ткани.

Четвёртая зона – зона регенерации фильтровальной ткани. В этой зоне ткань продувается сжатым воздухом или водяным паром и освобождается от оставшихся в порах частиц.

Таким образом, на каждом участке поверхности фильтра все операции проводятся последовательно одна за другой, но участки работают независимо, и поэтому в целом все операции проводятся одновременно, т.е. процесс протекает непрерывно.

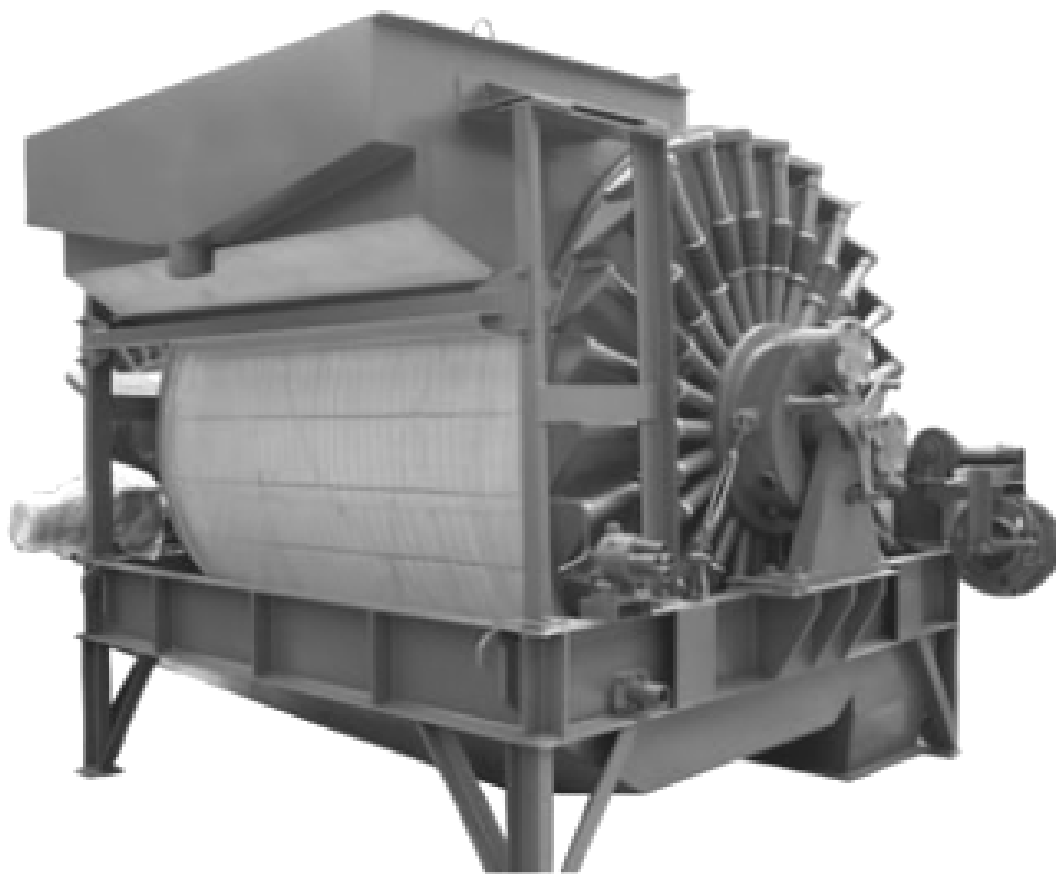


Рис. 62. Внешний вид барабанного фильтра

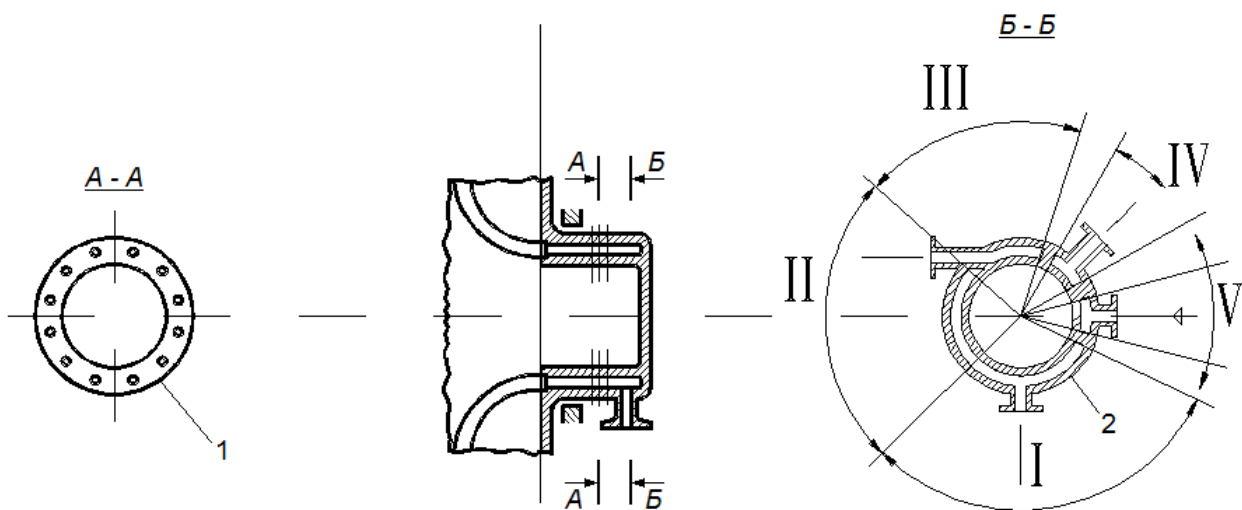


Рис. 63. Схема устройства распределительной головки:

1 – подвижный диск; 2 – неподвижный диск; I – зона фильтрации; II – зона просушки;
 III – зона промывки и просушки осадка; IV – зона отдувки осадка; V – зона очистки ткани

Среди достоинств барабанного вакуум фильтра, помимо непрерывности работы, необходимо отметить простоту обслуживания, возможность фильтрования суспензий с высоким содержанием твёрдой фазы, хорошие условия для промывки осадка.

К недостаткам фильтра относятся сравнительно небольшая удельная поверхность фильтрования, сложность герметизации распределительной головки, необходимость перемешивания суспензии в корыте, невозможность фильтрования суспензий, образующих рыхлые осадки, сразу отваливающиеся от фильтровальной ткани.

Дисковый фильтр

Попыткой увеличить поверхность фильтрования является дисковый вакуум-фильтр (рис. 64, 65), во многом аналогичный барабанному. Фильтровальная ткань в этом фильтре расположена на поверхности дисков, насаженных на горизонтальный вращающийся полый вал. Диски примерно наполовину погружены в корыто с суспензией. Фильтрат под действием вакуума проходит внутрь дисков, а оттуда в полость вала. На одном конце вала находится распределительная головка (как и в барабанном фильтре), на другом – привод. Осадок, образовавшийся на поверхности ткани, удаляется с помощью ножей.

Расположение фильтровальной ткани на боковой поверхности дисков позволяет при тех же габаритных размерах, что и у барабанного фильтра, увеличить поверхность в несколько раз. Другим достоинством фильтра является

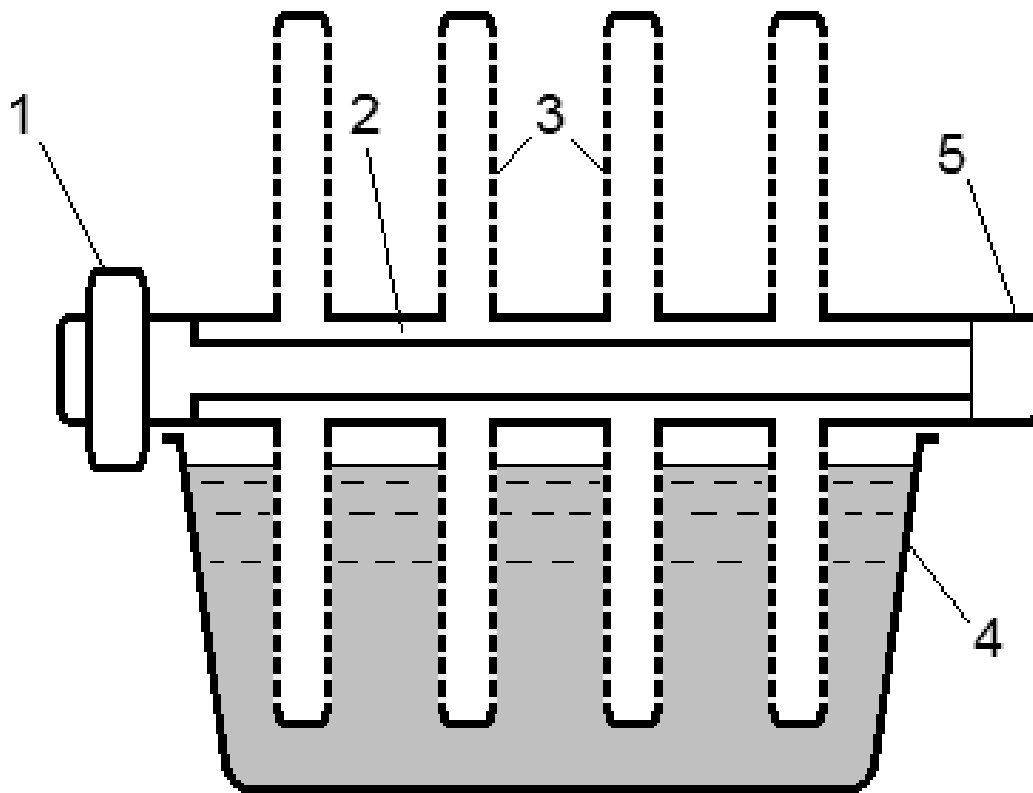


Рис. 64. Схема дискового вакуум-фильтра:
 1 – привод; 2 – полый вал; 3 – диски с фильтрующими боковыми поверхностями;
 4 – корыто для суспензии; 5 – распределительная головка

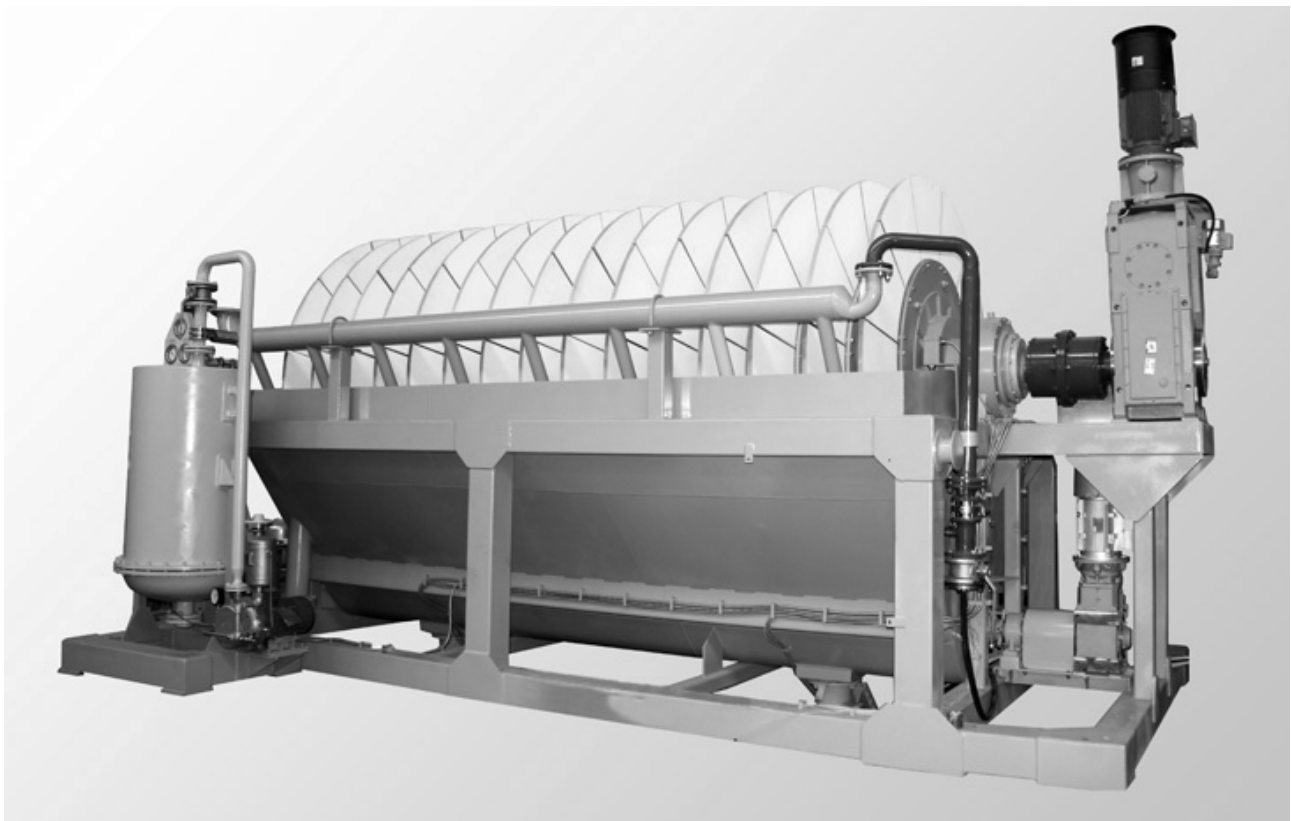


Рис. 65. Внешний вид дискового вакуум-фильтра

возможность замены вышедших из строя дисков. Недостатком дисковых фильтров являются трудность герметизации и сложность промывки осадка. Поэтому дисковые фильтры применяют в тех случаях, когда осадок не требует промывки.

Сравнительные характеристики фильтров

При выборе фильтров для разделения суспензий следует принимать во внимание технико-экономические показатели их работы, при определении которых необходимо учитывать размер частиц суспензии, её концентрацию, тип образующегося осадка, возможность и качество его промывки, непрерывность работы фильтра, перепад давления на фильтровальной перегородке и др.

Таблица 3

Сравнительные характеристики фильтров

Тип фильтра	Размер частиц суспензии, мкм	Концентрация суспензии, г/л	Качество фильтрования (концентрация частиц в фильтрате)	Тип осадка	Качество промывки
Закрытый нутч-фильтр	2–2500	20–800	хорошее (до 60 мг/л)	любые	отличное
Пресс-фильтр	0,5–200	0,3–400	отличное (до 40 мг/л)	кроме тиксотропных	хорошее
Ленточный фильтр	3–5000	50–650	удовлетв. (до 120 мг/л)	кроме липких	отличное
Барабанный фильтр	1–300	10–400	удовлетв. (до 120 мг/л)	любые	удовлетв.
Дисковый фильтр	1–300	10–400	удовлетв. (до 120 мг/л)	любые	не удовлетв.

В табл. 3 приведены некоторые усреднённые характеристики фильтров.

2.2. Разделение газовых гетерогенных систем

Газовые гетерогенные системы делятся на две большие группы: механические и конденсированные, отличающиеся друг от друга главным образом размером частиц. Механические газовые системы, получаемые в процессах, где твёрдые или жидкие частицы механически распределяются в газовой фазе, имеют размеры частиц 5–50 мкм. Конденсированные газовые системы получают при конденсации частиц из газа или при химическом взаимодействии двух газов. Размеры частиц в конденсированных газовых системах составляют

0,001–0,3 мкм. Указанные выше размеры частиц гетерогенных газовых систем являются в значительной мере условными. Следует указать, что частицы конденсированных систем могут объединяться в более крупные агрегаты. С другой стороны, при распыливающей сушке или обжиге сыпучих материалов часто образуются частицы, приближающиеся по размерам к конденсированным.

Взвешенные частицы размером ниже 2 мкм находятся в так называемом броуновском движении, возникающем вследствие теплового движения молекул газовой среды, что значительно затрудняет их разделение. Частицы меньше 0,1 мкм практически уже не оседают под влиянием силы тяжести и могут находиться во взвешенном состоянии неограниченно долгое время.

В химической промышленности имеется много источников образования неоднородных газовых систем. Пыли образуются при дроблении твёрдых материалов, просеивании, смешивании и транспортировке сыпучих материалов и в других механических процессах. Дымы и туманы образуются в различных процессах, сопровождающихся конденсацией паров: при выпаривании жидкостей, сушке распылением и многих других. В процессах горения, при неполном сгорании часто образуются дымы. Примером образования дымов может также служить выпадение хлористого аммония в виде мельчайших твёрдых взвешенных частичек при смешении газообразного аммиака с хлороводородом. При конденсации паров иногда образуются туманы. Примером возникновения туманов является конденсация серной кислоты в виде мельчайших капелек, образующихся при взаимодействии серного ангидрида с влажным воздухом.

В производственных процессах часто приходится проводить разделение газовых неоднородных систем для очистки газов от взвешенных в них твёрдых и жидких частиц. Применяемые методы очистки могут быть разделены на следующие основные группы:

1. Механическая или сухая очистка, при которой осаждение частиц происходит под действием силы тяжести, инерции или центробежной силы.
2. Мокрая очистка путём пропускания газа через слой жидкости или орошения его жидкостью.
3. Фильтрование газов через пористые материалы, не пропускающие частицы.
4. Электрическая очистка газов путём осаждения на электродах взвешенных в газе частиц в электрическом поле высокого напряжения.

Циклон

Аппараты для очистки газов от взвешенных частиц под действием силы тяжести, такие как пылеосадительные газоходы и пылеосадительные камеры, отличаются низкой степенью очистки (которая обычно не превышает 30–40 %). Причём частицы размером менее 5 мкм вообще не отделяются от газа в таких аппаратах. Помимо низкой эффективности эти пылеосадительные аппараты отличаются громоздкостью и поэтому в настоящее время практически не используются. Для увеличения скорости осаждения частиц и для более полной очистки используют действие центробежной силы, развиваемой газовым потоком в центробежных аппаратах – циклонах.

Внешний вид циклона показан на рис. 66, схема – на рис. 67. Циклон состоит из цилиндрического корпуса с коническим днищем. Запылённый газ вводится в корпус тангенциально через штуцер со скоростью 20–30 м/с. Благодаря тангенциальному вводу он приобретает вращательное движение вокруг трубы, расположенной по оси аппарата. Частицы пыли под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам корпуса. Вращающийся поток газа постепенно достигает нижней части аппарата, где попадает в центральную трубу. По центральной трубе газ движется вверх, сохраняя вращательное движение, и отводится через верхний штуцер. Большая часть частиц осаждаётся в корпусе аппарата, в центральной трубе происходит доочистка газа от мелких частиц, чему способствует меньший, по сравнению с корпусом, радиус трубы, и, как следствие, большая центробежная сила. Осевшая пыль скапливается на коническом днище аппарата и удаляется через нижний штуцер.



Рис. 66. Внешний вид циклона

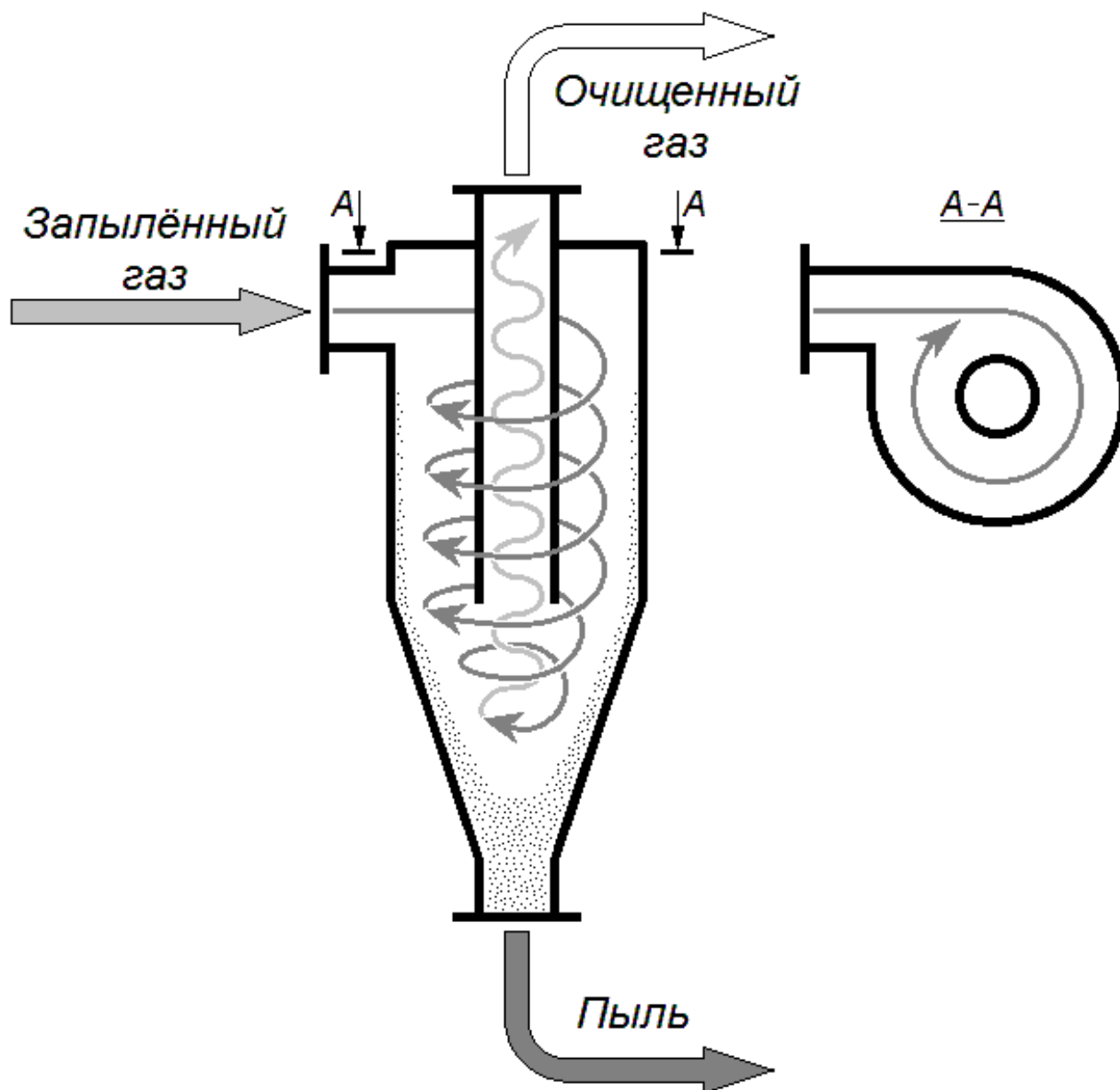


Рис. 67. Схема циклона

Циклоны характеризуются простотой конструкции, отсутствием движущихся частей, возможностью обработки химически агрессивных сред. Они более компактны, чем аппараты для гравитационного осаждения, и обеспечивают при этом более высокую степень разделения.

К недостаткам циклонов относятся сравнительно высокое гидравлическое сопротивление, невысокая степень улавливания частиц размером менее 10 мкм, механическое истирание корпуса аппарата твёрдыми частицами, чувствительность к колебанию нагрузки по газу.

Батарейный циклон

Степень очистки газа в циклонах тем больше, чем выше фактор разделения K_p , представляющий собой отношение центробежного ускорения к ускорению свободного падения. Фактор разделения можно повысить либо увеличением скорости газового потока, либо уменьшением радиуса вращения. Однако увеличение скорости сопряжено с резким возрастанием гидравлического сопротивления и увеличением турбулентности потока (которая ухудшает осаждение). В то же время уменьшение радиуса циклона приводит к уменьшению его производительности. Поэтому при больших расходах запыленного газа вместо одного циклона большого диаметра применяют несколько циклонов меньшего диаметра, объединённых в одном корпусе. Такие аппараты называют батарейными циклонами. На рис. 68 показан батарейный циклон (а) и его элемент (б).

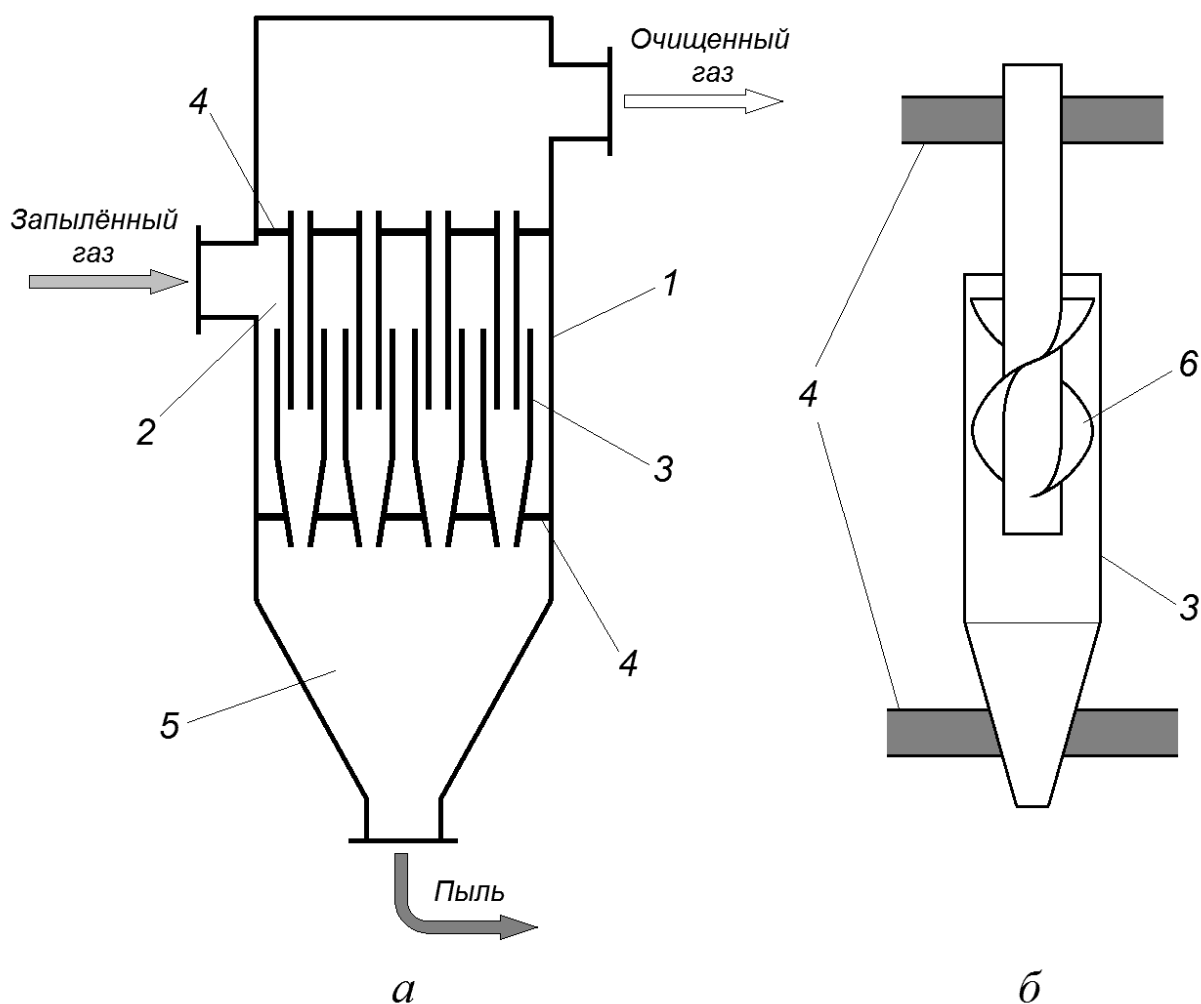


Рис. 68. Схема батарейного циклона (а) и его элемента (б):

- 1 – корпус;
- 2 – газораспределительная камера;
- 3 – корпус циклонного элемента;
- 4 – трубные решётки;
- 5 – бункер для пыли;
- 6 – лопастные устройства для закручивания газового потока внутри циклонных элементов

В общем корпусе батарейного циклона расположены циклонные элементы, герметично закреплённые в трубных решётках. Запылённый газ через входной штуцер поступает в газораспределительную камеру, а из неё – в циклонные элементы. В кольцевом пространстве между корпусом элемента и патрубком для вывода очищенного газа размещены лопастные устройства, придающие входящему газовому потоку вращательное движение. Пыль отбрасывается центробежной силой к стенкам аппарата, движется вниз и ссыпается из всех элементов в общий бункер. Очищенный газ выходит из элементов по трубам в общую камеру и удаляется из аппарата через верхний штуцер.

Батарейный циклон обеспечивает более высокую степень очистки, по сравнению с обычным циклоном, однако имеет более сложную конструкцию и более высокое гидродинамическое сопротивление.

Центробежный скруббер

Мокрую очистку применяют для очистки газов от пыли и тумана. В качестве промывной жидкости обычно используют воду, реже – водные растворы соды, серной кислоты и других веществ.

Центробежные скрубберы относятся к полым скрубберам, где поверхностью контакта фаз между газом и жидкостью является поверхность капель и стекающей по стенкам аппарата плёнки. В центробежных скрубберах (рис. 69) процесс мокрой очистки интенсифицируется благодаря проведению его в поле центробежных сил.

Запылённый газ поступает в скруббер со скоростью порядка 20 м/с через входной патрубок прямоугольного сечения, расположенный тангенциально, и приобретает вращательное движение. Внутренняя часть корпуса непрерывно орошается из сопел. Струя жидкости, выходящая из сопла, направляется в сторону вращения очищаемого газа тангенциально к поверхности корпуса и смачивает её. Далее жидкость тонкой плёнкой стекает по поверхности корпуса. Частицы пыли, взвешенные в поднимающемся по винтовой линии потоке газа, под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам скруббера, смачиваются плёнкой жидкости и улавливаются ею. Жидкость с поглощённой пылью (суспензия) выводится из аппарата через штуцер в коническом днище. Очищенный газ выходит через верхний патрубок.

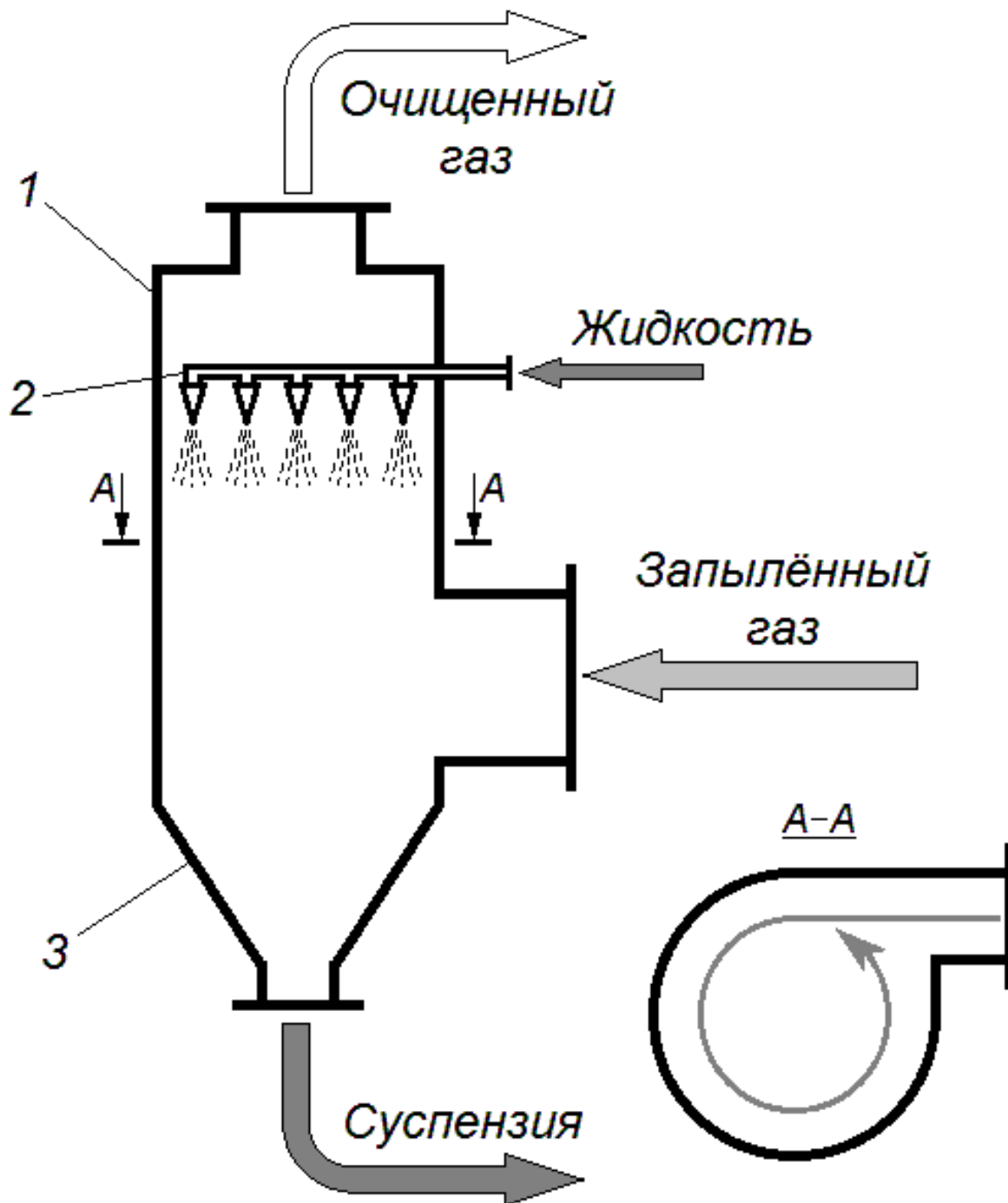


Рис. 69. Схема центробежного скруббера:
 1 – корпус; 2 – кольцевая оросительная труба с форсунками; 3 – коническое днище

Центробежные скрубберы, объединяя в себе достоинства циклонов и аппаратов для мокрой очистки газов, отличаются повышенной степенью улавливания пыли: частицы размером 2–5 мкм улавливаются на 90 %, а размером 15–20 мкм – более чем на 95 %. Гидравлическое сопротивление центробежных скрубберов ниже гидравлического сопротивления циклонов (500–800 Па), а

расход жидкости ниже, чем в других аппаратах мокрой очистки ($0,1-0,2 \text{ м}^3$ на 1000 м^3 очищаемого газа).

Недостатки центробежных скрубберов – общие для аппаратов мокрой очистки: увлажнение очищаемого воздуха и образование суспензии, требующей дальнейшего разделения или утилизации.

Барботажный (пенный) пылеуловитель

Барботажные пылеуловители используют для очистки сильно запылённых газов. В таких аппаратах жидкость, взаимодействующая с газом, приводится в состояние подвижной пены, что обеспечивает большую поверхность контакта фаз. Барботажный пылеуловитель (рис. 70) выполняется в виде цилиндрического или прямоугольного корпуса, в котором находится перфорированная тарелка. Промывная жидкость подаётся на тарелку через боковой штуцер, а в нижнюю часть аппарата подаётся запылённый газ, который проходит через отверстия в тарелке и барботирует через жидкость, превращая её в слой подвижной пены. В слое пены пыль поглощается жидкостью, часть которой удаляется из аппарата через переливной порог, а другая часть сливается через отверстия в тарелке, промывая их и улавливая в подтарелочном пространстве крупные частицы пыли. Образующаяся суспензия выводится через штуцер в коническом днище аппарата. Обычно для очистки газов достаточно одной тарелки, но при большом пылесодержании и высоких требованиях к качеству очистки возможно использование аппаратов с двумя-тремя тарелками.

Расход жидкости в барботажных пылеуловителях выше, чем в центробежных скрубберах ($0,2-0,3 \text{ м}^3$ на 1000 м^3 очищаемого газа). Также выше гидравлическое сопротивление ($500-1000 \text{ Па}$ для однетарелочных аппаратов). При работе пенных пылеуловителей недопустимы значительные колебания нагрузки, так как это может привести к нарушению пенного режима работы. Увлажнение очищаемого воздуха и образование суспензии, требующей дальнейшего разделения или утилизации, также относятся к недостаткам пенных пылеуловителей.

Барботажные пылеуловители хорошо справляются с очисткой сильно загрязнённых газов. При этом пыль с частицами размером $20-30 \text{ мкм}$ улавливается практически полностью, частицы размером 5 мкм улавливается на $80-90 \%$.

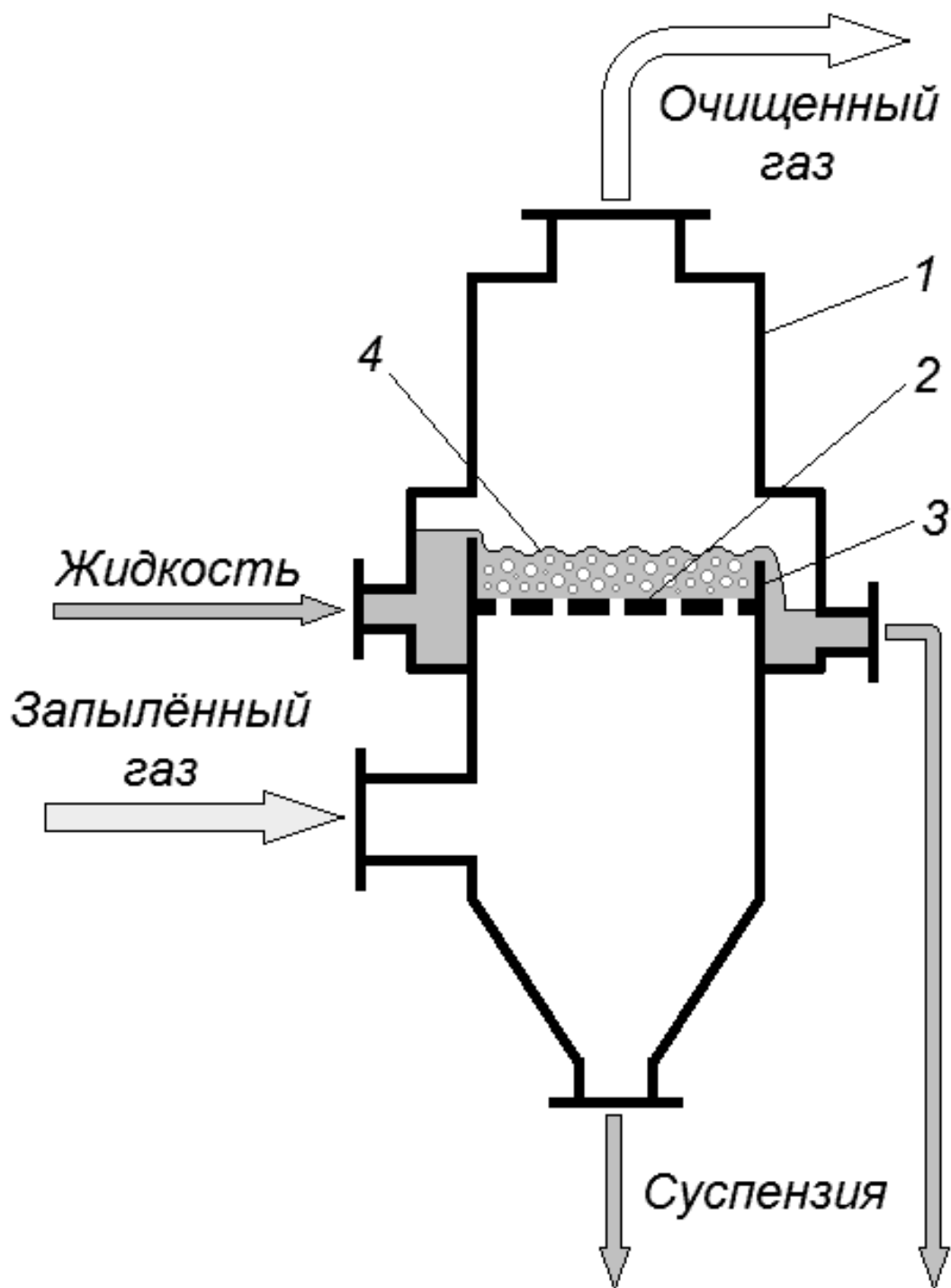


Рис. 70. Схема барботажного (пенного) пылеуловителя:
 1 – корпус; 2 – перфорированная тарелка; 3 – переливной порог; 4 – барботажный слой

Рукавный фильтр

Принцип действия аппаратов для очистки газов фильтрованием тот же, что и для разделения суспензий. Однако при фильтровании газов в подавляющем большинстве случаев происходит закупоривание пор фильтровальной перегородки частицами. В результате закупоривания пор гидравлическое сопротивление фильтра возрастает, а также несколько повышается степень очистки.

Рукавный фильтр (рис. 71) представляет собой корпус, в котором находятся тканевые мешки (рукава). Нижние открытые концы рукавов закреплены на патрубках трубной решётки. Для сохранения формы рукава снабжены кольцами жёсткости. Верхние закрытые концы рукавов подвешены на общей раме. Запылённый газ вводится в аппарат через штуцер и попадает внутрь рукавов. Проходя через ткань, из которой сделаны рукава, газ очищается от пыли и выходит из аппарата через верхний штуцер. Пыль осаждается на внутренней поверхности и в порах ткани. Для удаления пыли из рукавов их встряхивают с помощью специального устройства, пыль высыпается из рукавов в бункер и выводится через нижний штуцер. Кроме того рукава продувают воздухом, подаваемым с их наружной стороны.

Для изготовления рукавов обычно используют хлопчатобумажные и шерстяные ткани, что ограничивает возможную температуру газа. К недостаткам рукавных фильтров относятся также высокое гидродинамическое сопротивление, сравнительно быстрый износ ткани и непригодность для очистки влажных газов, поскольку намокание ткани приводит к закупориванию пор.

Основным достоинством рукавных фильтров является высокая степень очистки газов от тонкодисперсной пыли (частицы размером 1 мкм улавливаются на 98–99 %).

Трубчатый электрофильтр

По форме электродов электрофильтры делятся на трубчатые и пластинчатые, а в зависимости от влажности газового потока – на сухие и мокрые. В сухих электрофильтрах очистка газа происходит при температуре выше точки росы и улавливается сухая пыль. Мокрые электрофильтры предназначены для удаления влажной пыли, а также для осаждения взвешенных в газе капель жидкости.

Трубчатый электрофильтр (рис. 72) представляет собой аппарат, в котором расположены осадительные электроды, выполненные в виде труб диаметром 150–300 мм и длиной 3–4 м. По оси труб проходят коронирующие электроды из проволоки, которые подвешены к раме. Запылённый газ подаётся в нижнюю часть аппарата и движется вверх внутри труб-электродов. Под действием электростатического поля взвешенные в газе частицы пыли поляризуются и оседают на электродах. С электродов пыль удаляют путём их встряхивания, при

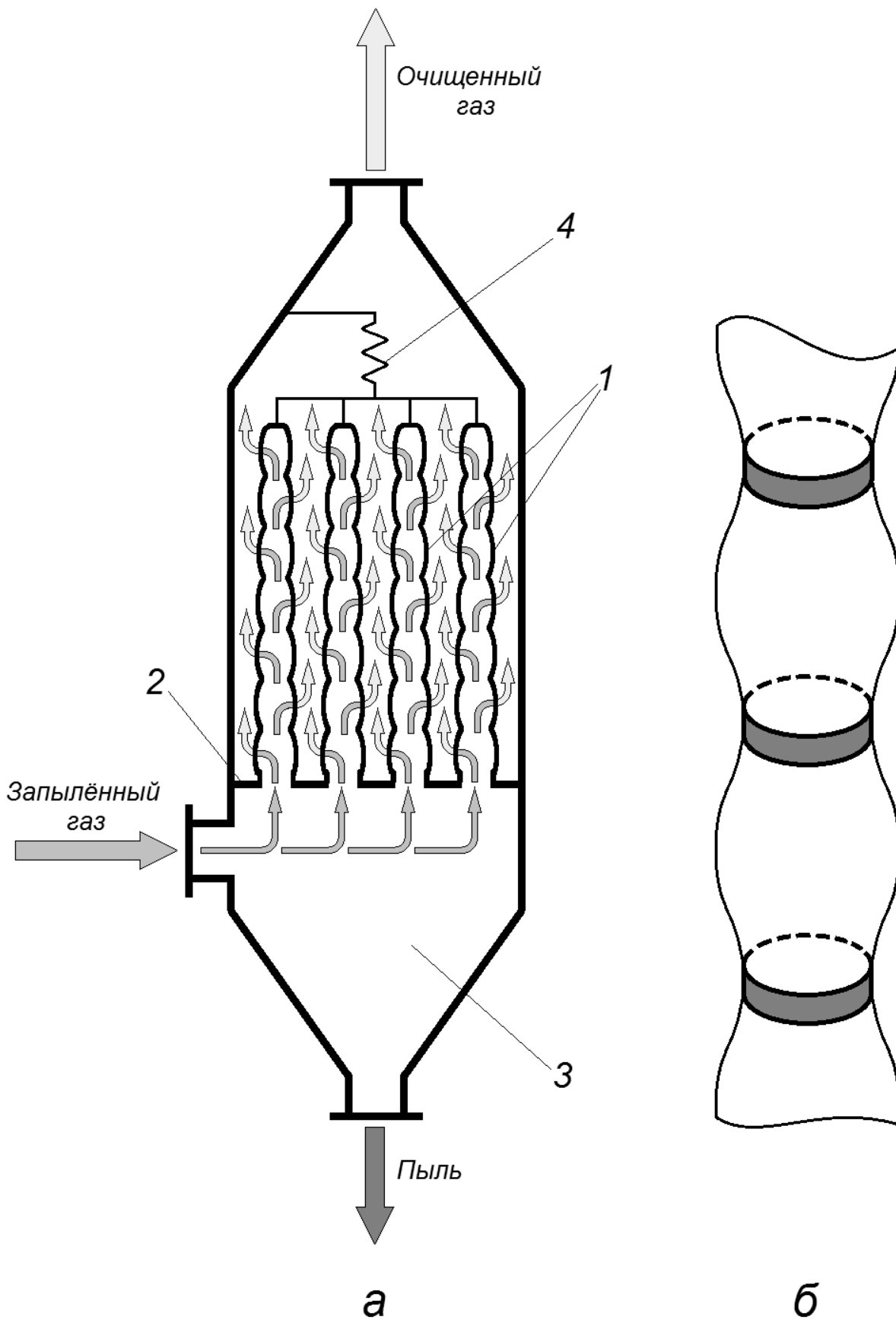


Рис. 71. Схема рукавного фильтра (а) и участка рукава с кольцами жёсткости (б):
 1 – рукава; 2 – трубная решётка; 3 – разгрузочный бункер;
 4 – устройство для встряхивания рукавов

этом пыль сыпается в бункер и выводится через нижний штуцер. Очищенный газ выходит из аппарата сверху.

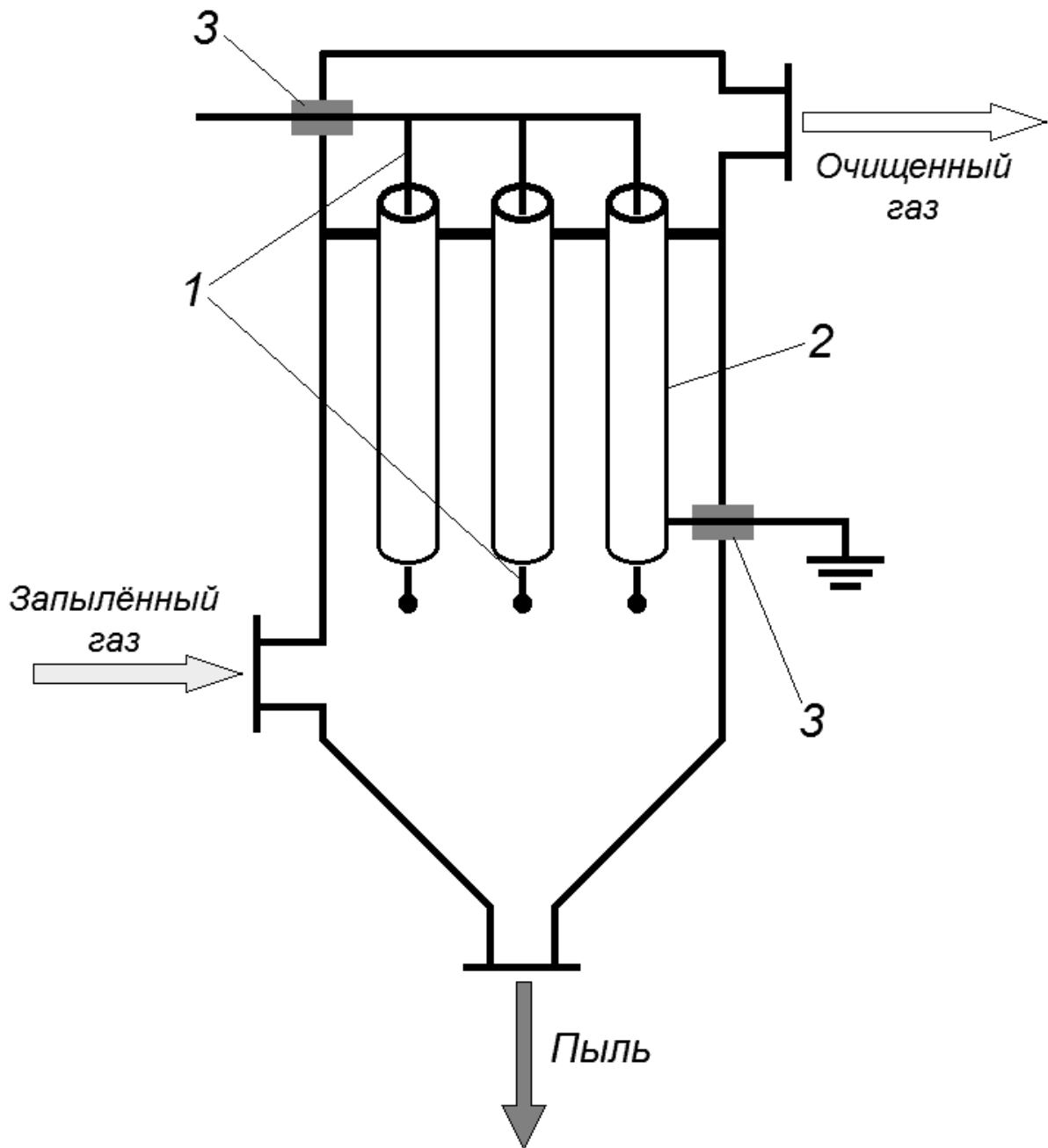


Рис. 72. Схема трубчатого электрофильтра:
1 – коронирующие электроды; 2 – осадительные электроды; 3 – изоляторы

Хотя электрофильтры работают при высоком напряжении постоянного тока (40–75 кВ), расход электроэнергии в них невелик и обычно составляет 0,2–0,3 кВт·ч на 1000 м³ газа. Гидравлическое сопротивление электрофильтров меньше, чем большинства других аппаратов газоочистки. Степень очистки газа от пыли составляет 95–99 %.

Электрофильтры характеризуются относительно высокой стоимостью, сложны в эксплуатации, малопригодны для очистки газов от частиц с малым электросопротивлением.

Сравнительные характеристики газоочистительной аппаратуры

При выборе аппаратов для очистки газа следует принимать во внимание технико-экономические показатели их работы, при определении которых необходимо учитывать степень очистки газа, гидравлическое сопротивление аппарата, расход электроэнергии, пара и воды на очистку, стоимость аппарата и стоимость очистки газа. При этом должны быть приняты во внимание факторы, от которых зависит эффективность очистки: влажность газа и содержание в нём пыли, температура газа и его химическая активность, свойства пыли (сухая, липкая, волокнистая, гигроскопичная и т.д.), размеры частиц пыли и её фракционный состав и др.

Таблица 4

Сравнительные характеристики газоочистительных аппаратов

Аппараты	Максимальное содержание пыли, кг/м ³	Минимальный размер отделяемых частиц, мкм	Степень очистки, %	Гидравлическое сопротивление, Па
Циклоны	0,4	10	70–95	400–700
Батарейные циклоны	0,1	10	85–90	500–800
Рукавные фильтры	0,02	1	98–99	500–2500
Центробежные скрубберы	0,05	2	85–95	400–800
Пенные пылеуловители	0,3	0,5	95–99	300–900
Электрофильтры	0,05	0,005	99	100–200

В табл. 4 приведены некоторые усреднённые характеристики распространённых газоочистительных аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 10-е изд. стереотип., доработ. Перепеч. с изд. 1973 г. М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. 753 с.
2. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: Часть 1. М.: Химия, 2002. 368 с.
3. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: Часть 2. М.: Химия, 2002. 368 с.
4. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Книга 2. М.: Химия, 1981. 812 с.
5. Иоффе И. Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1991. 352 с.
6. Плановский А. Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Госхимиздат, 1962. 844 с.
7. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Книга 2/ В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов, В. В. Захаренко, Т. В. Зиновкина, А. Л. Таран, А. Е. Костанян. М.: Химия, 2002. 872 с.
8. Ульянов Б. А., Бадеников В. Я., Ликучёв В. Г. Процессы и аппараты химической технологии в примерах и задачах. Ангарск: Издательство АГТА, 2006. 743 с.
9. Игнатович Э. Химическая техника. Процессы и аппараты: пер. с нем. М.: Техносфера, 2007. 656 с.
10. Поникаров И.И., Перелыгин О.А. Машины и аппараты химических производств. М.: Машиностроение, 1989. 368 с

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. АППАРАТУРА РАЗДЕЛЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ СИСТЕМ	4
1.1. Насадочные контактные устройства	6
Кольцевые насадки	7
Седлообразные насадки.....	9
Блочные насадки	10
Хордовые и кусковые насадки.....	11
Расположение насадок в колоннах.....	12
Достоинства и недостатки насадок	14
1.2. Тарельчатые контактные устройства	15
Провальные барботажные тарелки.....	18
Ситчатые переливные тарелки	20
Колпачковые переливные тарелки	21
Клапанные переливные тарелки	24
Сравнительные характеристики тарелок	26
1.3. Абсорбция	28
Плёночный трубчатый абсорбер	28
Полый распыливающий абсорбер	30
Абсорбер Вентури.....	30
Насадочный плёночный абсорбер	33
Эмульгационный абсорбер с затопленной насадкой	36
Тарельчатый абсорбер	38
Сравнение абсорбционных аппаратов	40
1.4. Простая перегонка.....	42
1.5. Ректификация.....	46
Тарельчатая ректификационная колонна	48
Насадочная ректификационная колонна	50
Экстрактивная и азеотропная ректификация	51
1.6. Жидкостная экстракция.....	53
Полые (распылительные) колонные экстракторы	54
Насадочный экстрактор	56
Тарельчатый экстрактор.....	58

Роторно-дисковый экстрактор	58
1.7. Адсорбция	60
Адсорбер с неподвижным слоем	62
Адсорбер с псевдоожиженным слоем	64
2. АППАРАТУРА РАЗДЕЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ	66
2.1. Разделение жидких гетерогенных систем	68
Одноярусный отстойник непрерывного действия	69
Многорярусный отстойник непрерывного действия	71
Отстойник для разделения эмульсий	71
Гидроциклон	73
Отстойная центрифуга	74
Нутч-фильтр	75
Рамный пресс-фильтр	78
Ленточный фильтр	81
Барабанный фильтр	83
Дисковый фильтр	86
Сравнительные характеристики фильтров	88
2.2. Разделение газовых гетерогенных систем	88
Циклон	90
Батарейный циклон	92
Центробежный скруббер	93
Барботажный (пенный) пылеуловитель	95
Рукавный фильтр	96
Трубчатый электрофильтр	97
Сравнительные характеристики газоочистительной аппаратуры ...	100
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	101

Учебное издание

ДМИТРИЕВ Евгений Александрович
КОМЛЯШЕВ Роман Борисович
МОРГУНОВА Елена Павловна
ТРУШИН Александр Михайлович
ВЕШНЯКОВ Александр Викторович
САЛЬНИКОВА Людмила Сергеевна

**АППАРАТУРА ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ
ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ**

Редактор Р. Г. Чиркова
Е. В. Копасова

Подписано в печать 28.06.2016 г. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,0. Тираж 500 экз. Заказ

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Издательский центр

Адрес университета и Издательского центра
125047 г. Москва, Миусская пл., 9.