УДК 66.021.3:66.069.833-026.26-027.28(048.83)

И.О. Микулёнок, д-р техн. наук (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского») E-mail: i.mikulionok@gmail.com

Классификация конструкций массообменных колонн с подвижной насадкой (*обзор патентов*)

Наряду с массообменными колоннами с неподвижной насадкой [1—5] разработаны конструкции аппаратов с подвижной насадкой, разновидностью которых являются колонны с трёхфазным псевдоожиженным слоем [6, 7].

Турбулизация фаз в аппаратах с подвижной насадкой на порядок выше, чем в аппаратах с неподвижной насадкой [2], поэтому аппараты с подвижной насадкой применяются при высоком диффузионном сопротивлении в лёгкой фазе и для обработки загрязнённых фаз [6].

Анализ конструктивного исполнения массообменных колонн с подвижной насадкой позволяет предложить их укрупнённую классификацию (**рис. 1**).

По степени подвижности элементов — колонны с подвижными элементами; с подвижными частями элементов; с комбинированными элементами.

В большинстве колонн подвижными являются элементы насадки в целом, однако разработаны неподвижные элементы с одной или несколькими подвижными частями для формирования регулярных и нерегулярных насадок.

Элемент регулярной насадки — в виде вертикального полого цилиндра с закреплённой внутри него на пружинах вибрирующей трубчатой вставкой (пат. № RU174152U1, № RU189422U1).

Элемент регулярной насадки в виде закрытого перфорированными крышками вертикального полого цилиндра с сыпучим материалом, который под воздействием лёгкой фазы псевдоожижается (пат. № UA110925U).

Сферический элемент с дополнительным грузом (внутри) состоит из двух перфорированных полусфер с соединением типа «твист-офф» (пат. № UA132063U; **рис. 2**). При низких скоростях фаз элементы насадки неподвижны, колеблется лишь дополнительный груз. При возрастании скоростей фаз наступает режим псевдоожижения элементов.

Комбинированный элемент насадки — в виде перфорированного цилиндрического кольца с внутренней вставкой, закреплённой упругими стержнями (а. с. № SU1400649A1). В процессе работы колонны образуется псевдоожиженный слой с вибрирующими внутри элементов вставками.

Комбинированный элемент в виде полого цилиндра с поперечным эластичным бандажом, вибрирующим под действием фаз (а. с. № SU1528545A2).

Рис. 1. Классификация массообменных колонн с подвижной насадкой

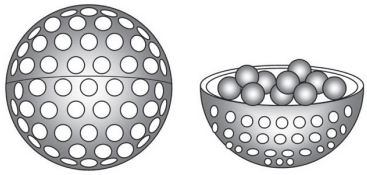

Рис. 2. Схема элемента насадки с подвижными шариками (пат. № UA132063U)

hp421.indd 44 26.04.2021 16:49:33

По механизму движения элементов насадки — аппараты с взвешенной, циркулирующей, вращающейся, колеблющейся и комбинированной насадками.

Аппараты со взвешенной насадкой бывают с восходящим потоком тяжелой фазы и с нисходящим потоком тяжёлой фазы (а. с. № SU901798A1). В первом случае плотность материала насадки выше плотности тяжёлой фазы, во втором — ниже. Аппараты со взвешенной насадкой характеризуются хаотичным и пульсационным движением элементов насадки (в псевдоожиженном слое).

Колонна — с перфорированными коническими тарелками, направленными вершинами вверх (пат. RU173764U1). В процессе работы подвижной гофрированной насадкой образуется псевдоожиженный слой между тарелками.

Колонна с корпусом в виде усечённого конуса с большим основанием вверху, горизонтальными тарелками, а также размещёнными на каждой тарелке подвижными элементами насадки, плотность которых снижается от нижней тарелки к верхней (а. с. № SU1247068A1). Колонна характеризуется высокой эффективностью в широком диапазоне нагрузок по лёгкой фазе.

В колонне со взвешенной насадкой расположены вертикальные стержни или струны со свободно размещёнными на них сферическими элементами насадки (а. с. № SU682255A1). Аналогичные элементы в нижней части — с радиальными цилиндрическими иглами (а. с. № SU1287927A1).

В аналогичной колонне плотность элементов снижается снизу вверх (а. с. № SU793620A2). Под действием лёгкой фазы элементы «растягиваются» вдоль стержней, при этом снижается гидравлическое сопротивление колонны.

Элементы насадки неподвижно установлены на гибких струнах, закреплённых в распределительных решётках, при этом положение одной из решёток регулируется по высоте (пат. № UA56771U). Изменением расстояния между решётками обеспечивается необходимая амплитуда колебаний элементов.

Контактный элемент в виде вертикального шнура с пучками коротких волокон (пат. № RU2264252C2). Недостаток — сложность очистки элементов.

Колонна — с установленными на вертикальных стержнях вращающимися под воздействием потоков фаз объёмными элементами с наклонными выступами, впадинами или каналами (пат. № UA790U), а также — с элементами в виде крыльчатки (а. с. № SU1500353A1, № SU1678437A1), в том числе расположенной внутри сетчатых направляющих элементов, обеспечивающих повышение насосного и диспергирующего эффектов насадки (а. с. № SU1741884A1).

Элементы установлены на гибких струнах, консольно закреплённых в перфорированной решётке (а. с. № SU850183A1, № SU791401A1). Недостаток — в случае перепутывания струн снижается надёжность работы колонны.

Соединением вертикальных цепей горизонтальной цепью исключается их переплетение в процессе работы колонны (а. с. № SU1152630A1).

Колонна с насадкой в виде вертикальных цепей, закреплённых концами на двух вибрирующих решётках (пат. № RU2465957C1). Недостаток колонны — дополнительные затраты энергии на вибрацию решёток.

Насадка в виде многопетлевой цепи при обтекании её обрабатываемыми фазами непрерывно колеблется, при этом турбулизируются потоки фаз и исключается проскок фаз без взаимодействия (пат. № DE202014101190U1).

В верхней части колонны смонтирован горизонтальный барабан с перекинутыми через него несколькими (висящими на нём) кольцевыми цепями (а. с. № SU1041136A1). При вращении барабана цепями обеспечивается турбулизация потоков фаз, а также самоочищение цепей от отложений.

В полом перфорированном элементе расположен шарик из ферромагнитного материала, вибрирующий под воздействием электромагнитного поля (пат. № CN108144419A).

Элемент — в виде двух размещённых друг в друге сферических оболочек (с отверстиями), заполненных подвижными вставками (пат. № CN206613502U).

Элементы в виде шариков закреплены над распределительной решёткой короткими упругими нитями (а. с. № SU1142131A1). Колебаниями шариков обеспечивается повышение равномерности распределения лёгкой фазы на выходе из решётки.

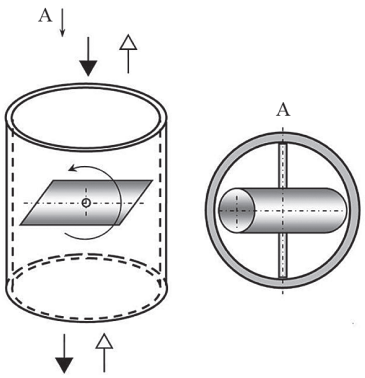

Рис. 3. Схема элемента насадки с вращающейся трубкой (пат. № UA126202U)

Элемент регулярной насадки — в виде цилиндрической оболочки со свободно установленной внутри неё (на поперечной оси) короткой трубкой со скошенными параллельными торцами (пат. № UA126202U; **рис. 3**).

В аналогичном элементе на взаимно перпендикулярных поперечных осях установлены две крыльчатки (пат. № CN206701289U).

Элементы — в виде перфорированной сферы с крыльчаткой (пат. № CN207970865U) и со свободно установленным на оси вращающимся полым однополосным гиперболоидом (пат. № CN207970866U). Недостатки элементов — сложность изготовления и очистки от загрязнений и отложений.

Элемент — в виде трёх соединённых колец, расположенных в ортогональных плоскостях, при этом на поперечной оси внутри колец установлен по меньшей мере один вращающийся элемент (пат. № UA131563U).

Элемент регулярной насадки — в виде вертикально расположенной вогнутой оболочки вращения с установленными внутри неё двумя дипирамидами, соединёнными пружиной (пат. № UA6504U). Действие восходящего потока вызывает колебание верхней дипирамиды и турбулизацию фаз.

Элемент насадки — в виде цилиндрической оболочки с закреплённым в её полости (на упругих элементах) шариком, колеблющимся под действием обрабатываемых фаз (пат. № UA101453U). В усовершенствованном элементе внутри полого шарика размещено тело обтекаемой формы (пат. № UA110926U).

На горизонтальные стержни нанизаны короткие цилиндрические

hp421.indd 45 26.04.2021 16:49:33

трубки (пат. № GB1171958A). Под воздействием поднимающейся лёгкой фазы трубки приподнимаются на стержнях и колеблются либо вращаются.

Колеблющиеся (вибрирующие) элементы свободно уложены на оснащенной вибратором эластичной распределительной тарелке (пат. № RU2286834C1, № RU2286835C1) либо на жёсткой распределительной тарелке, закреплённой на вибрирующем корпусе (пат. № UA77166U, № UA77167U).

Внутри элемента в виде эластичного цилиндрического кольца размещена крестовина, взаимно перпендикулярные плечи которой — различной длины (пат. № RU107963U1). Для изготовления элементов насадки могут быть использованы отходы эластичных трубчатых изделий (например шланги) [8].

Положение сферических элементов насадки определяется размерами ячеек горизонтальных сеток, а также расстоянием между ними (пат. № CH506446A; **рис. 4**). Варьированием этих параметров и плотности материала элементов обеспечивается необходимая подвижность элементов.

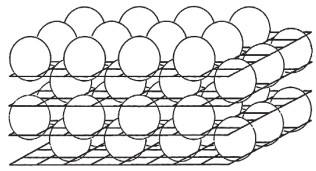

Рис. 4. Схема регулярной насадки с подвижными шарами (пат. № CH506446A)

К аппаратам с комбинированным механизмом движения элементов насадки относится колонна с подвижной насадкой, каждый элемент которой выполнен в виде сферы, состоящей из двух упруго соединенных полусфер (а. с. № SU430872A1). Под воздействием потоков фаз элементы находятся в режиме псевдоожижения, а полусферы — колеблются.

По форме элементов насадки — аппараты с насадкой правильной и неправильной геометрической формы.

Чаще используются элементы насадки в виде тел правильной геометрической формы, обеспечивающей однородность структуры слоя насадки и исключение взаимного проскока фаз без взаимодействия: элементы в виде шара (пат. № JPS60212206A), а также в виде сфер с гладкой (пат. № US3122594A, № US3350075A), ребристой (а. с. № SU793634A1, № SU892185A1) и перфорированной поверхностями (а. с. № SU1212523A1, пат. № UA71359U).

Элемент — в виде сферы с местным перфорированным участком (а. с. № SU728892A1). В процессе псевдоожижения через перфорацию внутрь элемента попадает некоторый объём тяжёлой фазы, и масса элемента изменяется. В результате характер движения элемента — неравномерный, пульсирующий. Однако в связи с неконтролируемым объёмом жидкости в элементе не обеспечивается стабильность гидродинамики процесса псевдоожижения.

Элемент — в виде шара с глухими отверстиями, смещёнными относительно осей симметрии шара (а. с. № SU915918A1). Под действием лёгкой фазы обеспечиваются не только хаотичное движение элемента в псевдоожиженном слое, но и движение вокруг собственного центра масс. Однако при загрязнении глухих отверстий изменяются масса элемента и характер его движения.

Элемент в виде сферы с расположенным в центре сферы шаром, плотность материала которого выше плотности материала сферы, при этом пространство между сферой и шаром заполнено пористым материалом (а. с. № SU1271549A1). В зависимости от соотношения размеров и плотностей материалов частей элемента обеспечивается вращение элемента в процессе работы аппарата.

Для исключения взаимного «прилипания» шарообразные элементы насадки изготавливают с радиальными выступами (пат. № US2198861A, а. с. № SU614806A1). Недостатки насадки — сложность изготовления; интенсивное изнашивание выступов при соударениях элементов.

Шарообразный элемент — в виде трёх круглых дисков, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях (а. с. № SU237100A1). Недостаток — возможность образования застойных зон в месте пересечения дисков.

Этого недостатка нет у (сложного в изготовлении) шарообразного элемента в виде горизонтального круглого диска с центральным отверстием и скрепленных с ним трёх круглых вертикальных колец, расположенных под углом 120° (а. с. № SU990278A1).

В общем случае элементы подвижной насадки могут быть самой разнообразной формы, но без резких выступов и впадин (для исключения их взаимного сцепления).

Элемент подвижной насадки — в виде сплюснутого шара с продольными впадинами на широких участках (заявка № WO94/29019A1).

Сложный в изготовлении элемент — в виде полого тела каплевидной формы с прямолинейными или винтообразными лопастями (а. с. № SU403423A1).

Элемент — в виде полого цилиндра с наружными лопастями и внутренней вставкой в форме гиперболического параболоида (а. с. № SU691171A1). Элемент сложен в изготовлении, изменение положения элемента в пространстве влияет на стабильность гидродинамики фаз.

Элементам в виде усечённых конусов с наружными лопастями характерны такие же недостатки (а. с. № SU740266A1, № SU940817A1).

Элемент — в виде выпуклого многогранника с расположенным внутри него и смещённым относительно его центра шаром для стабилизации положения элемента в процессе работы (а. с. № SU1576191A2, пат. № RU2124941C1).

Элементы — в виде перфорированных куба и полусферы с днищем (пат. № GB1204781A), в виде цилиндрической оболочки с противоположно расположенными косыми срезами стенок вблизи торцов (а. с. № SU654275A1), в виде скрученного по длине профиля Х-образного поперечного сечения (а. с. № SU484715A1, № SU1150008A1), в виде короткого отрезка цилиндрической трубки с косыми непараллельными торцами (а. с. № SU980790A1), а также в виде замкнутой цилиндрической оболочки с продольными выступами и впадинами, а также отогнутыми внутрь оболочки лепестками (а. с. № SU1274750A1).

По степени сборки элементов насадки — аппараты с насадкой в виде деталей и в виде сборочных единиц.

Элементы насадки в виде деталей — обычно достаточно простой формы, хотя современные методы переработки материалов (например 3D-печать) позволяют получать изделия практически любой формы.

Элемент — в виде детали, получаемой одновременной экструзи-

hp421.indd 46 26.04.2021 16:49:34

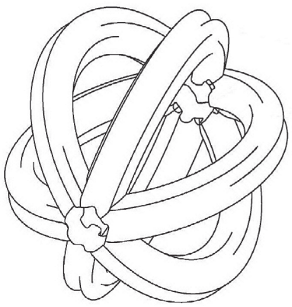

Рис. 5. Схема элемента подвижной насадки (заявка № US2017190075A1)

ей нескольких полимерных стренг (в форме сферы или эллипсоида, заявка № US2017190075A1; **рис. 5**). Элемент характеризуется высокой технологичностью и безотходным производством изготовления [9, 10].

Рассмотренные ранее элементы насадки с подвижными частями (колеблющимися, вращающимися и т. д.) — сборочные единицы.

Элемент — в виде четырёх выпуклых равносторонних треугольников, соединённых с образованием оболочки, при этом вершины выпуклых треугольников направлены к центру оболочки (а. с. № SU1018700A1). Недостаток элемента — значительное образование отходов при изготовлении.

Элемент — в виде шара с радиальными каналами, а также с эжектором и стабилизатором положения, интенсифицирующими циркуляцию и диспергирование фаз через элемент (а. с. № SU1031483A1). Данный элемент — нетехнологичен и чувствителен к загрязнению.

По возможности изменения массы элементов насадки — аппараты с постоянной массой и с регулируемой массой элементов насадки.

Элемент регулируемой массы — в виде цилиндрической оболочки с двумя торцевыми крышками (пат. № UA105266U). Дополнительный груз (кусковой, сыпучий, жидкий) внутри элемента позволяет регулировать массу элемента и его плавучесть в объёме тяжёлой фазы.

Выполненный из эластичного материала сферический элемент частично заполнен жидкостью (пат. № SU967532A1). Заполнение и опорожнение элемента осуществляется шприцем, при этом образующееся в элементе отверстие затягивается после извлечения иглы.

По материалу элементов насадки — аппараты с металлической, неметаллической и комбинированной подвижными насадками.

Металлические элементы ввиду большой плотности металла применяются относительно редко, например, в виде замкнутой оболочки (пат. № UA105266U).

Большие возможности для изготовления элементов подвижной насадки связаны с применением композиционных материалов и прежде всего полимеров [11], в том числе вспененных (пат. № FR2112104A7).

Полимерный элемент (из полиэтилена, полипропилена, поливинилденфторида и т. д.) — в виде тела обтекаемой формы с кольцевым утолщением в нижней части (заявка № GB2551272A; **рис. 6**). В процессе работы формой элемента обеспечивается стабильное положение элемента в пространстве.

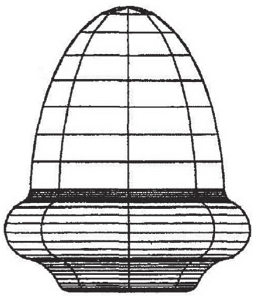

Рис. 6. Схема элемента подвижной насадки (заявка № GB2551272A)

Также элементы насадки изготавливают из политетрафторэтилена (а. с. № SU1782642A1), полиуретана (пат. № GB1097473A), поливинилхлорида (а. с. № SU899594A1) и резины (а. с. № SU466038A1).

Несмотря на множество конструкций подвижных насадок и их высокую эффективность по сравнению с неподвижными насадками, они применяются намного реже, что объясняется большей универсальностью неподвижных насадок, удовлетворительно работающих в широком диапазоне скоростей взаимодействующих фаз. Однако подвижные насадки могут быть успешно применены в крупнотоннажных производствах, характеризующихся стабильностью технологических режимов.

Список литературы

1. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов /под ред. А.Г. Лаптева. Казань: Отечество. 2013. 454 с.

2. Тютюнников А.Б., Товажнянский Л.Л., Готлинская А.П. Контактные элементы массообменных колонн. Киев: ИСИО. 1993. 440 с.

3. Микулёнок И.О. Механические, гидромеханические и массообменные процессы и оборудование химической технологии. Киев: НТУУ «КПИ». 2014. 340 с.

4. Mikulionok I.O. Classification of Nozzles of Mass Transfer Apparatuses // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. V. 83. N. 9. P. 1631—1637.

5. Пушнов А.С., Микулёнок И.О., Севрюков А.С., Беренгартен М.Г. Классификация конструкций насадок колонных аппаратов и методов интенсификации в них процессов тепломассообмена // Химическая технология. 2014. № 4. С. 244—250.

6. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн. М.: Химия. 1981. 812 с.

7. Заминян А.А., Рамм В.М. Абсорберы с подвижной насадкой. М.: Химия. 1980. 184 с.

8. Mikulionok I.O. Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. V. 83. N. 6. P. 1105—1113.

9. Mikulyonok I.O. Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. V. 48. N. 11—12. P. 658—661.

10. Mikulionok I.O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. V. 51. N. 1—2. P. 14—19.

11. Микулёнок И.О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // Пластические массы. 2012. № 9. С. 29—38.

hp421.indd 47 26.04.2021 16:49:34