

И. А. Лютаревич, аспирант; В. А. Марков, профессор
РОТОРНЫЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ АППАРАТЫ
 (краткий обзор)

In this article is given classification rotor devices for heat and mass transfer processes. Designs of devices are given and their comparative characteristic is carried out.

Во многих отраслях промышленности проявляется повышенный интерес к способам и устройствам, позволяющим интенсифицировать тепломассообменные процессы за счет подвода энергии извне, в частности, к роторным тепломассообменным аппаратам. Об этом свидетельствует отечественная и зарубежная патентная литература [1–5].

Создаваемые роторные тепломассообменные аппараты отличаются друг от друга по конструкции, по виду организуемой в них поверхности контакта фаз, по направлению взаимного движения фаз и т. д. С целью сравнительной оценки их характеристик предлагается следующая схема классификации (рис. 1), где все объекты, относящиеся к одному суперклассу, разбиваются на более мелкие подклассы.

Роторные тепломассообменные аппараты по виду организуемой поверхности контакта фаз разделяются на пленочные, дисперсионно-пленочные и барботажные. В роторно-пленочных аппаратах центробежная сила используется для создания пленочного течения жид-

кости по твердой подвижной или неподвижной поверхности, а массообмен происходит на поверхности пленки. В роторных дисперсионно-пленочных аппаратах распределение жидкости, участвующей в массообмене с газом или паром, происходит как в виде жидкостной пленки на контактных элементах, так и в виде струй и капель в объеме массообменной ступени. В барботажных роторных аппаратах центробежная сила используется для организации направленного движения фаз и многократного барботажа пара (газа) через слой жидкости в каждой ступени контакта.

В свою очередь, по способу организации взаимного движения фаз пленочные роторные аппараты подразделяются на противоточные и перекрестноточные, а дисперсионно-пленочные – на противоточные, перекрестноточные и аппараты с объемным взаимодействием, в которых взаимное движение фаз однозначно не определено и может иметь разное направление в различных точках контактной ступени.

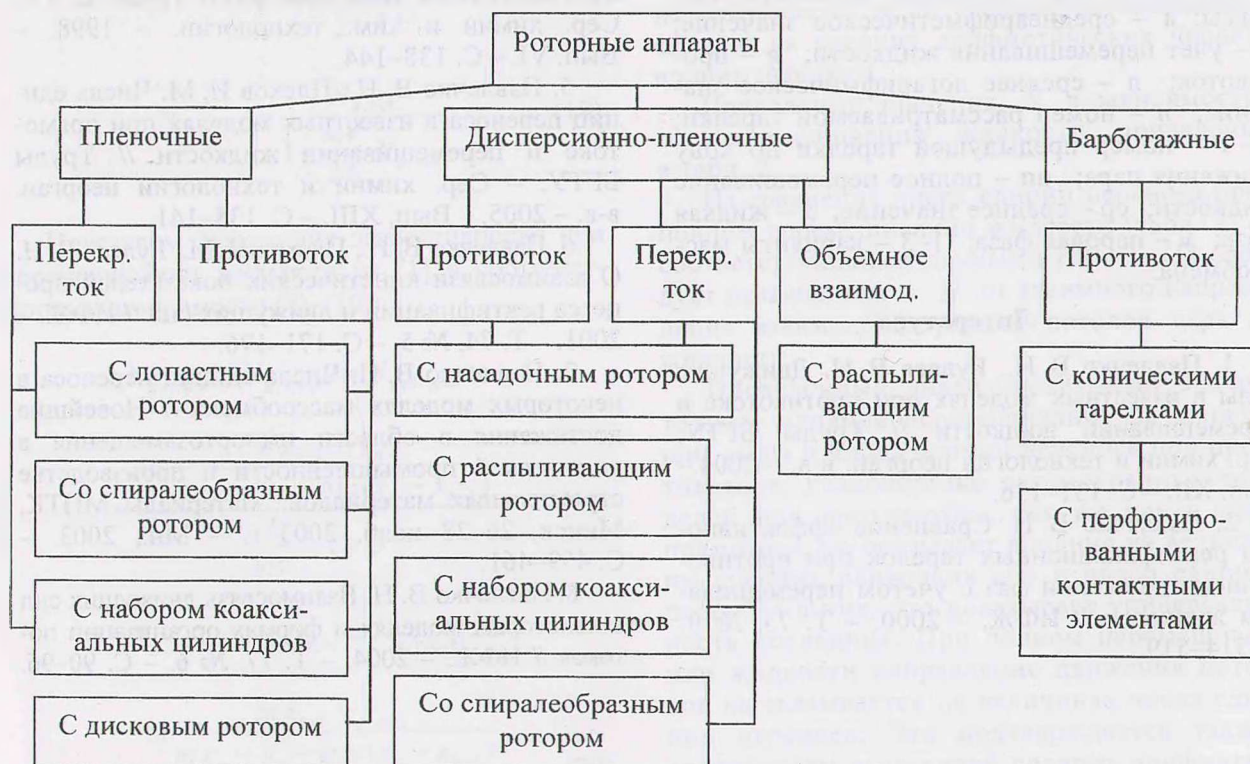


Рис. 1. Классификационная схема

Роторно-пленочные аппараты. Аппараты данной группы (некоторые из них показаны на рис. 2, а–г) разработаны с лопастными [6], спиралеобразными роторами [7, 8–10], а также с роторами, выполненными в виде коаксиальных цилиндров или конусов [11, 12].

Конструкция массообменного аппарата с ротором лопастного типа для проведения абсорбционных процессов (рис. 2, а) состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1, внутри которого соосно с ним размещен ротор 2, состоящий из полого перфорированного вала, к которому крепятся гофрированные лопасти 3. На валу ротора предусмотрены четыре (по числу

лопастей) вертикальных ряда отверстий, расстояние между которыми соответствует ширине гофра. При вращении полого вала жидкость (абсорбент) вытекает из отверстий перфорации в виде струек, которые, попадая на лопасть, растекаются по ней и образуют пленку. Под действием центробежных сил пленка перемещается в радиальном направлении от центра к периферии и сбрасывается с наружной кромки лопасти на внутреннюю поверхность корпуса, по которой стекает вниз. Взаимодействие между жидкостью и газом осуществляется как на смоченной поверхности лопастей, так и на стекающей по стенке корпуса пленки жидкости.

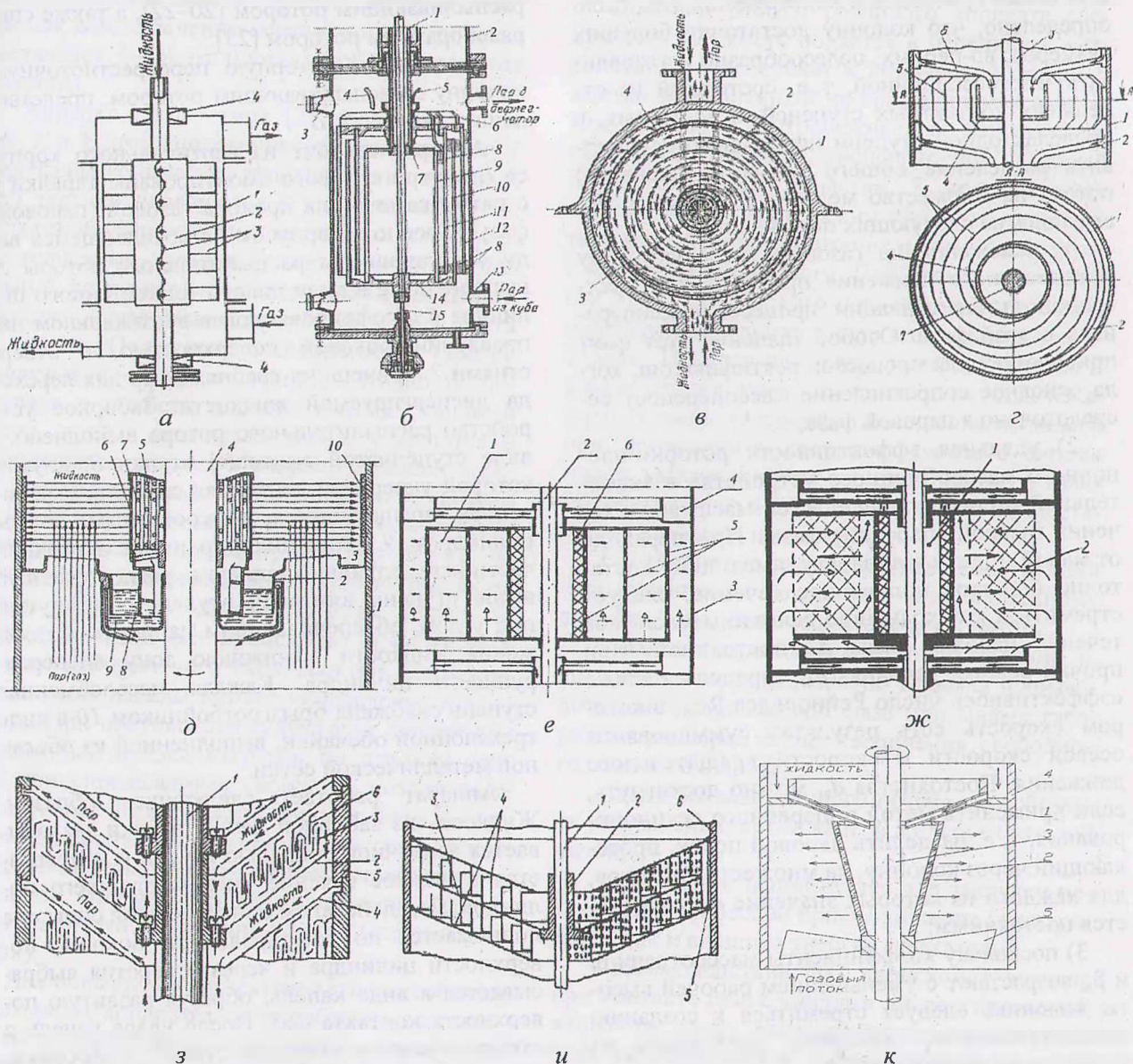


Рис. 2. Конструкции роторно-пленочных теплообменных аппаратов.
 а – абсорбер с ротором лопастного типа; б – многоцилиндровая роторная ректификационная колонна;
 в – ректификатор Подбельняка; г – ректификатор со спиралеобразным ротором;
 д – роторная перекрестноточная колонна с распыливающим ротором; е – роторный массообменный аппарат с набором коаксиальных цилиндров; ж – роторный насадочный аппарат; з – роторный барботажный аппарат; и – роторный аппарат с перфорированными контактными элементами;
 к – роторный массообменный аппарат.

Между тем создание достаточно крупных промышленных аппаратов с лопастным ротором до недавнего времени представлялось проблематичным. Основная трудность заключается в том, что любые попытки увеличить сечение для прохождения газа (пара) неизбежно приводили к снижению удельной эффективности, настолько значительному, что сама идея создания такого аппарата оказывалась практически бессмысленной. Выход из сложившейся ситуации был найден в результате применения принципа поперечно-продольного секционирования, использование которого для создания роторно-пленочных колонн определило целенаправленный поиск приемлемой конструкции. Так, было определено, что колонну достаточно больших размеров, во-первых, целесообразно изготавливать многосекционной, т. е. состоящей из отдельных контактных ступеней, а во-вторых, в пределах одной ступени необходимо осуществить разделение общего газового (парового) потока на множество мелких. При этом основывались на следующих положениях:

1) наложение на газовую (паровую) фазу вращательного движения приводит к существенной интенсификации процесса массопереноса в этой фазе. Особое значение этот факт приобретает для процессов ректификации, когда основное сопротивление массопереносу сосредоточено в паровой фазе;

2) удельная эффективность роторно-пленочного массообменного устройства в значительной степени определяется масштабом течения газовой (паровой) фазы. При переходе от малой модели к аппарату, имеющему достаточно большое поперечное сечение, следует стремиться к сохранению величины масштаба течения паровой фазы $d_{зг}$ постоянной. При прочих равных условиях $d_{зг}$ определяет также «эффективное» число Рейнольдса $Re_{зг}$, в котором скорость есть результат суммирования осевой скорости и скорости вращательного движения. Постоянства $d_{зг}$ можно достигнуть, если применить метод поперечного секционирования, т. е. разделить паровой поток, протекающий через колонну, на множество потоков, для каждого из которых значение $d_{зг}$ сохраняется постоянным;

3) поскольку коэффициенты массоотдачи β_r и $\beta_{ж}$ возрастают с уменьшением рабочей высоты колонны, следует стремиться к созданию многоступенчатого аппарата, состоящего из коротких по высоте секций;

4) интенсивное закручивание жидкостной пленки приводит к существенному возрастанию удельной эффективности массообменной пленочной колонны;

5) в промышленной конструкции следует отказаться от противоточной организации взаимодействующих потоков пара и жидкости

и перейти к многоступенчатому аппарату с перекрестным током жидкости и пара в пределах одной ступени. Эти основные положения нашли практическое осуществление в ряде конструкций роторно-пленочных аппаратов, созданных в ГИАПе. Наиболее ранняя из них – ректификатор со спиралеобразным ротором [7] (рис. 2, б). В этой конструкции сохраняется примерно постоянной удельная эффективность независимо от диаметра аппарата.

Дисперсионно-пленочные роторные аппараты. Аппараты данной группы выполняются с насадочным ротором [13–15], ротором в виде набора коаксиальных цилиндров [16–19], распыливающим ротором [20–22], а также спиралеобразным ротором [23].

Рассмотрим роторную перекрестноточную колонну с распыливающим ротором, представленную на рис. 2, д.

Аппарат состоит из вертикального корпуса 1, внутри которого вмонтированы тарелки 2 с патрубками 3 для прохода газовой (паровой) фазы. Соосно с корпусом на вращающемся валу 4 установлены распылительные роторы 5, выполненные в виде полого тонкостенного цилиндра 6 с гофрированной в вертикальном направлении боковой поверхностью, с отверстиями 7 на внешних гребнях гофр для перехода диспергируемой жидкости. Заборное устройство распылительного ротора выполнено в виде ступенчатой винтовой втулки 8, внутри которой укреплен ленточная спираль, ограниченная вращающимся тонкостенным полым цилиндром 9. Этот цилиндр имеет в верхней части направляющий заплечик, расположенный выше ступени винтовой втулки и отогнутый под углом, обеспечивающим направление движения жидкости в нижнюю зону диспергирующего цилиндра. Каждая массообменная ступень снабжена брызгоотбойником 10 в виде трехслойной обечайки, выполненной из объемной металлической сетки.

Аппарат работает следующим образом. Жидкость из заборной чаши тарелки захватывается ленточной спиралью втулки и направляется в нижнее сечение диспергирующего цилиндра. Под действием центробежной силы она поднимается по гофрированной боковой поверхности цилиндра и через отверстия выбрасывается в виде капель, образуя развитую поверхность контакта фаз. После удара капель о стенку аппарата жидкость стекает в заборную чашу тарелки, откуда основная часть вновь забирается на повторное диспергирование, а избыток через гидрозатвор сливается на нижележащую ступень.

Аппараты данного типа (рис. 2, д–ж) обладают высокой производительностью по газовой (паровой) фазе, малым гидравлическим сопротивлением.

На кафедре ПиАХП была разработана конструкция роторного массообменного аппарата с перекрестноточным взаимодействием газа (пара) и жидкости (рис. 2, е). В аппарате диспергирование жидкости осуществляется набором коаксиальных цилиндров 5. Также была разработана конструкция с насадочным ротором (рис. 2, ж), где взаимодействие фаз осуществляется в режиме противотока. Диспергирование жидкости осуществляется вращающимся перфорированным цилиндром 1 навстречу движущемуся газовому (паровому) потоку.

Роторные барботажные аппараты [24, 25] обладают высокой разделительной способностью, но малой производительностью, так как живое сечение контактного устройства составляет 5–7% от площади общего сечения колонны.

Аппарат такого типа [25] представлен на рис. 2, и. В этом аппарате на вертикальном валу 1 укреплены конические тарелки 2 с кольцами 3. Эти тарелки чередуются с неподвижными тарелками 4, укрепленными на стенках колонны 5. Неподвижные тарелки также снабжены кольцами 6, которые расположены между кольцами подвижной тарелки и перекрывают друг друга на 3–5 мм. Подвижная и неподвижная тарелки образуют контактную секцию. Жидкость поступает в полость первого кольца. Капли и струи, пройдя кольцевой канал, ударяются о неподвижное кольцо, и жидкость стекает между первым и вторым неподвижными кольцами и т. д. Пар, перемещаясь в контактном устройстве аппарата по принципу противотока по отношению к жидкости, многократно проходит через зону, где диспергируется жидкость. Взаимодействие фаз происходит в кольцевых каналах лабиринтного типа. Пар при движении через такие каналы меняет направление и скорость. При противотоке существует вполне определенный предел нагрузок по потокам, так как при определенных скоростях потока пара происходит накапливание жидкой фазы в горловине неподвижного корпуса, которое сопровождается резким возрастанием сопротивления аппарата. При дальнейшем увеличении количества жидкости ротор заполняется («захлебывается»).

Для повышения эффективности массообмена в роторных аппаратах целесообразно осуществлять рециркуляцию жидкости в элементах контактного устройства (рис. 2, и) [24].

Наиболее благоприятные возможности, обусловленные низким гидравлическим сопротивлением роторно-пленочной аппаратуры (по сравнению с тарельчатыми, насадочными колоннами), имеются в процессах вакуумной ректификации термически нестойких веществ,

особенно обладающих близкими температурами кипения, в том числе изомеров. Подобные проблемы часто возникают в производствах синтетических мономеров и в нефтехимических процессах. Особо следует выделить пищевую, парфюмерную и медицинскую отрасли промышленности, где недопустима даже малейшая термическая деструкция в процессе разделения и очистки.

Наряду с указанными конструкциями нами была разработана конструкция роторного массообменного аппарата, в которой диспергирование жидкости осуществляется вращающимся перфорированным конусом (рис. 2, к).

Принцип работы роторного аппарата следующий: жидкость подается в переливное устройство 1 и поступает в конический стакан 2, жестко закрепленный на вращающемся валу 3. Под действием центробежных сил жидкая фаза, выходя из отверстий, диспергируется. Газовый поток, благодаря лопастям 5, вращающимся также вместе с коническим стаканом, приобретает вращательное движение и взаимодействует с капельками жидкости. При этом в зависимости от крутки газового потока капли изменяют направление и движутся по спиральным траекториям. Попадая на стенку, капли сливаются и в виде пленки жидкости стекают на нижележащую ступень. Очевидно, что пленка жидкости при достаточных скоростях газового потока может увлекаться (так же как и капли) и взаимодействие фаз в этом случае будет осуществляться в режиме прямотока.

В отличие от рассмотренных конструкций предложенному роторному массообменному аппарату присущи следующие достоинства:

- малое гидравлическое сопротивление и, следовательно, сравнительно высокая производительность по газовой фазе при малых габаритных размерах за счет увеличения свободного сечения аппарата;

- наличие закрученного потока способствует уменьшению уноса капель жидкости газовой фазой;

- в аппарате используется для закрутки потока как статические приспособления (завихрители), так и внешняя энергия (двигатель);

- взаимодействие фаз происходит вначале при контакте газа с каплями диспергированной жидкости, затем взаимодействие газового потока осуществляется с закрученной пленкой жидкости.

Литература

1. Basta N. Facelift for distillation // Chem. Engng. – 1987. – № 2. – P. 14.
2. Brauer H. Chem. – Ing. – Techn. – 1986. – В. 58. – № 2. – S. 97.

3. Neramann A., Uoit H., Zeppenfeld R. // *Loid.* – 1966. – В. 58. – № 2. – С. 87.
4. Porter K. E., Jenkins I. *Distillation up – date // Processing.* – 1983. – December. – P. 26.
5. Ramshaw C. «Hi Gu» Distillation. An example of process intensification // *Chem. Engng.* – № 11. – P. 13.
6. А. с. 1183144 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Роторная колонна / А. В. Шафранский, В. М. Олевский. – Оpubл. 07.10.85, Бюл. № 37.
7. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура / В. М. Олевский, В. Р. Ручинский, А. М. Кашников, В. И. Чернышев – М.: Химия, 1988. – 240 с.
8. А. с. 203621 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Роторная массообменная колонна / А. В. Шафранский, В. Р. Ручинский. – Оpubл. 09.10.67, Бюл. № 21.
9. А. с. 850104 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Роторный пленочный аппарат / А. В. Шафранский. – Оpubл. 30.07.81, Бюл. № 28.
10. А. с. 259822 СССР, МПК В 01 D кл. 12а, 5. Роторная массообменная колонна / А. В. Шафранский, В. Р. Ручинский. – Оpubл. 22.12.69, Бюл. № 3.
11. А. с. 1274707 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Теплообменный аппарат / В. А. Линеv, А. Г. Липкин. – Оpubл. 07.12.86, Бюл. № 45.
12. А. с. 537685 СССР, МКИ 2 В 01 D 3/30. Роторная массообменная колонна / В. Р. Ручинский, В. К. Чубуков, В. П. Гаврилов, Ю. Г. Нечаев, И. Ф. Евкин, В. А. Гурнов. – Оpubл. 05.12.76, Бюл. № 45.
13. А. с. 1012938 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Ротационный массообменный аппарат / А. Г. Карасев, Н. А. Соловьев. – Оpubл. 23.04.83, Бюл. № 15.
14. А. с. 1055529 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Роторная насадочная колонна / К. Ф. Богатых, Б. Н. Марушкин, А. А. Кондратьев и др. – Оpubл. 23.11.83, Бюл. № 43.
15. А. с. 829125 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Роторная массообменная колонна / В. Р. Ручинский, Ю. А. Бленов, Д. Г. Нечаев, Е. М. Михальчук. – Оpubл. 15.05.81, Бюл. № 18.
16. А. с. 1212450 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Теплообменная колонна / В. Р. Ручинский, Ю. Г. Нечаев, Е. М. Михальчук, Ю. А. Бленов. – Оpubл. 23.02.86, Бюл. № 7.
17. А. с. 1095920 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Роторная массообменная колонна / Ю. Г. Нечаев, Е. М. Михальчук, О. В. Назарова и др. – Оpubл. 07.06.84, Бюл. № 21.
18. А. с. 1057054 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Ротационный массообменный аппарат / Ф. А. Мусташкин, И. В. Шаркин, А. А. Калинин и др. – Оpubл. 30.11.83, Бюл. № 44.
19. Исследование процесса диспергирования жидкости в роторном аппарате / В. А. Марков, В. К. Волков, А. И. Ершов, А. М. Волк // *Энергетика: Изв. высш. учеб. заведений.* – 1991. – № 6. – С. 94–98.
20. А. с. 1127611 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Роторная массообменная колонна / Я. М. Константинов. – Оpubл. 07.12.84, Бюл. № 45.
21. А. с. 814386 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Ротационный массообменный аппарат / П. П. Любченков, Н. П. Рябченко, Б. Г. Попов. – Оpubл. 23.03.81, Бюл. № 11.
22. А. с. 480424 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Ротационный массообменный аппарат / В. М. Питеров, А. Н. Одинцов, М. Я. Рознин и др. – Оpubл. 15.08.75, Бюл. № 30.
23. А. с. 1230617 СССР, МКИ 3 В 01 D 3/30. Роторная массообменная колонна / Д. Г. Нечаев, Е. М. Михальчук, А. В. Овсяков. – Оpubл. 15.05.86, Бюл. № 18.
24. Роторный массообменный аппарат с рециркуляцией жидкой фазы / А. С. Лозовой, В. М. Бреднев, А. А. Александровский. // *Труды КХТИ.* – 1973. – Вып. 5. – С. 75–83.
25. Вертикальный роторный аппарат для проведения физико-химических процессов между газами и жидкостями / В. С. Николаев // *Материалы межвузовской конференции по машинам и аппаратам диффузионных процессов.* – Казань, 1961. – С. 263–269.