

Аппараты с регулярными насадками имеют более низкую энергоемкость и более высокую пропускную способность, чем аппараты с другими видами контактных устройств. Именно поэтому их целесообразно использовать для

осуществлении различных теплообменных процессов, в том числе для процессов ректификации и абсорбции [1; 2].

Известно большое количество разновидностей регулярных насадок [3; 4], каждая из которых имеет свои особенности, положительные стороны и недостатки. Дальнейшее совершенствование конструкций регулярных насадок остается актуальным.

Пленочное течение жидкости в аппаратах с регулярными насадками может осуществляться в одном из четырех режимов. Каждый режим списывается отдельным уравнением для определения интенсивности массоотдачи в жидкой пленке [5; 6]. Этим уравнениям соответствуют линии 1-4 на рис. 1.

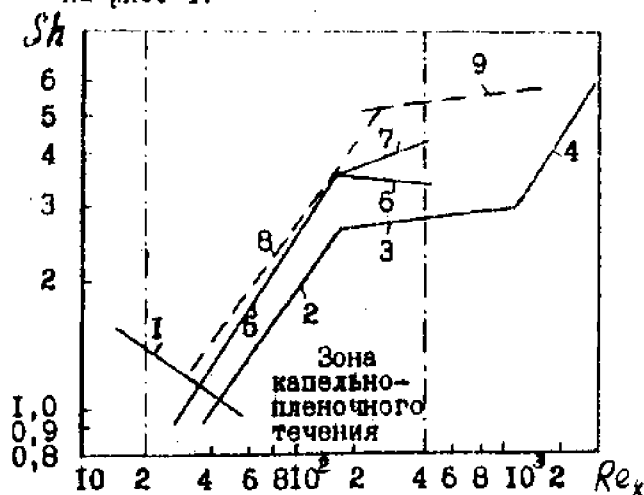


Рис. 1. Сравнение данных по массоотдаче в жидкой фазе при капельно-пленочном и пленочном течении жидкости: 1-4 - по формулам (1)-(4) для течения жидкости в трубах длиной 1 м [6]; 5-7 - капельно-пленочное течение жидкости по насадке с зубчатыми отверстиями при скорости парогазового потока W , м/с: 5 - до 3,5; 6 - 2,3; 7 - 4,5; 8, 9 - результаты расчета по формулам (2) и (3), если значение δ принять равным расстоянию 0,016 м между горизонтальными рядами зубчатых отверстий

1. Безволновой ламинарный режим при большом времени контакта ($Re_x \leq 40$)

$$Sh' = 3,76 / Re_x^{1/3} \quad (1)$$

2. Первый ламинарно-волновой режим ($40 \leq Re_x \leq 200$)

$$Sh = 0,011 Re_x^{0,67} Sc_x^{0,45} (\theta/l)^{0,12} \quad (2)$$

3. Второй ламинарно-волновой режим ($200 \leq Re_x \leq 1200$)

$$Sh = 0,356 Re_x^{0,07} Sc_x^{0,45} (\theta/l)^{0,155} \quad (3)$$

4. Турбулентный режим ($Re_x \geq 1200$)

$$Sh = 2,2 \cdot 10^{-3} Re_x^{0,82} Sc_x^{0,45} (\theta/l)^{0,176} \quad (4)$$

Здесь и далее используются следующие обозначения:

- a - капиллярная постоянная, м;
- b - ширина зуба отверстия, м;
- D - коэффициент молекулярной диффузии, m^2/c ;
- g - ускорение свободного падения, m/c^2 ;

- h, h_2 - средняя толщина пленки, высота зуба отверстия, м;
 l - длина участка пленочного течения, м;
 q - объемная плотность орошения, м³/с;
 ω_x, ω_y - скорость жидкой и газовой фаз, м/с;
 $\theta = (v_x^2/g)^{1/3}$ - приведенная толщина пленки, м;
 ν_x - кинематическая вязкость жидкости, м²/с;
 ρ - плотность жидкости, кг/м³;
 σ - поверхностное натяжение, Дж/м²;
 $Re_x = 4q/\nu_x$ - число Рейнольдса для пленки жидкости;
 $Sc = \nu_x/D$ - число Шмидта для жидкости;
 $Sh = \beta_x \theta/D$ - число Шервуда;
 $Sh' = \beta_x h/D$ - число Шервуда, в котором в качестве линейного размера использована средняя толщина пленки жидкости.

В массообменных аппаратах с регулярными насадками используются, как правило, первый и второй ламинарно-волновые режимы, при которых интенсивность переноса вещества в жидкой фазе недостаточно высока.

Для интенсификации массообмена авторами предложено прерывать течение жидкой пленки, перфорируя листы регулярной насадки продолговатыми горизонтальными отверстиями, верхние края которых выполнены зубчатыми [7]. Отверстия в листах насадки располагаются горизонтальными рядами и в шахматном порядке. Верхние края отверстий выполняются зубчатыми, ширина выступающих вниз зубьев равна ширине зазоров между зубьями. Расстояние между соседними отверстиями в горизонтальном ряде равно ширине зубьев.

При работе насадки жидкость равномерно распределяется сверху и под действием силы тяжести стекает вниз. Парогазовая фаза подается снизу (противоток) или сверху (нисходящий прямоток). Особенностью насадки является самопроизвольное выравнивание равномерности распределения жидкости по ширине листов.

Схема течения жидкости по листу насадки изображена на рис. 2. Стрелками показано, что на верхний ряд зубчатых отверстий жидкость попана неравномерно в двух местах, а именно: слева имеется участок равномерного распределения пленки жидкости, обозначенный тремя стрелками, и локальный поток жидкости (струя), обозначенный одной стрелкой справа. Встречая на своем пути вертикальные края отверстий, жидкая пленка или струйка обтекает их по бокам, каждый раз при этом разделяясь на два потока. Жидкость, попадающая на выступающие вниз зубья отверстий, образует капли, которые после отрыва от зубьев и

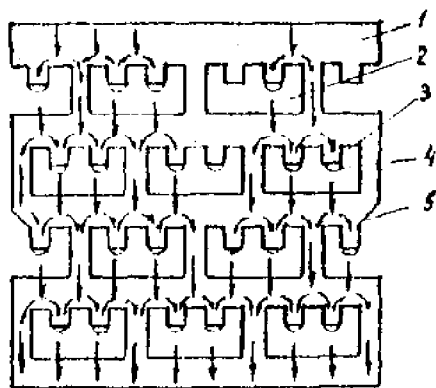


Рис. 2. Схема улучшения равномерности распределения жидкости, стекающей по листу насадки, перфорированной зубчатыми отверстиями.

ретекает на стенки аппарата. С целью предупреждения этого явления верхние края зубчатых отверстий у боковых срезов листа имеют направленные вверх косые срезы, отклоняющие жидкость к центру листов насадки.

Равномерное распределение жидкости по всему сечению насадки (т.е. в двух взаимоперпендикулярных направлениях) достигается установкой пакетов насадки друг на друга с поворотом на 90° вокруг вертикальной оси, т.е. установкой пакетов крест накрест. Такая насадка может одновременно использоваться и как контактное устройство, и как устройство для распределения и перераспределения жидкости по сечению и высоте колонны. Основным фактором, приводящим к повышению эффективности массообмена, выступает прерывистое капельно-пленочное течение жидкости.

Один из вариантов показанной на рис. 2 насадки был испытан [8; 9] в экспериментальной колонне сечением 200×200 мм с высотой экспериментального участка 0,8 м. В листах насадки из углеродистой стали толщиной 0,8 мм были штампованы зубчатые отверстия высотой 11 и шириной 21 мм. Верхние края отверстий имели по два выступающих на 5 мм вниз зуба шириной по 6 мм. Расстояние между отверстиями по горизонтали было 6, по вертикали — 5 мм.

пролета пространства отверстий падают на поверхность листов и растекаются в пленку. Пленка, вновь стекая на верхние края отверстий, обтекает их и опять делится на два одинаковых потока. Многократное деление пленки на зубьях каждого ряда отверстий приводит к улучшению равномерности распределения жидкости.

Из рис. 2 видно, что жидкость, вначале распределенная неравномерно, пройдя три ряда зубчатых отверстий, растекается по всей ширине листа. В процессе непрерывного перераспределения жидкость попадает на края насадки, а с них может пе-

В аналогичных условиях в опытной установке была испытана плоскопараллельная насадка (без перфораций) и насадка с зубчатыми отверстиями. Результаты испытаний показаны на рис. 3 и 4.

Из рис. 3 следует, что гидравлическое сопротивление обеих насадок отличается незначительно, но при увеличенных расходах рабочих продуктов на перфорированной насадке наблюдается усиленное межфазное взаимодействие, следствием которого является возрастание гидравлического сопротивления. Согласно рис. 4, а усиленное взаимодействие фаз при повышенной скорости парогазового потока сопровождается возрастанием массоотдачи в жидкой фазе. Интенсификация процесса массоотдачи в газовой фазе (рис. 4, б) объясняется дополнительной турбулизацией парогазового потока краями отверстий в листах насадки и утолщениями жидкости при образовании капель диаметром 2...3 мм.

Для наглядного представления о величине и границах применимости способа интенсификации массоотдачи в жидкой фазе с помощью создания капельно-пленочного режима течения жидкости на рис. 1 изображены линии 5-7, относящиеся к насадке, перфорированной зубчатыми отверстиями. При построении линий 1-4 было принято, что эффективность массоотдачи в жидкости внутри трубок равна эффективности, получаемой при течении пленки по вертикальным плоским листам.

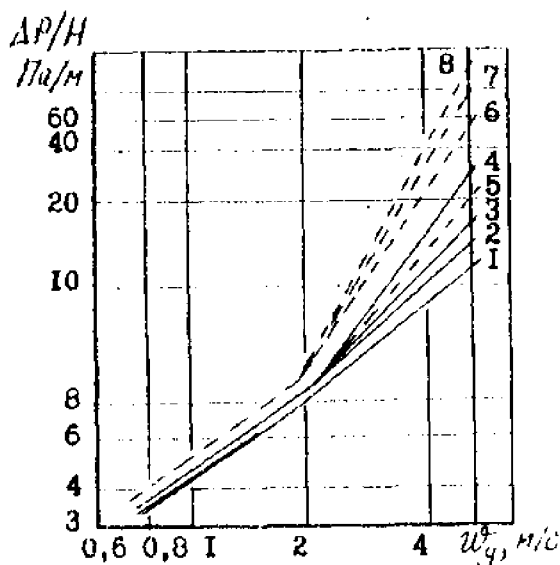


Рис. 3. Гидравлическое сопротивление плоскопараллельной (сплошные линии) и перфорированной (штриховые линии) насадок. Линии 1-9 соответствуют плотности орошения Γ , кг/(м·с): 1 - 0; 2 - 0,013; 3 - 0,0341; 4 - 0,104 (плоскопараллельная насадка); 5 - 0; 6 - 0,0056; 7 - 0,0341; 8 - 0,0597; 9 - 0,104 (перфорированная насадка)

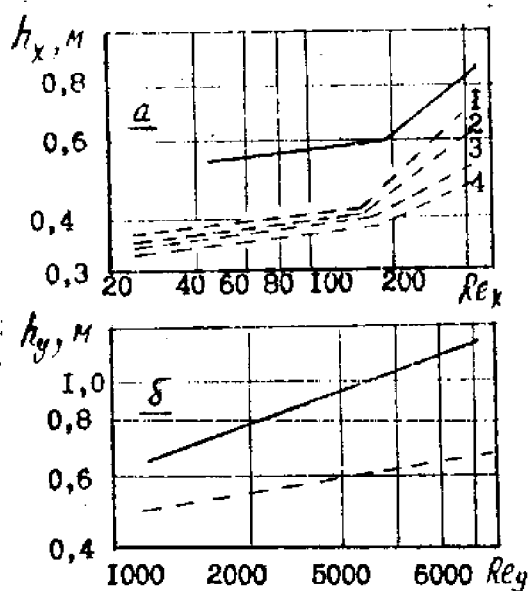


Рис. 4. Значения высот единицы переноса массы для плоско-параллельной (сплошные линии) и перфорированной зубчатыми отверстиями (штриховые линии) насадок: а - жидкая; б - газовая фаза.

Линии 1-4 соответствуют значениям скорости газовой фазы w_y , м/с: 2,3; 3,1; 3,8; 4,5

Линии 6 и 7 заканчиваются при значениях $Re_x = 420$, при которых дальнейшее увеличение расхода жидкости приводит к переходу капельного течения жидкости в струйное, сопровождаемому снижением относительной эффективности перфорированной насадки (при этом уменьшается степень перемешивания жидкости, связанная с каплеобразованием). Нижний предел применимости капельно-пленочного метода интенсификации массообмена ограничен значениями $Re_x = 20$ (левая вертикальная штрихпунктирная линия на рис. 1).

Интересно отметить, что если в формулы (2) и (3), учитывая изменение эффективности массоотдачи от длины пленки, подставить вместо значения длины $l = 1$ м значение $l = 0,016$ м, равное расстоянию между горизонтальными рядами зубчатых отверстий, то получим увеличение эффективности

массоотдачи в 1,64 раза в первом и в 1,9 раза во втором (см. рис. 1, соответственно линии 8 и 9) ламинарно-волновом режимах течения пленки. Близкое расположение линий 5 и 8 является результатом случайного совпадения, поскольку зависимость $Sh \sim (\theta/l)^p$ учитывает лишь определенный этап развития волнового течения и справедлива в диапазоне длин участков пленочного течения примерно 0,15...1,5 м.

Во время образования и роста капли внутри нее возникает циркуляционное движение жидкости, приводящее к обновлению поверхности контакта фаз и улучшению транспортирования вещества в капле. По аналогии с [10] на рис. 5 стрелками показано, что элемент жидкости, стекающий по зубу насадки в растущую каплю, проходит по вертикальному

стволю и выходит с противоположной стороны на нижнюю поверхность капли, описывает полуокружность вблизи ее поверхности, а затем опять возвращается внутрь капли. Обтекание капель парогазовым потоком в некоторой степени способствует усилению циркуляционных токов внутри них. В периоды отрыва капель и их кратковременного падения в пространстве между зубьями и нижними краями отверстий происходит осцилляция капель и деформирование их поверхностей, а в результате — дополнительное перемешивание жидкости.

После падения на нижние края отверстий капли резко тормозятся и под действием инерционных сил жидкость растекается по поверхности насадки, а затем растекающиеся пятна жидкости частично стягиваются в более компактные струйки под действием сил поверхностного натяжения. Периодическое образование и разрушение капель можно интерпретировать как нестационарный циклический процесс течения жидкости, при котором, как известно, возникают дополнительные составляющие скорости внутри потока, приводящие к усилению перемешивания.

Уменьшение толщины листов насадки (0,6...0,8 мм) приводит к тому, что капли, падающие на нижние края отверстий, не столько расплющиваются, сколько перерезаются листами на две части, что уменьшает положительный эффект перемешивания жидкости при падении капель. С целью улучшения условий расплющивания падающих капель предложены два варианта насадок, показанные на рис. 6. В варианте, показанном на рис. 6,а [11], нижние края горизонтальных отверстий выполнены утолщенными, в результате чего падающие на них капли жидкости хорошо деформируются и расплющиваются. Указанный вариант применим, когда насадка изготовляется из хорошо смачиваемых полимерных материалов.

Если же насадка изготовляется из листовых материалов, более целесообразен вариант, показанный на рис. 6,б [12], в котором нижние края отверстий снабжены горизонтальными площадками, полученными выгибанием соответствующих просеченных участков листов насадки. Чтобы

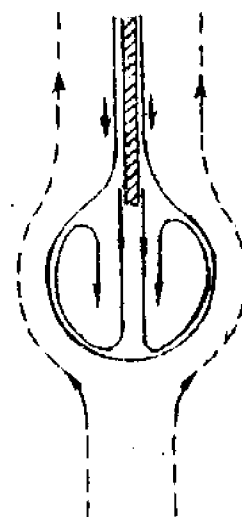


Рис. 5. Схема циркуляции жидкости в растущей капле

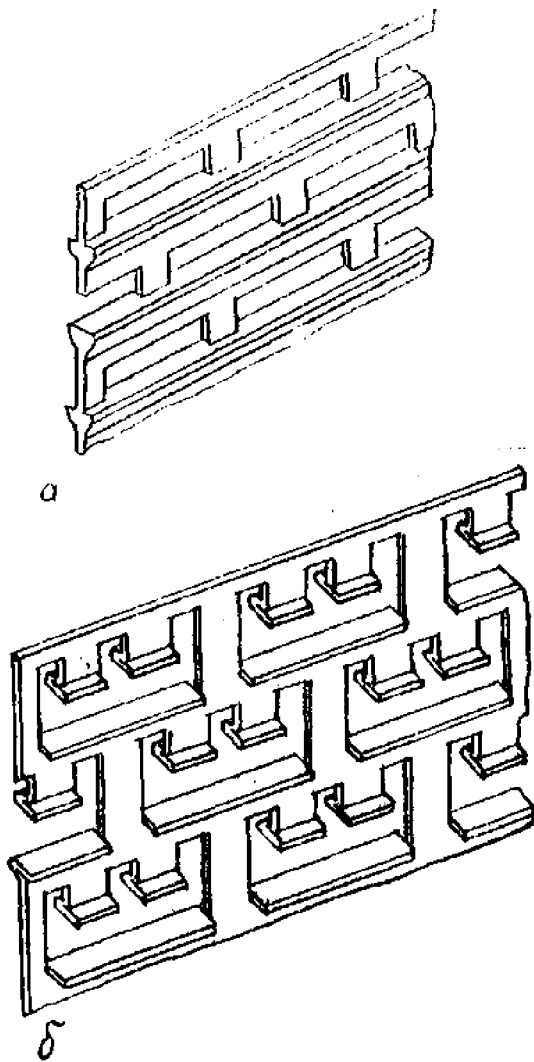


Рис. 6. Насадки с расширенными нижними краями отверстий, изготовленные из полимерного (а) и листового (б) материала

капли формировались более крупные, зубья отверстий также можно выполнять с горизонтальными площадками. Длина зубьев и ширина горизонтальных площадок нижних краев отверстий и зубьев должны быть соизмеримыми с диаметрами образующихся капель жидкости.

Применение вариантов насадок с расширенными нижними краями отверстий способствует повышению эффективности массообмена в жидкой и газовой фазах примерно на 10–15% по сравнению с насадкой с плоскими листами, показанной на рис. 2.

Вариант насадки [13], в которой зубчатые отверстия образуются путем просекания с трех сторон и последующего отгибания полученных просеченных элементов под прямым углом вокруг вертикальной оси, показан на рис. 7. Зубчатые отверстия и просеченные элементы расположены друг под другом вертикальными рядами. Высота зубчатых отверстий и расстояния между ними по высоте приняты одинаковыми, в результате чего создаются аналогичные условия контактирования фаз при течении отдельных капельно-пленочных потоков жидкости по рядам отверстий и по рядам просеченных элементов. При та-

ком решении предельная нагрузка на насадку по жидкости может быть увеличена примерно в 1,5 раза с сохранением капельно-пленочного режима течения.

При определении размеров элементов насадок, перфорированных зубчатыми отверстиями, в качестве исходного положения принимается то, что на капельно-пленочное течение жидкости определяющее влияние оказывают капиллярные явления, связанные с поверхностным натяжением, которое устанавливается на границах раздела фаз. Масштаб проявления капиллярных сил в условиях воздействия гравитационного поля, вызывающего ускорение g , оценивается капиллярной постоянной α , связанной с поверхностным натяжением σ :

$$\alpha = \sqrt{2\sigma / (\Delta\rho \cdot g)}, \quad (5)$$

где $\Delta\rho$ - разность плотностей жидкой и парогазовой фаз.

Величина α определяет размеры и форму менисков жидкости у границы твердого тела, в том числе размеры и форму образующихся капель. Изменяясь пропорционально $\sigma^{0.5}$, капиллярная постоянная уменьшается с ростом температуры. Например, для воды при нуле градусов $\alpha = 3,95$ мм и уменьшается до нуля в критической точке.

Капли, образующиеся на концах цилиндрических стержней (зубьях отверстий насадки), геометрически подобны, и циркуляция жидкости при их образовании одинакова, если отношение радиуса капли к капиллярной постоянной сохраняется, т.е. $r/\alpha = \text{idem}$. Это означает, что, во-первых, при исследовании капельно-пленочного течения жидкости можно ограничиваться одной модельной системой и, во-вторых, при определении размеров зубчатых отверстий в качестве основного геометрического параметра можно принять капиллярную постоянную, зависящую от физико-химических свойств обрабатываемых продуктов.

В [14] показано, что для создания условий образования равновесных капель жидкости без перетекания части жидкости на соседние зубья при слабом гидродинамическом взаимодействии фаз высота зубьев h_z (рис. 8) должна быть равной (или чуть больше) размеру α , т.е. $h_z \approx \alpha$.

Ширина зубьев b должна быть в пределах $\alpha \leq b \leq 2\alpha$, причем для жидкостей с большим поверхностным натяжением (например, воды)

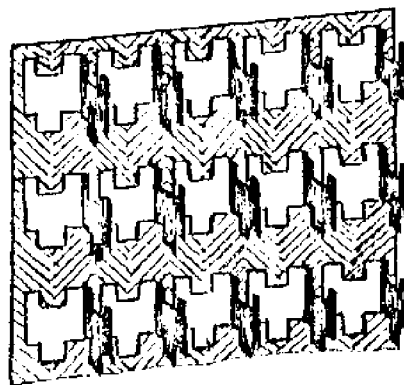


Рис. 7. Насадка с вертикальными просечными элементами



Рис. В. Основные размеры зубчатого отверстия

значение b принимается близким к α , а для жидкостей с малым поверхностным натяжением (например, этанола) значение b принимается ближе к 2α . В работе [14] рекомендуется

$$b \approx 1,73\alpha. \quad (6)$$

Расстояние между зубьями b_1 должно приниматься близким к значению α , т.е. высота зубьев и расстояния между ними должны быть примерно одинаковыми: $b_1 \approx h_1 \approx \alpha$.

Расстояние H от зуба до нижней кромки отверстия должно быть достаточным для того, чтобы капля вытягивалась перед ее отрывом от зуба и пребывала в полете (пусть даже самом кратковременном). Это условие

$$2\alpha \leq H \leq 2,5\alpha. \quad (7)$$

При работе насадок в условиях усиленного гидродинамического взаимодействия фаз указанные линейные размеры зубчатых элементов следует увеличивать на 10–15%.

Внедрение в промышленность насадок с капельно-пленочным течением жидкости позволяет интенсифицировать многие теплообменные процессы, сократив при этом затраты на их осуществление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марценюк А.С., Стабников В.Н. Пленочные тепло- и массообменные аппараты в пищевой промышленности. - М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1981. - 160 с.
2. Марценюк А.С. Регулярные перфорированные насадки и их использование в спиртовой промышленности // Изв. вузов СССР. Пищ. технология. - 1986. - № 6. - С. 73-77.
3. Глазильщиков С.В., Щелкунов В.А., Круглов С.А., Молоканов Ю.У. Насадки массообменных аппаратов для нефтепереработки и химии: Обзорная информация. - М.: ЦНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1983. - 48 с.
4. Марценюк А.С. Разработка и применение регулярных насадок в пленочных массообменных аппаратах (обзор). - М.: ЦНИИТЭНПИЩЕПРОМ, 1983. - 32 с.

5. Кулов Н.Н., Малюсов В.А. Массоотдача в трубке с орошаемой стенкой при перемещивании жидкой пленки // Теор. основы хим. технол. - 1967. - Т. 1. - № 2. - С. 213-223.

6. Кулов Н.Н., Максимов В.В., Малюсов В.А., Жаворонков Н.М. Массоотдача в стекающих пленках жидкости // Теор. основы хим. технол. - 1983. - Т. 17. - № 3. - С. 291-306.

7. А.с. 440147 СССР, В 01 Д 53/20. Регулярная пластинчатая насадка / А.С.Марценюк. - Оpubл. 25.08.74, Бюл. № 31.

8. Марценюк А.С., Стабников В.И. Рабочие характеристики насадки с зубчатыми отверстиями // Пятая всесоюз. конф. по теории и практике ректификации. - Северодонецк, - 1984. - Ч.2. - С. 117-119.

9. Марценюк А.С., Стабников В.И. Исследование массообмена в газовой фазе на регулярной насадке с зубчатыми отверстиями // Пищ. пром-сть. Республ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1979. - Вып. 25. - С. 17-20.

10. Железняк А.С. Массопередача в период образования капли // Журн. прикл. химии. - 1967. - № 4. - С. 870-874.

11. А.с. 416075 СССР, В 01 Д 53/20. Регулярная насадка для тепло-массообменных процессов / А.С. Марценюк. - Оpubл. 25.02.74, Бюл. № 7.

12. А.с. 1369775 СССР, В 01 Д 53/20. Регулярная насадка / А.С.Марценюк. - Оpubл. 30.01.88, Бюл. № 4.

13. А.с. 1318269 СССР, В 01 Д 53/20. Регулярная насадка для тепло-массообменных аппаратов / А.С.Марценюк, Р.Н.Гусейнов. - Оpubл. 23.06.87, Бюл. № 25.

14. Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н. Определение размеров зубьев в отверстиях листовых насадок / Пищ. пром-сть: Республ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1987. - Вып. 33. - С. 31-34.