



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-174-192>

Расчет конструктивных параметров регулярной насадки теплообменного аппарата на трубах-струнах

Е.А. Жидебаев , О.А. Шохаев , А.А. Волненко ,
Д.К. Жумадуллаев* 

Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан

*E mail: daulet_ospl@mail.ru, nii_mm@mail.ru, 742186vr@mail.ru,
Zhidebayev_Yeldos@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрены конструкции теплообменных аппаратов с регулярной насадкой на трубах-струнах. Насадка выполнена в виде пластинчатых и лопастных элементов, закреплённых на трубчатом каркасе. На основе анализа геометрии насадочных элементов и их расположения в рабочем объёме аппарата предложена расчётная схема элементарной ячейки. С учётом особенностей движения газового потока по каналам, образованным элементами насадки, получены уравнения для определения пористости насадки в поперечном сечении аппарата, объёмной пористости и эквивалентного диаметра. В расчётных зависимостях учтены геометрические параметры насадочных элементов. Также учтены радиальные и вертикальные шаги их размещения. Проведено сравнение расчётных данных для пластинчатой и лопастной насадок на трубах-струнах. Кроме того, выполнено сопоставление с аналогичной конструкцией насадки на проволоочных струнах. Установлено, что лопастная насадка обладает более высокой пористостью в сечении аппарата. Это способствует снижению гидравлического сопротивления. В то же время пластинчатая насадка характеризуется меньшим эквивалентным диаметром и более развитой поверхностью контакта фаз. Благодаря этому создаются благоприятные условия для интенсификации процессов тепло- и массообмена.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, регулярная насадка, трубы-струны, пластинчатая насадка, лопастная насадка, порозность, объемная порозность, эквивалентный диаметр, удельная поверхность.

Введение

В химической, нефтехимической, энергетической и металлургической промышленности широко применяются аппараты для проведения процессов тепло- и массообмена. Одними из наиболее распространённых аппаратов являются насадочные колонны, которые обеспечивают эффективный контакт газовой и жидкой фаз и отличаются высокой производительностью и относительной простотой конструкции [1]. Повышение эффективности тепломассообменных процессов является важной задачей современной химической технологии, поскольку позволяет снизить энергозатраты и повысить производительность технологических установок.

В настоящее время разработан широкий спектр аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры и различными вариантами размещения труб [1]. В частности, к ним относятся аппараты с гладкими прямыми трубами [2], а также конструкции с турбулизаторами теплоносителя, размещёнными внутри труб [3,4]. Значительное внимание уделено аппаратам с комбинированными регулярно-взвешенными насадками, включая трубчато-взвешенные [5] и трубчато-фонтанирующие системы [6]. Кроме того, предложены конструкции с отдельными коллекторами для подачи и отвода теплоносителя в четных и нечетных слоях регулярной кольцевой трубчатой насадки [7]. С целью повышения компактности разработаны аппараты с размещением коллекторов непосредственно в зоне контакта фаз [8], а также двухступенчатые аппараты ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой [9]. Отдельный интерес представляют конструкции, обеспечивающие чередование противоточного движения потоков теплоносителей в трубах по сечению рабочей зоны насадки [10]. Для проведения исследований гидродинамики и процессов тепломассообмена ранее был разработан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединённых труб одного диаметра, размещённых внутри корпуса аппарата [11].

Современные исследования показывают, что эффективность регулярных насадок в значительной степени определяется их геометрическими параметрами и условиями распределения потоков фаз в аппарате [12]. В связи с этим большое внимание уделяется разработке новых конструкций регулярных насадок. Также активно совершенствуются методы расчёта их гидродинамических и тепломассообменных характеристик.

Для исследования процессов, протекающих в насадочных аппаратах, применяются как экспериментальные методы, так и численное моделирование. В частности, широко используются методы вычислительной гидродинамики (CFD) [13–14].

Одним из перспективных направлений совершенствования тепломассообменных аппаратов является использование регулярных насадок, установленных на трубчатых каркасных элементах — трубах-струнах. Применение труб-струн позволяет повысить механическую прочность конструкции насадки. Одновременно с этим формируется развитая поверхность контакта фаз.

В качестве насадочных элементов могут использоваться различные конструктивные решения. Наиболее распространёнными являются пластинчатые и лопастные элементы. Их применение способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена.

При проектировании тепломассообменных аппаратов с регулярной насадкой важное значение имеет определение основных конструктивных параметров насадки. К ним

относятся пористость насадки в сечении аппарата, объёмная пористость и эквивалентный диаметр.

Эти параметры оказывают существенное влияние на гидродинамические характеристики аппарата, распределение фаз и эффективность тепломассообменных процессов [15]. Вместе с тем для регулярных насадок, устанавливаемых на трубах-струнах, вопросы определения указанных параметров пока изучены недостаточно.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка расчётных зависимостей для определения конструктивных параметров регулярной насадки тепломассообменного аппарата на трубах-струнах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования конструкций регулярных насадок и повышения эффективности процессов тепло- и массообмена.

В работе рассмотрены пластинчатые и лопастные элементы насадки. Для данных конструкций получены уравнения расчёта пористости в поперечном сечении аппарата, объёмной пористости и эквивалентного диаметра. При этом в расчётах учтены геометрические характеристики насадочных элементов и шаги их размещения.

Научная новизна работы заключается в разработке расчётных зависимостей для определения порозности насадки в сечении и объеме аппарата и эквивалентного диаметра новой конструкции регулярной насадки на трубах-струнах. Отличительной особенностью конструкции является использование турбулизирующих пластинчатых и лопастных элементов.

Методология

В настоящей работе анализ конструктивных параметров регулярной насадки тепломассообменного аппарата на трубах-струнах основан на геометрическом моделировании формы насадки и определении её ключевых характеристик. Основные параметры, подлежащие расчету – это порозность в сечении аппарата, объёмная порозность и эквивалентный диаметр насадки.

Регулярная насадка рассматривается как упорядоченная структура, состоящая из повторяющихся элементов, закрепленных на трубах-струнах и распределённых по объёму аппарата. В зависимости от конструктивного варианта, такими элементами являются либо пластинчатые, либо лопастные тела, обеспечивающие развитую поверхность контакта фаз.

Перед началом аналитических расчётов необходимо определить геометрические исходные параметры насадки: диаметр труб, размеры насадочных элементов и шаги их размещения по горизонтали и вертикали. Эти параметры задают форму и размеры расчётных ячеек, которые служат основой для последующих вычислений.

Порозность насадки в поперечном сечении определяется как отношение свободного пространства, через которое может проходить поток, к общей площади сечения аппарата. Для этого рассматривается элементарная ячейка сечения, размеры которой определяются шагом между соседними трубами-струнами. Свободная площадь ячейки получается как разность между общей площадью ячейки и площадью, занятой трубами и насадочными элементами.

Объёмная пористость характеризует долю свободного объёма насадки в рабочем объёме аппарата. Для её расчёта выделяется элементарная объёмная ячейка, размеры которой соответствуют шагам размещения элементов конструкции. При этом свободный объём определяется как разность между объёмом расчётной ячейки и суммарным объёмом насадочных элементов, расположенных внутри неё.

Эквивалентный диаметр рассматривается как обобщённая характеристика геометрии насадки. Его определяют на основе соотношения между свободным объёмом насадки и общей площадью поверхности её элементов.

Удельная поверхность насадки включает поверхность труб-струн и поверхности пластинчатых или лопастных элементов. Данный параметр имеет важное значение, поскольку оказывает влияние на распределение фаз и интенсивность процессов тепло- и массообмена.

Предложенный подход позволяет аналитически оценивать влияние геометрических параметров насадки на её конструктивные характеристики. Полученные зависимости могут применяться при проектировании и оптимизации теплообменных аппаратов с регулярными насадками на трубах-струнах.

Результаты и Обсуждение

Квадратные пластины на трубах-струнах

Конструктивные параметры пластинчатой насадки на трубах-струнах (порозность в сечении аппарата, объемная порозность и эквивалентный диаметр).

На рисунке 1 представлена ячейка пластинчатой насадки в сечении аппарата размером $t_p \times t_p$.

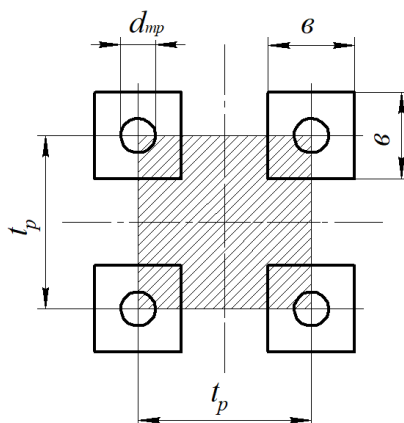


Рисунок 1. Фрагмент пластинчатой насадки на трубах-струнах в сечении аппарата

Порозность насадки в сечении аппарата определяется по зависимости:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{S_{эл}}{S_{яч}}, \quad (1)$$

где $S_{эл}$ – площадь элементов в миделевом сечении, входящих в ячейку, m^2 ; $S_{яч}$ – площадь ячейки, m^2 .

Площадь элементов в миделевом сечении определим по формуле:

$$S_{\text{эл}} = b^2 - 0,785 \cdot d_{\text{тр}}^2 \quad (2)$$

Площадь ячейки определим по формуле:

$$S_{\text{яч}} = t_p^2 \quad (3)$$

После подстановки формул (2) и (3) в выражение (1) получим:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{b^2 - 0,785 \cdot d_{\text{тр}}^2}{t_p^2} \quad (4)$$

На рисунке 2 представлена ячейка пластинчатой насадки в объеме аппарата размером $t_p \times t_p \times t_b$.

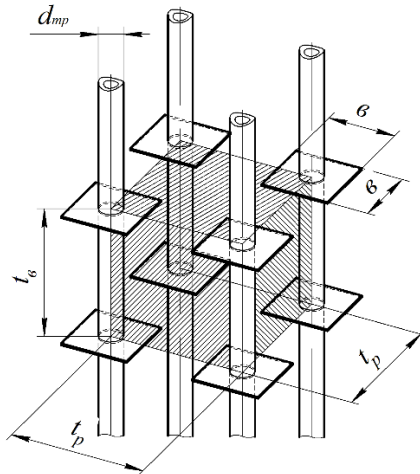


Рисунок 2. Ячейка пластинчатой насадки на трубах-струнах в объеме аппарата

Объемная порозность пластинчатой насадки на трубах-струнах определяется по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{яч}}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{эл}}$ – объем элементов насадки, входящих в ячейку, м^3 ; $V_{\text{яч}}$ – объем ячейки, м^3 .

Объем элементов насадки определяется по формуле:

$$V_{\text{эл}} = 2 \cdot \delta \cdot (b^2 - 0,785 \cdot d_{\text{тр}}^2) \quad (6)$$

Объем ячейки определим по формуле:

$$V_{\text{яч}} = t_p^2 \cdot t_b \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в уравнение (5), получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\delta \cdot (b^2 - 0,785 \cdot d_{\text{тр}}^2)}{t_p^2 \cdot t_b} \quad (8)$$

Эквивалентный диаметр пластинчатой насадки на трубах-струнах рассчитывается по формуле [16]:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_n} \quad (9)$$

Удельную поверхность пластинчатой насадки определим по формуле:

$$a_n = \frac{S_{\text{эл}}^n}{V_{\text{яч}}} \quad (10)$$

Удельная площадь составляющих элементов пластинчатой насадки на трубах-струнах определим по формуле:

$$S_{\text{эл}}^n = S_{\text{пл}}^n + S_{\text{тр}}^n \quad (11)$$

Удельная поверхность пластин:

$$S_{\text{пл}}^n = 2 \cdot [(b^2 - 0,785 \cdot d_{\text{тр}}^2) + 2 \cdot b \cdot \delta] \quad (12)$$

Удельная поверхность труб:

$$S_{\text{тр}}^n = \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_b \quad (13)$$

Подставляя (12) и (13) в формулу (11), получим:

$$S_{\text{эл}}^n = 2 \cdot [(b^2 - 0,785 \cdot d_{\text{тр}}^2) + 2 \cdot b \cdot \delta] + \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_b \quad (14)$$

Объем ячейки определим по формуле (7). Подставляя (14) и (7) в уравнение (10), получим:

$$\alpha_H = \frac{2 \cdot [(b^2 - 0,785 \cdot d_{тр}^2) + 2 \cdot b \cdot \delta] + \pi \cdot d_{тр} \cdot t_B}{t_p^2 \cdot t_B} \quad (15)$$

Тогда с учетом (8) и (15) уравнение (9) примет вид:

$$d_{эКВ} = \frac{4 \cdot [t_p^2 \cdot t_B - \delta \cdot (b^2 - 0,785 \cdot d_{тр}^2)]}{2 \cdot [(b^2 - 0,785 \cdot d_{тр}^2) + 2 \cdot b \cdot \delta] + \pi \cdot d_{тр} \cdot t_B} \quad (16)$$

Лопастная насадка на трубах-струнах

Пористость лопастной насадки в поперечном сечении аппарата зависит от геометрии её конструкции.

На рисунке 3 представлена элементарная ячейка лопастной насадки в сечении аппарата с размерами $t_p \times t_p$.

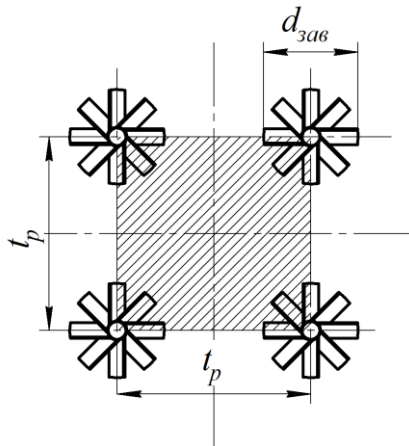


Рисунок 3. Ячейка лопастной насадки в сечении аппарата

Для насадки с наклонными лопастями пористость в поперечном сечении определяется следующим выражением:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{S_{эл}}{S_{яч}}, \quad (17)$$

где $S_{эл}$ – суммарная площадь конструктивных элементов насадки, m^2 ; $S_{яч}$ – площадь элементарной ячейки насадки, m^2 .

Так как основную часть конструкции составляют лопасти, площадь элементов насадки принимается равной площади лопастей:

$$S_{эл} = S_{лоп}. \quad (18)$$

Площадь лопастей определяется по формуле:

$$S_{\text{лоп}} = 8 \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot l, \quad (19)$$

где b – ширина лопасти, м; l – длина лопасти, м; α – угол наклона лопасти.

Площадь ячейки насадки рассчитывается как:

$$S_{\text{яч}} = t_p^2, \quad (20)$$

где t_p – радиальный шаг между осями труб с насадочными элементами. В данной конструкции:

$$t_p = 2 \cdot d_{\text{зав}},$$

где $d_{\text{зав}}$ – диаметр завихрителя, м.

После подстановки выражений (19) и (20) в формулу (17) получим:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{8 \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot l}{t_p^2} \quad (21)$$

На рисунке 4 показана элементарная ячейка насадки уже в объёме аппарата. Размеры ячейки составляют $t_p \times t_p \times t_v$, где вертикальный шаг между элементами принимается равным ($t_v = 3,5 \cdot d_{\text{зав}}$, $d_{\text{зав}}$ – диаметр завихрителя, м).

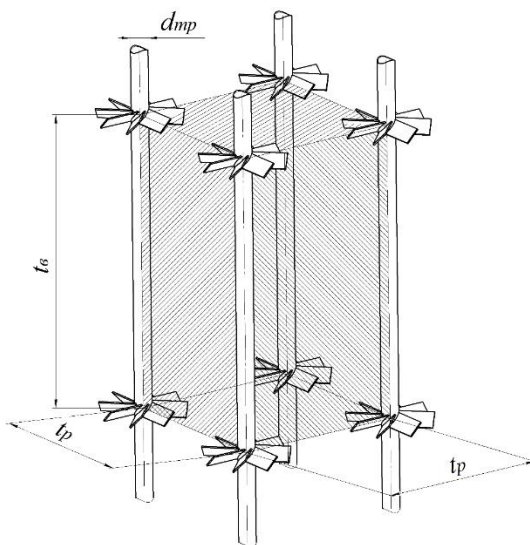


Рисунок 4. Ячейка лопастной насадки в объеме аппарата

Объёмная пористость регулярной лопастной насадки определяется выражением:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{яч}}} \quad (22)$$

Общий объём элементов насадки складывается из объёма трубы и объёма лопастей:

$$V_{\text{эл}} = V_{\text{тр}} + V_{\text{лоп}}. \quad (23)$$

Объём трубы определяется следующим образом:

$$V_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}{4} \cdot t_{\text{в}} \quad (24)$$

Объём лопастей рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{лоп}} = 8 \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot l \cdot \delta_{\text{лоп}} \quad (25)$$

Объём элементарной ячейки насадки:

$$V_{\text{яч}} = t_{\text{р}}^2 \cdot t_{\text{в}}, \quad (26)$$

где $t_{\text{в}}$ – вертикальный шаг между насадочными элементами.

Подставляя формулы (24) и (25) в уравнение (23), а затем с учетом (26) в уравнение (22), получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{0,785 \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot t_{\text{в}} + 8 \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot l \cdot \delta_{\text{лоп}}}{t_{\text{тр}}^2 \cdot t_{\text{в}}} \quad (27)$$

Эквивалентный диаметр регулярной лопастной насадки определяется по формуле [16]:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_{\text{н}}} \quad (28)$$

Удельная поверхность насадки рассчитывается как отношение площади поверхности элементов к объёму ячейки:

$$a_{\text{н}} = \frac{S_{\text{эл}}^{\text{н}}}{V_{\text{яч}}} \quad (29)$$

Полная поверхность элементов насадки включает поверхность трубы и поверхность лопастей:

$$S_{\text{эл}}^{\text{н}} = S_{\text{тр}}^{\text{н}} + S_{\text{лоп}}^{\text{н}} \quad (30)$$

Площадь поверхности трубы определяется выражением:

$$S_{\text{тр}}^{\text{н}} = \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_{\text{в}} \quad (31)$$

Площадь поверхности лопастей:

$$S_{\text{лоп}}^{\text{н}} = 16 \cdot b \cdot l \quad (32)$$

Удельная поверхность насадки с учетом (31) и (32):

$$a_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_{\text{в}} + 16 \cdot b \cdot l}{t_{\text{р}}^2 \cdot t_{\text{в}}} \quad (33)$$

После подстановки выражений (27) и (33) в формулу (28) получим выражение для эквивалентного диаметра насадки:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot [t_{\text{р}}^2 \cdot t_{\text{в}} - (0,785 \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot t_{\text{в}} + 8 \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot l \cdot \delta_{\text{лоп}})]}{3,14 \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_{\text{в}} + 16 \cdot b \cdot l} \quad (34)$$

В таблице 1 приведены расчетные данные конструктивных параметров для регулярной пластинчатой насадки на проволочных струнах и регулярной пластинчатой насадки на трубах-струнах.

Таблица 1. Сравнительные характеристики насадок

Расчетные параметры	С регулярной пластинчатой насадкой на проволочных струнах [17]	С регулярной насадкой на трубах-струнах	
		квадратные пластины	лопастные элементы
Порозность в сечении аппарата ε_0 , м ² /м ²	0,75	0,758	0,882
Объемная порозность ε , м ³ /м ³	0,997	0,997	0,994
Эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}$, м	0,608	0,388	0,66

Полученные расчетные данные показывают, что конструкция насадки оказывает существенное влияние на её гидродинамические характеристики. В частности, лопастная насадка на трубах-струнах характеризуется более высокой порозностью в сечении

аппарата по сравнению с пластинчатой, что свидетельствует о меньшем гидравлическом сопротивлении и более свободном прохождении газового потока.

В то же время уменьшение эквивалентного диаметра для пластинчатой насадки указывает на более развитую поверхность контакта фаз, что потенциально способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена. Полученные результаты хорошо согласуются с известными представлениями о влиянии геометрии регулярных насадок на структуру потока и эффективность аппаратов.

Для объективного сравнительного анализа проведем сопоставление расчетных и экспериментальных данных конструктивных и гидродинамических показателей созданных нами аппаратов с регулярной насадкой на трубах-струнах с данными, полученными для нерегулярных и регулярных насадочных элементов и представленными в работах [16,18-20].

В качестве нерегулярной насадки выберем наиболее распространенные в промышленности типы кольцевых насадок: керамические кольца Рашига размером $25 \times 25 \times 3$ мм, имеющие удельную поверхность $a=200 \text{ м}^2/\text{м}^3$; объемную порозность $\varepsilon=0,74 \text{ м}^3/\text{м}^3$; эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}=0,0148 \text{ м}$, а также металлические кольца Палля размером $25 \times 25 \times 0,6$ мм (внутренние лепестки этой насадки существенно увеличивают свободный объем и снижают сопротивление по сравнению со стандартными кольцами Рашига), имеющие удельную поверхность $a=235 \text{ м}^2/\text{м}^3$; объемную порозность $\varepsilon=0,9 \text{ м}^3/\text{м}^3$; эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}=0,0153 \text{ м}$ [16,18,19].

В качестве регулярной насадки выберем металлическую гофрированную регулярную насадку типа Mellapak 250.Y, имеющую удельную поверхность $a=250 \text{ м}^2/\text{м}^3$; объемную порозность $\varepsilon=0,96 \text{ м}^3/\text{м}^3$; эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}=0,01536 \text{ м}$, а также сетчатую рулонную регулярную насадку (часто изготавливается по типу насадки Гудлоу (Goodloe), имеющую удельную поверхность $a=500 \text{ м}^2/\text{м}^3$; объемную порозность $\varepsilon=0,93 \text{ м}^3/\text{м}^3$; эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}=0,00744 \text{ м}$ [20].

Анализ конструктивных параметров выбранных насадок во многом определяет гидродинамические показатели и интенсивность тепломассообмена. Порозность в сечении определяет истинную скорость газа и локальную гидродинамику. В регулярных насадках она постоянна по высоте, а в нерегулярных (насыпных) — колеблется. Особое значение имеет в пристенной зоне, где порозность в сечении всегда выше, что приводит к «пристенному эффекту» (проскоку газа и байпасированию жидкости) [16,18,19].

Анализ рекомендуемых рабочих скоростей зависит от объемной порозности насадки [16,18-20]. Для колец Рашига из-за малого свободного объема $\varepsilon=0,74$ захлебывание наступает очень рано, и рабочая скорость газа составляет 0,4-0,6 м/с. Для колец Палля объемная порозность $\varepsilon=0,9$ позволяет пропускать больше газа и рабочие скорости составляют 0,6-0,9 м/с. Для сетчатой рулонной (регулярной) насадки при объемной порозности $\varepsilon=0,93$ рабочая скорость газа составляет 0,8-1,2 м/с, а для насадки Mellapak 250.Y при объемной порозности $\varepsilon=0,96$ рабочая скорость – 1,2-1,8 м/с.

Действие разработанных нами аппаратов с регулярной насадкой на трубах-струнах основано на вихревом механизме взаимодействия потоков газа и жидкости. При определенном расположении обтекаемых элементов в вертикальном направлении возможно достижение синфазных режимов взаимодействия вихрей [21], а расположение обтекаемых элементов в радиальном направлении определяет механизм формирования вихрей в зазоре между рядом расположенными элементами [22]. Размеры шагов размещения обтекаемых элементов в вертикальном и радиальном направлении являются значительными, что и определяет высокую объемную порозность насадки из квадратных пластин на трубах-струнах $\varepsilon=0,997$ и насадки с лопастными элементами на трубах-струнах $\varepsilon=0,988$ (таблица 1). При этом для реализации вихревого механизма взаимодействия потоков рабочие скорости составляют 3,5-4,5 м/с. При таких рабочих скоростях диаметр колонных аппаратов является наименьшим из колонн с сравниваемыми насадками.

Эквивалентный диаметр каналов насадки рассчитывается через отношение свободного объема к удельной поверхности насадки. Сопоставление численных значений эквивалентного диаметра сравниваемых насадок показывает, что для реализации вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости требуются более высокие значения эквивалентного диаметра. Так, для насадки из квадратных пластин на трубах-струнах $d_{\text{экв}}=0,388$ м, а для насадки с лопастными элементами на трубах-струнах $d_{\text{экв}}=0,66$ м.

Для дальнейшего анализа влияния конструктивных параметров проведем сравнение по основному энергетическому параметру – гидравлическому сопротивлению колонных аппаратов.

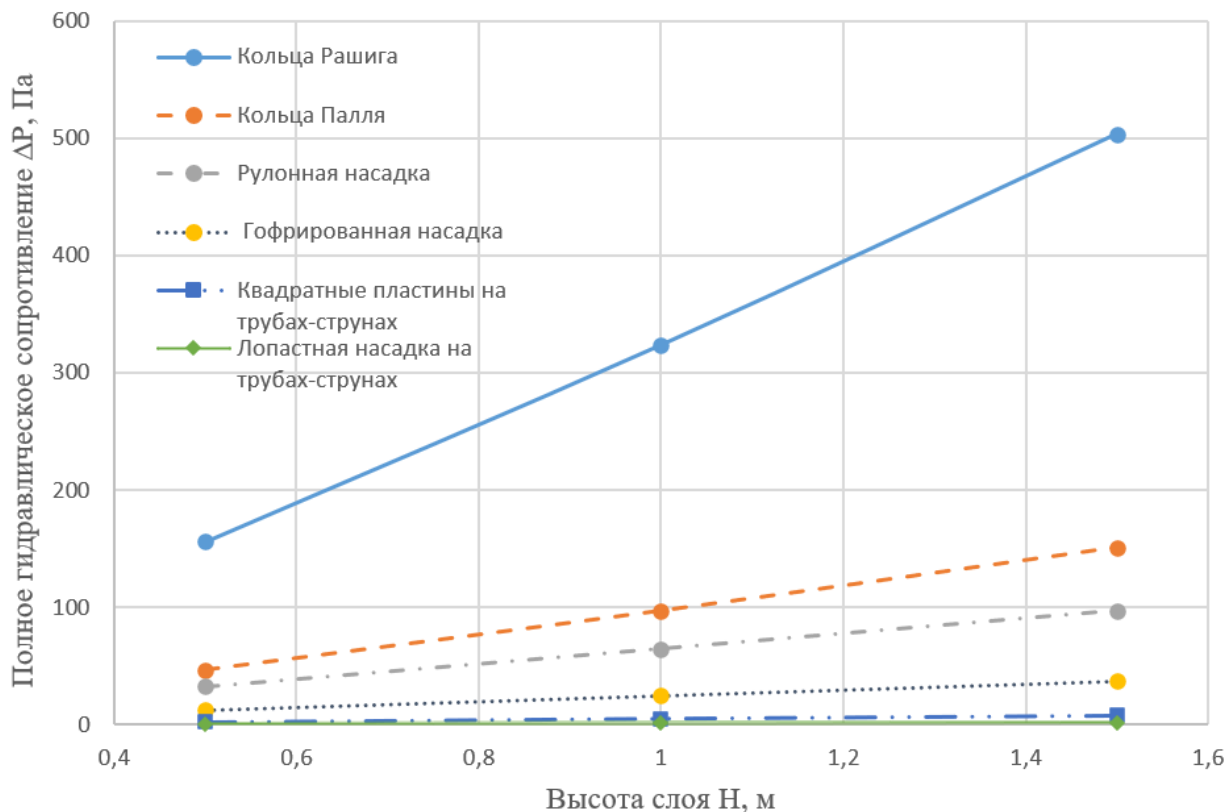
Сравнение гидравлического сопротивления ΔP осуществим для трех размеров высоты насадочной зоны $H_{\text{нас}}$ – 0,5 м; 1 м и 1,5 м. В таблице 2 и на рисунке 5 представлены результаты расчетов и экспериментальные данные сравниваемых насадок.

Таблица 2. Гидравлическое сопротивление в зависимости от высоты насадки

Высота слоя насадки H , м	Гидравлическое сопротивление ΔP , м					
	Кольца Рашига	Кольца Палля	Регулярная гофрированная насадка	Регулярная рулонная насадка	Квадратные пластины на трубах- струнах	Лопастная насадка на трубах- струнах
0,5	156	46,8	12,5	32,5	2,18	0,7
1,0	324	97,2	25,0	65,0	5,36	1,4
1,5	504	151,2	37,5	97,5	8,04	2,1

Как видно из рисунка, наибольшим гидравлическим сопротивлением обладают аппараты с нерегулярной насадкой (кольца Рашига и Палля). При увеличении высоты слоя наблюдаются два негативных эффекта [16,18,19]: первый – эффект уплотнения (деформация), когда нижние слои насадки испытывают значительное статическое давление от веса верхних слоев и задерживающейся в них жидкости. Элементы насадки

внизу колонны могут деформироваться или укладываться плотнее, из-за чего порозность в нижней части падает, а удельное сопротивление растёт и, второй – пристеночный эффект. По мере стекания вниз жидкость уходит от центра к стенкам колонны. В зонах у стенок образуются локальные «пробки» из жидкости, локально уменьшающие живое сечение для газа. Газ начинает идти через центр с большей скоростью, что вызывает нелинейный скачок сопротивления всей системы. В аппарате с кольцами Рашига стенки колец являются сплошными, и газ постоянно меняет направление под углами до 90° и более, ударяясь об элементы насадки, и тратит кинетическую энергию на преодоление местных сопротивлений.



Условия опытов: среда вода-воздух; скорость газа $w_r=0,5$ м/с

Рисунок 5. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP от высоты насадочной зоны $H_{нас}$

В аппарате с кольцами Палля благодаря вырезам в стенках насадка обладает лучшей аэродинамикой, что снижает сопротивление слоя насадки в сравнении с кольцами Рашига.

В регулярной насадке типа Mellapak 250.Y гофрированные блоки жестко фиксируют геометрию каналов, исключая уплотнение или смещение элементов под весом вышележащих слоев. Жидкость распределяется капиллярными силами и течет в виде строго однородной пленки по гофрам. Благодаря отсутствию хаотичных завихрений и эффекта уплотнения, удельное сопротивление регулярной насадки постоянно по всей высоте слоя, в 3,6 раза ниже колец Палля и в 12 раз ниже колец Рашига [16,18-20].

В регулярной рулонной насадке каналы для прохождения потоков узкие, поэтому базовое удельное сопротивление в них выше, чем у листовой регулярной насадки. При этом оно все равно остается значительно ниже, чем у нерегулярных насадок (колец Рашига и Палля), благодаря упорядоченности и отсутствию тупиковых зон завихрения [20].

Наименьшим гидравлическим сопротивлением при заданных условиях обладают аппараты с регулярной насадкой на трубах-струнах. Это происходит из-за значительного расстояния между гирляндами с насадочными элементами и между их слоями в вертикальном направлении.

Заключение

В данной работе рассмотрены конструкции теплообменного аппарата с регулярной насадкой на трубах-струнах. Насадка выполнена в виде пластинчатых и лопастных элементов, закреплённых на трубчатом каркасе. На основе анализа геометрии насадочных элементов и особенностей их размещения предложена расчётная схема элементарной ячейки. Она позволяет учитывать основные конструктивные параметры насадки.

При рассмотрении движения газового потока через каналы, образованные элементами регулярной насадки, были получены зависимости для расчёта порозности в поперечном сечении аппарата, объёмной порозности и эквивалентного диаметра насадки. Полученные выражения учитывают размеры элементов насадки. Также в расчётах учтены радиальные и вертикальные шаги их размещения.

Проведён сравнительный анализ расчётных параметров пластинчатой и лопастной насадок на трубах-струнах. Дополнительно выполнено сопоставление с аналогичной насадкой на проволочных струнах. Установлено, что лопастная насадка имеет более высокую порозность. Это способствует снижению гидравлического сопротивления аппарата. В то же время пластинчатая насадка характеризуется меньшим эквивалентным диаметром. Это указывает на более развитую поверхность контакта фаз и возможность интенсификации процессов тепло- и массообмена.

Проведено сопоставление разработанных насадок и четырех известных типов насадки, используемых в колонных теплообменных аппаратах по конструктивным показателям: порозности в сечении и объеме аппарата, эквивалентному диаметру, а также гидравлическому сопротивлению. Сопоставление выполнено с нерегулярными насадками (кольцами Рашига и Палля) и регулярными насадками – металлической гофрированной и сетчатой рулонной. Анализ показал перспективность применения регулярной насадки на трубах-струнах.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых теплообменных аппаратов. Кроме того, они могут применяться при модернизации существующих конструкций.

Благодарность, конфликт интересов

Работа выполняется при поддержке грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (проект No AP26199841).

Вклад авторов.

Е.А. Жидебаев: концепция, расчетная методика, написание текста.

О.А. Шохаев: расчетная методика, написание текста.

А.А. Волненко: теоретический анализ, пересмотр текста.

Д.К. Жумадуллаев: анализ конструктивных решений, обсуждение результатов.

Список литературы

1. Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Корганбаев Б.Н., Сарсенбекулы Д., Ешжанов А.А., Абжапбаров А.А. Тепломассообменные и пылеулавливающие аппараты с регулярной структурой трубчатой насадки. – Шымкент: Южно-Казахстанский университет им. М.О.Ауэзова, 2023. – 164 с.
2. Инновационный патент №27719 Республика Казахстан, МПК В01Д 53/20, В01Д 47/14. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / А.А. Волненко, О.С. Балабеков, Б.Н. Корганбаев, Ж.Е. Хусанов, Н.С. Бекибаев; опубл. 18.12.13, Бюл. №12. – 4 с.
3. Инновационный патент №30217 Республика Казахстан. МПК В01Д 53/20, В01Д 47/14. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О. С., Сарсенбекулы Д., Жумадуллаев Д.К., Корганбаев Б.Н.; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова. - № 2014/1176.1; заявл. 09.09.14; опубл. 17.08.15, Бюл. №8. – 4 с.
4. Инновационный патент №28151 Республика Казахстан, МПК F28F 1/42. Теплообменная труба / Волненко А.А., Голубев В.Г., Балабеков О.С., Бажиров Т.С., Хусанов Ж.Е., Жумадуллаев Д.К.; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова.- №2012/0374.1; заявл. 28.11.12; опубл. 17.02.2014, Бюл.№2.- 4 с.
5. Патент на полезную модель №2092 по заявке №2016/0474.2 от 25.08.2016г. МПК В01Д 53/20, 47/14. Приоритет от 9.02.2016. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Бишимбаев В.К., Волненко А.А., Ескендилов М.З., Протопопов А.В., Жантасов К.Т., Анарбаев А.А. Опубл. 30.03.17, бюл. №6.
6. Патент на полезную модель №3656 Республика Казахстан по заявке №2018/0037.2 от 16.01.2018г. МПК В01Д 53/20 (2006/01); В01Д 47/14 (2006/1) Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания /Волненко А.А., Ешжанов А.А., Абжапбаров А.А., Ескендилов М.З., Жумадуллаев Д.К. Опубл. 15.02.19, бюл. №7. – 4с.
7. Патент на полезную модель РК №5919 по заявке №2020/1083.2 от 03.12.2020г. МПК В01Д 53/20 (2006/01); В01Д 47/14 (2006/1). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Корганбаев Б.Н., Исаева А.Н., Джакипбекова Н.О., Жумадуллаев Д.К., Абжапбаров А.А., Камалбек Д.К. Опубл.12.03.2021, бюл. №10.
8. Патент РК № 34418 на изобретение по заявке №2017/0048.1 от 20.01.2017г. МПК В01J 2/04 (2006/1); В01J 19/32 (2006/1). Приоритет установлен 22.06.2018г. №22011 Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О.С., Корганбаев Б.Н., Ескендилов М.З., Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А., Байгутов Н.Т., Абжапбаров А.А. Бюл. №25 от 26.06.2020 г.
9. Патент РК №35809 по заявке №2021/0372.1 от 18.06.2021г. МПК В01Д 53/18(2006.01), 53/00 (2006.01), 47/02(2006.01). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и

- пылеулавливания / Волненко А.А., Абжапбаров А.А., Корганбаев Б.Н., Хусанов Ж.Е., Жумадуллаев Д.К., Камалбек Д.К., Бажибаев Т.Р. Оpubл. 26.08.22, бюл. №34.
10. Патент РК №36995 по заявке №2023/0587.1 от 07.09.2023г. МПК В01D 53/20 (2006.01), 47/14(2006.01). Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Шамбилова А.С., Исмаилов Б.Р., Абжапбаров А.А., Корганбаев Б.Н., Нурымбетов Р.А. Оpubл. 18.10.24, бюл. №42.
11. Патент РК №36157 по заявке №2022/0046.1 от 27.01.2022г. МПК В01D 47/14(2006.01), 53/00 (2006.01). Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Абжапбаров А.А., Камалбек Д.К., Корганбаев Б.Н., Жумадуллаев Д.К., Бажибаев Т.Р. Оpubл. 31.03.23, бюл. №13.
12. Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Slesareva E.Yu. et al. Large-scale maldistributions of local flow parameters at distillation on structured packing // Bulgarian Chemical Communications. – 2020. – Vol. 52. – P. 42–46. <https://doi.org/10.34049/bcc.52.F.0007>
13. Macfarlan L.H., Phan M.T., Eldridge R.B. Structured packing geometry study for liquid-phase mass transfer and hydrodynamic performance using CFD // Chemical Engineering Science. – 2022. – Vol. 249. – Article 117353. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117353>
14. Amini Y., Nasr Esfahany M. CFD simulation of structured packings: A review // Separation Science and Technology. – 2019. – Vol. 54(15). – P. 2536–2554. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1549078>
15. Zhang Y., Du C., Zhang Z., Du J., Tu Y., Ren Z. Process Intensification of Gas–Liquid Separations Using Packed Beds: A Review // Separations. – 2024. – Vol. 11. – Article 284. <https://doi.org/10.3390/separations11100284>
16. Рамм В.М. Абсорбция газов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656с.
17. Волненко А.А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов: дис. ... докт. техн. наук. - Шымкент, 1999. - 300с.

E.A. Zhidebayev, O.A. Shokhaev, A.A. Volnenko, D.K. Zhumadullayev

M.Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

Calculation of the Design Parameters of Regular Packing in a Heat and Mass Transfer Apparatus with Pipe-Strings

Abstract. This paper considers the design of a heat and mass transfer apparatus equipped with a regular packing based on pipe-strings. The geometric parameters of the packing elements and their arrangement within the working zone of the apparatus are analyzed. Based on the known principles of gas flow through tortuous channels formed between packing elements, calculation relationships are obtained for determining porosity, volumetric porosity, and equivalent diameter of the apparatus cross-section. The derived equations take into account the geometric characteristics of the packing elements as well as their spacing in vertical and transverse directions. A comparative analysis of calculated parameters is performed for plate-type and blade-type packings mounted on pipe-strings. The results show that blade-type packing is characterized by higher porosity, which contributes to lower hydraulic resistance, whereas plate-type packing provides a higher specific surface area, enhancing the efficiency of heat and mass transfer processes.

Keywords: heat and mass transfer apparatus, regular packing, pipe-strings, plate packing, blade packing, porosity, volumetric porosity, equivalent diameter, specific surface area.

References

1. Volnenko A.A., Zhumadullaev D.K., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D., Eshzhanov A.A., Abzhapbarov A.A. Teplomassoobmennyye i pyleulavlivayushchiye apparaty s regulyarnoy strukturoy trubchatoy nasadki [Heat and mass transfer and dust collection devices with a regular structure of tubular packing]. - Shymkent: South Kazakhstan University named after M.O. Auezov, 2023. - 164 p. [in Russian]
2. Innovative patent No. 27719 Republic of Kazakhstan, IPC B01D 53/20, B01D 47/14. Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with packing for heat and mass transfer and dust collection] / A.A. Volnenko, O.S. Balabaykov, B.N. Korganbaev, Zh.E. Khusanov, N.S. Bekibaev; publ. 18.12.13, Bull. №12. – 4 p. [in Russian]
3. Innovation patent №30217 Republic of Kazakhstan. IPC B01D 53/20, B01D 47/14. Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with packing for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Balabekov O.S., Sarsenbekuly D., Zhumadullaev D.K., Korganbaev B.N.; applicant and patent holder M.Auezov SKSU. - № 2014/1176.1; declared 09.09.14; published 17.08.15, Bulletin №8. – 4 p. [in Russian]
4. Innovative patent No. 28151 Republic of Kazakhstan, IPC F28F 1/42. Teploobmennaya truba [Heat exchange tube] / Volnenko A.A., Golubev V.G., Balabaykov O.S., Bazhirov T.S., Khusanov Zh.E., Zhumadullaev D.K.; applicant and patent holder M.Auezov SKSU. - No. 2012/0374.1; declared. 28.11.12; published. 17.02.2014, Bulletin No. 2. - 4 p. [in Russian]
5. Utility Model Patent No. 2092 for Application No. 2016/0474.2 dated 25.08.2016. IPC B01D 53/20, 47/14. Priority dated 9.02.2016. Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Bishimbayev V.K., Volnenko A.A., Yeskendirov M.Z., Protopopov A.V., Zhantasov K.T., Anarbayev A.A. Published 30.03.17, Bulletin No. 6. [in Russian]
6. Patent for Utility Model No. 3656 of the Republic of Kazakhstan for Application No. 2018/0037.2 dated 16.01.2018. IPC B01D 53/20 (2006/01); B01D 47/14 (2006/1) Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Yeszhanov A.A., Abzhapbarov A.A., Yeskendirov M.Z., Zhumadullaev D.K. Published 15.02.19, Bulletin No. 7. – 4 p. [in Russian]
7. Patent for utility model RK No. 5919 for application No. 2020/1083.2 dated 03.12.2020. IPC B01D 53/20 (2006/01); B01D 47/14 (2006/1). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Korganbaev B.N., Isaeva A.N., Dzhakipbekova N.O., Zhumadullaev D.K., Abzhapbarov A.A., Kamalbek D.K. Published 12.03.2021, Bulletin No. 10. [in Russian]
8. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 34418 for invention based on application No. 2017/0048.1 dated 20.01.2017. IPC B01J 2/04 (2006/1); B01J 19/32 (2006/1). Priority established on 22.06.2018. No. 22011 Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Balabaykov O.S., Korganbaev B.N., Yeskendirov M.Z., Zhumadullaev D.K., Eshanov A.A., Baigutov N.T., Abzhapbarov A.A. Bull. №25 dated 26.06.2020. [in Russian]
9. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 35809 for application No. 2021/0372.1 dated 18.06.2021. IPC B01D 53/18 (2006.01), 53/00 (2006.01), 47/02 (2006.01). Apparat s

- nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Korganbaev B.N., Khusanov Zh.E., Zhumadullaev D.K., Kamalbek D.K., Bazhibaev T.R. Published 26.08.22, Bulletin No. 34. [in Russian]
10. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 36995 for application No. 2023/0587.1 dated 09/07/2023. IPC B01D 53/20 (2006.01), 47/14 (2006.01). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Shambilova A.S., Ismailov B.R., Abzhapbarov A.A., Korganbaev B.N., Nurymbetov R.A. Published 10/18/24, Bulletin No. 42. [in Russian]
 11. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 36157 for application No. 2022/0046.1 dated 27.01.2022. IPC B01D 47/14 (2006.01), 53/00 (2006.01). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Kamalbek D.K., Korganbaev B.N., Zhumadullaev D.K., Bazhibaev T.R. Published 31.03.23, Bulletin No. 13. [in Russian]
 12. Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Slesareva E.Yu. et al. Large-scale maldistributions of local flow parameters at distillation on structured packing // Bulgarian Chemical Communications. – 2020. – Vol. 52. – P. 42–46. <https://doi.org/10.34049/bcc.52.F.0007>
 13. Macfarlan L.H., Phan M.T., Eldridge R.B. Structured packing geometry study for liquid-phase mass transfer and hydrodynamic performance using CFD // Chemical Engineering Science. – 2022. – Vol. 249. – Article 117353. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117353>
 14. Amini Y., Nasr Esfahany M. CFD simulation of structured packings: A review // Separation Science and Technology. – 2019. – Vol. 54(15). – P. 2536–2554. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1549078>
 15. Zhang Y., Du C., Zhang Z., Du J., Tu Y., Ren Z. Process Intensification of Gas–Liquid Separations Using Packed Beds: A Review // Separations. – 2024. – Vol. 11. – Article 284. <https://doi.org/10.3390/separations11100284>
 16. Ramm V.M. Absorbciya gazov. 2-e izd. pererab. i dop. [Absorption of gases. 2nd ed. reworked and additional] – M.: Chemistry, 1976. – 656 p. [in Russian]
 17. Volnenko A.A. Nauchnye osnovy razrabotki i rascheta vikhrevykh massoobmennyykh i pyleulavlivayushchikh apparatov [Scientific foundations for the development and calculation of vortex mass transfer and dust collection apparatus]: dis. ... doctor of technical sciences. – Shymkent, 1999. – 300 p. [in Russian]

Сведения об авторах:

Жидебаев Е.А. – докторант, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана, 5, 160012, Шымкент, Казахстан
Шохаев О.А. – докторант, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана, 5, 160012, Шымкент, Казахстан
Волненко А.А. – доктор технических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана, 5, 160012, Шымкент, Казахстан
Жумадуллаев Д.К. – автор для корреспонденции, доктор PhD, доцент, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана, 5, 160012, Шымкент, Казахстан

Zhidebayev E.A. – Doctoral student, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan

Shokhaev O.A. – Doctoral student, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan

Volenko A.A. – Doctor of Technical Sciences, Professor, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan

Zhumadullayev D.K. – Corresponding author, PhD, Associate Professor, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)