



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-245-256>

Расчет конструктивных параметров регулярной насадки теплообменного аппарата из непрерывно соединенных труб

Д.К.Камалбек^{ID}, А.А.Волненко^{ID}, А.А. Абжапбаров^{ID},
Д.К. Жумадуллаев*^{ID}

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

*E mail: kamalbekovd@mail.ru, nii_mm@mail.ru, abaimilan@mail.ru,
daulet_ospl@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены конструкции аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры с внешним и внутренним расположением коллекторов. На основе анализа существующих конструкций создан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединенных труб одного диаметра внутри корпуса аппарата. Целью исследования является получение расчетных зависимостей для определения конструктивных параметров трубчатой насадки из непрерывно соединенных труб. Методология исследования основана на известном подходе движения газа по извилистым каналам, образованным насадочными телами. Получены уравнения для расчета порозности трубчатой насадки в сечении аппарата, объемной порозности и эквивалентного диаметра, учитывающие конструктивные параметры трубчатого пучка и шаги размещения труб в вертикальном и радиальном направлениях. Проведены вычислительные эксперименты и выполнено сопоставление расчетных данных для трубчатых насадок с прямыми трубами и выносными коллекторами и насадок из непрерывно соединенных труб. Установлено, что наличие отводов приводит к снижению объемной порозности и эквивалентного диаметра вследствие уменьшения свободного пространства контактной зоны. Полученные зависимости могут быть использованы при расчете и проектировании теплообменных аппаратов с регулярной трубчатой насадкой.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, регулярная трубчатая насадка, отводы, порозность в сечении, объемная порозность, эквивалентный диаметр, вертикальный шаг, радиальный шаг.

Введение

Известно, что практически во всех отраслях промышленности наибольшее распространение для проведения процессов тепломассообмена получили тарельчатые и насадочные аппараты. Несмотря на огромное разнообразие конструкций, тепломассообменные аппараты постоянно совершенствуются в направлении снижения энергозатрат и повышения эффективности проводимых процессов.

Перспективным направлением является создание конструкций насадочных аппаратов с регулярной структурой трубчатого пучка, позволяющих одновременно реализовать процессы тепло и массообмена в интенсивных (синфазных) режимах взаимодействия фаз при внешнем обтекании труб и осуществлять процесс теплообмена при движении теплоносителя в трубах. Причем поглотительный раствор в зоне контакта не смешивается с теплоносителем, движущимся в трубах. Это может явиться важным обстоятельством при использовании теплоносителя для производственных нужд.

В настоящее время создан ряд конструкций аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры и внешним расположением коллекторов [1]. К их числу можно отнести аппарат с гладкими прямыми трубами [2], а также аппарат с турбулизаторами теплоносителя в трубах [3,4], аппараты с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой двух типов: трубчато-взвешенной [5] и трубчато-фонтанирующей насадкой [6], аппарат с насадкой с раздельными коллекторами для подачи и слива теплоносителя нечетных и четных слоев регулярной кольцевой трубчатой насадки [7]. Для достижения компактности созданы аппараты с трубчатой насадкой регулярной структуры и расположением коллекторов в зоне контакта [8], двухступенчатый аппарат ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой [9], а также аппарат, обеспечивающий чередование противоточного движения потоков холодных и горячих теплоносителей в трубах по сечению рабочей зоны трубчатой насадки [10]. Нами для проведения исследований гидродинамики и процессов тепломассообмена был создан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединенных труб одного диаметра внутри корпуса аппарата [11].

Для определения степени влияния конструктивных параметров исследуемого трубчатого пучка на гидродинамические характеристики и параметры тепломассообмена необходимо получение расчетных зависимостей для определения порозности насадки и эквивалентного диаметра насадочной зоны аппарата с трубчатым пучком из непрерывно соединенных труб, что и определяет актуальность данной статьи.

Новизной темы является получение уравнений для расчета порозности насадки и эквивалентного диаметра новой конструкции регулярной трубчатой насадки в виде непрерывно соединенных труб.

Методология

Изучение конструктивных параметров тепломассообменного аппарата квадратного поперечного сечения проводилось для трубчатой насадки, представляющей собой трубчатый пучок в виде непрерывно соединенных с помощью отводов труб. Перед проведением численных экспериментов определяются размеры конструктивных составляющих трубчатого пучка (длины и диаметра труб, размеры отводов), количество прямых участков труб и отводов, а также шаги трасположения труб в вертикальном и радиальном направлении. В дальнейшем на основе известных расчетных зависимостей при движении газа по извилистым каналам получены уравнения для определения порозности

в сечении аппарата, объемной порозности и эквивалентного диаметра, которые учитывают параметры трубчатой насадки. С помощью языка программирования Pascal проведены расчеты по полученным уравнениям и сопоставление с аналогичным по конструкции аппаратом с прямыми трубами и выносными коллекторами.

В статье решается исследовательский вопрос по влиянию размеров трубчатых элементов и шагов расположения труб на конструктивные параметры: порозность и эквивалентный диаметр трубчатой насадки.

Основной гипотезой является определение характера влияния конструктивных параметров на ключевые показатели – энергопотребление и эффективность проводимых процессов.

Этапами исследования являются: определение размеров трубчатого пучка, получение расчетных зависимостей порозности и эквивалентного диаметра трубчатой насадки, проведение вычислительных экспериментов.

Методы исследования - вычислительные эксперименты на основе полученных расчетных зависимостей.

Результаты и Обсуждение

Известно, что газ движется через насадку по извилистым каналам, образованным насадочными телами [12]. Нами для получения расчетных зависимостей конструктивных параметров трубчатой насадки рассмотрена конструкция аппарата квадратного поперечного сечения, в рабочей зоне которого расположен трубчатый пучок в виде непрерывно соединенных с помощью отводов труб. Конструкция аппарата с трубчатым пучком в виде непрерывно соединенных с помощью отводов труб защищена патентом РК на изобретение [11]. Все полученные уравнения, представленные ниже, получены применительно к данному аппарату.

Конструктивные параметры трубчатой насадки (порозность в сечении аппарата, объемную порозность и эквивалентный диаметр) определим для ячейки, расположенной в центральной части аппарата.

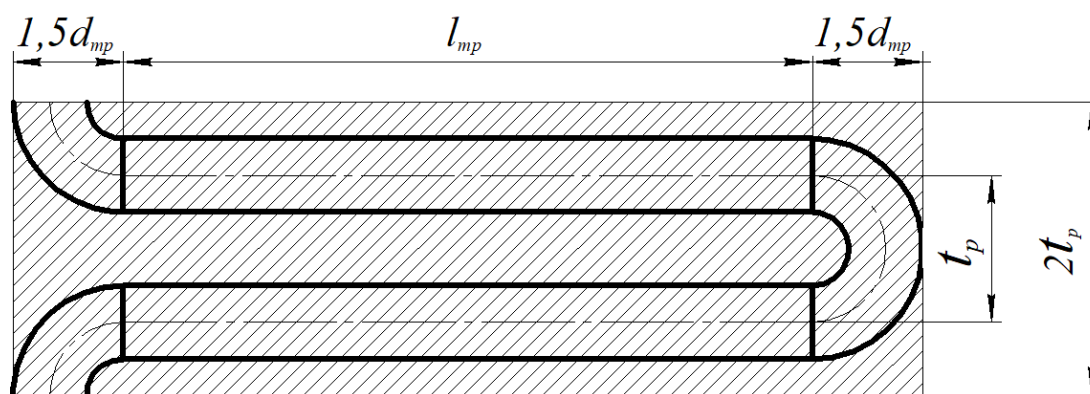


Рисунок 1. Фрагмент трубчатой насадки в центральной части аппарата (вид сверху)

Как видно из рисунка 1, в рассматриваемый фрагмент входят две трубы, один полный отвод и две половинки отводов, составляющих также один полный отвод.

Порозность в сечении аппарата определяется по зависимости:

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

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

Площадь элементов в миделевом сечении определим по формуле:

$$S_{\text{эл}} = S_{\text{тр}} + S_{\text{кольца}} \quad (2)$$

Площадь сечения труб в ячейке рассчитываем по формуле:

$$S_{\text{тр}} = 2 \cdot d_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{тр}}$ – диаметр труб, м; $l_{\text{тр}}$ – длина труб, м.

Площадь кольца рассчитывается по известной зависимости:

$$S_{\text{кольца}} = \pi \cdot (R^2 - r^2) \quad (4)$$

Здесь $R = 1,5 \cdot d_{\text{тр}}$ – наружный радиус кольца, м; $r = 0,5 \cdot d_{\text{тр}}$ – внутренний радиус кольца, м.

После подстановки и преобразований получим:

$$S_{\text{кольца}} = 2 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}}^2. \quad (5)$$

Тогда

$$S_{\text{эл}} = 2 \cdot d_{\text{тр}} \cdot (l_{\text{тр}} + \pi \cdot d_{\text{тр}}). \quad (6)$$

Площадь ячейки определим по формуле:

$$S_{\text{яч}} = (l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}}) \cdot 2 \cdot t_{\text{р}} \quad (7)$$

После подстановки формул (6) и (7) в выражение (1) получим:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{d_{\text{тр}} \cdot (l_{\text{тр}} + \pi \cdot d_{\text{тр}})}{(l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}}) \cdot t_{\text{р}}} \quad (8)$$

В уравнении (8) отношение $\frac{l_{\text{тр}} + \pi \cdot d_{\text{тр}}}{l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}}} \approx 1$, тогда порозность в сечении аппарата может быть определена по выражению:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{d_{\text{тр}}}{t_{\text{р}}}. \quad (9)$$

Ячейка для определения объемной порозности представлена на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что выделенная ячейка содержит четыре трубы, два полных отвода

и четыре половинки отводов, составляющих два полных отвода.

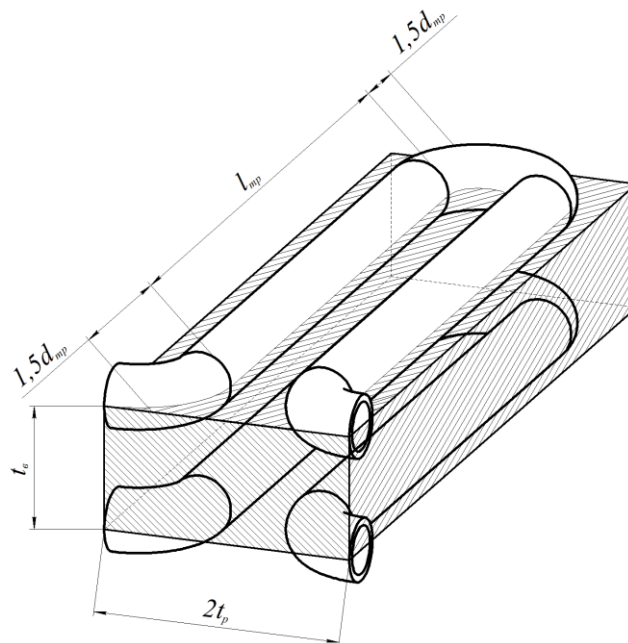


Рисунок 2. Ячейка трубчатой насадки в центральной части аппарата

Объемная порозность трубчатой насадки определяется по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{яч}}}, \quad (10)$$

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:

$$V_{\text{эл}} = V_{\text{тр}} + V_{\text{отв}} \quad (11)$$

Объем труб в ячейке определим по формуле:

$$V_{\text{тр}} = \pi \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot l_{\text{тр}}, \quad (12)$$

Объем отвода составляет половину объема тора. Для расчета объема тора известна формула:

$$V_{\text{тора}} = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r^2, \quad (13)$$

где $R = 1,5 \cdot d_{\text{тр}}$ – наружный радиус тора, м; $r = 0,5 \cdot d_{\text{тр}}$ – внутренний радиус тора, м.
Преобразовав известную формулу с подстановкой значений радиусов, получим уравнение для расчета объема отводов:

$$V_{\text{отв}} = 1,5 \cdot \pi^2 \cdot d_{\text{тр}}^3. \quad (14)$$

следовательно объем элементов насадки, с учетом (12) и (14), можно рассчитать по формуле:

$$V_{\text{эл}} = \pi \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot (l_{\text{тр}} + 1,5 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}}). \quad (15)$$

объем ячейки определим по формуле:

$$V_{\text{яч}} = 2 \cdot t_{\text{р}} \cdot t_{\text{в}} \cdot (l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}}) \quad (16)$$

подставляя (15) и (16) в уравнение (10), получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot (l_{\text{тр}} + 1,5 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}})}{2 \cdot t_{\text{р}} \cdot t_{\text{в}} \cdot (l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}})} \quad (17)$$

эквивалентный диаметр трубчатой насадки рассчитывается по формуле [12]:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_{\text{н}}} \quad (18)$$

удельную поверхность трубчатой насадки определим по формуле:

$$a_{\text{н}} = \frac{S_{\text{эл}}^{\text{н}}}{V_{\text{яч}}} \quad (19)$$

удельную площадь составляющих элементов трубчатой насадки определим по формуле:

$$S_{\text{эл}}^{\text{н}} = S_{\text{тр}}^{\text{н}} + S_{\text{отв}}^{\text{н}} \quad (20)$$

здесь удельная площадь труб:

$$S_{\text{тр}}^{\text{н}} = 4 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}} \quad (21)$$

удельная площадь отводов может быть рассчитана с использованием уравнения площади поверхности тора:

$$S_{\text{тор}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r \quad (22)$$

подставляя значения радиусов ($R = 1,5 \cdot d_{\text{тр}}$; $r = 0,5 \cdot d_{\text{тр}}$), получим формулу для определения удельной площади отводов:

$$S_{\text{отв}}^{\text{н}} = 6 \cdot \pi^2 \cdot d_{\text{тр}}^2 \quad (23)$$

с учетом (18) и (20) уравнение (17) примет вид:

$$S_{\text{эл}}^{\text{н}} = 2 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot (2 \cdot l_{\text{тр}} + 3 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}}) \quad (24)$$

подставляя (24) и (16) в уравнение (19), получим:

$$a_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot (2 \cdot l_{\text{тр}} + 3 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}})}{2 \cdot t_p \cdot t_b \cdot (l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}})} \quad (25)$$

тогда с учетом (25) и (17) уравнение (18) примет вид:

$$d_{\text{экв}} = \frac{2 \cdot [2 \cdot t_p \cdot t_b \cdot (l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}}) - \pi \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot (l_{\text{тр}} + 1,5 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}})]}{\pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot (2 \cdot l_{\text{тр}} + 3 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}})} \quad (26)$$

На основании инженерной методики расчета, представленных в работах [13-15], содержащей уравнения для расчета порозности трубчатой насадки в сечении аппарата, объемной порозности и эквивалентного диаметра, а также рекомендации по выбору оптимальных конструктивных параметров применительно к трубчатой насадке с прямыми трубами и выносными коллекторами, составлена программа расчета на языке Pascal, т.е. выполнен расчет по формулам. В таблице 1 приведены расчетные данные конструктивных параметров для трубчатых насадок с прямыми трубами и выносными коллекторами и непрерывно соединенных труб.

Таблица 1. Сравнительные характеристики трубчатых насадок

Расчетные параметры	С прямыми трубами и выносными коллекторами [13]	Непрерывно соединенные трубы (наши данные)
Порозность в сечении аппарата $\varepsilon_0, \text{м}^2/\text{м}^2$	0,5	0,5
Объемная порозность $\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$	0,804	0,553
Эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}, \text{м}$	0,102	0,032

Как видно из таблицы, в аппарате с прямыми трубами и выносными коллекторами значения объемной порозности и эквивалентного диаметра выше, чем для аппарата из непрерывно соединенных труб. Это очевидно, так как в объеме аппарата из непрерывно соединенных труб присутствуют отводы, занимающие определенную часть свободного пространства.

Заключение

Рассмотрены конструкции аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры с внешним и внутренним расположением коллекторов, и на основе анализа их работы нами создан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединенных труб одного диаметра внутри корпуса аппарата.

Основываясь на известном подходе движения газа по извилистым каналам, получены уравнения для расчета порозности трубчатой насадки из непрерывно соединенных труб в сечении аппарата, объемной порозности и эквивалентного диаметра, учитывающие конструктивные составляющие трубчатого пучка и шаги размещения труб в вертикальном и радиальном направлениях.

Проведено сопоставление расчетных данных конструктивных параметров для трубчатых насадок с прямыми трубами и выносными коллекторами из непрерывно соединенных труб, которые показали, что присутствие отводов в пучке из непрерывно соединенных труб приводит к снижению численных значений объемной порозности и эквивалентного диаметра за счет уменьшения свободного пространства контактной зоны.

Благодарность, конфликт интересов

Работа выполняется при поддержке грантового финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (проект No AP25794939). Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов.

Д.К. Камалбек – разработка концепции исследования, постановка задачи, получение расчетных зависимостей для определения конструктивных параметров трубчатой насадки, проведение вычислительных экспериментов, анализ результатов, подготовка первоначального варианта рукописи.

А.А. Волненко – научное руководство исследованием, формирование методологии расчета, теоретический анализ полученных зависимостей, критический пересмотр содержания статьи и утверждение окончательной версии рукописи.

А.А. Абжапбаров – выполнение расчетов по разработанной методике, обработка и интерпретация результатов вычислительных экспериментов, подготовка табличных материалов, редактирование текста статьи.

Д.К. Жумадуллаев – анализ существующих конструкций теплообменных аппаратов и патентных решений, обсуждение результатов исследования, проверка корректности инженерных расчетов, участие в подготовке и согласовании окончательной версии статьи.

Список литературы

1. Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Корганбаев Б.Н., Сарсенбекулы Д., Ешжанов А.А., Абжапбаров А.А. Теплообменные и пылеулавливающие аппараты с регулярной структурой трубчатой насадки. - Шымкент: Южно-Казахстанский университет им. М.О.Ауэзова, 2023. – 164 с. – монография.
2. Инновационный патент №27719, Республика Казахстан, МПК B01D 53/20, B01D 47/14. Аппарат с насадкой для теплообмена 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. – патент.
3. Инновационный патент №30217, Республика Казахстан. МПК B01D 53/20, B01D 47/14. Аппарат с насадкой для теплообмена 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. – патент.
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. – патент.
5. Патент на полезную модель №2092 по заявке №2016/0474.2 от 25.08.2016г. МПК

- B01D 53/20, 47/14. Приоритет от 9.02.2016. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Бишимбаев В.К., Волненко А.А., Ескендиоров М.З., Протопопов А.В., Жантасов К.Т., Анарбаев А.А. Опубл. 30.03.17, бюл. №6. – патент.
6. Yeshzhanov A.A., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N. Calculation of hydrodynamic characteristics of combined apparatuses with a regular-suspended packing, International Review of Mechanical Engineering, 13(7), 382–389 (2019). – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i7.16645>.
 7. Issayeva A.N., Korganbayev B.N., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Jumadillayeva G.N. Calculation of Hydrodynamic Characteristics of Apparatus with Regular Tubular Packing, Rocznik Ochrona Srodowiska, 23, 868-882 (2021) – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2021.059>.
 8. Патент РК № 34418 на изобретение по заявке №2017/0048.1 от 20.01.2017г. МПК B01J 2/04 (2006/1); B01J 19/32 (2006/1). Приоритет установлен 22.06.2018г. №22011 Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О.С., Крганбаев Б.Н., Ескендиоров М.З., Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А., Байгутов Н.Т., Абжапбаров А.А. Бюл. №25 от 26.06.2020 г. – патент.
 9. Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N., Kamalbek D.K. Calculation of Heat and Mass Transfer Characteristics and Dust Collection Parameters of a Shock-Vortex Apparatus with a Regular Tubular Packing, International Review of Mechanical Engineering, 16(6), 309-318 (2022). – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i6.22605>.
 10. Патент РК №36995 по заявке №2023/0587.1 от 07.09.2023г. МПК B01D 53/20 (2006.01), 47/14(2006.01). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Шамбилова А.С., Исмаилов Б.Р., Абжапбаров А.А., Крганбаев Б.Н., Нурымбетов Р.А. Опубл. 18.10.24, бюл. №42. – патент.
 11. Abzhapbarov A.A., Volnenko A.A., Kamalbek D.K., Zhidebayev Y.A., Zhumadullayev D.K. Calculation of Hydraulic Resistance of Various Types of Regular Hollow-Ring Beams in Heat-and-Mass Exchangers, International Review of Mechanical Engineering, 19(4), 182-193 (2025). – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v19i4.26191>.
 12. Рамм В.М. Абсорбция газов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656с. – книга.
 13. Сарсенбекулы Д. Методология расчета и проектирования аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2016. -143 с. – диссертация.
 14. Volnenko A.A., Balabekov O.S., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D. Purification apparatuses with new types of regular packings for chromium salts production // Chemical Engineering Transactions. 2015. Vol. 43. P. 1147–1152. – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1543192>.
 15. Yeshzhanov A.A., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N. Calculation of Hydrodynamic Characteristics of Combined Apparatuses with a Regular-Suspended Packing // International Review of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 13, No. 7. P. 382–389. – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i7.16645>.

D.K. Kamalbek, A.A. Volnenko, A.A. Abzhapbarov, D.K. Zhumadullaev*

M.Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

Calculation of design parameters of the regular packing of heat and mass transfer apparatus from continuously connected pipes

Abstract. Designs of apparatuses with regular tubular packing and external or internal collector arrangements are considered. Based on an analysis of existing designs, an apparatus with regular packing made of continuously connected pipes of equal diameter was developed. The study aims to obtain calculation relationships for determining design parameters of tubular packing. Methodology is based on a known approach describing gas flow through tortuous channels formed by packing elements. Equations were derived for calculating cross-sectional porosity, volumetric porosity, and equivalent diameter, taking into account design parameters of the tubular bundle and tube spacing. Computational experiments were performed, and calculated data for packings with straight tubes and external collectors were compared with those for continuously connected pipes. Results showed that bends reduce volumetric porosity and equivalent diameter due to the reduction of free space in the contact zone. Obtained relationships can be applied in the calculation, design, and optimization of heat and mass transfer apparatuses with regular tubular packing.

Keywords: heat and mass transfer apparatus, regular tubular packing, bends, cross-sectional porosity, volumetric porosity, equivalent diameter, vertical pitch, radial pitch.

References

1. Volnenko A.A., Zhumadullaev D.K., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D., Eshzhanov A.A., Abzhapbarov A.A. Teplomassoobmennyye i pyleulavlivayushchiye apparaty s regul'yarnoy 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. Yeshzhanov A.A., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N. Calculation of hydrodynamic characteristics of combined apparatuses with a regular-suspended packing, *International Review of Mechanical Engineering*, 13(7), 382–389 (2019). DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i7.16645>.
7. Issayeva A.N., Korganbayev B.N., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Jumadillayeva G.N. Calculation of Hydrodynamic Characteristics of Apparatus with Regular Tubular Packing, *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 23, 868-882 (2021). DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2021.059>.
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. Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N., Kamalbek D.K. Calculation of Heat and Mass Transfer Characteristics and Dust Collection Parameters of a Shock-Vortex Apparatus with a Regular Tubular Packing, *International Review of Mechanical Engineering*, 16(6), 309-318 (2022). DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i6.22605>.
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. Abzhapbarov A.A., Volnenko A.A., Kamalbek D.K., Zhidabayev Y.A., Zhumadullayev D.K. Calculation of Hydraulic Resistance of Various Types of Regular Hollow-Ring Beams in Heat-and-Mass Exchangers, *International Review of Mechanical Engineering*, 19(4), 182–193 (2025). DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v19i4.26191>.
12. 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]
13. Sarsenbekuly D. Metodologiya rascheta i proyektirovaniya apparatov s trubchatoy nasadkoy regul'yarnoy struktury [Methodology of calculation and design of devices with tubular packing of regular structure]: dis. ... doctor PhD. – Shymkent. 2016. -143 p. [in Russian]
14. Volnenko A.A., Balabekov O.S., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D. Purification apparatuses with new types of regular packings for chromium salts production // *Chemical Engineering Transactions*. 2015. Vol. 43. P. 1147–1152. – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1543192>.
15. Yeshzhanov A.A., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N. Calculation of Hydrodynamic Characteristics of Combined Apparatuses with a Regular-Suspended Packing // *International Review of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 13, No. 7. P. 382–389. – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i7.16645>.

Сведения об авторах:

Камалбек Д.К. – 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

Абжапбаров А.А. – доктор PhD, доцент, 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,

Kamalbek D.K. – 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

Abzhapbarov A.A. – PhD, Associate 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/>).