

УДК 66.021.3

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-107-112

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НАСАДОК
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АБСОРБЦИИ**

Р.И. ЛАНКИН, канд. техн. наук, доц. **В.С. ФРАНЦКЕВИЧ**, канд. техн. наук, доц. **А.М. ВОЛК**
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Развитие промышленности, вызванное увеличением объемов производства, приводит к росту выбросов промышленных отходящих газов, содержащих вредные вещества, негативно влияющие на окружающую среду и здоровье людей. В химической и других отраслях промышленности активно используются насадочные колонны, которые играют ключевую роль в массо- и теплообменных процессах, таких как абсорбция, ректификация и экстракция. Особое внимание уделяется аппаратам с подвижной (псевдооживленной) насадкой, которые обеспечивают высокую эффективность благодаря улучшенному распределению потоков и увеличению площади контакта между фазами. В данной статье описывается запатентованный элемент насадки для массообмена, разработанный с учетом современных требований к эффективности и экологической безопасности. Также представлен способ расположения впадин на поверхности шарового элемента, который оптимизирует распределение потока и увеличивает площадь обмена. Исследуется толщина водяной пленки на поверхности шара, что важно для эффективности массообменного процесса. Результаты исследования могут значительно повлиять на проектирование и эксплуатацию массообменных аппаратов в различных отраслях.

Ключевые слова: абсорбция, насадка, подвижная насадка, расположение впадин, площадь поверхности, водяная пленка, массообмен, гидравлическое сопротивление.

Введение. В настоящее время развитие промышленности наряду с резким подъемом объемов производства сопровождается возрастанием выбросов в атмосферу промышленных отходящих газов. Строящиеся заводы создаются на основе мощных единичных технологических систем и высокоэффективных аппаратов. Очистка отходящих промышленных газов должна обеспечить утилизацию ценных компонентов, которые находятся в них, и охрану окружающей среды от загрязнения. Обычно на очистку поступает большой объем газов, и при этом требуется высокая степень извлечения компонентов [1; 2].

В химической промышленности, как и в других отраслях, часто используются насадочные колонны для процессов массо- и теплообмена при абсорбции, ректификации и экстракции, в т.ч. для охлаждения газов и жидкостей. В большинстве случаев данные процессы происходят в противоточных потоках газовой и жидкой фаз. Насадочные колонны относятся к группе массообменных установок, жидкость в которых под действием силы тяжести стекает через неупорядоченную или структурированную насадку в виде пленки либо капель [3; 4].

Наиболее часто применяются насадочные абсорберы с подвижной насадкой, пригодной для работы в условиях агрессивной и коррозионной сред, при наличии жидкостей, склонных к вспениванию, при высоких соотношениях жидкость–газ, при наличии твердых включений в жидкой фазе, а также в тех случаях, когда важно низкое гидравлическое сопротивление установки [5; 6].

Подвижная насадка в абсорбционном аппарате играет роль дробящего и турбулизирующего устройства для жидкой фазы и объемного барботера для газовой фазы. Она характеризуется тем, что может работать в значительном интервале плотностей орошения ($1\text{--}200\text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$). Преимуществом таких конструкций является способность к самоочищению насадок, стенок колонны и опорно-распределительных решеток от осадка в процессе эксплуатации, что позволяет функционировать такому слою с кристаллизующимися, загипсовывающимися и закоксовывающимися растворами [7–9].

В абсорбционных аппаратах с подвижной насадкой насадочные тела поддерживаются за счет газовой фазы в псевдооживленном (кипящем) состоянии. В качестве насадочных тел могут использоваться сплошные или полые шары из полиэтилена, пенополистерола, полипропилена и других полимерных материалов. Положение шаров фиксируется опорной и ограничительной решетками. Опорная (нижняя) решетка необходима для поддержания насадки, а ограничительная (верхняя) – предотвращает унос насадки из аппарата [9; 10].

В аппаратах увеличение эффективности процессов массообмена создается псевдооживлением насадочных тел. Жидкость, поступающая в аппарат, формирует пленку, обтекающую поверхность насадочных тел, или с большими скоростями газа включается в состав барботажного слоя газа и жидкости, или находится в виде струй и капель, распределенных в газе [11]. В слое насадки направление движения и длина пути каждого элемента носит случайный характер [2].

Важной задачей изучения процесса массообмена является создание простой и надежной конструкции элемента насадочных массо- и теплообменных колонн, обеспечивающей увеличение эффективной поверхности массообмена за счет пленочного течения жидкости по поверхности элемента, снижение гидравлического сопротивления путем изменения профиля поверхности межфазного контакта жидкость–газ.

Проблема равномерного распределения точек на поверхностях имеет значение для различных фундаментальных и прикладных исследований. Она важна для таких научных направлений и групп методов, как статистическое и имитационное математическое моделирование¹.

Для равномерного распределения точек на плоскости, во-первых, можно помещать их в узлах координатной сетки. Во-вторых, можно генерировать независимо друг от друга две координаты (работая в декартовой системе координат), используя генератор случайного числа (ГСЧ) с равномерным распределением на заданных интервалах. Оба способа являются самыми простыми в использовании и наиболее распространенными.

Поскольку равномерно распределять точки на плоскости представляется несложным, то, соответственно, можно получить равномерное распределение точек на разгибающихся поверхностях (поверхностях нулевой гауссовой кривизны) путем применения соответствующих преобразований поверхностей.

Намного сложнее дело обстоит с задачей равномерного распределения точек на поверхности сферы и в целом на поверхностях ненулевой гауссовой кривизны.

Наиболее полно проблема равномерного распределения точек на поверхностях представляется при рассмотрении частного случая задачи – проблемы равномерного распределения точек на поверхности сферы.

Основная часть. Насадка для массообменных процессов представляет собой сплошную сферу, в которой расположены впадины в форме полусфер, количество которых зависит от величины диаметра шара, измеряемого в миллиметрах. Глубина таких впадин варьируется в пределах 0,08–0,095 от диаметра шара, также измеряемого в миллиметрах, расстояние между ними – 0,3–0,7 диаметра впадин².

При обтекании насадочного тела газом пограничные слои наблюдаются на всей поверхности шара, а впадины задерживают отделение пограничных газовых слоев. Это способствует уменьшению вихревой зоны за сферой, а, следовательно, и снижению гидравлического сопротивления. Как показали проведенные исследования, в предложенной насадке гидравлическое сопротивление в 1,5–2 раза меньше, по сравнению с гладким шаром такого же диаметра. Кроме того, в шаре со впадинами на 50% увеличивается поверхность контакта фаз².

В исследуемой конструкции для увеличения площади контакта жидкой фазы с газом в качестве насадок использовались шары с впадинами запатентованной конструкции². Предложенный элемент насадки представлен на рисунке 1.

Важной задачей стало выявление способа равномерного расположения впадина на поверхности шара. Для определения мест расположения впадин на шаре применялась сферическая система координат (рисунок 2).

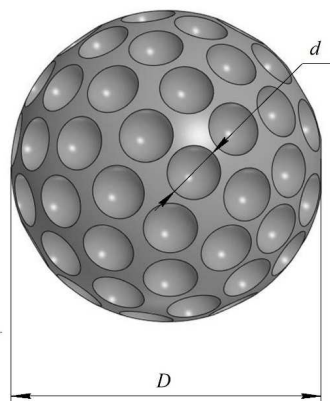


Рисунок 1. – Шар со впадинами

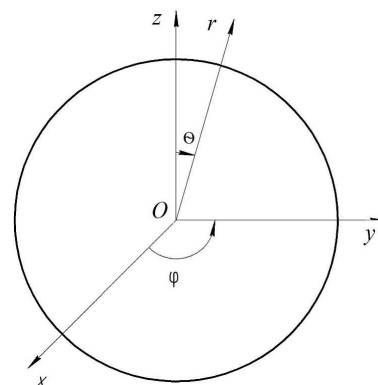


Рисунок 2. – Схема сферической системы координат

При распределении впадин было выбрано 9 уровней, через каждые $\pi/8$ рад. На I уровне координаты, на которых располагаются впадины, будут записаны следующим образом:

$$r = R \quad \theta = 0 \quad \varphi = 0.$$

На II уровне:

$$r = R \quad \theta = \frac{\pi}{8} \quad \varphi = \frac{\pi}{6} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 5.$$

¹ Копытов, Н.П. Равномерное распределение точек на поверхностях и его применение в исследованиях структурно-неоднородных сред: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Н.П. Копытов. – Екатеринбург, 2015. – 121 л.

² Насадка для массообменных процессов: полз. модель № и 20230256 ВУ 13477, МПК В 01J 19/30 (2006.01) / В.С. Францкевич, Р.И. Ланкин. – Опубл. 20.05.2024.

Аналогично запишем для III–IX уровней:

$$\begin{aligned}
 r = R \quad \theta = \frac{\pi}{4} \quad \varphi = \frac{\pi}{11} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 10. \\
 r = R \quad \theta = \frac{3 \cdot \pi}{8} \quad \varphi = \frac{\pi}{14} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 13. \\
 r = R \quad \theta = \frac{\pi}{2} \quad \varphi = \frac{\pi}{15} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 14. \\
 r = R \quad \theta = \frac{5 \cdot \pi}{8} \quad \varphi = \frac{\pi}{14} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 13. \\
 r = R \quad \theta = \frac{3 \cdot \pi}{4} \quad \varphi = \frac{\pi}{11} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 10. \\
 r = R \quad \theta = \frac{7 \cdot \pi}{8} \quad \varphi = \frac{\pi}{6} \cdot k, \quad k = 0, \dots, 5. \\
 r = R \quad \theta = \pi \quad \varphi = 0.
 \end{aligned}$$

Площадь шара вычисляется по формуле

$$S = 4 \cdot \pi \cdot R^2. \tag{1}$$

Найдем площадь шара со впадинами (рисунок 3).

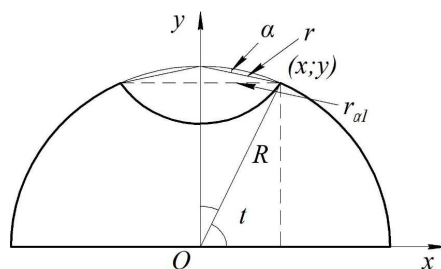


Рисунок 3. – Сечение шара с впадиной

Найдем координаты точки (x, y) пересечения шаров в декартовой системе координат:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2, \\ x^2 + (y - R)^2 = r^2. \end{cases} \tag{2}$$

Вычитаем уравнения системы (2)

$$y^2 - (y - R)^2 = R^2 - r^2. \tag{3}$$

Откуда получим

$$2Ry = 2R^2 - r^2. \tag{4}$$

Выразим y

$$y = \frac{2R^2 - r^2}{2R}. \tag{5}$$

Запишем параметрическое уравнение окружности (рисунок 3)

$$\begin{cases} x = R \cos t, \\ y = R \sin t. \end{cases} \tag{6}$$

Подставим y в (5) и выразим $\sin t$

$$\sin t = \frac{2R^2 - r^2}{2R^2}. \tag{7}$$

Выразим t

$$t = \arcsin \left(\frac{2R^2 - r^2}{2R^2} \right). \tag{8}$$

Площадь поверхности вращения вычисляется по формуле

$$S_{Oy} = \int_{\alpha}^{\beta} 2\pi x dl. \quad (9)$$

Длина дуги будет

$$dl = \sqrt{(x'_t)^2 + (y'_t)^2} dt = R dt. \quad (10)$$

Получаем площадь поверхности шара, вырезанной одним элементом одним элементом

$$S_{Oy} = \int_t^{\frac{\pi}{2}} 2\pi R \cos t \cdot R dt = 2\pi R \sin t \left| \begin{array}{l} \frac{\pi}{2} \\ \arcsin\left(\frac{2R^2 - r^2}{2R^2}\right) \end{array} \right. = 2\pi R^2 \left(1 - \frac{2R^2 - r^2}{2R^2}\right) = \pi r^2. \quad (11)$$

Вычисляем площадь поверхности одной впадины:

$$\frac{R - y}{r} = \sin \alpha. \quad (12)$$

$$y = \frac{2R^2 - r^2}{2R^2}. \quad (13)$$

$$\frac{R - \frac{2R^2 - r^2}{2R^2}}{r} = \sin \alpha. \quad (14)$$

$$\frac{r}{2R} = \sin \alpha. \quad (15)$$

$$S_{Oy} = 2\pi \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} 2 \cos t r dt = 2\pi r^2 \sin t \left| \begin{array}{l} \frac{\pi}{2} \\ \alpha \end{array} \right. = 2\pi r \left(1 - \sin \alpha\right) = 2\pi r^2 \left(1 - \frac{r}{2R}\right). \quad (16)$$

Увеличение площади шара с учетом одного элемента

$$S - S_1 = 2\pi r^2 \left(1 - \frac{r}{2R}\right) - \pi r^2 = \pi r^2 \left(2 - \frac{r}{R} - 1\right) = \pi r^2 \left(1 - \frac{r}{R}\right). \quad (17)$$

Получим общее увеличение площади шара

$$S_O = \pi r^2 \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot n. \quad (18)$$

Общая площадь поверхности шара будет

$$S_{\text{общ}} = 4\pi R^2 + \pi r^2 \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot n. \quad (19)$$

Данная зависимость будет учитываться в дальнейшем при исследовании процесса массообмена в колонне с запатентованным видом шаровой насадки.

Шар, с которым были проведены экспериментальные исследования по вычислению толщины водяной пленки на единичном элементе (шаре со впадинами), с описанными выше параметрами был распечатан на 3D-принтере. Изучение толщины пленки важно для проведения процесса массообмена. Суть эксперимента заключалась во взвешивании шара до и после погружения жидкостью, что позволило количественно оценить взаимодействие шара с жидкой средой и измерить толщину водяной пленки, образующейся на его поверхности.

Перед началом эксперимента шары, использовавшиеся в качестве насадок, были тщательно подготовлены. Их поверхность была очищена для минимизации влияния загрязнений на результаты взвешивания.

Взвешивание проводилось в два этапа:

– шар помещался на весы, и фиксировалась его масса в сухом состоянии. Это значение записывалось для дальнейших расчетов;

– затем шар аккуратно погружался в заранее подготовленную жидкость, после чего снова взвешивался. Этот шаг позволял измерить массу шара с прилипшей к нему жидкостью.

Разность между массой шара до и после погружения позволила определить количество жидкости, которая прилипла к его поверхности. Результаты были представлены на рисунке 4, где графически отображены изменения массы.

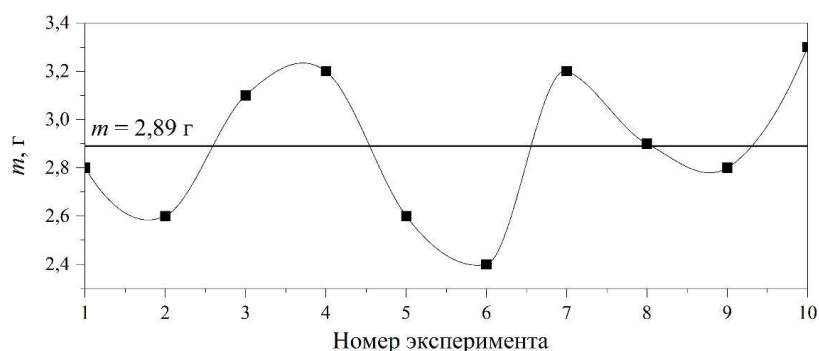


Рисунок 4. – Результаты экспериментального исследования

В ходе серии испытаний средняя разность масс шара до и после погружения составляла $m = 2,89$ г. Используя эту массу и плотность воды ($\rho = 1000$ кг/м³), найдем объем жидкости, который остался на шаре (так называемая пленка):

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{1000} = 2,89 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (20)$$

Толщина пленки δ рассчитывалась следующим образом. По формуле (19) была найдена площадь поверхности шара. Для исследуемого шара $D = 40$ мм она составила $S_{\text{общ}} = 7530,96$ мм².

Подставив полученный объем из формулы (20) и площадь поверхности шара в формулу (21), найдем толщину водяной пленки δ_p , находящейся на шаре после погружения в жидкость:

$$\delta_p = \frac{V}{S_{\text{общ}}} = \frac{2,89 \cdot 10^{-6}}{7,53 \cdot 10^{-3}} = 0,385 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (21)$$

После перевода: толщина водяной пленки составляет $\delta_p = 385$ мкм.

Заключение. В ходе проведенного исследования были проанализированы ключевые аспекты массообменных процессов в аппаратах с подвижной насадкой. Разработка и внедрение запатентованного элемента насадки, а также методика расположения впадин на поверхности шарового элемента показали высокую эффективность в оптимизации процессов абсорбции и ректификации. Увеличение площади контакта между фазами и снижение гидравлического сопротивления открывают новые горизонты для повышения производительности и устойчивости работы массообменного оборудования.

Полученные результаты, в т.ч. измерение толщины водяной пленки, подчеркивают важность детального изучения характеристик насадочных элементов для улучшения технологических процессов в химической и других отраслях. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к созданию более действенных и экологически безопасных решений, что будет способствовать не только улучшению производственных показателей, но и защите окружающей среды.

Таким образом, предложенные инновации и методы имеют значительный потенциал для применения в практической деятельности, что подтверждает их актуальность и необходимость дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Замянин А.А., Рамм В.М. Абсорберы с подвижной насадкой. – М.: Химия, 1980. – 184 с.
2. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбера с подвижной шаровой насадкой // Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2(259). – С. 107–114.
3. Рамм В.М. Абсорбция газов. – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
4. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Влияние геометрических параметров опорно-распределительных решеток на гидродинамику в массообменном аппарате с подвижной шаровой насадкой // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2023. – № 2(48). С. 108–112. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-108-112.
5. Maćkowiak J. Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 355 p.
6. Левш И.П., Убайдуллаев А.К. Тарельчатые абсорберы и скрубберы с псевдооживленным (подвижным) слоем орошаемой насадки. – Ташкент: Узбекистан, 1981. – 236 с.
7. Kohl A.L., Neilsen R.B. Gas purification. – 5th ed. – Texas: Gulf Publishing Company, 1997. – 1395 p.

8. Billet R. *Packed Towers in Processing and Environmental Technology* / Translated by Fullarton J.W. – Weinheim: VCH, 1995. – 382 p.
9. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Влияние формы и геометрии насадки на гидродинамику в массообменном аппарате с псевдооживленным слоем // Горная механика и машиностроение. – 2024. – № 1. – С. 89–95.
10. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. – Л.: Химия, 1972. – 248 с.
11. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбционной колонны с подвижной насадкой // Химическая технология и техника: материалы 86-й науч.-техн. конф. (с международным участием) / Минск (31 янв. – 12 февр. 2022 г.). – Минск: БГТУ, 2022. – С. 148–151.

REFERENCES

1. Zaminyan, A.A. & Ramm, V.M. (1980). *Absorberty s podvizhnoi nasadkoi*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
2. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2022). Gidravlichesкое soprotivlenie absorbera s podvizhnoi sharovoi nasadkoi [Hydraulic Resistance of the Absorber with a Movable Ball Nozzle]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geokologiya* [Proceedings of BSTU. Iss. 2, Chemical technologies, biotechnology, geoecology], 2(259), 107–114. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Ramm, V.M. (1976). *Absorbtsiya gazov*. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
4. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2023). Vliyanie geometricheskikh parametrov oporno-raspredelitel'nykh reshetok na gidrodinamiku v massoobmennom apparate s podvizhnoj sharovoy nasadkoy [Influence of geometric parameters of support-distribution grides on hydrodynamics in a mass exchanger with a movable ball nozzle]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science], 2(48), 108–112. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-108-112. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Maćkowiak, J. (2010). *Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems*. Heidelberg: Springer-Verlag.
6. Levsh, I.P. & Ubaidullaev, A.K. (1981). *Tarel'chatye absorberty i skrubbery s psevdoozhivlennym (podvizhnym) sloem oroshaemoi nasadki*. Tashkent: Uzbekistan. (In Russ.).
7. Kohl, A.L. & Neilsen, R.B. (1997). *Gas purification*. – 5th ed. Texas: Gulf Publishing Company.
8. Billet, R. (1995). *Packed Towers in Processing and Environmental Technology*. Translated by Fullarton J.W. Weinheim: VCH.
9. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2024). Vliyanie formy i geometrii nasadki na gidrodinamiku v massoobmennom apparate s psevdoozhivlennym sloem [Influence of the shape and geometry of the nozzle on the hydrodynamics in a mass transfer apparatus with a fluidized layer]. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie* [Mining Mechanical Engineering and Machine-Building], (1), 89–95. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Uzhov, V.N. & Val'dberg, A.Yu. *Ochistka gazov mokrymi fil'trami*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.).
11. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2022). Gidravlichesкое soprotivlenie absorbtionnoi kolonny s podvizhnoi nasadkoi // *Khimicheskaya tekhnologiya i tekhnika: materialy 86-i nauch.-tekhn. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem)*. Minsk, 31 yanv. – 12 fevr. 2022 g. (148–151). Minsk: BGTU.

Поступила 27.09.2024

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF PACKING ELEMENTS TO ENHANCE ABSORPTION EFFICIENCY

R. LANKIN, V. FRANTSKEVICH, A. VOLK
(Belarussian State Technological University, Minsk)

The development of industry, driven by increased production volumes, leads to a rise in emissions of industrial waste gases that contain harmful substances, negatively impacting the environment and human health. In the chemical and other industries, packed columns are actively used, playing a key role in mass and heat transfer processes such as absorption, rectification, and extraction. Special attention is given to apparatuses with moving (fluidized) packing, which provide high efficiency due to improved flow distribution and increased contact area between phases. This article describes a patented packing element for mass transfer, developed with modern efficiency and environmental safety requirements in mind. It also presents a method for positioning depressions on the surface of the spherical element, optimizing flow distribution and increasing the exchange area. The thickness of the liquid film on the surface of the sphere is investigated, as this is important for the efficiency of the mass transfer process. The results of this research could significantly impact the design and operation of mass transfer apparatuses across various industries.

Keywords: absorption, nozzle, movable nozzle, location of depressions, surface area, water film, mass transfer, hydraulic resistance.