

# МЕХАНИКА MECHANICS

---

УДК 66.021.1

**A. M. Volk**

Белорусский государственный технологический университет

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В РОТОРНОМ АППАРАТЕ

В предлагаемой статье рассматривается возможность применения вихревых аппаратов для межфазного взаимодействия при проведении различных физико-химических процессов в химической, пищевой, газодобывающей, строительной и других отраслях. В процессах массопередачи один или несколько распределляемых компонентов через активную поверхность их раздела переходят из одной фазы в другую. Для эффективного выполнения данных процессов в абсорберах, ректификаторах, адсорберах, экстракторах важное значение имеет развитая поверхность взаимодействующих фаз. Большинство химических реакций в реакционных аппаратах и гетерогенных средах происходит при подводе исходных распределляемых веществ в зону реакции и отводе образующихся продуктов из зоны химического взаимодействия через поверхность раздела фаз. Указанные процессы используются и при решении экологических проблем: для санитарной очистки вентиляционных газов, мокрой очистки выбросов. При выпарке, абсорбции, ректификации, мокрой очистке газов и других процессах актуальна задача предотвращения уноса капель жидкости с газовым потоком. Рассмотрена одна из конструкций роторного многоступенчатого массобменного аппарата, позволяющего достигать равномерного по высоте тонкодисперсного распыла жидкости при восходящем перекрестном движении газа. Приведены схемы установок для выполнения эксперимента. На основании экспериментальных исследований получена зависимость среднего диаметра капель диспергированной жидкости от геометрических и гидродинамических параметров. Описан дисперсный состав, позволяющий определить основные характеристики, используемые в физико-химических процессах. Теоретическими и экспериментальными методами произведена оценка уноса жидкой фазы, выполнен анализ процесса и даны практические рекомендации.

**Ключевые слова:** вихревые аппараты, физико-химические процессы, массопередача, роторный аппарат, диспергирование жидкости, экспериментальные исследования, дисперсный состав, унос жидкости, практические рекомендации.

**Для цитирования:** Волк А. М. Анализ процессов переноса в роторном аппарате // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2022. № 2 (260). С. 26–30.

**A. M. Volk**  
Belarusian State Technological University

## ANALYSIS OF TRANSFER PROCESSES IN A ROTARY APPARATUS

The proposed article considers the possibility of using vortex apparatuses for interfacial interaction in various physical and chemical processes in the chemical, food, gas production, construction and other industries. In mass transfer processes, one or more distributed components pass from one phase to another via their active interface. For effective execution of these processes in absorbers, rectifiers, adsorbers, extractors a developed surface of interacting phases is important. The majority of chemical reactions in reaction vessels and heterogeneous media occur at feeding of the initial distributed substances into the reaction zone and removal of the formed products from the zone of chemical interaction through the phase interface. These processes are also used for solving environmental problems: for sanitary purification of ventilation gases and wet emissions purification. At evaporation, ab-sorption, rectification, wet gas purification and other processes the task of prevention of carry-over of drops of liquid with the gas stream is actual. The paper considers one of the designs of a rotor multistage mass-exchange apparatus which allows achieving a uniform fine pulverized liquid atomization at ascending cross-movement of gas.

The diagrams of installations for the experiment are given. The dependence of average diameter of dispersed liquid droplets on geometrical and hydrodynamic parameters is obtained on the basis of experimental studies. The disperse composition is described, allowing to determine the main characteristics used in physicochemical processes. By theoretical and experimental methods the estimation of liquid phase entrainment is made, the analysis of the process is carried out and practical recommendations are given.

**Key words:** vortex apparatuses, physical and chemical processes, mass transfer, rotary apparatus, liquid dispersion, experimental studies, dispersion composition, liquid entrainment, practical recommendations.

**For citation:** Volk A. M. Analysis of transfer processes in the rotatory apparatus. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2022, no 2 (260), pp. 26–30 (In Russian).

**Введение.** Вихревые аппараты широко применяются в химической, пищевой, газодобывающей, строительной и других отраслях для проведения различных физико-химических процессов, таких как разделение гетерогенных систем и тепломассоперенос [1]. Они характеризуются небольшим гидравлическим сопротивлением, малой металлоемкостью, внешним подводом энергии.

Эффективность явлений переноса в таких устройствах [2, 3] обеспечивается высокими относительными скоростями взаимодействующих фаз, развитой поверхностью контакта, высокой интенсивностью процессов межфазного взаимодействия и существенно превосходит кинетические характеристики контактных аппаратов с традиционными способами взаимодействия фаз в системах, что способствует заметному уменьшению габаритов оборудования.

Внедрение аппаратов в производство требует математического моделирования исследуемых процессов, сочетания теоретических и экспериментальных методов, относительной простоты расчетов.

**Основная часть. Конструкция роторного массообменного аппарата.** На основе анализа работы известных конструкций разработан многоступенчатый роторный аппарат [4], позволяющий в пределах ступени контакта, благодаря вращению ротора, достигать равномерного по высоте тонкодисперсного распыла жидкости при восходящем перекрестном движении газа. Устройство аппарата схематично изображено на рис. 1.

При работе жидкость с вышележащей ступени контакта поступает по переливному устройству во внутренний перфорированный цилиндр. За счет механического воздействия перераспределительного элемента жидкости передается вращательное движение, и это приводит к быстрому выравниванию скоростей их вращения, причем наблюдается равномерное распределение толщины пленки по высоте цилиндра. Под действием центробежных сил происходит истечение жидкости из отверстий перфорации и ее диспергирование в пространстве между цилиндрами, где капли жидкости перемещаются

в радиальном направлении и попадают на внутреннюю стенку элемента следующего цилиндра, после чего циклы повторяются соответственно числу цилиндров.

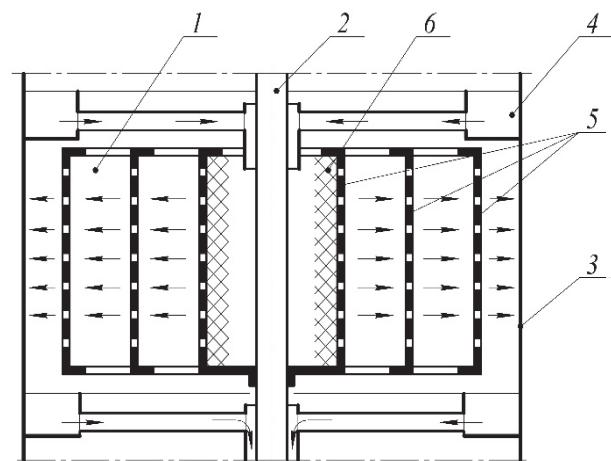


Рис. 1. Схема роторного массообменного аппарата:  
 1 – ротор; 2 – вал; 3 – корпус аппарата;  
 4 – переливное устройство;  
 5 – перфорированные цилиндры;  
 6 – перераспределительный элемент

При этом газ проходит в направлении оси аппарата, взаимодействуя с диспергированной жидкостью в пространстве между соседними цилиндрами и между внешним цилиндром и корпусом, а также с пленкой жидкости на внутренней поверхности цилиндров и корпуса.

**Экспериментальные и теоретические исследования процессов массопереноса.** Для разработки методики расчета аппарата важно установить зависимость дисперсного состава жидкой фазы от режимных и конструктивных параметров, а также функций распределения количества, поверхности, объема капель жидкости и числовые характеристики этих распределений [5].

С этой целью проведены экспериментальные исследования по изучению дисперсного состава жидкой фазы методом стробоскопического фотографирования. Также выполнены теоретические исследования. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

В опытах использовался полый цилиндрический стакан, жестко закрепленный на валу и предназначенный для диспергирования жидкой фазы (в нашем случае воды).

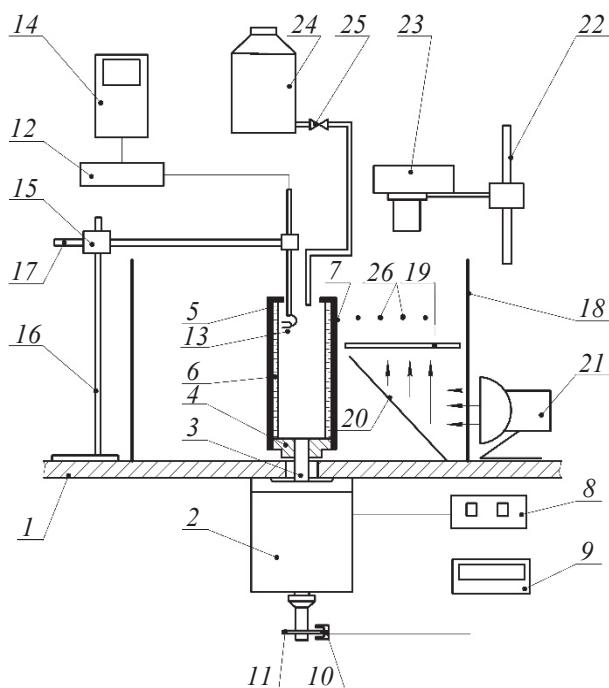


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:  
1 – горизонтальная плита; 2 – электродвигатель;  
3 – вал; 4 – ступица; 5 – цилиндр; 6 – жидкостная  
пленка; 7 – отверстие; 8 – выпрямитель;  
9 – тахометр; 10 – фотоэлектрический датчик;  
11 – диск датчика; 12 – измеритель газосодержания;  
13 – датчик; 14 – осциллограф; 15 – механизм  
перемещения датчика; 16 – штатив; 17 – микрометр;  
18 – цилиндрическая обечайка; 19 – матовое стекло;  
20 – зеркало; 21 – стробоскоп; 22 – штатив;  
23 – фотоаппарат; 24 – емкость; 25 – вентиль;  
26 – капли диспергированной жидкости

Подвод жидкости осуществлялся внутрь вращающегося стакана, отвод – через отверстие, выполненное на его боковой поверхности. Благодаря воздействию центробежных сил, возникающих при вращении, жидкость при выходе из отверстия диспергировалась и в виде капель отбрасывалась на стенку неподвижной обечайки.

Фотографирование капель проводилось при установившемся режиме истечения на разных участках между стаканом и обечайкой. При этом диаметр отверстия на стенке стакана изменялся в пределах 1,3–3,0 мм, частота вращения – 1000–2300 об/мин, диаметр стакана – 50 мм, диаметр наружного цилиндра – 300 мм. Установлено (рис. 2), что средний диаметр диспергированных капель жидкости зависит от скорости вращения стакана, а также диаметра отверстия для оттока жидкости.

Обработка большого количества экспериментальных данных показала, что зависимость

среднего диаметра капель диспергированной жидкости от указанных параметров хорошо аппроксимируется выражением

$$\bar{d} = 0,089 \left( \frac{\pi n}{30} \right)^{-0,64} \left( \frac{d_0}{D_{\text{пп}}} \right)^{0,31}, \quad (1)$$

где  $n$  – частота вращения диспергирующего цилиндра, об/мин;  $d_0$  – диаметр отверстия в цилиндре, м;  $D_{\text{пп}}$  – наружный диаметр диспергирующего цилиндра, м.

Дисперсный состав капель диспергируемой жидкости опишем с помощью обобщенного гамма-распределения [5], которое наиболее точно характеризует статистические распределения во всем диапазоне изменения размера частиц и инвариантно относительно величины порядка  $d^k$ .

Теоретические исследования и анализ экспериментальных данных позволили получить функцию распределения объемов частиц жидкости, диспергируемой вращающимся ротором:

$$F_3(d) = 4,93 \int_0^{d/\bar{d}} x^{4,5} \exp(-x^{4,5}) dx. \quad (2)$$

Полученные результаты позволяют в зависимости от нагрузок по газовой фазе, геометрических параметров роторных аппаратов, режимов их работы рассчитать дисперсный состав частиц жидкости, оценить допустимую величину уноса. Кроме того, известный дисперсный состав жидкой фазы дает возможность рассчитать величину межфазной поверхности и, следовательно, определить тепломассообменные характеристики роторных и других диспергирующих аппаратов.

Для проверки теоретических расчетов и при определении гидравлического сопротивления конструкции выполнены экспериментальные исследования. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

С помощью газодувки 1 через измерительную диафрагму 2 газовый поток поступает в корпус аппарата 3. Жидкая фаза диспергируется вращающимися перфорированными цилиндрами 4. Мелкие капли увлекаются потоком воздуха, и в брызгоуловителе 5 происходит их сепарация. Величина относительного уноса определялась по количеству уловленной жидкости. Для измерения гидравлического сопротивления применялся U-образный манометр 6.

Конструкция ротора представляет собой соосно установленные цилиндры высотой 160 мм каждый и диаметром 50, 130 и 210 мм. Суммарная площадь отверстий, расположенных в шахматном порядке, –  $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  на каждом цилиндре. Диаметр отверстий 1,5 мм.

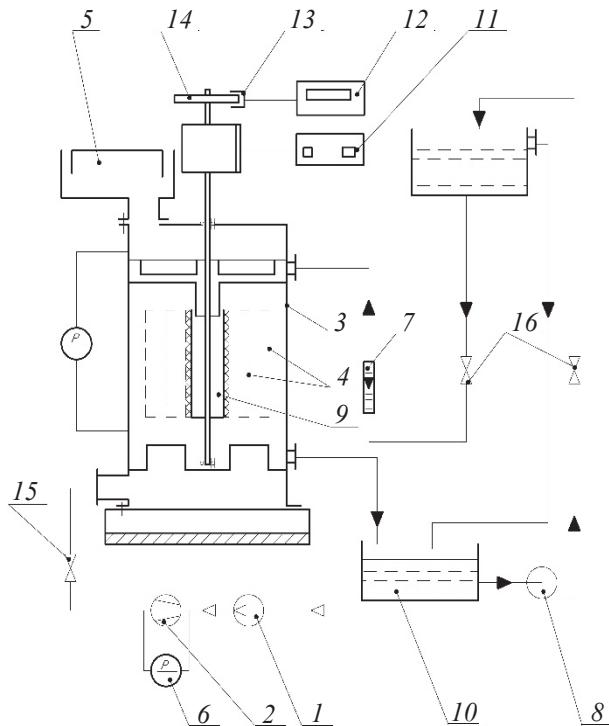


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:  
 1 – газодувка; 2 – диафрагма; 3 – корпус аппарата;  
 4 – перфорированные цилиндры; 5 – брызголовитель;  
 6 – U-образный манометр; 7 – ротаметр; 8 – насос;  
 9 – стакан; 10 – емкость; 11 – выпрямитель;  
 12 – тонометр; 13 – фотоэлектрический датчик;  
 14 – диск; 15 – задвижка; 16 – вентиль

Опыты проводились на системе «вода – воздух» в пределах изменения значений следующих параметров: плотность орошения  $q = 0,5\text{--}15,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; скорость газа по сечению аппарата  $W_z = 0\text{--}5 \text{ м/с}$ ; число оборотов ротора  $n = 500\text{--}2000 \text{ об/мин}$ ; плотность частиц  $\rho_{\text{ж}} = 800\text{--}1400 \text{ кг/м}^3$ .

Задачей диспергирования жидкости в роторном аппарате является равномерное орошение цилиндров и отсутствие ее уноса из корпуса. Анализ уноса частиц диспергированной жидкой фазы в роторном аппарате можно выполнить при оценке траектории движения частиц жидкости в пространстве между цилиндрами.

Рассмотрим вращение ротора с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Движение частиц в закрученном газовом потоке исследовано в источниках [6–9] и описывается системой дифференциальных уравнений в цилиндрической системе координат.

Анализ расчетов показывает, что изменение плотности частицы в указанных пределах не оказывает существенного влияния на изменения траектории ее движения. Высота подъема частицы уменьшается при увеличении частоты вращения ротора, так как увеличиваются ее начальные касательная и радиальная составляющие скорости. Время движения от стенки до стенки сокращается. Увеличение газовых нагрузок увеличивает

высоту подъема частиц, мелкие частицы при этом уносятся газовым потоком. Режимы работы аппарата необходимо выбирать таким образом, чтобы траектории движения частиц имели минимальное отклонение от горизонтальной плоскости. При отклонении частиц вниз нарушается равномерность орошения цилиндров, а при отклонении вверх увеличивается унос. Как в одном, так и во втором случае происходит снижение эффективности процессов массопереноса.

Обобщение выполненных расчетов при заданной нулевой радиальной скорости газового потока ( $W_r = 0$ ) и нулевом начальном значении радиальной составляющей скорости частицы ( $V_r = 0$ ) дало возможность получить расчетную осевую скорость газового потока, при которой достигается равномерное орошение цилиндров:

$$W_z = 3,96 \cdot 10^5 d^{2,1} (\omega R_i)^{0,5} (R_2 - R_1)^{-1,1}. \quad (3)$$

При различных режимах работы аппарата были выполнены оценки уноса жидкой фазы из корпуса. Из полученных результатов следует, что величина уноса жидкости растет с увеличением числа оборотов ротора и скорости газа и снижается при увеличении плотности орошения. Это значит, что основную долю составляет вторичный унос. При увеличении плотности орошения увеличивается толщина пленки жидкости на внутренних поверхностях цилиндров и капли, достигшие стенки, поглощаются пленкой. Резкое снижение уноса наблюдается при плотности орошения  $q > 6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . При этом характер зависимостей аналогичен для разных скоростей газа. Обработкой экспериментальных данных получена зависимость величины уноса жидкости от основных режимных параметров:

$$E = 1,4 \cdot 10^{-15} Re_g^{2,61} q^{-1,46} n^{1,82}, \quad (4)$$

где  $Re_g = W_z D \rho_g / \mu_g$  – число Рейнольдса;  $D$  – внутренний диаметр корпуса аппарата, м;  $\mu_g$  – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с.

Анализ величины уноса жидкости показывает, что расчетные и экспериментальные значения достаточно близки при плотности орошения  $q \geq 6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Например, при частоте вращения ротора  $n = 1000 \text{ об/мин}$ , диаметре отверстий  $d_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и диаметре диспергирующего цилиндра  $D_{\text{ц}} = 0,21 \text{ м}$  средний диаметр капель, рассчитанный по (1), равен  $1,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . При осевой скорости газа  $W_z = 2 \text{ м/с}$  теоретические исследования показывают, что уносяться будут капли диаметром менее  $(0,4\text{--}0,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Величина уноса, определенная по зависимости (4), составляет 0,7–0,8 %. Данные значения соответствуют результатам опыта. Расхождение расчетных и опытных значений при плотности орошения  $q < 6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  свидетельствует о вторичном уносе.

Измерение гидравлического сопротивления роторного аппарата в диапазоне изменения рассмотренных параметров дает низкие значения, не превышающие 500 Па, поэтому они в работе не приводятся.

**Заключение.** Вихревые аппараты позволяют существенно интенсифицировать процесс межфазного массообмена, создать гидродинамические режимы с достаточно высокими относительными скоростями частиц и несущей среды, значительными центробежными ускорениями. Пленочные и вихревые аппараты характеризуются также развитой поверхностью контакта фаз.

Разработанный метод определения дисперсности, исследование механизма и закономерностей диспергирования и взаимодействия фаз в роторном аппарате позволяют определить нагрузки по фазам, режимы работы, обеспечить равномерное орошение поверхностей частиц жидкой фазы, минимальный унос жидкости и наименьшее гидравлическое сопротивление аппарата.

Выполненные исследования могут быть применены при разработке конструкций вихревых аппаратов и исследовании процессов межфазного взаимодействия в аналогичных конструкциях.

### Список литературы

1. Кутепов А. М., Латкин А. С. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем. М.: Наука, 1992. 250 с.
2. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.; Ч. 2. 360 с.
3. Кафаров В. А., Мешалкин В. М. Анализ и синтез химико-технологических систем. М.: Химия, 1991. 431 с.
4. Роторный массообменный аппарат вентиляторного типа: пат. 2605 Респ. Беларусь / В. А. Марков, А. И. Ершов, А. А. Боровик, А. М. Волк. Опубл. 30.12.1998.
5. Волк А. М. Статистическая оценка параметров обобщенного гамма-распределения / А. М. Волк // Труды БГТУ. 2016. № 6. Физ.-мат. науки и информатика. С. 10–13.
6. Волк А. М., Терешко Е. В. Анализ сил, действующих на твердую частицу в сплошном потоке // Труды БГТУ. 2015. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 10–14.
7. Волк А. М. Тонкодисперсная сепарация жидкости // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2020. № 2 (236). С. 31–36.
8. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 176 с.
9. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. Соу. М.: Мир, 1971. 536 с.

### References

1. Kutepov A. M., Latkin A. S. *Vikhrevyye protsessy dlya modifikatsii dispersnykh sistem* [Vortex processes for the modification of disperse systems]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 250 p. (In Russian).
2. Nigmatullin R. I. *Dinamika mnogofaznykh sred: v 2 chastyakh* [Dynamics of multiphase media: in 2 parts]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Part 1. 464 p.; Part 2. 360 p. (In Russian).
3. Kafarov V. A., Meshalkin V. M. *Analiz i sintez khimiko-tehnologicheskikh sistem* [Analysis and Synthesis of Chemical-Technological Systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 431 p. (In Russian).
4. Markov V. A., Yershov A. I., Borovik A. A., Volk A. M. Rotary Mass Transfer Device of Fan Type: Patent Republic of Belarus 2605, 1998 (In Russian).
5. Volk A. M. Statistical Evaluation of the Parameters of the Generalized Gamma Distribution. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp 10–13 (In Russian).
6. Volk A. M., Tereshko E. V. Analysis of forces acting on a solid particle in a continuous stream. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 10–14 (In Russian).
7. Volk A. M. Fine-dispersed liquid separation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2020, no 2 (236), pp. 31–36 (In Russian).
8. Mednikov E. M. *Turbulentnyy perenos i osazhdeleniye aerozoley* [Turbulent transport and deposition of aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p. (In Russian).
9. Sou S. *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem* [Hydrodynamics of multiphase systems]. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p. (In Russian).

### Информация об авторе

**Волк Анатолий Матвеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: volk@belstu.by

### Information about the author

**Volk Anatoliy Matveevich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volk@belstu.by

Поступила после доработки 08.09.2022