

УДК 62–94

## Модель массопереноса в газовом пузыре в режиме развитой турбулентности

Канд. техн. наук В. В. КИСС<sup>1</sup>, канд. техн. наук Б. Ю. НОВИКОВ<sup>2</sup>, А. О. МАКАРЧЕВ

<sup>1</sup>vvkiss@yandex.ru, <sup>2</sup>novikov-bn@yandex.ru

Университет ИТМО

Канд. техн. наук Т. Т. КАВЕРЗНЕВА<sup>3</sup>

<sup>3</sup>kaverztt@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*Произведено математическое моделирование массопереноса внутри газового пузыря при осуществлении абсорбционных процессов (в частности, при абсорбционном осушении газов) в режиме развитой турбулентности, который реализуется в пенных и циклонно-пенных контактных аппаратах. Предложена модель массопереноса, в которой циркуляция компонента внутри пузыря описывается системой тороидов, что позволило учесть интенсивное перемешивание и вибрацию, влияющие на эффективность массопереноса. Разработанная модель позволяет рассчитывать коэффициент массопереноса в газовом пузыре и общую эффективность процессов абсорбции. Проведены экспериментальные исследования процесса осушения воздуха в циклонно-пенном аппарате с использованием четырех абсорбентов, отличающихся физическими свойствами. Экспериментальные исследования проводились в широком диапазоне изменения гидродинамических параметров процесса, что позволило подтвердить адекватность разработанной модели реальным процессам.*

**Ключевые слова:** массоперенос, газовый пузырь, турбулентность, циклонно-пенный.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 24.12.2019, принята к печати 19.02.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-1-108-113

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Кисс В. В., Новиков Б. Ю., Макарчев А. О., Каверзнева Т. Т. Модель массопереноса в газовом пузыре в режиме развитой турбулентности // Вестник Международной академии холода. 2020. № 1. С. 108–113.

## Model of mass transfer in a gas bubble in the mode of developed turbulence

Ph. D. V. V. KISS<sup>1</sup>, Ph. D. B. Y. NOVIKOV<sup>2</sup>, A. O. MAKARCHEV

<sup>1</sup>vvkiss@yandex.ru, <sup>2</sup>novikov-bn@yandex.ru

ITMO University

Ph. D. T. T. KAVERZNEVA<sup>3</sup>

<sup>3</sup>kaverztt@mail.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

*The purpose of this work is to develop a model of mass transfer inside a gas bubble during absorption processes (in particular, during absorption drying of gases) in the mode of developed turbulence, which is implemented in foam and cyclone-foam contact devices. A model of mass transfer is proposed, in which the circulation of the component inside the bubble is described by a system of toroids, which allowed to take into account the intensive mixing and vibration that affect the efficiency of mass transfer. The developed model allows us to calculate the mass transfer coefficient in a gas bubble and the overall efficiency of absorption processes. Experimental studies of the process of air dehumidification in a cyclone-foam apparatus using four absorbers with different physical properties. Experimental studies were carried out in a wide range of changes in the hydrodynamic parameters of the process, which allowed us to confirm the adequacy of the developed model to real processes.*

**Keywords:** mass transfer, gas bubble, turbulence, cyclone-foam.

### Article info:

Received 24/12/2019, accepted 19/02/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-1-108-113

Article in Russian

### For citation:

Kiss V. V., Novikov B. Y., Makarchev A. O., Kaverzneva T. T. Model of mass transfer in a gas bubble in the mode of developed turbulence. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 1. p. 108–113.

### Введение

Абсорбционные процессы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности, они применяются для осушения воздуха в системах технического кондиционирования. В качестве контактных аппаратов стремятся использовать наиболее эффективные. К таким аппаратам следует отнести, прежде всего, аппараты циклонно-пенного типа, в которых реализуется режим динамической пены. Данный режим обеспечивает большую, по сравнению с другими, величину поверхности контакта фаз. Проведенные исследования циклонно-пенных аппаратов показали их высокую эффективность [1, 2, 3]. Установлено, что максимальная эффективность в аппаратах данного типа достигается при скоростях газа 1,5–2,7 м/с и высоте слоя динамической пены 0,3–0,35 м. При этом были рассмотрены и другие факторы, влияющие как на эффективность процесса абсорбции, так и на энергетическую эффективность. В работе [4] было предложено оценивать общую эффективность с помощью коэффициента оптимальности. Коэффициент оптимальности учитывает наряду с эффективностью процесса абсорбции водяных паров также массогабаритные характеристики аппарата и энергетические затраты. В результате было установлено, что с учетом вышеперечисленных факторов, оптимальным режимом работы циклонно-пенных аппаратов является скорость газа 4–5 м/с и высота слоя пены — 0,3 м. При этом сохраняется устойчивый гидродинамический режим работы аппарата. Для описания процессов массо- и теплопереноса в контактных аппаратах необходимы сведения о параметрах гидродинамических режимов (величине поверхности контакта фаз, размерах газовых пузырей). Данному вопросу посвящен целый ряд работ [5]–[12]. В работах [13]–[15] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований гидродинамических характеристик циклонно-пенного аппарата, а именно величины удельной поверхности контакта фаз и среднеобъемного диаметра газовых пузырей, а также общей эффективности по Мерффри и по степени извлечения компонентов. На основании этих исследований, актуально продолжение изучения процессов массо- и теплопереноса в циклонно-пенных аппаратах при осушении газов. В литературе опубликован ряд статей по исследованию процессов массопереноса в контактных аппаратах различных конструкций [16]–[26]. К сожалению, полученные результаты не могут быть непосредственно применены к описанию процессов массопереноса в циклонно-пенных аппаратах при осушении воздуха, что объясняется рядом причин.

Процессы абсорбционного осушения газов характеризуются тем, что их кинетика целиком определяется переносом массы в дисперсной (газовой фазе), поскольку константа равновесия водяных паров над растворами абсорбентов имеет порядок величины  $10^{-2}$ . В связи с этим, сопротивлением переносу в сплошной (жидкой) фазе можно пренебречь. Таким образом, коэффициент массопередачи можно принять равным коэффициенту массопередачи в дисперсной фазе.

Это значительно затрудняет исследование процесса массообмена, так как движение среды внутри пузыря имеет весьма сложный характер, и позволяет предполо-

жить наличие интенсивного перемешивания внутри газового пузыря, в результате чего значительно возрастает скорость массо- и теплопереноса.

Вследствие этого, целью проводимого исследования является разработка математической модели массопереноса внутри газового пузыря при абсорбционном осушении воздуха и проверка ее адекватности на основании экспериментальных исследований.

### Математическая модель

В связи с тем, что скорость массопереноса в газовом пузыре в сильной степени зависит от пульсаций и интенсивного перемешивания внутри газового пузыря, представляется целесообразным разработать математическую модель переноса массы внутри пузыря, учитывающую внутренние вибрации и циркуляцию. Хандлос и Барон при исследовании экстракции из капли в жидкость предложили моделировать внутреннюю циркуляцию в капле системой тороидов [27]. Представляется целесообразным использовать аналогичную модель для описания переноса внутри газового пузыря.

На рис. 1 изображена схема циркуляции внутри газового пузыря. В отличие от модели Адамара, линии тока заменены системой тороидов. Полагаем, что в начальный момент частица расположена на окружности радиуса  $\rho$ . После одного оборота по этой окружности, являющейся линией тока, в результате турбулентной диффузии частица переместится на окружность радиуса  $\rho^1$ . При полном перемешивании за один циркуляционный период вероятность того, что частица окажется между  $\rho^1$  и  $\rho^1 + d\rho$ , равна отношению величины дифференциального объема с координатой  $\rho^1$  к полному объему тороида:

$$P(\rho^1) d\rho^1 = \frac{32\rho^1}{d^2} d\rho^1, \tag{1}$$

где  $d$  — средний диаметр газового пузыря, м.

Приведем уравнение (1) к безразмерному виду, подставив  $r = \frac{4\rho}{d}$ :

$$P(r^1) dr^1 = 2r^1 dr^1 \tag{2}$$

Отсюда площадь смещения (циркуляции):

$$z^2 = \frac{d^2 (r^1 - r)^2}{16} \tag{3}$$

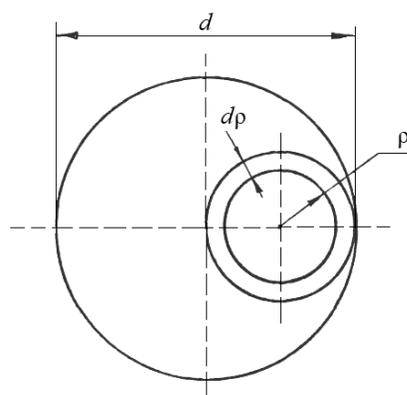


Рис. 1. Схема циркуляции внутри газового пузыря  
Fig. 1. Circulation inside a gas bubble

Математическое ожидание среднего квадратичного смещения выразится уравнением:

$$\bar{z}^2 = \int_0^1 z^2(r') P(r') dr' = \frac{d^2(6r^2 - 8r + 3)}{96} \quad (4)$$

Характеристическое время смещения, т. е. время, за которое частица обходит линию тока, находится из выражения, аналогичного полученному Кронингом и Бринком для адамаровской функции тока [3]:

$$\bar{\tau} = \frac{16d\varphi_r}{3w_r}, \quad (5)$$

где  $w_r$  — скорость газа, отнесенная к сечению аппарата, м/с.;  $\varphi_r$  — газосодержание, доли ед.

Учитывая, что процесс переноса внутри газового пузыря осуществляется путем турбулентной диффузии, коэффициент диффузии можно определить посредством уравнения Эйнштейна:

$$D_r = \frac{\bar{z}^2}{4\bar{\tau}}. \quad (6)$$

Подставив в уравнение (6) выражения (4) и (5), получим уравнение для определения коэффициента турбулентной диффузии:

$$D_r = \frac{dw_r}{2048\varphi_r} (6r^2 - 8r + 3). \quad (7)$$

Уравнение диффузии в сферической системе координат запишется следующим образом:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{16}{d^2 r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_r \cdot r \frac{\partial c}{\partial r} \right). \quad (8)$$

Если  $r=1$  —  $\gamma$ , с учетом уравнения (7), выражение (8) преобразуется к виду:

$$\frac{2048d\varphi_r}{16w_r} \frac{\partial c}{\partial \tau} = \left\{ \frac{1}{1-\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[ (1-5\gamma+10\gamma^2-6\gamma^3) \frac{\partial c}{\partial \gamma} \right] \right\}. \quad (9)$$

С граничными условиями:

$$c = c_0 \text{ при } \tau = 0, 0 \leq \gamma \leq 1$$

$$c = 0, \gamma = 0, \left( \frac{\partial c}{\partial \gamma} \right)_{\gamma=1} = 0 \text{ при } \tau > 0$$

Решение уравнения (9) легко осуществляется методом разделения переменных и принимает вид:

$$\bar{c}(\tau) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 \exp\left(-\frac{\lambda_n \tau w_r}{128d\varphi_r}\right), \quad (10)$$

где  $A_n$  — постоянный коэффициент;  $\lambda_n$  — собственное число;  $\tau$  — время контакта фаз, с.

Умножим и разделим подэкспоненциальное выражение уравнения (10) на коэффициент диффузии:

$$\bar{c}(\tau) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 \exp\left(-\frac{\lambda_n D_r \tau \cdot \text{Pe}_r}{128d^2}\right), \quad (11)$$

где критерий Пекле  $\text{Pe}_r = \frac{dw_r}{D_r \varphi_r}$ .

В результате получим уравнение для концентрации компонента в газовом пузыре в зависимости от времени, отличающееся от уравнения Хандлоса и Барона значением критерия Пекле.

Уравнение для коэффициента переноса внутри газового пузыря можно получить на основании материального баланса:

$$\frac{d c_i}{6 d \tau} = k_i (c_{i,m} - c_i), \quad (12)$$

где  $k_i$  — коэффициент массопереноса.

С учетом граничных условий уравнения (9) решение уравнения (12) имеет вид:

$$c(\tau) = \exp\left(-\frac{6k_i \tau}{d}\right). \quad (13)$$

При больших временах контакта фаз основной вклад в решение, как показали вычисления, вносит первый член ряда уравнения (11) и тогда уравнение для коэффициента переноса внутри газового пузыря будет иметь вид:

$$k_r = \frac{\lambda_1 D_r \text{Pe}_r}{6 \cdot 128d}. \quad (14)$$

В работе [27], вариационным методом определено значение числа  $\lambda_1 = 2,88$  и тогда окончательное выражение для коэффициента массопереноса внутри газового пузыря запишется в виде:

$$k_r = 0,00375 \frac{w_r}{\varphi_r}. \quad (15)$$

При уменьшении времени контакта фаз для получения надежного результата необходимо брать большое число членов ряда уравнения (11), что весьма трудоемко.

Решение, учитывающее два члена ряда, имеет вид:

$$k_r = 0,00367 \frac{w_r}{\varphi_r} + 0,075 \frac{d}{\tau}. \quad (16)$$

Анализ выражений (15) и (16) показывает, что в более точном решении значительный вклад в величину коэффициента массопереноса вносит время контакта фаз, т. е. учитывается нестационарность процесса переноса внутри газового пузыря.

Логично предположить, что при весьма малых временах контакта фаз (<1 с), имеющих место в циклонно-пенном аппарате, влияние второго слагаемого в уравнении (16) будет еще больше.

Необходимую поправку на нестационарность процесса возможно определить на основе экспериментальных исследований, путем введения в уравнение (16) постоянного коэффициента  $B$ :

$$k_r = 0,00367 \frac{w_r}{\varphi_r} + B \frac{d}{\tau}, \quad (17)$$

где  $B$  — постоянный коэффициент, учитывающий гидродинамическую обстановку в аппарате.

В настоящей модели, при определении удельной поверхности контакта фаз использовался средний поверхностно-объемный диаметр газовых пузырей, образующихся в рабочей зоне циклонно-пенного аппарата, причем принималось, что газовый пузырь имеет форму шара. Учет дисперсии пузырьков по размерам и их несферичность осуществляется постоянным коэффициентом  $B$  в уравнении (17), значение которого определено на основании проведенных экспериментальных исследований. Данный путь является наиболее целесообразным, т. к. средний поверхностно-объемный диаметр газовых пузырей, образующих поверхность контакта фаз в циклонно-пенном аппарате, колеблется от 0,0035 до 0,0091 м

в зависимости от режима работы. Исследования Р. М. Ладыженского [29] показали, что при диаметрах пузыря меньше 0,009 м их несферичность незначительна, в связи с чем ее специальный учет нецелесообразен.

Таким образом, использование среднего поверхностно-объемного диаметра пузыря вместо действительного и дисперсии по размерам является достаточно обоснованным.

Для определения значения коэффициента  $B$  были проведены экспериментальные исследования процесса осушения воздуха в циклонно-пенном аппарате, подробно описанные в работе [13]. Исследования проводились с использованием четырех абсорбентов с различными физическими свойствами — хлористый кальций, хлористый литий, бромистый литий и раствор холин-хлорида при скоростях газа от 1 до 6 м/с и высоте слоя динами-

ческой пены от 0,1 м до 0,4 м. В результате определено значение коэффициента  $B=0,235$ .

### Выводы и рекомендации

Проведенные исследования доказали адекватность разработанной математической модели массопереноса в газовом пузыре реальным процессам абсорбционного осушения газа в циклонно-пенных аппаратах. Данная модель может быть использована для расчетов аналогичных процессов в циклонно-пенных аппаратах. С целью совершенствования модели предполагается в дальнейшем провести расчеты коэффициента массопереноса с учетом более двух членов ряда. Также считаем целесообразным провести исследования продольного перемешивания в газовой фазе, которое может оказывать влияние на общую эффективность процессов массопереноса.

### Литература

1. Богатых С. А. Циклонно-пенные аппараты. Л.: Машиностроение, 1978, 223 с.
2. Воронцов Ю. С., Арсеньев В. В. Циклонно-пенный аппарат для комплексной подготовки газа // Наука. Мысль: электронный научный журнал. 2016. № 2. С. 23–27. [Электронный ресурс]: URL: [wwenews.esrae.ru/28–247](http://wwenews.esrae.ru/28–247) (дата обращения: 31.01.2020).
3. Мнушкин И. А., Вафин И. А., Сайкин В. В., Тихонов А. А. Исследование циклонных устройств дегазации и предварительного разделения газожидкостных смесей для сепарационно-разделительного оборудования установок подготовки газа // Газовая промышленность. 2019. № 51 (782). С. 94–100.
4. Кисс В. В. Оценка эффективности процессов абсорбции в циклонно-пенном аппарате // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: материалы конференции. Санкт-Петербург, 2015. С. 43–45.
5. Елисеев В. И., Луценко В. И. Вытеснение жидкостью газового пузыря из капилляра // Геотехнічна механіка. 2017. Вып. 134. С. 95–104.
6. Липнин Ю. А., Федоров А. Ю. Разработка блока генерации воздушных пузырей для исследования процессов барботирования углеводородных жидкостей // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2018. № 1. С. 80–81.
7. Мадышев И. Н., Дмитриева О. С., Дмитриев А. В. Определение размеров образующихся газовых пузырей в струйно-барботажных контактных устройствах массообменных аппаратов // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 7. С. 148–150.
8. Рева Д. А., Рыбкин К. А. Экспериментальное изучение поведения газового пузыря в вязких средах // Физика для Пермского края. Материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь, 2017. С. 129–132.
9. Cappello V. P., Vial C., Augier C. F. Bubble size and liquid-side mass transfer coefficient measurements in aerated stirred tank reactors with non-Newtonian liquids // Chemical engineering science. 2020. Vol. 211. P. 115280.
10. Nedeltchev S. Theoretical prediction of mass transfer coefficients in both gas — liquid and slurry bubble columns // Chemical Engineering Science. 2017. Vol. 157. P. 169–181.
11. Saito T., Toriu M. Effects of a bubble and the surrounding liquid motions on the instantaneous mass transfer across the gas —

### References

1. Bogatyh S. A. Cyclone-foam apparatus. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 223 p. (in Russian)
2. Vorontsov Yu. S., Arsenyev V. V. Cyclone-foam apparatus for complex gas preparation. *Nauka. Thought: electronic scientific journal*. 2016. No. 2. Pp. 23–27. [Electronic resource]: URL: [wwenews.esrae.ru/28–247](http://wwenews.esrae.ru/28–247) (accessed 31.01.2020). (in Russian)
3. Mnushkin I. A., Vafin I. A., Saikin V. V., Tikhonov A. A. Research of cyclone devices for degassing and preliminary separation of gas-liquid mixtures for separation and separation equipment of gas treatment plants. *Gas industry*. 2019. No. 51 (782). Pp. 94–100. (in Russian)
4. Kiss V. V. Evaluating the effectiveness of absorption processes in a cyclone-foam apparatus. *Low-Temperature and food technologies in the XXI century: conference proceedings*. Saint Petersburg, 2015. Pp. 43–45. (in Russian)
5. Eliseev V. I., Lutsenko V. I. the displacement of the liquid gas bubble out of the capillary. *Geotechnical mechanics*. 2017. Vol. 134. Pp. 95–104. (in Russian)
6. Lipnin Yu. A., Fedorov A. Yu. Development of air bubble generation unit for investigation of bubbling processes of hydrocarbon liquids. *Modern technologies and scientific and technical progress*. 2018. No. 1. Pp. 80–81. (in Russian)
7. Madyshev I. N., Dmitrieva O. S., Dmitriev A. V. Determining the size of formed gas bubbles in jet-bubbling contact devices of mass transfer devices. *Bulletin of the Kazan technological University*. 2015. No. 7. Pp. 148–150. (in Russian)
8. Reva D. A., Rybkin K. A. Experimental study of the behavior of a gas bubble in viscous media. *Physics for the Perm region. Materials of the regional scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*. Perm, 2017. Pp. 129–132. (in Russian)
9. Cappello V. P., Vial C., Augier C. F. Bubble size and liquid-side mass transfer coefficient measurements in aerated stirred tank reactors with non-Newtonian liquids. *Chemical engineering science*. 2020. Vol. 211. P. 115280.
10. Nedeltchev S. Theoretical prediction of mass transfer coefficients in both gas — liquid and slurry bubble columns. *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 157. P. 169–181.
11. Saito T., Toriu M. Effects of a bubble and the surrounding liquid motions on the instantaneous mass transfer across the gas — liquid interface. *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 265. P. 164–175.

- liquid interface // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 265. P. 164–175.
12. Yao C., Dong Z., Zhao Y., Chen G. Gas-liquid flow and mass transfer in a microchannel under elevated pressures. *Chemical Engineering Science*. 2015. Vol. 123. P. 137–145.
  13. Kiss V. V., Evdokimov A. A., Kaverzneva T. T., Rummyantseva N. V. Absorption air dehumidification in cyclone-foaming apparatus. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 3. p. 22–28. DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-3-22-28 (in Russian)
  14. Kiss V. V., Radionova I. E. Results of experimental studies of the size of the phase contact surface during intensive bubbling. national Association of scientists (correspondence conferences) — Eurasian Union of scientists (ESU). 2016. No. 2–4 (23). Pp. 62–64. (in Russian)
  15. Kiss V. V. Theoretical description of the value of the phase contact surface during intensive bubbling. *Scientific journal of the NIU ITMO. Series: processes and devices of food production*. 2014. No. 2 (20). Pp. 13–17. (in Russian)
  16. Dudarovskaya O. G. Efficiency of mass transfer in turbulent flow. Scientific potential of youth and technical progress materials of the II international scientific and practical conference. Saint Petersburg, 2019. p. 67. (in Russian)
  17. Zakirov M. A. On the convergence of diffusion model of Newman for the calculation of mass transfer coefficients in disperse systems. *Bulletin of the Kazan technological University*. 2015. No. 8. Pp. 203–206. (in Russian)
  18. Zakirov M. A. on the convergence of the Kronig and brink circulation model for mass transfer coefficients in dispersed systems. *Bulletin of the Kazan technological University*. 2015. No. 15. Pp. 207–210. (in Russian)
  19. Kologrivov M. M., Buzovsky V. P. Numerical simulation of heat and mass transfer in an ejection apparatus. *Engineering and physics journal*. 2016. Vol. 89, no. 1. Pp. 158–169. (in Russian)
  20. Lapteva E. A., Laptev A. G. Applied aspects of transfer phenomena in devices of chemical technology and heat power engineering (hydromechanics and heat and mass transfer). Kazan: Print-Service XXI century, 2015. 236 PP. (in Russian)
  21. Lapteva E. A., Farakhov M. M., Shagieva G. K. Determining the efficiency of heat and mass transfer in bubbling devices using a diffusion model. *Scientific research*. 2016. No. 7 (8). Pp. 6–10. (in Russian)
  22. Rudyak V. Ya., Lezhnev E. V., Lyubimov D. N. Simulation modeling of transport coefficients of rarefied gases and nanogases. *Bulletin of Tomsk state University, Mathematics and mechanics*. 2019, No. 59, pp. 105–117. (in Russian)
  23. Sabanaev I. A., Almakaeva F. M. Development of simulation models. *Bulletin of the Kazan technological University*. 2015. No. 18. Pp. 203–205. (in Russian)
  24. Khramtsov D. P., Nekrasov D. A., Karlov S. P. Modeling of the bubble mass transfer process in gel. *Mathematical methods in engineering and technology*. 2016. No. 2. Pp. 60–62. (in Russian)
  25. Lee J. Baseline Mass-Transfer Coefficient and Interpretation of Nonsteady State Submerged Bubble-Oxygen Transfer Data // *Journal of environmental engineering*. 2020. Vol. 146. N 1. P. 04019102.
  26. Yang L., Dietrich N., Loubière K., Gourdon C., Hébrard G. Visualization and characterization of gas — liquid mass transfer around a Taylor bubble right after the formation stage in microreactors. // *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 143. P. 364–368.
  13. Kiss V. V., Евдокимов А. А., Каверзнева Т. Т., Румянцева Н. В. Исследование абсорбционного осушения воздуха в циклонно-пенном аппарате // *Вестник Международной академии холода*. 2018. № 3. С. 22–28. DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-3-22-28
  14. Kiss V. V., Радионова И. Е. Результаты экспериментальных исследований величины поверхности контакта фаз при интенсивном барботаже // *Национальная ассоциация ученых (заочные конференции) — Евразийский союз ученых (ЕСУ)*. 2016. № 2–4 (23). С. 62–64.
  15. Kiss V. V. Теоретическое описание величины поверхности контакта фаз при интенсивном барботаже // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. 2014. № 2 (20). С. 13–17.
  16. Дударовская О. Г. Эффективность массопереноса в турбулентном прямотоке // *Научный потенциал молодежи и технический прогресс материалы II международной научно-практической конференции*. Санкт-Петербург, 2019. с. 67.
  17. Закиров М. А. О сходимости диффузионной модели Ньюмена для расчета коэффициентов массоотдачи в дисперсных системах // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. № 8. С. 203–206.
  18. Закиров М. А. О сходимости циркуляционной модели Кронига и Бринка для коэффициентов массопереноса в дисперсных системах // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. № 15. С. 207–210.
  19. Калогризов М. М., Бузовский В. П. Численное моделирование тепло-и массообмена в эжекционном аппарате // *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89, № 1. С. 158–169.
  20. Лантева Е. А., Лантев А. Г. Прикладные аспекты явления переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и тепломассообмен). Казань: Печать-Сервис XXI век, 2015. 236 с.
  21. Лантева Е. А., Фарахов М. М., Шагиева Г. К. Определение эффективности тепло- массообмена в барботажных аппаратах по диффузионной модели // *Научные исследования*. 2016. № 7 (8). С. 6–10.
  22. Рудяк В. Я., Лежнев Е. В., Любимов Д. Н. Имитационное моделирование коэффициентов переноса разреженных газов и наногазовзвесей // *Вестник Томского государственного университета, Математика и механика*. 2019, № 59, с. 105–117.
  23. Сабанаев И. А., Алмакаева Ф. М. Разработка имитационных моделей // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. № 18. С. 203–205.
  24. Храмов Д. П., Некрасов Д. А., Карлов С. П. Моделирование процесса массообмена пузыря в геле // *Математические методы в технике и технологиях*. 2016. № 2. С. 60–62.
  25. Lee J. Baseline Mass-Transfer Coefficient and Interpretation of Nonsteady State Submerged Bubble-Oxygen Transfer Data // *Journal of environmental engineering*. 2020. Vol. 146. N 1. P. 04019102.
  26. Yang L., Dietrich N., Loubière K., Gourdon C., Hébrard G. Visualization and characterization of gas — liquid mass transfer around a Taylor bubble right after the formation stage in microreactors. // *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 143. P. 364–368.

27. Handlos A. E., Baron T. Mass and heat transfer from drops in liquid — liquid extraction. // *Am Inst. Chem. Eng. I.*, 1957. vol. 3. No 1. p. 127–136.
28. Kroning R., Brink J. Mass and heat transfer from drops. // *Appl. Sci. Res.*, 1950, vol. A2, p. 142–148.
29. Ладыженский Р. М. Исследование движения воздушного пузырька в воде при высоких значениях Re. // *Журнал прикладной химии*, 1954. т. 27. № 1, с. 22–32.
27. Handlos A. E., Baron T. Mass and heat transfer from drops in liquid — liquid extraction. *Am Inst. Chem. Eng. I.*, 1957. vol. 3. No 1. p. 127–136.
28. Kroning R., Brink J. Mass and heat transfer from drops. *Appl. Sci. Res.*, 1950, vol. A2, p. 142–148.
29. Ladyzhensky R. M. Investigation of the movement of an air bubble in water at high Re values. *Journal of applied chemistry*, 1954. vol. 27. No. 1, pp. 22–32. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Кисс Валерий Вячеславович

К. т. н., доцент факультета пищевых биотехнологий и инженерии Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, vvkiss@yandex.ru

#### Новиков Борис Юрьевич

К. т. н., тьютор факультета пищевых биотехнологий и инженерии Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, novikov-bn@yandex.ru

#### Макарчев Андрей Олегович

Аспирант факультета пищевых биотехнологий и инженерии Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

#### Каверзнева Татьяна Тимофеевна

к. т. н., доцент Высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического Университета Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, kaverztt@mail.ru

### Information about authors

#### Kiss Valerii V.

Ph. D., Associate professor of the Faculty of Food Biotechnology and Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, vvkiss@yandex.ru

#### Novikov Boris Yu.

Ph. D., Tutor of the Faculty of Food Biotechnology and Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, novikov-bn@yandex.ru

#### Makarchev Andrey O.

Graduate student of the Faculty of Food Biotechnology and Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

#### Kaverzneva Tatiana T.

Ph. D., Associate Professor of the Higher school of technosphere safety of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251. St. Petersburg. Politekhnikeskaya, 29, kaverztt@mail.ru



# ЭНЕРГЕТИКА и ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**Выставка энергетического, электротехнического и светотехнического оборудования и технологий  
27–29 апреля 2020 г.**

#### Тематические направления выставочной экспозиции:

- ✓ Электроэнергетика;
- ✓ Теплосбережение;
- ✓ Автоматизированные системы управления технологическими процессами;
- ✓ Системы и средства измерения и контроля;
- ✓ Программное обеспечение;
- ✓ Энергоэффективные и энергосберегающие технологии и оборудование;
- ✓ Безопасность энергообъектов;
- ✓ Исследования и разработки.

#### Организатор:

Выставочное объединение «РЕСТЭК ®»  
Тел.: +7 (812) 320 6363  
Факс: +7 (812) 320 8090  
E-mail: main@restec.ru

#### Место проведения:

КВЦ «Экспофорум», павильон F  
Санкт-Петербург, Петербургское шоссе, 64/1  
**Подробная информация на сайте:**  
<http://energetika-restec.ru/>