

УДК 628.84

## Моделирование гидродинамических процессов в орошаемой проволочной насадке

Д-р техн. наук А. В. ЦЫГАНКОВ<sup>1</sup>, А. ХИЛДАЯТИ<sup>2</sup>, А. А. СЕРОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>tsygaav@hotmail.com, <sup>2</sup>hildayati.annisa@mail.ru, <sup>3</sup>serov\_sasha@bk.ru

Университет ИТМО

*Рассмотрен подход к математическому моделированию гидродинамических процессов в хаотичном насадочном слое, сформированном из проволоки. Эквивалентная насадка представлена в виде единичного плоского канала или совокупности цилиндрических каналов. Геометрические размеры каналов определяются из условий равенства доли свободного объема, площади поверхности раздела фаз и напор-расходных характеристик модельных каналов и сухого насадочного слоя. Рассмотрено противоточное ламинарное движение жидкой пленки и газа. Толщина пленки определяется из условия равенства скоростей жидкости и газа на границе раздела фаз. Приведено решение для линеаризованной модели движения жидкости и газа в эквивалентных каналах, которое сводится к системе трех нелинейных уравнений.*

**Ключевые слова:** насадка, эквивалентный канал, пленка жидкости, ламинарный режим.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 31.03.2020, принята к печати 29.04.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-31-36

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Цыганков А. В., Хилдаяти А., Серов А. А. Моделирование гидродинамических процессов в орошаемой проволочной насадке // Вестник Международной академии холода. 2020. № 2. С. 31–36.

## Modeling of hydrodynamic processes in an irrigated wire nozzle

D. Sc. A. V. TSYGANKOV<sup>1</sup>, A. HILDAYATI<sup>2</sup>, A. A. SEROV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>tsygaav@hotmail.com, <sup>2</sup>hildayati.annisa@mail.ru, <sup>3</sup>serov\_sasha@bk.ru

ITMO University

*An approach to the mathematical modeling of hydrodynamic processes in a chaotic packed layer formed from a wire is considered. The equivalent nozzle is presented in the form of a single flat channel or a combination of cylindrical channels. The geometric dimensions of the channels are determined from the equality conditions of free volume fraction, the surface area of the interface, and the pressure-flow characteristics of the model channels and the dry packed layer. The countercurrent laminar motion of a liquid film and gas is considered. The film thickness is determined from the condition that the liquid and gas velocities are equal at the phase boundary. A solution is given for a linearized model of liquid and gas motion in equivalent channels, which is reduced to a system of three nonlinear equations.*

**Keywords:** nozzle, equivalent channel, liquid film, laminar movement mode.

### Article info:

Received 31/03/2020, accepted 29/04/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-31-36

Article in Russian

### For citation:

Tsygankov A. V., Hildayati A., Serov A. A. Modeling of hydrodynamic processes in an irrigated wire nozzle. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 2. p. 31–36.

### Введение

В системах кондиционирования воздуха широкое применение находят насадочные теплообменные аппараты. К достоинствам таких устройств относятся: простота конструкции, удобство обслуживания, небольшая мощность насосов орошения, незначительная масса аппаратов.

В увлажнителях и абсорберах орошаемые насадки используются для увлажнения, фильтрации и дезодорирования приточного воздуха, в градирнях — для охлаждения воды [1]–[3]. Адиабатные процессы массообмена проходят при взаимодействии воздуха с поверхностью, которая смачивается водой. Основным требованием, предъявляемым к насадкам, является высокая удельная

площадь поверхности при малом гидравлическом сопротивлении

Насадки могут иметь либо регулярную структуру, если поверхность каналов имеет заранее заданную геометрическую форму, либо нерегулярную структуру, если поверхность создается из хаотично расположенных волокон (нитей), которые сформированы в отдельные блоки. В зависимости от используемого для изготовления насадки материала они разделяются на металлические, керамические, пластмассовые, стеклянные, стеклопластиковые и др.

### Постановка задачи

Существующие инженерные методы расчета теплообменных процессов в насадочных аппаратах, являются полуэмпирическими и основаны на вычислении коэффициентов гидравлического сопротивления по критериальным зависимостям, полученным в результате обобщения экспериментальных данных [4]–[6]. Отсутствие достаточного объема экспериментальных данных для насадок из новых материалов приводит к необходимости использовать методы расчета, обеспечивающих получение приближенных, качественных оценок.

При разработке любых моделей насадок в качестве характерного размера используется диаметр. Модели эквивалентного канала изотропного пористого материала рассматриваются в работах [7]–[9]. Под эквивалентным каналом понимается либо единичная плоская щель, либо совокупность нескольких цилиндрических каналов. Для любой модели обеспечивается равенство доли свободного объема и поверхности раздела фаз реальной и модельной насадок. В зависимости от решаемых задач и моделируемых процессов, могут выдвигаться дополнительные условия, например, эквивалентности массы, гидравлического сопротивления и т.п. Общим является требование совпадения количества варьируемых геометрических характеристик канала и параметров эквивалентности.

### Математическая модель

Рассмотрим насадку, изготовленную из проволоки (нити) имеющей постоянную площадь поперечного сечения по всей длине. Будем полагать заданными:  $M_n$  — масса сухой насадки;  $F_n$  — площадь поперечного сечения насадки;  $H_n$  — высота насадки;  $d_p$  — диаметр проволоки;  $\rho_p$  — плотность материала проволоки.

Длина проволоки в насадке —  $l_p$ , площадь поверхности проволоки —  $s_p$ , объем проволоки в насадке —  $V_p$  вычисляются по формулам:

$$l_p = \frac{4M_n}{\pi d_p^2 \rho_p};$$

$$s_p = l_p \pi d_p;$$

$$V_p = l_p s_p.$$

Удельная доля свободного объема —  $\varepsilon$  и удельная поверхность раздела фаз —  $\alpha$ , отнесенные к объему сухой насадки вычисляются по формулам:

$$\alpha = \frac{s_p}{H_n F_n}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{V_p}{H_n F_n}.$$

Из сформулированных условий эквивалентности размеры модельного плоского канала составляют

$$h_m = \varepsilon \frac{H_n F_n}{L_m H_m}; \quad (1)$$

$$L_m = \alpha \frac{H_n F_n}{2 H_m}, \quad (2)$$

где  $h_m$  — расстояние между стенками модельного канала;  $L_m$  — длина канала;  $H_m$  — высота канала.

Толщина стенок канала  $t_m$  — определяется из условия равенства массы проволоки в насадке и массы стенок канала.

$$M_n = 2 L_m H_m t_m \rho_p. \quad (3)$$

Если известны только геометрические характеристики насадки  $\alpha$  и  $\varepsilon$ , то размеры канала вычисляются по формулам (1), (2), а высота канала принимается равной высоте насадки  $H_m = H_n$ .

Если в результате натуральных экспериментальных исследований определена зависимость расхода воздуха от градиента давления в сухой насадке, то ширина  $h_m$  вычисляется из условия эквивалентности напор-расходных характеристик в насадке и модельном канале. Экспериментальную напор-расходную характеристику представим в виде линейной зависимости

$$Q_n = k \Delta P_n, \quad (4)$$

где  $Q_n$  — объемный расход воздуха через насадку;  $\Delta P_n$  — перепад давления в направлении движения воздушного потока;  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Изменение скорости по ширине плоского канала (по оси  $y$ ) [10]–[12]

$$u = \frac{1}{2\mu_v} \frac{\partial P}{\partial y} (h_m^2 - x^2).$$

Расход воздуха через поперечное сечение канала

$$Q_m = 2 \int_0^{h_m/2} u L_m dx = \frac{h_m^3 L_m}{12\mu_v} \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (5)$$

где  $\mu_v$  — динамический коэффициент вязкости воздуха.

Разделив расход на площадь поперечного сечения канала и полагая, что давление изменяется линейно, получим формулу для средней расходной скорости

$$u_m = \frac{h_m^2 \Delta P_n}{12\mu_v H_m}.$$

Основная формула для расчета перепада статического давления в канале

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_v (u_m)^2}{4} \frac{H_m}{h_m}, \quad (6)$$

где  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho_v$  — плотность воздуха.

Для ламинарного режима движения в плоском канале

$$\xi = \frac{96}{Re}.$$

Число Рейнольдса  $Re = \frac{2u_m h_m}{\nu_v}$ ;  $\nu_v$  — кинематический коэффициент вязкости воздуха.

После подстановки в (4) выражений (5) или (6) получим формулу для вычисления ширины плоского эквивалентного канала

$$h_m = \sqrt[3]{\frac{12H_m k \mu_v}{L_m}} \quad (7)$$

Рассмотрим модель, представляющую собой совокупность одинаковых цилиндрических каналов. По аналогии с изложенным выше, условия эквивалентности имеют вид

$$\alpha H_n F_n = \pi n_m d_m H_m; \quad (8)$$

$$\varepsilon H_n F_n = \frac{1}{4} \pi n_m (d_m)^2 H_m; \quad (9)$$

$$M_n = \pi n_m d_m H_m t_m \rho_p, \quad (10)$$

где  $n_m$  — количество каналов;  $d_m$  — диаметр канала.

Распределение скорости по сечению круглого канала [4].

$$u = \frac{1}{4\mu_v} \frac{\partial P}{\partial y} (r_m^2 - r^2),$$

где  $r_m$  — радиус канала,  $r$  — текущий радиус.

Расход воздуха и осредненная по расходу скорость потока в цилиндрическом канале вычисляются по формулам

$$Q_m = \frac{\pi d_m^4}{128\mu_v} \frac{\partial P}{\partial y};$$

$$u_m = \frac{4Q_m}{\pi(d_m)^2} = \frac{d_m^2}{32\mu_v} \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления в цилиндрическом канале

$$\xi = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64 v_v}{u_m d_m}.$$

После подстановки в (5) формулы (15) получим

$$d_m = \sqrt[3]{\frac{128 H_m k \mu_v}{\alpha F_n}}; \quad (11)$$

$$n_m = \frac{\alpha F_n}{\pi d_m}.$$

Таким образом, решение уравнений (1)–(3) и (7) позволяет найти геометрические параметры плоского эквивалентного канала, а решение системы уравнений (8)–(11) геометрические размеры эквивалентной модели, представляющей собой совокупность цилиндрических каналов.

Анализ показывает, что в плоском канале максимальная скорость воздуха на 25% ниже чем в цилиндрическом, поэтому с учетом аналогии процессов переноса теплоты, массы и импульса, процессы конвективного теплопереноса протекают в цилиндрическом канале более интенсивно. Можно предположить, в экспериментальные характеристики этих процессов находятся между расчетными результатами, полученными на представленных выше эквивалентных моделях.

Рассмотрим модель движения жидкости стекающей под действием силы тяжести по насадке и противоточное движение воздуха. Будем считать известными: геометрические параметры насадки, давление воздуха на входе в насадку —  $P_1$  давление воздуха на выходе из насадки —  $P_0$ . Схема движения жидкости и воздуха в эквивалентном канале насадки показана на рис. 1.

Установившееся ламинарное движение вязкой несжимаемой жидкости по поверхности плоского канала под действием силы тяжести описывается уравнением

$$\mu_l \frac{d^2 v_l}{dx^2} + \frac{dP}{dy} - \rho_l g = 0$$

где  $\mu_l$  — динамический коэффициент вязкости жидкости;  $v_l = v_l(x)$  — скорость движения жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\rho_l$  — плотность жидкости,  $\frac{dP}{dy} \approx \frac{(P_1 - P_0)}{H_m}$ .

Граничные условия для уравнения движения жидкости:

$$v_l = \begin{cases} 0, & \text{при } x = 0 \\ v_H, & \text{при } x = \delta \end{cases}$$

Здесь  $v_H$  — скорость на границе раздела сред;  $\delta$  — толщина слоя жидкости.

После интегрирования получим выражение [8]:

$$v_l = \left[ \frac{(P_1 - P_0)}{H_m} - \rho_l g \right] \frac{1}{2\mu_l} (\delta x - x^2) + \frac{v_H x}{\delta} \quad (12)$$

Ламинарное движение воздуха в канале, ограниченном пленкой жидкости описывается уравнением

$$\mu_g \frac{d^2 v_g}{dx^2} - \frac{dP}{dy} = 0,$$

где  $\mu_g$  — динамический коэффициент вязкости воздуха;  $v_g$  — скорость воздуха.

В качестве граничных условий примем условие симметрии потока воздуха по ширине канала и скорость на границе раздела сред

$$\frac{d v_g}{dx} = 0, \text{ при } x = 0; \quad v_g = v_H, \text{ при } x = \pm \frac{h}{2}.$$

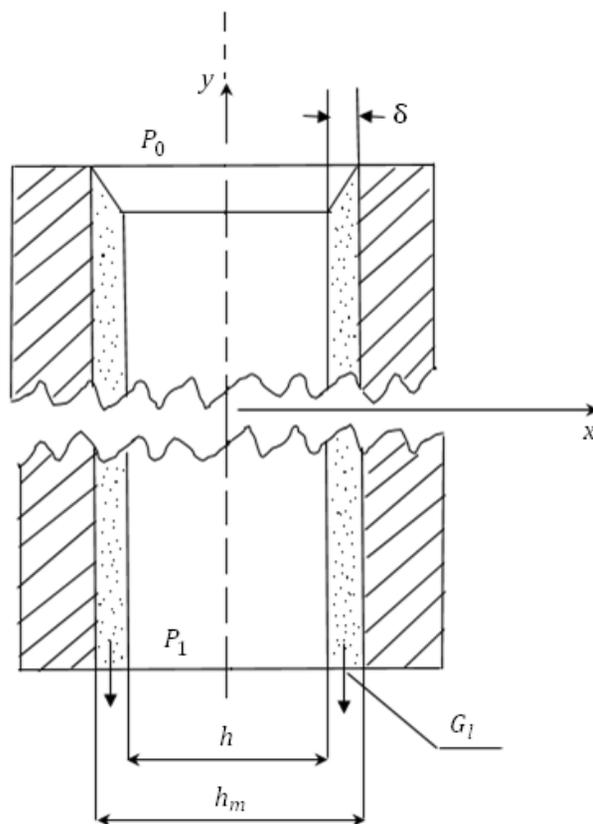


Рис. 1 Схема движения жидкости и воздуха в плоском канале  
Fig. 1 Scheme of liquid and air movement in a flat channel

После интегрирования уравнения движения воздуха получим

$$v_g = \frac{(P_1 - P_0)}{2\mu_g H_m} \left( \frac{h^2}{4} - x^2 \right) + v_H. \quad (13)$$

В уравнения (12) и (13) входит скорость на границе раздела сред, которая определяется из условия сплошности

$$\left. \frac{dv_l}{dx} \right|_{x=\delta} = \left. \frac{dv_g}{dx} \right|_{x=\frac{h}{2}}$$

После дифференцирования и подстановки вычислим скорость  $v_H$

$$v_H = \frac{h\delta}{2\mu_g} \frac{(P_1 - P_0)}{H_m} + \left[ \frac{(P_1 - P_0)}{H_m} - \rho_l g \right] \frac{\delta^2}{2\mu_l}.$$

Проинтегрировав уравнения (12) и (13) по толщине потока жидкости и воздуха соответственно получим формулы для расчета расходов жидкости и воздуха.

$$G_l = \left[ \frac{(P_1 - P_0)}{H_m} - \rho_l g \right] \frac{L\delta^3}{6\mu_l} + v_H L \delta. \quad (14)$$

$$G_g = \frac{(P_1 - P_0)}{96H_m} \frac{Lh^3}{\mu_g} - Lv_H h.$$

В том случае, если расход жидкости известен, скорость  $v_H$  может быть вычислена непосредственно из уравнения (14). При большом перепаде давления, и, следовательно, высокой скорости движения воздуха возникает торможение жидкой пленки, что может привести к выносу ее из канала.

Рассмотрим модель цилиндрических эквивалентных каналов (рис. 2).

Введем обозначения  $R = \frac{h_m}{2}$  — внутренний радиус канала;  $R_1 = (R - \delta)$  — радиус воздушного канала.

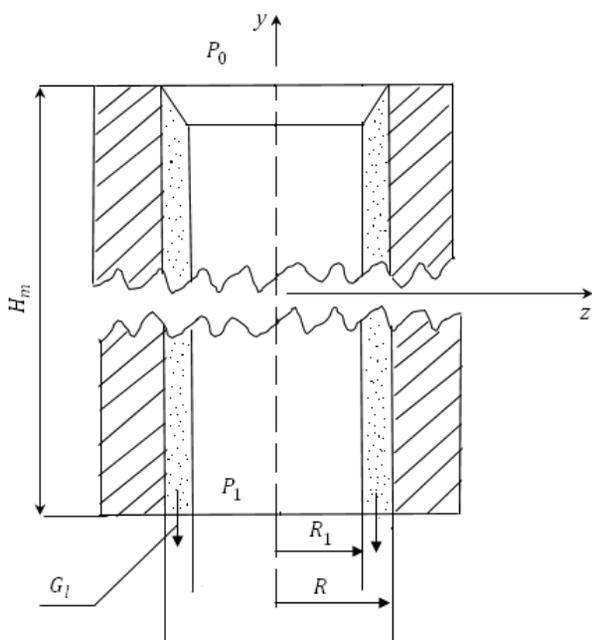


Рис. 2. Схема движения жидкости и воздуха в цилиндрическом канале

Fig. 2. Scheme of liquid and air movement of in a cylindrical channel

В цилиндрической системе координат  $(y, r)$  уравнение движения пленки жидкости имеет вид

$$\mu_l \frac{1}{r} \left( r \frac{dv_l}{dr} \right) + \frac{dP}{dy} - \rho_l g = 0.$$

Граничные условия для уравнения (15)

$$v_l = \begin{cases} 0, & \text{при } r = R \\ v_H, & \text{при } r = R_1. \end{cases}$$

После интегрирования с учетом граничных условий получим

$$v_l = - \frac{1}{4\mu_l \ln \frac{R}{R_1}} \left( \frac{dP}{dy} - \rho_l g \right) \left[ (R^2 - R_1^2) \ln \frac{r}{R_1} - (r^2 - R_1^2) \ln \frac{R}{R_1} \right] + \left( 1 - \frac{r - R_1}{R - R_1} \right) v_H. \quad (15)$$

Если толщина слоя жидкости значительно меньше радиуса, т.е.  $\delta \ll R$  формула (15) существенно упрощается. Обозначим  $x = r - R_1$  и разложим логарифмы в ряды Тейлора.

$$\ln \frac{r}{R_1} = \ln(1 + x/R_1) = \frac{x}{R_1} - \frac{1}{2} \frac{x^2}{R_1^2} + \frac{1}{6} \frac{x^3}{R_1^3};$$

$$\ln \frac{R}{R_1} = \ln(1 + \delta/R_1) = \frac{\delta}{R_1} - \frac{1}{2} \frac{\delta^2}{R_1^2} + \frac{1}{6} \frac{\delta^3}{R_1^3}.$$

Подставив ряды в (15) и, отбрасывая члены высшего порядка малости, получим

$$v_l = - \frac{1}{2\mu_l} \left( \frac{dP}{dy} - \rho_l g \right) \left[ \delta x - x^2 \right] + \left( 1 - \frac{x}{\delta} \right) v_H. \quad (16)$$

Расход жидкости определяется как интеграл скорости потока по толщине слоя

$$G_l = 2\pi R_1 \int_0^\delta v_l dx. \quad (17)$$

После подстановки (16) в (17) получим

$$G_l = 2\pi R_1 \delta \left[ \left( \frac{dP}{dy} - \rho_l g \right) \frac{\delta^2}{6\mu_l} - v_H \right].$$

Окончательно с учетом того, что  $\frac{dP}{dy} \approx \frac{(P_1 - P_0)}{H_m}$  общий расход через все цилиндрические каналы модели

$$G_l = 2\pi R_1 \delta n_m \left[ \left( \frac{P_1 - P_0}{H_m} - \rho_l g \right) \frac{\delta^2}{6\mu_l} - v_H \right].$$

В том случае, если скорость  $v_l$  определяется по формуле (15), интеграл в (17) вычисляется по методу Симпсона.

Установившееся ламинарное движение вязкой несжимаемой жидкости по поверхности цилиндрического канала описывается уравнением

$$\mu_g \frac{1}{r} \left( r \frac{dv_g}{dr} \right) + \frac{dP}{dy} = 0. \quad (18)$$

с граничными условиями

$$\left. \frac{dv_g}{dr} \right|_{r=0} = 0, \text{ при } r = 0; v_g = v_H, \text{ при } r = R_1.$$

После интегрирования (18) и определения постоянных интегрирования получим.

$$v_g = \frac{1}{4\mu_g} \frac{dP}{dy} (R_1^2 - r^2) - v_H.$$

Объемный расход воздуха вычисляется по формуле

$$G_g = \int_0^{R_1} 2\pi v_g r dr = \frac{\pi R_1^4}{8\mu_g} \frac{dP}{dy} - \pi R_1^2 v_H.$$

Общий расход через все цилиндрические каналы модели

$$G_g = \left[ \frac{\pi R_1^4 (P_1 - P_0)}{8\mu_g H_m} - \pi R_1^2 v_H \right] n_m.$$

Аналогично тому как это было показано для плоского канала, вычисление скорости на границе раздела сред проводится из условия сплошности

$$\left. \frac{dv_g}{dr} \right|_{r=R_1} = \left. \frac{dv_g}{dr} \right|_{r=R_1}.$$

### Литература

1. Шпилин Д. И., Пронин В. А. Повышение эффективности очистки и дезодорации газозвушных выбросов пищевых предприятий в орошаемых колоннах насадочного типа с полимерной насадкой // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 4 (22). С. 195–203.
2. Экологические проблемы мегаполисов и промышленных агломераций: учеб. пособие / М. А. Пашкевич, М. Ш. Баркан, Ю. В. Шариков и др. СПб., 2010. 202 с.
3. Майоров В. А. Запахи их восприятие, воздействие, устранение. М.: Мир, 2006. 366 с.
4. Зиганшин М. Г., Колесник А. А., Посохин В. Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. М.: Экопресс-3М, 1998. 505 с.
5. Каган А. М., Пушинов А. С. Сравнительные характеристики насадок для процессов тепло- и массообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 4. с. 5–7.
6. Каган А. М., Чиж К. В. и др. Аэродинамика миникольцевых насадок. Энергосбережение и водоподготовка, 2010. № 6. с. 42–45.
7. Лантев А. Г. Фарахов М. М. Разделение гетерогенных систем в насадочных аппаратах. Казань: Казан. гос. энергетический. ун-т, 2006. 342 с.
8. Tsygankov A. V., Kuznetsov Y. L., Dolgovskaia O. V., Hildayati A., Shilin A. S. Hydrodynamic calculation of spray wire packing // AIP Conference Proceedings. 2019, Vol. 2141, pp. 030023.
9. Цыганков А. В., Пронин В. А., Шпилин Д. И., Аleshin А. Е. Гидродинамический расчет орошаемой колонны с пористыми насадочными телами // Вестник Международной академии холода. 2014. № 2. С. 34–36.
10. Kutateladze S. S. Heat transfer and hydrodynamic resistance. Academic Press, New York, 1993.
11. Loitsyanskii L. G. Mechanics of Liquids and Gases. Pergamon Press, 1966.
12. Targ S. M. Основные задачи теории ламинарных течений. М. ГИЗ Технико-теоретической литературы, 1951. С. 420.
13. Tayfun E. Tezduyar. Interface-tracking and interface-capturing techniques for finite element computation of moving boundaries and interfaces // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2006. No 195. P. 2983–3000.
14. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. No 39, P. 201–225.

### Заклучение

Необходимо отметить, что представленная математическая модель не ориентирована на расчет расходов воздуха, воды и толщины жидкой пленки на рабочей поверхности реального технического объекта. Модель позволяет оценить влияние варьируемых параметров проволочных насадок (удельная площадь раздела фаз, доля свободного объема, плотность материала проволоки и т.п.) на основные гидродинамические характеристики. Приведенный инженерный метод расчета не требует значительных вычислительных ресурсов и может быть использован на начальных этапах проектирования или в качестве первого приближения для расчетов методами вычислительной гидродинамики [13]–[16].

### References

1. Shpilin D. I., Pronin V. A. Increase in efficiency of cleaning and deodorization of air-gas emissions of the food entities in the irrigated columns of nozzle type with a polymeric nozzle. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2014. No 4 (22). p. 195–203. (in Russian)
2. Environmental problems of megalopolises and industrial agglomerations: education guidance / M. A. Pashkevich, M. Sh. Barkan, Yu. V. Sharikov ets. SPb., 2010. 202 p. (in Russian)
3. Maiorov V. A. Smells their perception, influence, elimination. Moscow, Mir, 2006. 366 p. (in Russian)
4. Ziganshin M. G., Kolesnik A. A., Posohin V. N. Proektirovanie apparatov pyilegazoochistki. Moscow. Ekopress-3M, 1998. 505 p. (in Russian)
5. Kagan A. M., Pushnov A. S. Comparative characteristics of nozzles for heat and mass transfer processes. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2008. No 4, pp. 5–7. (in Russian)
6. Kagan A. M. Chizh K. V. Aerodynamics of mini-ring attachments. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2010. No 6, pp. 42–45. (in Russian)
7. Laptev A. G. Farahov M. M. Separation of heterogeneous systems in nozzles. Kazan: 2006. 342 p. (in Russian)
8. Tsygankov A. V., Kuznetsov Y. L., Dolgovskaia O. V., Hildayati A., Shilin A. S. Hydrodynamic calculation of spray wire packing. *AIP Conference Proceedings*. 2019, Vol. 2141, pp. 030023.
9. Tsygankov A. V., Pronin V. A., Shpilin D. I., Aleshin A. E. Hydrodynamic calculation of an irrigated column with porous packed bodies. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2014. No. 2. P. 34–36. (in Russian)
10. Kutateladze S. S. Heat transfer and hydrodynamic resistance. Academic Press, New York, 1993. (in Russian)
11. Loitsyanskii L. G. Mechanics of Liquids and Gases. Pergamon Press, 1966. (in Russian)
12. Targ S. M. The main tasks of the theory of laminar flows. Moscow. 1951. P. 420. (in Russian)
13. Tayfun E. Tezduyar. Interface-tracking and interface-capturing techniques for finite element computation of moving boundaries and interfaces. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2006. No 195. P. 2983–3000.
14. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*. 1981. No 39, P. 201–225.

15. Gubaidullin A. Comments on liquid film atomization on wall edges separation criterion and droplets formation model. // *J. Fluids Engineering*. 2007. No 129. P. 665–666.
16. Grinfeld P. Exact nonlinear equations for fluid films and proper adaptations of conservation theorems from classical hydrodynamics // *Geometry and Symmetry in Physics*. 2009. No 16. P. 1–21.
15. Gubaidullin A. Comments on liquid film atomization on wall edges separation criterion and droplets formation model. // *J. Fluids Engineering*. 2007. No 129. P. 665–666.
16. Grinfeld P. Exact nonlinear equations for fluid films and proper adaptations of conservation theorems from classical hydrodynamics. *Geometry and Symmetry in Physics*. 2009. No 16. P. 1–21.

### Сведения об авторах

#### Цыганков Александр Васильевич

Д.т. н., профессор факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, tsygaav@hotmail.com

#### Хилдаяти Анниса

Аспирант факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, hildayati.annisa@mail.ru

#### Серов Александр Алексеевич

Аспирант факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Serov\_sasha@bk.ru

### Information about authors

#### Tsygankov Alexander V.

D. Sc., Professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, tsygaav@hotmail.com

#### Hildayati Annisa

Postgraduate student of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, hildayati.annisa@mail.ru

#### Serov Alexander A.

Postgraduate student of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, serov\_sasha@bk.ru



**24–26 февраля 2021 г.**

**АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ ЮГА РОССИИ** – это специализированный форум, направленный на демонстрацию сельскохозяйственной техники, оборудования и материалов для производства и переработки сельхозпродукции.

#### РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ «ИНТЕРАГРОМАШ»:

- Сельскохозяйственная техника и запчасти
- Автоматизация

#### РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ «АГРОТЕХНОЛОГИИ»:

- Растениеводство
- Оборудование для хранения и переработки сельхозпродукции
- Животноводство
- Оборудование для животноводства
- Услуги для АПК

#### В ПРОГРАММЕ ФОРУМА:

- Проведение в рамках форума ежегодного Аграрного конгресса юга России, в рамках которого проходит три большие тематические конференции, посвященные вопросам растениеводства, животноводства и с/х технике.
- Проведение предпосевного совещания для муниципальных районов области с участием Губернатора РО.
- Презентации и демонстрации от участников форума.

#### Организатор:

КВЦ «ДонЭкспоцентр», тел.: (863) 268-77-68

#### Место проведения:

КВЦ «ДонЭкспоцентр»  
г. Ростов-на-Дону, пр. М. Нагибина, 30

#### Руководитель проекта – Демченко Алла

Тел.: (863) 268-77-14

E-mail: [inter@donexpocentre.ru](mailto:inter@donexpocentre.ru)

<http://www.interagromash.net/index.html>