

УДК 504.064

doi:10.23968/2305–3488.2017.21.3.171–184

Цыганков А. В., Пронин В. А., Шпилин Д. И.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДЕЗОДОРАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

UDC 504.064

doi:10.23968/2305–3488.2017.21.3.171–184

TSYGANKOV A. V., PRONIN V. A., SHPILIN D. I.

OPTIMIZATION OF THE DEODORIZATION PROCESS IN THE DESIGN OF LIFE SUPPORT SYSTEMS**Аннотация**

Рассмотрена математическая модель противоточного ламинарного движения жидкости и газа в скруббере с хаотичной укладкой насадочных тел. Слой насадки представлен в виде эквивалентного канала, размеры которого зависят от удельной поверхности и доли свободного объема насадки. Сформулирована оптимизационная задача, позволяющая на начальном этапе проектирования найти геометрические и режимные параметры работы абсорбера, обеспечивающие высокую эффективность дезодорации при соблюдении комплекса конструктивных и технологических ограничений. Предложено оценивать гидродинамический режим работы насадки по величине скорости на границе раздела фаз. В качестве целевой функции рассматривались энергетические затраты на движение жидкости и воздуха. Эффективность полученного решения оценивалось на основании гидродинамической аналогии переноса массы и импульса в модели. Тестирование модели показало зависимость сходимости итерационного процесса от области определения варьируемых переменных целевой функции и параметров настройки эволюционного метода решения оптимизационной задачи.

Abstract

A mathematical model of the counter flow laminar motion of liquid and gas in a scrubber with chaotic packing of packed bodies is considered. The nozzle layer is presented in the form of a narrow channel whose dimensions depend on the specific surface area and the fraction of the free volume of the nozzle. The optimization problem is formulated allowing at the initial design stage to find the geometric and mode parameters of the absorber operation, ensuring its maximum efficiency while observing a set of design and technological limitations. It is proposed to evaluate the hydrodynamic operation mode of the nozzle in terms of the speed at the interface. As an objective function, the energy costs for the movement of fluid and air were considered. The efficiency of the solution obtained was estimated on the basis of the hydrodynamic analogy of mass and momentum transfer in the model. The testing of the model showed the dependence of the convergence of the iterative process on the domain of determining the variable variables of the objective function and the tuning parameters of the evolutionary method for solving the optimization problem.



Ключевые слова: абсорбер, эквивалентный канал, оптимизация, энергетический метод, гидродинамическая аналогия.

Авторы

Цыганков Александр Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой. «Кондиционирование воздуха»

Университет ИТМО.

Тел.: +7 (921) 955 36 20,

E-mail: pallada-ltd@infopro.spb.su

Пронин Владимир Александрович

доктор технических наук, профессор, заведующий каф. «Инженерное проектирование» Университет ИТМО.

Тел.: +7 (921) 938 35 75,

E-mail: maior.pronin@mail.ru.

Шпилин Дмитрий Игоревич

аспирант

Университет ИТМО.

Тел.: +7 (921) 983 54 34,

E-mail: shpilinspb@gmail.com

Keywords: absorber, equivalent channel, optimization, power method, hydrodynamic analogy.

Authors

Aleksandr Vasil'evich Tsygankov

Doctor of technical science, Professor Head at Department. of Air conditioning» University ITMO

Tel.: +7 (921) 955 36 20,

E-mail: pallada-ltd@infopro.spb.su

Vladimir Aleksandrovich Pronin

Doctor of technical science, Professor Head at Department. of Engineering design University ITMO

Tel.: +7 (921) 938 35 75,

E-mail: maior.pronin@mail.ru.

Dmitrij Igorevich Shpilin

postgraduate student

University ITMO

Tel.: +7 (921) 983 54 34,

E-mail: shpilinspb@gmail.com

Введение

Промышленное производство и другие виды хозяйственной деятельности сопровождаются выделением веществ, загрязняющих воздушную среду. По мере развития техники и совершенствования технологических процессов появляются новые виды загрязнителей, выбрасываемых в атмосферу. Для того чтобы поддерживать качество воздуха на уровне, соответствующем санитарным требованиям, выбросы в атмосферу должны очищаться не только от аэрозольных загрязнений, но и от различных газов и паров, даже малая концентрация которых оказывает существенное влияние на здоровье и самочувствие людей. Особенно остро эта проблема стоит в районах, расположенных близко от очистных сооружений систем канализации и полигонов твердых бытовых отходов. Дезодорация больших объемов атмосферного воздуха является актуальной задачей для систем жизнеобеспечения современных мегаполисов. Для решения этой задачи традиционно используются процессы физической абсорбции и хемосорбции, реализуемые в орошаемых насадочных скрубберах. Перспективным направлением повышения эффективности

воздухоочистки является применение насадок из пористых полимерных и композитных материалов изготовленных по технологии экструдирования полимерных нитей с регулируемой плотностью укладки [8; 9]. Насадочные тела из таких материалов имеют малую плотность, высокую химическую стойкость и смачиваемость, могут изготавливаться в виде отдельных тел или блоков с заданной структурой пористости.

Увеличение эффективности воздухоочистки при использовании пористых материалов обусловлено молекулярной диффузией абсорбируемых веществ в поры насадочных тел, заполненных абсорбентом. Согласно двухпленочной модели абсорбции [10; 12] увеличение объема жидкой фазы приводит к уменьшению концентрации растворенного абсорбата на границе раздела фаз, что увеличивает движущую силу абсорбции.

Задачи и методы исследования

Существующие методы расчета абсорберов, являются полуэмпирическими и базируются на вычислении коэффициентов конвективной диффузии и гидродинамического сопротивления по уравнениям вида $Nu = aRe^n Pr^m$, где Nu , Pr , Re диффузионные и гидродинамические критерии Нуссельта, Прандтля и Рейнольдса [2; 5]. Эти зависимости были получены в результате обобщения экспериментальных и эксплуатационных данных для различных типов упорядоченных и хаотичных насадок из колец Паля, Рашига, седел Берля и пр. [3; 4]. Отсутствие достаточного объема экспериментальных данных для абсорберов систем дезодорации с насадками из новых материалов приводит к необходимости использовать на начальных стадиях проектирования методы расчета гидродинамических процессов в двухфазных средах, обеспечивающие получение приближенных, качественных оценок влияния на эффективности воздухоочистки структуры насадки при режимах работы характерных для систем дезодорации.

Разработка новых или модернизация существующих инженерных систем всегда является многовариантной задачей, которая заключается в поиске оптимального технического решения. Сложность оптимизации связана с неоднозначностью выбора целевой функции, большим числом варьируемых параметров и ограничений. Традиционный подход к поиску проектного решения заключающийся в выборе базового варианта и последовательного перебора возможных вариантов требует значительных затрат времени, а конечный результат во многом зависит от традиций и предыдущего опыта проектировщика. Поэтому представляется целесообразным использовать на начальных этапах расчетные модели, построенные на фундаментальных законах сохранения и исходно ориентированных на решение формальной



оптимизационной задачи. Результаты разработки такой модели с учетом особенностей систем дезодорации представлены ниже.

Результаты исследования

Сформулируем оптимизационную задачу для орошаемого противоточного насадочного абсорбера системы дезодорации. Будем считать известными величинами: площадь поперечного сечения насадки – S , м^2 , расход воздуха через абсорбер – G_g , $\text{м}^3/\text{с}$, давление воздуха на выходе – P_o , Па. Примем, что градиент давления по высоте колонны величина постоянная, все процессы массопереноса стационарные и изотермические, раствор абсорбента и газ – ньютоновские жидкости, воздух идеальный газ. Необходимо определить давление воздуха на входе в насадку – P_1 , Па, расход абсорбента – G_p , $\text{м}^3/\text{с}$, высоту насадки – H , м, удельную поверхность насадки – α , $\text{м}^2/\text{м}^3$ и долю свободного объема насадки – ε , которые обеспечивают заданный расход воздуха и максимальную эффективность газоочистки при соблюдении ряда технологических и конструктивных ограничений.

При использовании практически любых моделей насадочных слоев он представляется как совокупность параллельных вертикальных каналов, эквивалентный диаметр которых определяется по удельной поверхности и доле свободного объема моделируемой насадки [15; 16]. Альтернативной моделью является узкий канал, поверхность и объем которого равны поверхности и свободному объему насадки. Принципиальной разницы между моделями нет, но щелевая модель представляется предпочтительной, т. к. полученные по ней расчетные зависимости несколько проще, что становится значимым для задач оптимизации решаемых эволюционными методами вычислений.

Рассмотрим насадку из насадочных тел с регулярной или хаотичной укладкой. Удельная поверхность насадки и доля ее свободного объема вычисляются по формулам:

$$\alpha = \frac{M p_b}{\rho_b W S_b} = \frac{\rho_n S_b}{\rho_b W_b},$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{M}{W \rho_b} = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_b}$$

где $W = SH$ – объем насадки, $M = W p_n$ – масса сухой насадки, ρ_n – плотность сухой насадки, ρ_b – плотность материала насадочного тела, S_b – площадь поверхности насадочного тела, W_b – объем насадочного тела.

Расчетная модель, показанная на рис.1, представляет собой узкий канал, по стенкам которого стекает жидкая фаза.

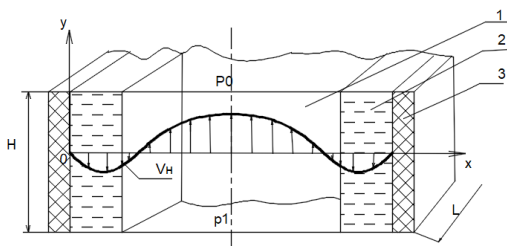


Рис.1 Расчетная модель: 1 – воздух, 2 – жидкость, 3 – пористая стенка.

Очищаемый воздух под действием избыточного давления на входе в насадку поднимается вверх. Длина L и ширина проходного сечения h определяются из условия равенства поверхности и свободного объема в насадке и расчетной модели.

$$2LH = \alpha W, \quad LhH = \varepsilon W,$$

$$L = \frac{1}{2} \alpha S, \quad h = \frac{2\varepsilon}{\alpha}.$$

Отличительной особенностью абсорберов систем дезодорации является низкая скорость воздуха, малая плотность орошения и большая поверхность раздела фаз. Это позволяет в первом приближении принять допущение о ламинарном режиме движения газа и жидкости, о правомерности которого можно судить исходя из того, что по данным приведенным в [15] началу турбулентного режима газа соответствует $Re = 40 - 50$, а полностью развитый режим наступает при $Re > 2000$.

Стационарное ламинарное движение вязкой жидкости по поверхности стенки в общем случае описывается уравнением [13]

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

где μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, $v_l = v_l(x)$ – скорость движения жидкости, g – ускорение свободного падения. С учетом принятого допущения о постоянстве градиента давления по высоте насадки



$$\frac{dP}{dy} = \frac{P_0 - P_1}{L}.$$

Введем обозначение $A = -\frac{P_0 - P_1}{L} - \rho_l g$, тогда уравнение принимает вид

$$\mu_l \frac{d^2 v_l}{dx^2} + A = 0. \quad (1)$$

Граничные условия для уравнения (1)

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

Здесь V_H – скорость на границе раздела сред, δ – толщина слоя жидкого абсорбента.

После интегрирования (1) и определения постоянных интегрирования получим

$$\begin{aligned} \mu_l v_l + A \frac{x^2}{2} - \frac{\mu_l v_H}{\delta} x - A \frac{\delta}{2} x &= 0 \\ v_l &= \frac{A}{2\mu_l} (\delta x - x^2) + \frac{v_H x}{\delta} \end{aligned} \quad (2)$$

Для определения расхода жидкости (абсорбента) в канале проинтегрируем уравнение по толщине слоя

$$\begin{aligned} G_l &= 2L \int_0^{\delta} v_l dx \\ G_l &= 2L \left(\frac{A\delta^3}{12\mu_l} + \frac{v_H \delta}{2} \right) = \frac{AL\delta^3}{6\mu_l} + v_H L \delta \end{aligned} \quad (3)$$

Ламинарное движение воздуха в канале с учетом принятых допущений описывается уравнением

$$\mu_g \frac{d^2 v_g}{dx^2} - \frac{dP}{dy} = 0, \quad (4)$$

где μ_g – динамический коэффициент вязкости воздуха, V_g – скорость воздуха. Перенесем начало координат на ось симметрии модели. В качестве граничных условий примем условие симметрии потока воздуха по ширине канала и скорость на границе раздела сред

$$\frac{d v_g}{dx} = 0 \quad \text{при } x = 0$$

$$v_g = v_H \quad \text{при } x = \pm \frac{\xi}{2}.$$

Здесь $\xi = h - 2\delta$, ширина канала между пленками.

После интегрирования уравнения (4) с учетом обозначения $B = -\frac{dP}{dy}$

получим

$$\mu_g v_g + B \frac{x^2}{2} - \mu_g v_H - B \frac{\xi^2}{4} = 0$$

$$v_g = \frac{B}{2\mu_g} \left(\frac{\xi^2}{4} - x^2 \right) + v_H$$

(5)

Расход воздуха в канале

$$G_g = 2L \int_0^{\frac{\xi}{2}} v_g dx$$

$$G_g = \frac{BL\xi^3}{96\mu_g} + Lv_H\xi$$

(6)

Из (6) найдем перепад давления в насадке,

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \frac{96H\mu_g}{\xi^2} (\bar{v}_g - v_H),$$

где $\bar{v}_g = \frac{G_g}{L\xi}$ – осредненная по расходу скорость воздуха.

Запишем полученную зависимость через коэффициент трения $\lambda = \frac{96}{Re}$,

$$Re = \frac{(\bar{v}_g - v_H)\rho_g \xi}{\mu_g}$$

где λ – число Рейнольдса.

$$\Delta P = \frac{\lambda H \rho_g}{\xi} (\bar{v}_g - v_H)^2$$

(7)



Дополним уравнения (3) и (7) условием сплошности на границе раздела сред

$$\left. \frac{dv_l}{dx} \right|_{x=\delta} = \left. \frac{dv_g}{dx} \right|_{x=-\frac{\xi}{2}} \quad (8)$$

После дифференцирования уравнений (2) и (5) и вычисления производных при и получим.

После подстановки этих равенств в (8) вычислим скорость движения границы раздела сред

$$\frac{B\xi}{2\mu_g} = \frac{v_H}{\delta} - \frac{A\delta}{2\mu_l},$$
$$v_H = \frac{B\xi\delta}{2\mu_g} + \frac{A\delta^2}{2\mu_l}$$

Соотношение расходов жидкости и воздуха, поступающих в абсорбер, должно обеспечивать эффективный гидравлический режим работы насадки. Из рис.1 видно, что этот режим определяется скоростью потоков на границе раздела сред. При небольших скоростях движения воздуха влияние газового потока на скорость стекания жидкой пленки незначительно. В этом режиме,

$$\frac{dv_H}{dx} \approx 0, v_H < 0$$

который принято называть пленочным, . Увеличение скорости газа приводит к увеличению сил трения на поверхности контакта фаз и торможению жидкости газовым потоком. Вследствие этого скорость течения пленки уменьшается, а ее толщина и количество жидкости, удерживаемой в насадке увеличиваются. В этом режиме торможения (подвисания)

выполняются условия $\frac{dv_H}{dx} > 0, v_H < 0$ (этот режим показан на рис. 1). Пределом увеличения скорости газа в насадочных колоннах является условие при котором наступает режим уноса, или обращенного движения жидкости, т. е.

$$\frac{B\xi\delta}{2\mu_g} + \frac{A\delta^2}{2\mu_l} < 0. \quad (9)$$

Опыт эксплуатации аппаратов газоочистки показывает, что их эффективность в основном определяется энергетическими затратами. В работах [5; 14] предлагается в качестве оценки эффективности использовать зависимость

$$\eta = 1 - \exp(-k_1 E^{k_2})$$

где E – энергетические затраты, $k_1 \geq 1$, $k_2 \geq 1$ – эмпирические коэффициенты зависящие от конструктивных и технологических характеристик оборудования. Если пренебречь потерями энергии в магистралях и вспомогательном оборудовании, то энергетические затраты в рассматриваемой модели связаны только с преодолением сил трения между стенками, жидкостью и воздухом. Тогда $k_1 = k_2 = 1$, а энергия тратится только на сжатие воздуха до давления P_1 и подъем жидкости на высоту насадки H .

$$E = E(P_1, G_l, H, \alpha, \varepsilon) = P_1 G_g + H g G_l = \text{extr} \tag{10}$$

Таким образом, гидродинамический расчет сводится к поиску максимума целевой функции (10) при выполнении равенств (3), (6) и условия (9). С учетом конструктивных и технологических характеристик абсорбера в расчет могут вводиться дополнительные условия и ограничения, например,

$$\frac{G_l}{G_g} \geq [q_l], \quad HL\delta\rho_l \leq [M_l], \quad P_1 \leq [P_1], \quad H \leq [H].$$

Здесь $[q_l]$, $[M_l]$, $[P_1]$, $[H]$ допустимые значения удельного расхода раствора абсорбента, массы жидкости в насадке, давления на входе, высоты насадки соответственно.

Решение оптимизационных задач такого типа проводится эволюционными методами [1; 11], которые исходно ориентированы на поиск глобального экстремума целевой функции. Необходимо учитывать возможность локальных экстремумов, которые близки к глобальному, но существенно отличаются от него по набору варьируемых параметров, поэтому анализ вариантов таких решений необходимо считать обязательным элементом алгоритма решения задачи.

Эффективность полученного решения можно оценить, используя гидродинамическую аналогию переноса массы и импульса [6; 7]. Запишем уравнения сохранения массы и массоотдачи абсорбируемого компонента для элемента поверхности канала $dF = 2Ldy$. Т. к. концентрация абсорбируемых газов в системах дезодорации мала, то можно принять, что интенсивность массообменного процесса по высоте насадки постоянная, поэтому

$$J = G_g dy, \\ J = \beta(C_\infty - C_H)dF$$

где J – удельный поток абсорбируемого газа к поверхности пленки, β – коэффициент массоотдачи, C_∞ – концентрация абсорбируемого газа в ядре потока (на оси симметрии канала), C_H – концентрация на границе раздела



фаз. Т. к. левые части уравнений одинаковы, то

$$G_g dy = \beta(C_\infty - C_H)dF \quad (11)$$

После интегрирования (11) по всей поверхности канала получим

$$\int_{C_1}^{C_0} \frac{dy}{C_\infty - C_H} = \frac{\beta F}{G_g}$$

где $F = 2LH$ – площадь поверхности канала, C_1 – концентрация абсорбируемого газа на входе в канал, C_0 – концентрация на выходе из канала

$$\int_{C_1}^{C_0} \frac{dy}{C_\infty - C_H} = N$$

В теории массообмена величину называют числом единиц переноса.

Для газов гидродинамические и диффузионные числа Прандтля близки к единице, поэтому используя гидродинамическую аналогию можно принять , где – коэффициент переноса импульса к поверхности канала. Тогда

$$N = \frac{\gamma F}{G_g} \quad (12)$$

Уравнение баланса сил для газа во всем канале имеет вид

$$\tau_H F = \Delta P S \quad (13)$$

где τ_H – касательное напряжение на поверхности канала. Касательное напряжение можно определить из уравнения сохранения импульса

$$\tau_H = \gamma \rho_g (v_{g0} - v_H) \quad (14)$$

где v_{g0} – скорость воздуха на оси канала. Из уравнения (5) при получим

$$v_{g0} = \frac{B}{8\mu_g} + v_H$$

Из уравнений (13), (14) найдем

$$\gamma = \frac{\Delta P S}{F \rho_g (v_{g0} - v_H)}$$

После подстановки в (12) получим

$$N = \frac{\Delta PS}{G_g \rho_g (v_{g0} - v_H)} = \frac{8 \Delta PS \mu_g}{B G_g \rho_g \xi^2}$$

Эффективность дезодорации связана с числом единиц переноса выражением [2; 15]..

$$\eta = \frac{C_1 - C_0}{C_1} = 1 - \exp(-N)$$

Выводы

Тестовые расчеты по представленной модели проводились в пакете Excel с использованием надстройки «Поиск решения». Тестирование показало работоспособность модели и существенную зависимость сходимости итерационного процесса от области определения варьируемых переменных целевой функции и параметров настройки эволюционного метода решения оптимизационной задачи.

В заключении необходимо отметить, что предлагаемая расчетная модель не ориентирована на поиск оптимального проектного решения для реального технического объекта. Модель не учитывает большого числа факторов, влияющих на эффективность дезодорации: различный характер течения газовой и жидкой фаз на различных типах насадок, смачиваемость материала насадочных тел, капиллярные эффекты в пористых материалах и пр. Модель позволяет оценить влияние варьируемых параметров, технических и технологических ограничений на процесс дезодорации на начальных этапах проектирования систем жизнеобеспечения.

Литература

1. Емельянов, В. В., Курейчик, В. В., Курейчик, В. М. (2003). Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, с. 432.
2. Зиганшин, М. Г., Колесник, А. А., Посохин, В. Н. (1998). Проектирование аппаратов пылегазоочистки. М.: «Экопресс-3М», 505 с.
3. Каган, А. М., Пушнов, А. С. (2008). Сравнительные характеристики насадок для процессов тепло- и массообмена. Химическое и нефтегазовое машиностроение, №4, с. 5–7.
4. Каган, А. М., Чиж, К. В. и др. (2010). Аэродинамика миникольцевых насадок. Энергосбережение и водоподготовка, № 6, с. 42–45.
5. Лаптев, А. Г. Фарахов, М. М. (2006). Разделение гетерогенных систем в насадочных аппаратах. Казань: Казан. гос. энергетический. ун-т, 342 с.
6. Лаптева, Е. А., Лаптев, А. Г. (2016). Определение коэффициентов тепло- и массоотдачи от частиц на основе развития гидродинамической аналогии. Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире, № 14-1, с. 61–66.



7. Лаптев, А. Г., Башаров, М. М., Рунов, Д. М. (2015). Определение коэффициентов теплоотдачи в каналах с элементами интенсификации. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, № 3-3, с. 311–315.
8. Пронин, В. А., Утин, А. В. (2012). Насадочный скруббер. Патент на полезную модель RU 113170.
9. Пронин, В. А., Утин, А. В. (2013). Насадочный скруббер. Патент на полезную модель RU 125877.
10. Романков, П. Г., Фролов, В. Ф., Флисюк, О. М. (2011). *Массообменные процессы химической технологии*. М.: Химиздат, 448 с.
11. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. (2008). *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы*. М.: Наука, 452 с.
12. Сугак, Е. В., Войнов, Н. А., Николаев, Н. А. (1999). Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. Казань: РИЦ «Школа», с. 340.
13. Тарг, С. М. (1951). *Основные задачи теории ламинарных течений*. М.: ГИТТЛ, 420 с.
14. Ужов В.Н. и др. (1981) Очистка промышленных газов от пыли. М.: Химия, с 265.
15. Фарахов М. М., Лаптев А. Г. (2014) Метод эквивалентного канала в моделировании массопереноса в хаотичных насадочных слоях. *Фундаментальные исследования*, №9, с. 2148-2152.
16. Цыганков А. В., Пронин В. А., Шпилин Д.И. Алешин А.Е. (2014) Гидродинамический расчет орошаемой колонны с пористыми насадочными телами. *Вестник МАХ*, № 2, с. 34-36.

References

1. Emelyanov, V. V., Kureychik, V. V., Kureychik, V. M. (2003). *Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya* [Theory and practice of evolutionary modeling]. М.: Fizmatlit, 432 p.
2. Ziganshin, M. G., Kolesnik A.A., Posohin V.N. (1998). *Proektirovanie apparatov pyilegazoochistki* [Designing devices for cleaning gases from dust]. М.: «Ekopress-3M», 505 p.
3. Kagan, A. M., Pushnov, A. S. (2008). *Sravnitelnyie harakteristiki nasadok dlya protsessov teplo- i massoobmena* [Comparative characteristics of nozzles for heat and mass transfer processes]. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, № 4, pp. 5–7.
4. Kagan, A. M. Chizh, K. V. (2010). Aerodinamika minikoltsevyih nasadok [Aerodynamics of mini-ring attachments]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, № 6, pp. 42–45.
5. Laptev, A. G. Farahov, M. M. (2006). *Razdelenie geterogennyih sistem v nasadochnyih apparatah* [Separation of heterogeneous systems in nozzles]. Kazan: Kazan. gos. energeticheskiy. un-t., 342 p.
6. Lapteva, E. A., Laptev, A. G. (2016). *Opreделение koeffitsientov teplo- i massootdachi ot chastits na osnove razvitiya gidrodinamicheskoy analogii* [Determination of the coefficients of heat and mass transfer from particles on the basis of the development of the hydrodynamic analogy]. *Fundamentalnyie i prikladnyie issledovaniya v sovremennom mire*, No 14-1, pp. 61–66.
7. Laptev, A. G., Basharov, M. M., Runov, D. M. (2015). *Opreделение koeffitsientov teplootdachi v kanalah s elementami intensivatsii* [Determination of heat transfer coefficients in channels with intensification elements]. *Mezhdunarodnyiy zhurnal prikladnyiy i fundamentalnyiy issledovaniy*, No 3-3, p. 311–315.
8. Pronin, V. A., Utin, A. V. (2012) *Nasadochnyy skrubber*. Patent na poleznuyu model [Filler scrubber. Patent for utility model]. RU 113170.
9. Pronin, V. A., Utin, A. V. (2013). *Nasadochnyy skrubber*. Patent na poleznuyu model [Filler scrubber. Patent for utility model]. RU 125877.
10. Romankov, P. G., Frolov, V. F., Flisyuk, O. M. (2011). *Massoobmennyye protsessy himicheskoy tehnologii* [Mass exchange processes of chemical technology]. М.: Himizdat, 448 p.

11. Rutkovskaya, D., Pilinskiy, M., Rutkovskiy, L. (2008). *Neyronnyie seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. M.: Nauka, 452 p.
12. Sugak, E. V., Voynov, N. A., Nikolaev, N. A. (1999). *Ochistka gazovyih vyibrosov v apparatah s intensivnyimi gidrodinamicheskimi rezhimami* [Purification of gas emissions in devices with intensive hydrodynamic regimes]. Kazan, RITs «Shkola», p. 340.
13. Targ, S. M. (1951) *Osnovnyie zadachi teorii laminarnyih techeniy* [The main problems of the theory of laminar flows]. M.: GITTL, p. 420.
14. Uzhov, V. N. (1981). *Ochistka promyshlennyih gazov ot pyili* [Cleaning of industrial gases from dust]. M.: Himiya, 265 p.
15. Farahov, M. M., Laptev, A. G. (2014). Metod ekvivalentnogo kanala v modelirovanii massoperenosa v haotichnyih nasadochnyih sloyah [Equivalent channel method in modeling mass transfer in chaotic packing layers]. *Fundamentalnyie issledovaniya*, №9, pp. 2148–2152.
16. Tsyigankov, A. V., Pronin, V. I., Shpilin, D. I., Aleshin, A. E. (2014). *Gidrodinamicheskiy raschet oroshaemoy kolonny s poristyimi nasadochnyimi telami* [Calculation of hydrodynamics for spray tower wits porous packing]. *Vestnik MAH*, No 2, p. 34-36.