



Моделирование процессов опреснения воды в комбинированной водоподготовительной установке

Р.А.Садыков¹, А.К. Мухаметзянова¹, Л.Р.Джунусова², А.А.Елеманова²

²Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань,
Российская Федерация

³Алматинский университет энергетики и связи, г.Алматы,
Республика Казахстан

Аннотация: Обеспечение населения РФ качественной хозяйственно-питьевой воды является для многих климатических режимов страны одной из приоритетных проблем, так как 16,8 % проб водопроводной воды не соответствует нормативам по химическим показателям, а 20 % населения потребляет воду без требуемой предварительной очистки, комплексное решение которой необходимо для сохранения здоровья, улучшения условий деятельности и повышения условий жизни населения.

Целью исследования является физико-математическое описание процессов переноса по обессоливанию грунтовых вод в комбинированной ультра- и нанофильтрационной водоподготовительной установке, используемой для систем водо- и теплоснабжения. Задачами исследования являются корректная формализация математической модели процессов массопереноса в комбинированной водоподготовительной установке и получение аналитических замкнутых решений краевых задач нестационарного диффузионного переноса для кусочно-однородных сред при различных условиях однозначности и нестационарных, несимметричных граничных условиях на поверхностях контакта неоднородных сред, а также анализ полученного обобщенного аналитического решения краевых задач математической модели комбинированной водоподготовительной установки при различных начальных и граничных условиях.

Основные результаты исследования состоят в том, что авторами была формализована математическая модель процесса очистки грунтовых вод и краевая задача математической модели процессов опреснения воды в комбинированной водоподготовительной установке, и найдены аналитические замкнутые решения краевых задач нестационарного молекулярного переноса для кусочно-однородных сред при различных исходных условиях однозначности и неустановившихся, несимметричных граничных условиях на поверхностях контакта двух неоднородных сред. Полученные аналитические решения формализованной математической модели позволяют путём нахождения экстремальных значений изменения концентрации взвешенных частиц от независимых переменных оптимизировать процессы очистки воды в теплоэнергетических установках, могут быть тестовыми задачами для более сложных нелинейных краевых задач процессов тепло- и массопереноса. Для масштабных переходов разработанную математическую модель можно переписать в безразмерном виде, как изменение относительной концентрации от массообменного критерия Фурье.

В работе получены аналитически замкнутые решения краевых задач нестационарного диффузионного переноса для кусочно-однородных сред при различных условиях однозначности и нестационарных краевых условиях на поверхностях контакта различных однородных сред, применяемые к процессам водоочистки систем теплоснабжения. Для масштабных переходов (от экспериментальной к промышленной установке) постановку и решения подобных краевых задач можно записать в критериальном виде, как изменение относительной концентрации от массообменного критерия Фурье.

Значимость полученных результатов состоит в том, что полученные аналитические решения краевых задач позволяют оптимизировать процессы очистки воды в комбинированной водоподготовительной установке и могут быть тестовыми краевых задач при численном решении более сложных нелинейных краевых задач несвязанного и взаимосвязанного тепло- и массопереноса, а оптимальные значения аналитических

решений краевых задач могут быть использованы в АСУТП при выборе энергоресурсосберегающих режимов управления.

Ключевые слова: питьевая вода, фильтрация, установка, математическая модель, краевая задача, дифференциальное уравнение, условия.

Для цитирования: Р.А.Садыков, А.К. Мухаметзянова, Л.Р.Джунусова, А.А.Елеманова
Моделирование процессов опреснения воды в комбинированной водоподготовительной
установке//Известия КГАСУ 2022, №1(59), С 80-89. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_80

Simulation of water desalination processes in a combined water treatment plant

R.A.Sadykov¹, A.K. Mukhamezianova¹, L.R. Junusova², A.A.Elemanova²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan,
Russian Federation

²Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty,
Kazakhstan

Abstract: The aim of the study is a physical and mathematical description of the transfer processes for desalting groundwater in a combined ultra- and nanofiltration water treatment plant used for water and heat supply systems. The objectives of the study are the following: correct formalization of the mathematical model of mass transfer processes in a combined water treatment plant; obtaining analytical closed solutions of boundary value problems of unsteady diffusion transfer for piecewise-homogeneous media under various conditions of uniqueness and unsteady, asymmetric boundary conditions on the contact surfaces of inhomogeneous media; and analysis of the obtained generalized analytical solution of boundary value problems of a mathematical model of a combined water treatment plant under various initial and boundary conditions.

The main results of the study are that the authors formalized a mathematical model of the groundwater treatment process and a boundary value problem of a mathematical model of water desalination processes in a combined water treatment plant, and found analytical closed solutions to boundary value problems of unsteady molecular transfer for piecewise homogeneous media under various initial conditions of uniqueness and unsteady, asymmetric boundary conditions on the contact surfaces of two inhomogeneous media. The obtained analytical solutions of the formalized mathematical model make it possible to optimize the processes of water purification in heat power plants by finding the extreme values of the change in the concentration of suspended particles from independent variables. The analytical solutions can be test problems for more complex nonlinear boundary value problems of heat and mass transfer processes. For large-scale transitions, the developed mathematical model can be rewritten in dimensionless form, as a change in the relative concentration from the Fourier mass transfer criterion.

In this work, analytically closed solutions of boundary value problems of unsteady diffusion transfer for piecewise homogeneous media are obtained under various conditions of uniqueness and unsteady boundary conditions on the contact surfaces of various homogeneous media, which are applied to the processes of water purification of heat supply systems. For large-scale transitions (from an experimental to an industrial installation), the formulation and solution of such boundary value problems can be written in a criterion form, as a change in the relative concentration from the Fourier mass transfer criterion. The significance of the obtained results lies in the fact that the obtained analytical solutions of boundary value problems make it possible to optimize the processes of water treatment in a combined water treatment plant and can become test boundary value problems in the numerical solution of more complex nonlinear boundary value problems of unconnected and interconnected heat and mass transfer. Optimal values of analytical solutions of boundary value problems tasks can be also used in the process control system when choosing energy-saving control modes.

Keywords: drinking water, filtration, plant, mathematical model, boundary value problem, differential equation, conditions.

For citation: R.A. Sadykov, A.K. Mukhamezianova, L.R. Junussova, A.A. Elemanova Simulation of water desalination processes in a combined water treatment plant//News KSUAE 2022, №1 (59), С 80-89. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_80

1. Введение

Во многих актуальных прикладных краевых задачах (КЗ) молекулярного переноса (диффузии, теплопроводности, фильтрации) для кусочно-однородных сред (КОС) приходится иметь дело с граничными условиями (ГУ), когда потенциалы переноса (концентрация, влагосодержание, температура, давление) субстанции на границе контакта различных слоев являются некоторой заданной функцией времени. В этом случае ГУ для следующего слоя неоднородно и нестационарно. В силу условия сопряжения КОС оно является ГУ для потенциала переноса на отрезке следующего (отличного от предыдущего) однородного слоя. Аналитические решения подобных нестационарных КЗ применены для формализации математических моделей (ММ) процессов опреснения питьевой воды на ультрафильтрационной наномембранной комбинированной водоподготовительной установке (КПВУ) в системах водо- и теплоснабжения населенных мест и производственных объектов [1-14].

Для более полного физического представления математического описания процессов массопереноса в КПВУ технологические схемы этих установок рассмотрены в [5-10].

Анализ литературного обзора показал, что остается не решенной проблема корректной формализации математической модели процессов массопереноса в комбинированных водонагревательных установках, а также получение и обобщение аналитического решения краевых задач этих математических моделей.

С учетом результатов данного анализа, целью исследования является физико-математическое описание процессов переноса по обессоливанию грунтовых вод в КПВУ, используемой для систем водо- и теплоснабжения.

Задачами исследования являются:

-Корректная формализация ММ процессов массопереноса в КПВУ.

-Получение аналитических замкнутых решений КЗ нестационарного диффузионного переноса для КОС при различных условиях однозначности и нестационарных, несимметричных ГУ на поверхностях контакта неоднородных сред.

-Анализ полученного обобщенного аналитического решения КЗ ММ КПВУ при различных начальных и граничных условиях.

2. Материалы и методы

Математическую модель (ММ) процессов опреснения грунтовой воды на ультрафильтрационной наномембранной КПВУ систем водо- и теплоснабжения можно представить как решение краевой задачи (КЗ) молекулярной диффузии для КОС, когда концентрация вещества $C(x, \tau)$ на границе контактирующих слоев фактически является некоторой заданной функцией времени $\mu(\tau)$, т.е. является решением КЗ для предыдущего слоя при заданной его длине или в толщине $C(l, \tau) = \mu(\tau)$, и которое в силу ГУ «склеивания» служит начальным нестационарным ГУ для концентрации на отрезке следующего однородного слоя.

ММ процесса фильтрации неочищенной жидкости можно рассмотреть, как решение двух сопряженных КЗ. В физической постановке, в первой - исходной нестационарной КЗ, рассматривается процесс молекулярной диффузии, протекающий в непроницаемой трубе ($\nabla C = 0$) с внутренним диаметром d и длиной $l \gg d$, в которой заданы жидкая среда с коэффициентом диффузии (D_1) и начальной концентрацией коллоидных взвешенных частиц $C_1(x, \tau_0) = \varphi(x)$. Во второй КЗ, сопрягаемой с исходной КЗ ГУ $C(l, \tau) = \mu(\tau)$, а на отрезке трубы $x > l$ диффундирующего вещества нет [$C_2(x, \tau_0) = 0$] и этот отрезок непроницаемой трубы заполнен средой (слоем адсорбента,

мембраны или абсорбента) с коэффициентом диффузии D_2 [10]. На границе $x=l$ находится непроницаемая заслонка (затвор), которая при $\tau=\tau_0$ открывается и при заданном расходе жидкости начинается молекулярный массоперенос, в течении которого определяется поле концентраций $C(x,\tau)$ взвешенных частиц для $x > 0$ [11-14].

Математически поставленную КЗ можно формализовать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{i\tau} = D_i C_{ixx}, \quad i = \{1, \text{ если } x \in (x_1, x_2), \text{ либо } 2, \text{ если } x > x_2\}, \quad \tau > \tau_0, \quad (1) \\ C_1(x, \tau_0) = \varphi(x) = \{C_0, \text{ если } x \in (x_1, x_2), \text{ либо } 0, \text{ если } x < x_1 \text{ и } x > x_2\}, \quad (2) \\ C_{1x}(x_1, \tau) = 0, \quad (3) \\ C_2(x, \tau_0) = 0, \quad (4) \\ C_2(x_2, \tau) = C_1(x_2, \tau) = \mu(\tau). \quad (5) \end{array} \right.$$

Если использовать фильтрующее свойство обобщенной функции Дирака [14], то начальное распределение концентрации $\varphi(x)$ можно представить «разложенным» на импульсы:

$\varphi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \delta(x, \xi) d\xi$, где $\delta(x, \xi)$ - импульсная функция Дирака, представляющая предел физического импульса $\varphi_\xi(x)$ при $\xi \rightarrow 0$.

3. Результаты

Решение поставленной КЗ ($i=1$) можно представить в виде:

$$C_1(x, \tau) = \int_{x_1}^{x_2} \varphi(\xi) [G(x, \xi, \tau, \tau_0) + G(x, -\xi, \tau, \tau_0)] d\xi, \quad (6)$$

$$\text{где } \begin{cases} G(x, \xi, \tau, \tau_0) = \left\{ 2\sqrt{\pi D_1(\tau - \tau_0)} \exp \left[\frac{(x-\xi)^2}{4D_1(\tau - \tau_0)} \right] \right\}^{-1}, \\ G(x, -\xi, \tau, \tau_0) = \left\{ 2\sqrt{\pi D_1(\tau - \tau_0)} \exp \left[\frac{(x+\xi)^2}{4D_1(\tau - \tau_0)} \right] \right\}^{-1} \end{cases} - \text{функции влияния [14,15].}$$

Тогда с учетом начального условия (2) получим

$$C_1(x, \tau) = \frac{C_0}{2} \{F(x_1) + F(x_2)\}, \quad (7)$$

$$\text{где } F(x_1) = \Phi\left(\frac{x-x_1}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) - \Phi\left(\frac{x+x_1}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right), \quad F(x_2) = \Phi\left(\frac{x+x_2}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) - \Phi\left(\frac{x-x_2}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right),$$

$$\text{erf}(\eta) = \Phi(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\alpha^2} d\alpha - \text{интеграл вероятностей } (\eta = \frac{x}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}) [16].$$

В частности, полагая $x_2 = l$, получим

$$C(x, \tau) = \frac{C_0}{2} \left[\Phi\left(\frac{x+l}{2\sqrt{D_1\tau}}\right) - \Phi\left(\frac{x+l}{2\sqrt{D_2\tau}}\right) \right], \quad (7a)$$

Графическое представление функциональных зависимостей $C(x, \tau)$ при различных фиксированных значениях $\tau > 0$ (по формуле (7a)) показаны на рис.1. Ввиду того, что массообмена с окружающей средой нет ($\nabla C = 0$), то площадь под каждым графиком равна $C l_0$ (на рис.4 заштрихована).

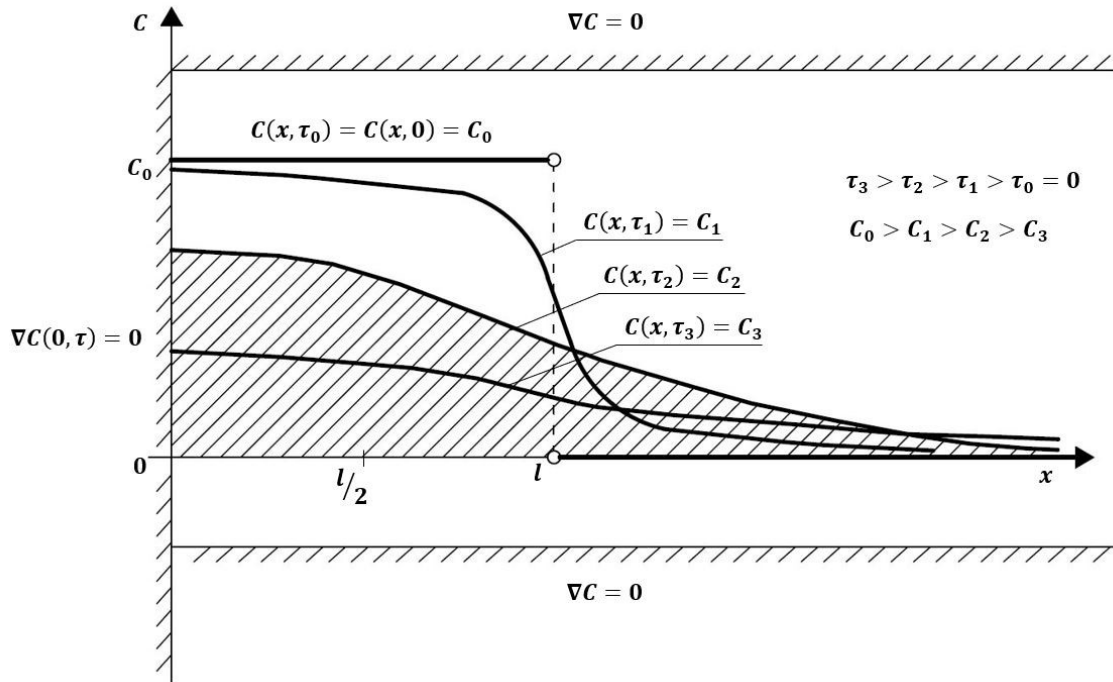


Рис. 1. Графическое представление функциональных зависимостей $C(x, \tau)$ при различных фиксированных значениях $\tau > 0$.

Если осуществить в начальном условии (НУ) предельный переход, то $C_1(x, \tau_0) = \varphi(x) = \delta(x, x_1)$, а решение КЗ ($i=1$) будет равно следующей сумме фундаментальных решений дифференциального уравнения (ДУ) молекулярного переноса

$$C_1(x, \tau) = G(x, x_1, \tau, \tau_0) + G(x, -x_1, \tau, \tau_0). \tag{8}$$

В частности, если в (6) положить $x_1 = 0$, $x_2 = l$, следует $F(x_1) = 0$, а решение (7) примет вид:

$$C_1(x, \tau) = \frac{C_0}{2} \left[\Phi\left(\frac{x+l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) - \Phi\left(\frac{x-l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) \right], \tag{9}$$

при ГУ $x = l$ следует

$$C_1(l, \tau) = C_2(l, \tau) = \frac{C_0}{2} \left[\Phi\left(\frac{l}{\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) \right] = \mu(\tau). \tag{10}$$

Это значение концентрации (10) в силу условия «склеивания», служит ГУ для $C_2(x, \tau)$ на отрезке $x > l$. Опуская далее промежуточные выкладки, окончательное решение поставленной КЗ (при $i=2$) будет

$$C_2(x, \tau) = \frac{C_0}{2} (x-l) \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{\mu(t)}{(\tau-t)} G(x, l, \tau, t) dt, \quad x > l, \tag{11}$$

где $G(x, l, \tau, t) = \left\{ 2\sqrt{\pi D_2(\tau-t)} \exp\left[\frac{(x-l)^2}{4D_2(\tau-t)}\right] \right\}^{-1}$.

С целью проверки удовлетворения условиям (4) и (5), решение КЗ ($i = 2$) можно тождественно переписать в виде

$$C_2(x, \tau) = \frac{C_0}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x-l}{2\sqrt{D_2(\tau-\tau_0)}}}^{\infty} \frac{x-l}{2\sqrt{D_2(\tau-\tau_0)}} \mu\left[\tau - \frac{(x-l)^2}{4D_2\eta^2}\right] e^{-\eta^2} d\eta, \quad x > l, \tag{12}$$

$$\text{где } \eta = \frac{x-l}{2\sqrt{D_2(\tau-t)}}, \quad d\eta = \frac{(x-l)d\tau}{4\sqrt{D_2(\tau-t)}^{3/2}}.$$

Отсюда уже видно, что при $\tau \rightarrow \tau_0$ и $x > 0$ удовлетворяется НУ (4), а при $x=l$ и $\tau > \tau_0$, с учетом значения интеграла Пуассона, удовлетворяется ГУ(5) или ГУ(10), найденное из решения КЗ при $i=1$.

4. Обсуждение

Проанализируем решение КЗ (1) при некоторых других условиях однозначности:

1. Если, например, НУ (2) задать в виде дельты функции Дирака, т.е. $C_1(x, \tau_0) = \delta(x)$ (т.е. $\tau = \tau_0$ и $x=0$ в установку вводится «погонная единица» диффундирующего вещества, которое при равномерном распределении по единице длины установки дает концентрацию равную единице), тогда решение КЗ ($i=1$) и $x < l$ будет фундаментальным решением ДУ нестационарной молекулярной диффузии

$$C_1(x, \tau) = G(x, 0, \tau, \tau_0) = \left\{ 2\sqrt{\pi D_1(\tau - \tau_0)} \exp\left[\frac{x^2}{4D_1(\tau - \tau_0)}\right] \right\}^{-1}, \quad (13)$$

интеграл КЗ ($i = 2$) и $x > l$ при условиях однозначности (4) и (5) запишется в виде

$$C_2(x, \tau) = (x-l) \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{G(l, 0, t, \tau_0) G(x, l, \tau, t)}{(\tau-t)} dt, \quad (14)$$

где $G(l, 0, t, \tau_0) = C_1(l, \tau) = C_2(l, \tau) = \mu(\tau)$.

В процессе отыскания $C_2(x, \tau)$ возникают определенные сложности, связанные с необходимостью численно вычислять несобственные интегралы.

2. Если вместо непроницаемости ГУ (3) задать ГУ в виде $C_1(x_1, \tau) = C_w = const$, т.е. на границе $x = x_1$ вводить жидкость с постоянно-заданной концентрацией взвешенных частиц, то решением КЗ $i=1$ будет

$$C_1(x, \tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta + \frac{C_0}{2} \{ \Phi(\eta_{x_1}) - \Phi(\eta_{x_2}) - \Phi(\eta_{-x_2}) + \Phi(\eta_{-x_1}) \}, \quad (15)$$

где $\operatorname{erfc} \eta$ – дополнительная функция ошибок Гаусса [15, 16],

$$\eta_{x_i} = \frac{x-x_i}{2\sqrt{D_2(\tau-t)}}, \quad \eta_{-x_i} = \frac{x+x_i}{2\sqrt{D_2(\tau-t)}}, \quad (i=1, 2).$$

При $x_1 = 0$ и $x_2 = l$ следует

$$C_1(x, \tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta + C_0 \operatorname{erf} \eta - \frac{C_0}{2} \left\{ \Phi\left[\frac{x-l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right] + \Phi\left[\frac{x+l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right] \right\}. \quad (16)$$

С учетом ГУ сопряжения (5) при $x = l$ получим

$$C_1(l, \tau) = C_2(l, \tau) = \mu(\tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta,$$

здесь $\eta = \frac{l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}$.

3. Если при постоянстве ГУ, НУ задать обобщенной функцией Дирака, т.е.

$C_1(x, \tau_0) = \delta(x, x_1)$, то решение (15) примет вид

$$C_1(x, \tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta + G(x, x_1, \tau, \tau_0) - G(x, -x_1, \tau, \tau_0), \quad (17)$$

а при $x_1 = 0$ и $x_2 = l$ следует

$$C_1(l, \tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta_l,$$

которое является ГУ «склеивания» для КЗ ($i = 2$)

$$C_2(l, \tau) = C_1(l, \tau) = \mu(\tau).$$

В этом случае (11) решение КЗ при $i = 2$ будет

$$C_2(x, \tau) = C_w(x-l) \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{\operatorname{erfc} \eta_l}{(\tau-t)} G(x, l, \tau, t) dt, \quad x > l. \quad (18)$$

Анализ (11) и (12) показывает, что при достаточно больших τ , концентрация $C_2(x, \tau)$ взвешенных коллоидных частиц после прохождения соответствующей фильтрации на КВПУ стремится к нулю.

Найденные аналитические решения КЗ позволяют с помощью матанализа экстремальных значений оптимизировать и автоматизировать процессы обессоливания воды в КВПУ, которые приводят к снижению энергопотребления и себестоимости очищенной воды для систем водо- и теплоснабжения в теплоэнергетических установках.

Рассмотренная физико-математическая модель может быть использована при решении КЗ тепло- и массообмена для многослойных конструкций зданий, систем тепло- и водоснабжения, а также транспортных сооружений и дорог [17-20].

Для масштабных переходов, постановку и аналитические решения КЗ ($i=1,2$) при рассмотренных различных условиях однозначности, можно также записать в критериальном виде как изменение относительной концентрации от массообменного критерия Фурье ($Fo_{im} = \frac{D_i \tau}{x^2}$).

5. Заключение

1. Формализована физико-математическая модель процесса опреснения грунтовых вод в КВПУ.
2. Получены аналитические замкнутые решения КЗ нестационарного диффузионного переноса для кусочно-однородных сред при различных исходных условиях однозначности и нестационарных, несимметричных краевых условиях на поверхностях контакта неоднородных сред.
3. Разработанная ММ процесса опреснения воды в КВПУ может быть использована для выбора ее оптимальных параметров, режимов и условий работы, что позволит снизить энергозатраты и себестоимость обессоленной воды при эксплуатации КВПУ для систем водо- и теплоснабжения в теплоэнергетических установках.
4. Полученные аналитические решения КЗ позволяют путём нахождения экстремальных значений оптимизировать процессы очистки воды в комбинированной водоподготовительной установке (КВПУ) и могут быть тестовыми КЗ при численном решении более сложных нелинейных КЗ несвязанного и взаимосвязанного тепло- и массопереноса.
5. Оптимальные значения по требуемым значениям независимых параметров аналитических решений КЗ могут быть использованы в контроллерах АСУТП при выборе энергоресурсосберегающих режимов управления.
6. Представленная ММ может быть также использована при решении КЗ тепло- и массообмена для многослойных ограждающих конструкций зданий и сооружений, систем трубопроводов водо- и теплоснабжения, многослойных дорожных одежд.

7. Для масштабных переходов постановка и аналитические решения КЗ можно легко записать в безразмерном виде, как изменение относительной концентрации от массообменного критерия Фурье.

Список литературы

1. Krishnamoorthy S., Modera M., Harrington, C. Efficiency optimization of a variable-capacity/variable-blower-speed residential heat-pump system with ductwork // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 150. P. 294–306. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.05.066
2. Kang Z., Zhou X., Zhao Y., Wang R., Wang X. Study on Optimization of Underground Water Source Heat Pump // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205. P. 1691–1697. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.353
3. Janghorban Esfahani I., Lee S., Yoo C. Evaluation and optimization of a multi-effect evaporation–absorption heat pump desalination based conventional and advanced exergy and exergoeconomic analyses // *Desalination*. 2015. Vol. 359. P. 92–107. DOI:10.1016/j.desal.2014.12.030
4. Parham K., Khamooshi M., Daneshvar S., Assadi M., Yari M. Comparative assessment of different categories of absorption heat transformers in water desalination process // *Desalination*. 2016. Vol. 396. P. 17–29. DOI:10.1016/j.desal.2016.05.031
5. Junusova L., Chicherin S. Wastewater treatment and application in the advanced Nanofil traction system: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources / IOP Publishing, Sevan, 2019. P. 131-134.
6. Junusova L. The impact of technological characteristics of membrane devices for the degree of desalination water treatment plant in the schemes VII Science, Technology and Higher Education : materials of the III International research and practice conference / Westwood, Canada, April 2-3, 2015. P. 251-256.
7. Junusova L.R. Installation for receiving drinking water. Innovative patent for invention No. 29944, Bulletin. No. 6 dated June 15, 2015 Committee on Intellectual Property Rights Min. Yust. RK.
8. Junusova L.R. Utility model patent FAP No. 01327 Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan dated 09.26.2018.
9. Chicherin S.V. The Analysis of Design Arrangements Associated with a Measuring Points Location of the Pipe Surveillance System. *Automation and IT in Power Engineering*. 2017. No. 12. 12-15 pp.
10. Junusova L.R. Membrane Plants In Water Conditioning Schemes At Thermal Power Stations // *Journal of European Applied Sciences*. Germany, Stuttgart. 2015. Vol. 4. P. 60-63.
11. Ortega Sandoval A. D., Barbosa Brião V., Cartana Fernandes V. M., Hemkemeier A., Friedrich M. T. Stormwater management by microfiltration and ultrafiltration treatment // *Journal of Water Process Engineering*. 2017. Vol. 30. P. 1-11. DOI:10.1016/j.jwpe.2017.07.018
12. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1965. 616 с.
13. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: изд-во МГУ, 1999. 736 с.
14. Бермант А. Ф., Араманович И. Г. Краткий курс математического анализа. Спб.: изд-во «Лань», 2005. 736 с.
15. Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. Интегралы и ряды. Специальные функции. М.: Наука, 1983. 752 с.
16. Письменный Д. Т. Конспект лекций по высшей математике. М.: Айрис-пресс, 2019. 608 с.
17. Карташов Э. М., Кудинов В. А., Калашников В. В. Теория тепломассопереноса: решение задач для многослойных конструкций. М.: изд-во «Юрайт», 2019. 435 с.
18. Садыков Р. А. Обобщенная математическая модель процессов переноса в многослойных ограждающих конструкциях зданий и сооружений. XX Международный конгресс «Энергоэффективность XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий». М., 2016. 34-38 с.

19. Садыков Р. А., Крайнов Д. В., Иванова Р. В. Теплозащитные свойства ограждающих конструкций при наличии стоков или источников теплоты и фильтрации воздуха // Научно-технический журнал. М.: Вестник МГСУ, 2011. № 7. 174-180 с.

20. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности. В 2-х частях. М.: Высшая школа, 1982. Ч. I – 372 с., Ч. II - 304 с.

References

1. Krishnamoorthy S., Modera M., Harrington, C. Efficiency optimization of a variable-capacity/variable-blower-speed residential heat-pump system with ductwork // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 150. P. 294–306. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.05.066

2. Kang Z., Zhou X., Zhao Y., Wang R., Wang X. Study on Optimization of Underground Water Source Heat Pump // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205. P. 1691–1697. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.353

3. Janghorban Esfahani I., Lee S., Yoo C. Evaluation and optimization of a multi-effect evaporation–absorption heat pump desalination based conventional and advanced exergy and exergoeconomic analyses // *Desalination*. 2015. Vol. 359. P. 92–107. DOI:10.1016/j.desal.2014.12.030

4. Parham K., Khamooshi M., Daneshvar S., Assadi M., Yari M. Comparative assessment of different categories of absorption heat transformers in water desalination process // *Desalination*. 2016. Vol. 396. P. 17–29. DOI:10.1016/j.desal.2016.05.031

5. Junusova L., Chicherin S. Wastewater treatment and application in the advanced Nanofil traction system: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources / IOP Publishing. Sevan, 2019. P. 131-134.

6. Junusova L. The impact of technological characteristics of membrane devices for the degree of desalination water treatment plant in the schemes VII Science, Technology and Higher Education : materials of the III International research and practice conference / Westwood, Canada, April 2-3, 2015. P. 251-256.

7. Junusova L.R. Installation for receiving drinking water. Innovative patent for invention No. 29944, Bulletin. No. 6 dated June 15, 2015 Committee on Intellectual Property Rights Min. Yust. RK.

8. Junusova L.R. Utility model patent FAP No. 01327 Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan dated 09.26.2018.

9. Chicherin S.V. The Analysis of Design Arrangements Associated with a Measuring Points Location of the Pipe Surveillance System. *Automation and IT in Power Engineering*. 2017. No. 12. 12-15 pp.

10. Junusova L.R. Membrane Plants In Water Conditioning Schemes At Thermal Power Stations // *Journal of European Applied Sciences*. Germany, Stuttgart. 2015. Vol. 4. P. 60-63.

11. Ortega Sandoval A. D., Barbosa Brião V., Cartana Fernandes V. M., Hemkemeier A., Friedrich M. T. Stormwater management by microfiltration and ultrafiltration treatment // *Journal of Water Process Engineering*. 2017. Vol. 30. P. 1-11. DOI:10.1016/j.jwpe.2017.07.018

12. Zeldovich Ya. B., Myshkis A.D. Elements of applied mathematics. M.: Nauka, 1965. 616 p.

13. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. Equations of mathematical physics. M: MGU Publishing House, 1999. 736 p.

14. Bermant A. F., Aramanovich I. G. A short course in mathematical analysis. SPb.: Publishing House "Lan", 2005. 736 p.

15. Prudnikov A. P., Brychkov Yu. A., Marichev O. I. Integrals and series. Special functions. M.: Nauka, 1983. 752 p.

16. Pismenny D. T. Lecture notes on higher mathematics. M.: Airis-press, 2019. 608 p.

17. Kartashov E. M., Kudinov V. A., Kalashnikov V. V. Theory of heat and mass transfer: solution of problems for multilayer structures. M.: Publishing House "Yurayt", 2019. 435 p.

18. Sadykov R.A. Generalized mathematical model of transport processes in multilayered enclosing structures of buildings and structures. XX International Congress "Energy Efficiency XXI century. Engineering methods to reduce energy consumption in buildings". M. 2016. 34-38 p.

19. Sadykov R. A., Kraynov D. V., Ivanova R. V. Thermal protection properties of enclosing structures in the presence of effluents or heat sources and air filtration // Scientific and Technical Journal. M.: Vestnik MGSU, 2011. № 7. 174-180 pp.

20. Belyaev N. M., Ryadno A. A. Methods of the Theory of Heat Conduction. In 2 parts. M.: Vysshaya Shkola, 1982. P. I - 372 p., P. II - 304 p.

Информация об авторах

Ренат Ахатович Садыков, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sadykov_r_a@mail.ru

Аида Камилевна Мухаметзянова, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: aidamukham@gmail.com

Ляззат Рысхановна Джунусова, кандидат технических наук, доцент, Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Республика Казахстан

Email: dzhunusova@mail.ru

Алия Аликовна Елеманова, доцент, Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Республика Казахстан

Email: a_liya83@mail.ru

Information about the authors

Renat A. Sadykov, doctor of technical sciences, professor Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sadykov_r_a@mail.ru

Aida K. Mukhamezianova postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: aidamukham@gmail.com

Lyazzat R. Junussova, candidate of technical sciences, associate professor Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

Email: dzhunusova@mail.ru

Aliya A. Elemenova, associate professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

Email: a_liya83@mail.ru