

Автоматизированный расчет трехлопастной пропеллерной мешалки для производства серосодержащего сорбента на основе хлорлигнина, селективного к ионам тяжелых металлов

В. С. Асламова¹✉, А. А. Асламов², Е. А. Головкова², Е. А. Шнегельбергер³

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

³ ООО «АйкьюЭкологджи», Иркутск, Российская Федерация

✉ aslamovav@yandex.ru

Резюме

В работе выполнена автоматизация расчета физических свойств ингредиентов двухфазной (жидкость – твердое) рабочей среды и гидродинамики перемешивающего устройства для реактора периодического действия, используемого при производстве серосодержащего сорбента на основе хлорлигнина. Сорбент селективен к целому ряду ионов тяжелых металлов. Исходя из результатов расчета физических свойств ингредиентов и обзора конструкций перемешивающих устройств в опытном реакторе использована пропеллерная трехлопастная мешалка для перемешивания рабочей среды с коэффициентом динамической вязкости 6,01 сП и содержанием твердой фазы 31,8 %. Так как в 70-х гг. XX в. было установлено, что из-за несовместимости критериев подобия химических и массообменных процессов масштабный переход в реакторе на основе физического подобия осуществить практически невозможно, то при масштабном переходе от лабораторной установки к малой производственной установке производительностью 200 кг серосодержащего сорбента на один цикл вместо физического подобия были использованы расчетные методы. Следует отметить, что увеличение масштаба установки до $M = 104$ не скажется на соотношении ингредиентов, используемых для получения нового сорбента (по аналогии с приготовлением блюда в большем количестве и в большей посуде: рецептура приготовления не изменится, масса ингредиентов увеличится в соответствии с масштабом), может измениться лишь время перемешивания, нагрева до 40–45°C и последующего охлаждения смеси до 20°C. Физические свойства твердых ингредиентов определялись по справочникам (для хлорлигнина – экспериментально). Для расчета физических свойств жидких ингредиентов и их смеси использованы известные аддитивные модели. Разработана технологическая схема производства новых серосодержащих сорбентов. Рассчитан профиль окружной скорости, которая квадратично возрастает до максимального значения на окружности, совпадающей по диаметру с мешалкой. В периферийной зоне окружная скорость гиперболически убывает вплоть до стенки реактора. Найдены параметры мешалки, средняя скорость рабочей среды в объеме реактора, мощность перемешивания, глубина образующейся воронки и затраты мощности на перемешивание среды.

Ключевые слова

автоматизация расчета, пропеллерная мешалка, технологическая схема, серосодержащий сорбент, хлорлигнин

Для цитирования

Асламова В. С. Автоматизация гидродинамического расчета трехлопастной пропеллерной мешалки для производства серосодержащего сорбента на основе хлорлигнина, селективного к ионам тяжелых металлов / В. С. Асламова, А. А. Асламов, Е. А. Головкова, Е. А. Шнегельбергер // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 48–58. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).48-58

Информация о статье

поступила в редакцию: 28.09.2021, поступила после рецензирования: 13.10.2021, принята к публикации: 27.10.2021

Automated calculation of a three-vane propeller mixer for production of the sulfur-containing sorbent based on chlorolignin selective to heavy metal ions

V. S. Aslamova¹✉, A. A. Aslamov², E. A. Golovkova², E. A. Shnegelberger³

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

³ LLC “AykyuEkology”, Irkutsk, the Russian Federation

✉ aslamovav@yandex.ru

Abstract

Automation of the calculation of the physical properties of the ingredients of a two-phase (liquid-solid) working medium and the hydrodynamics of a mixing device for a batch reactor used in the production of a sulfur-containing sorbent based on chlorolignin

has been performed. The sorbent is selective for a number of heavy metal ions. Based on the results of calculating the physical properties of the ingredients, a review of the design of mixing devices, a three-blade propeller mixer was used in the experimental reactor for mixing the working medium with a dynamic viscosity coefficient of 6.01 centipoise and a solid phase content of 31.8%. Since it was found in the 70s of the 20th century that, due to the incompatibility of the criteria for the similarity of chemical and mass transfer processes, a large-scale transition in a reactor based on physical similarity is practically impossible, then with a large-scale transition from a laboratory facility to a small production facility with a capacity of 200 kg of sulfur of the sorbent per cycle, instead of physical similarity, computational methods were used. It should be noted that an increase in the scale of the installation to $M = 104$ will not affect the ratio of ingredients used to obtain a new sorbent (by analogy with cooking a dish in larger quantities and in a larger container: the cooking recipe will not change, the mass of ingredients will increase in accordance with the scale), only the times of mixing, heating to 40–45 °C and subsequent cooling of the mixture to 20 °C can change. The physical properties of solid ingredients were determined by reference books (for chlorolignin - experimentally). Known additive models were used to calculate the physical properties of liquid ingredients and their mixtures. A technological scheme for the production of new sulfur-containing sorbents has been developed. The profile of the peripheral speed is calculated, which quadratically increases to the maximum value on the circle, which coincides in diameter with the mixer. In the peripheral zone, the peripheral velocity hyperbolically decreases down to the reactor wall. Found: the parameters of the mixer, the average speed of the working medium in the volume of the reactor, the mixing power, the depth of the formed funnel and the power consumption for mixing the medium.

Keywords

automation of calculation, propeller stirrer, technological scheme, sulfur-containing sorbent, chlorolignin

For citation

Aslamova V. S., Aslamov A. A., Golovkova E. A., Shnegelberger E. A. Avtomatizirovannyi raschet trekhlopastnoy propellernoy meshalki dlya proizvodstva serosoderzhashchego sorbenta na osnove khlorolignina, selektivnogo k ionam tyazhelykh metallov [Automated calculation of a three-blade propeller mixer for the production of sulfur-containing sorbent based on chlorolignin selective to heavy metal ions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 48–58. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).48-58

Article info

Received: 28.09.2021, Revised: 13.10.2021, Accepted: 27.10.2021

Актуальность исследования

Роль автоматизации расчетов технологических аппаратов, вспомогательного оборудования невозможно переоценить. Ведь их автоматизированный расчет способствует сокращению трудоемкости, повышению качества принимаемых проектных решений, снижает существенно производственные затраты, что положительно отражается на себестоимости готовой продукции [1–4].

Очистка промышленных стоков от соединений тяжелых металлов является одной из важнейших задач современного производства и относится к приоритетному направлению науки, технологий и техники. Так, концентрации тяжелых металлов (ртуть, цинк, кадмий, медь, железа и др.) в промышленных стоках гальванических производств Иркутской области от 0,5 до 1,0 г/л, что в 10–100 раз превосходят предельно допустимую концентрацию (ПДК) [5]. Производственные стоки объектов Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) также содержат ионы тяжелых металлов – цинк, медь, никель [6]. Всестороннее исследование адсорбционной эффективности нового

серосодержащего сорбента с использованием лигнина [7–11] выявило его высокую селективность к соединениям тяжелых металлов. Перечисленное свидетельствует об актуальности задачи разработки алгоритма и программы автоматизированного расчета физических свойств ингредиентов и трехлопастной пропеллерной мешалки, используемой для интенсификации процесса перемешивания при производстве эффективного серосодержащего сорбента, селективного к ионам тяжелых металлов.

О масштабном переходе от лабораторной установки к промышленной

В 70-х гг. XX в. было установлено, что из-за изменения соотношения отдельных стадий процесса в реакторе масштабный переход (МП) практически невозможно осуществить на основе физического подобия в связи с несовместимостью критериев подобия химических и массообменных процессов [11, 12]. Поэтому при расчете химического реактора с мешалкой физические свойства твердых ингредиентов определялись по справочникам (для хлорлигнина – экспериментально). Для расчета физиче-

ских свойств жидких ингредиентов и их смеси использовались модели, представленные в справочном пособии [13, 14]. Кроме того, использовалось гидродинамическое моделирование, так как эффект масштабирования обусловлен гидродинамической природой. Однако и гидродинамическое моделирование не позволяло полностью осуществить адекватный МП, так как математически очень сложно описать химию процесса и дефекты конструкции и монтажа реактора, подвода реакционной смеси и т. д. Этот эффект можно значительно уменьшить за счет конструктивных способов нивелирования неоднородностей полей скоростей в крупномасштабном реакторе [12].

В химических реакторах при двухфазном механическом перемешивании жидкой и твердой фаз поперечные неравномерности роли не играют. В них масштабный эффект зарождается вследствие изменения размеров циркуляционных контуров и / или продольного перемешивания при увеличении масштаба реактора. Химические реакции оказывают существенное влияние на гидродинамику, могут вызвать также тепловые неравномерности, которые, в свою очередь, могут усилить и гидродинамические неравномерности. В связи с этим к однородности полей скоростей и концентраций в химических реакциях предъявляются повышенные требования [12].

Для снижения неоднородности полей скоростей и концентраций, гидравлического сопротивления будем использовать следующие меры снижения масштабного эффекта:

- усиление продольного перемешивания и скорости движения фаз с помощью мешалки, интенсифицирующей тепло- и массообмен;

- установка в поворотных коленах трубопроводов направляющих лопаток.

Вместо выполнения дорогостоящих исследований на пилотных установках, спроектированных по критериям подобия, при масштабном переходе от лабораторной установки к малой производственной установке использованы расчетные методы, которые базируются на инженерном опыте. Это позволяет при увеличении масштаба реализации химико-технологического процесса сократить степень риска снижения достоверности получаемых результатов [15].

Следует отметить, что увеличение масштаба установки до $M = 104$ не скажется на

соотношении ингредиентов, используемых для получения нового сорбента (по аналогии с приготовлением блюда в большем количестве и в большей посуде: рецептура приготовления не изменится, масса ингредиентов увеличится в соответствии с масштабом), может измениться лишь время перешивания, нагрева до 40–45 °С и последующего охлаждения смеси до 20 °С.

Технология производства серосодержащего сорбента

Серосодержащий сорбент для очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов синтезирован на основе использования отходов производства эпихлоргидрина, хлорированного лигнина, полисульфидов натрия, получаемых из элементной серы (отход производства серной кислоты) и гидроксида натрия в водном растворе в присутствии гидразингидрата в одном реакционном сосуде при непрерывном перемешивании [7]. Масса достаточно вязкая, поэтому достижение равномерного распределения фаз в суспензии очень затруднительно и возможно только при механическом перемешивании. В основном (до 95 % случаев) для перемешивания рабочей среды используется механическое перемешивание по причине энергетической и экономической эффективности, надежности, простоте конструкций вращающихся мешалок [16, 17].

По результатам расчета физических свойств ингредиентов, обзора конструкций перемешивающих устройств, уплотнений вала и теплообменных устройств в опытном емкостном реакторе идеального смешения с теплообменной рубашкой, периодического действия, по рекомендациям [18, 19] для перемешивания в системе «жидкость – твердое», включающего растворение и проведение химических реакций, предложено использовать пропеллерную трехлопастную мешалку, которая применяется для перемешивания вязких жидкостей с $\mu < 50$ Па·с, с содержанием твердой фазы не более 30 %, очищает стенки емкости от налипающей реакционной массы, выравнивает концентрационные и температурные поля по всему объему реактора. Технологическая схема производства новых серосодержащих сорбентов приведена на рис. 1.

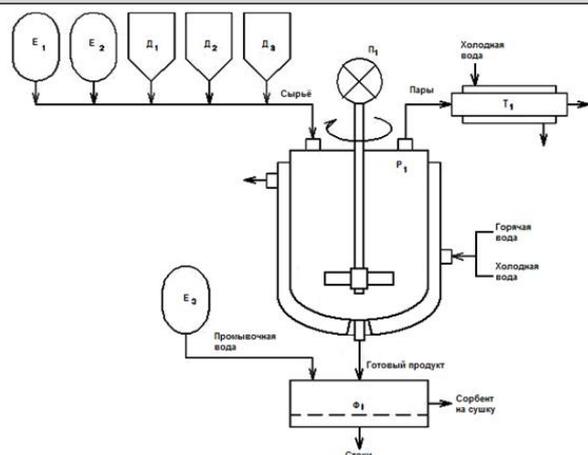


Рис. 1. Технологическая схема производства новых сорбентов: E_1, E_2, E_3 – емкости для подачи трихлорпропана, воды и гидразингидрата и промывочной воды соответственно;

D_1, D_2, D_3 дозаторы щелочи, серы и хлорлигнина соответственно; P_1 – реактор с трехлопастной пропеллерной мешалкой; T_1 – холодильный агрегат; Φ_1 – фильтр; P_1 – привод

Fig 1. Technological scheme for the production of new sorbents: tanks for supplying: E_1, E_2, E_3 – trichloropropane, water, hydrazine hydrate and flushing water feeding containers, respectively. D_1, D_2, D_3 – alkali, sulfur and chlorolignin dispensers, respectively. P_1 – tree-vane propeller mixer; T_1 – refrigerator; Φ_1 – filter; P_1 – drive unit

Установка работает следующим образом. Сначала готовится раствор 25 % концентрации щелочи. Для этого в реактор через загрузочный штуцер заливается вода и при перемешивании засыпается сухая щелочь (NaOH или KOH). Одновременно в рубашку реактора подается горячая вода для нагревания и выдержки смеси при температуре 45 °С (время нагрева смеси 0,507 ч). Когда щелочной раствор готов, в него, не прекращая перемешивания, добавляют серу в виде порошка с размером частиц до 1 мм. При этом происходит растворение серы с образованием полисульфида щелочного металла. Суспензию перемешивают в течение 3 ч. Далее добавляют хлорлигнин и фракции отхода производства эпихлоргидрина (состав, % масс: 1,2,3-трихлорпропан 86,2 %, эпихлоргидрин 6,5 %, дихлорпропанола 6,4 %, остальное – 0,9 %) – хлорорганического отхода. Перемешивают суспензию в течение 6 ч. Затем охлаждают до 20 °С, отфильтровывают осадок. По окончании

процесса конечный продукт выгружается через нижний штуцер на фильтровальное устройство, отправляется на промывку и последующую сушку [20].

В табл. 1 приведена масса ингредиентов согласно найденным соотношениям примера 1 [12] с учетом масштабного коэффициента M , необходимых для получения серосодержащего сорбента Па в количестве 200 кг.

Таблица 1. Состав ингредиентов рабочей среды
Table 1. Composition of the ingredients of the working environment

Наименование ингредиента	Доля, m_i	φ_i	Объем, m^3	Масса, кг
Щелочь NaOH (гран.)	0,2458	0,1367	0,15	319,5
H ₂ O	0,4606	0,5468	0,6	598,8
Гидразин-гидрат	0,0637	0,0729	0,08	82,8
Сера	0,0764	0,0905	0,048	99,36
Хлорлигнин (гироллизный)	0,0808	0,0911	0,1	105
1,2,3-трихлорпропан	0,0727	0,0620	0,068	94,452
Σ	1	–	1,097	1 299,9

Объем каждого ингредиента определялся по его доле. Масса ингредиента вычислялась произведением его объема на плотность. Как видно из табл. 1 при выпуске 200 кг сорбента утилизируется 298,8 кг отходов производства (хлорлигнин, сера, 1,2,3-трихлорпропан). Из них израсходовано 99,4 кг серы, хлорлигнина – 105 кг, 1,2,3-трихлорпропана – 94,4 кг. Объем загружаемой реакционной смеси составил $V_p = 1,097 m^3 \approx 1,1 m^3$. Рекомендуемый коэффициент загрузки химического реактора 0,75. Тогда объем реактора

$$V = 1,1 / 0,75 = 1,466 \approx 1,5 m^3.$$

Принимаем номинальный объем реактора $V_n = 1,6 m$. Согласно данным [18, 21] диаметр реактора $D = 1,2 m$, высота 1,42 м. Высота заполнения жидкостью $H_{ж} = 1,16 m$.

Автоматизация расчетов

На рис. 2, 3 представлена блок-схема основной программы гидродинамического расчета мешалки для реактора из условия идеального перемешивания среды. Программа реализована в интегрированной среде Delphi 7.0.

На рис. 4, 5 приведена блок-схема подпрограммы расчета физических свойств

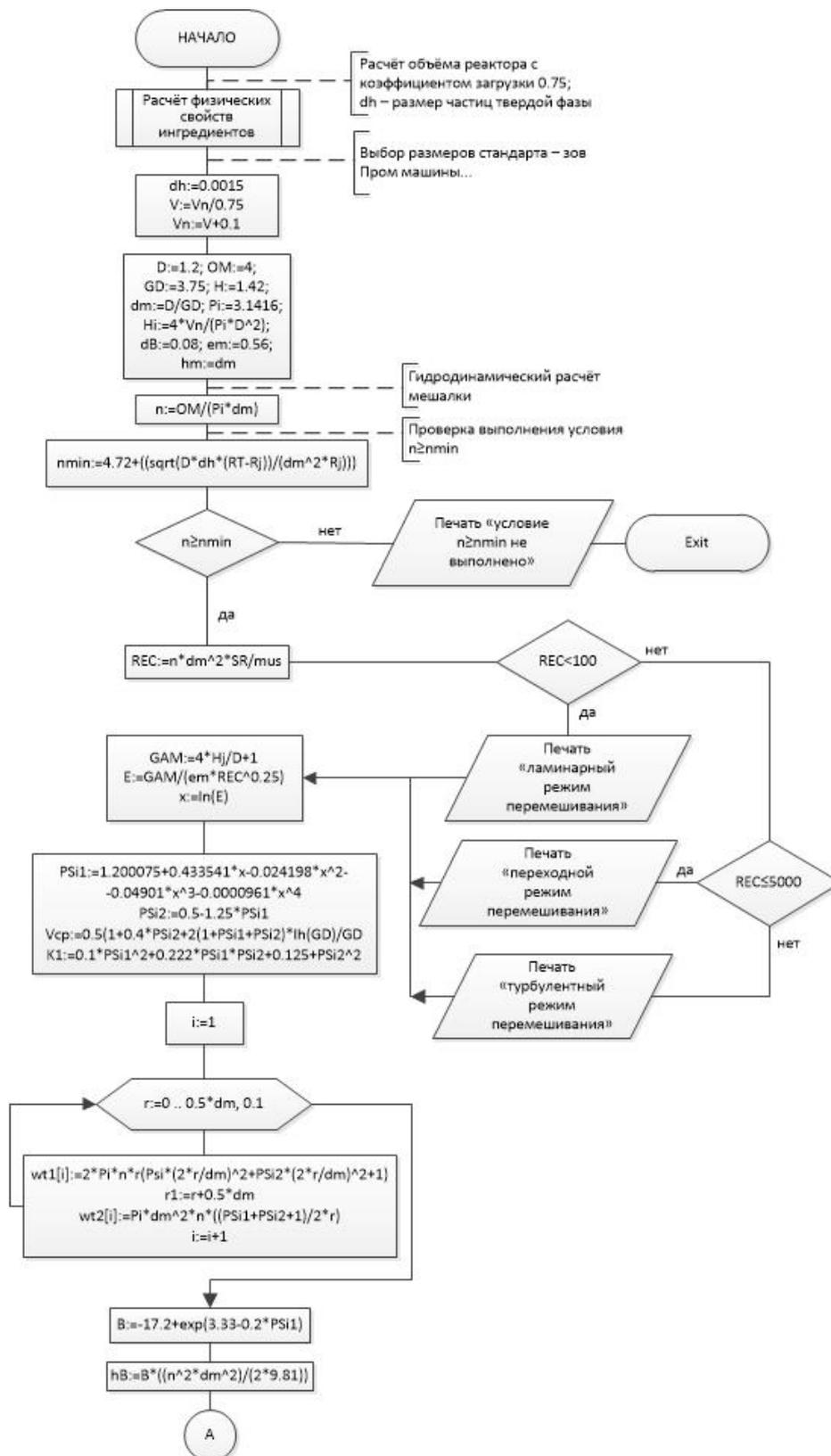


Рис. 2. Блок-схема гидродинамического расчета мешалки
Fig 2. Block diagram of the hydrodynamic calculation of the mixer

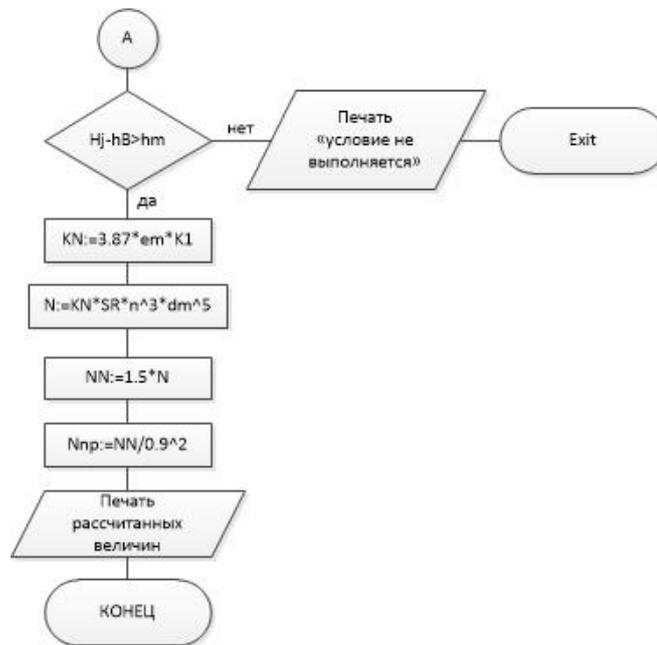


Рис. 3. Продолжение рис. 2

Fig 3. Continuation of fig. 2

рабочей среды и выбор типа мешалок.

Для расчета плотности ρ_c рабочей среды использовано правило аддитивности:

$$\rho_c = \sum_{i=1} m_i \cdot \rho_i,$$

где m_i , ρ_i – массовая доля и плотность i -го ингредиента [14].

Для расчета удельной теплоемкости среды в [13] предложена формула:

$$c_{pc} = \sum_{i=1} m_i \cdot c_{pi}.$$

Для определения коэффициента динамической вязкости $\mu_{ж}$ смеси жидких ингредиентов использована формула:

$$\lg \mu_{жс} = \sum_{i=1} y_i \cdot \lg \mu_{жси},$$

где y_i и $\mu_{жси}$ – мольная доля и коэффициент динамической вязкости i -го жидкого компонента [22].

Коэффициент динамической вязкости μ_c , сП рабочей среды при температуре 20 °С и содержании твердой фазы $\varphi_c = 0,318$ вычислялся по формуле, предлагаемой в [14], и справедливой для $0,3 < \varphi_c < 0,5$:

$$\mu_c = \mu_{жс} [1 + 2,5 / (2 - 2,7\varphi_c)]$$

Для расчета коэффициента теплопроводности λ_i , кал/(см·с·К) i -го жидкого ингредиента использована формула Роббинса и Кингри:

$$\lambda_i = \frac{(88,0 - 4,94H_i)10^{-3}}{\Delta S_i} \left(\frac{0,55 \cdot T_{ci}}{T_p} \right)^{N_i} c_{pmi} \cdot \rho_{mi}^{4/3}, \quad (1)$$

где i – номер ингредиента; $T_p = 305,5$ К – средняя рабочая температура смеси, К; T_{ci} – критическая температура i -го ингредиента, К; c_{pmi} – мольная теплоемкость i -го ингредиента, кал/(моль·К); ρ_{mi} – мольная плотность i -го ингредиента, моль/см³ [13].

Параметр H_i зависит от молекулярной структуры i -го ингредиента и выбирается по таблице 10.9 [13]. Показатель степени N_i находится по формуле:

$$N_i = \begin{cases} 1 & \text{при } \rho_{mi} < 1 \text{ г/см}^3, \\ 0 & \text{при } \rho_{mi} > 1 \text{ г/см}^3. \end{cases}$$

Так как для NaOH, гидразин-гидрата и хлорлигнина $\rho_{mi} > 1$ г/см³, то $N_i = 0$ и формулу (1) можно упростить:

$$\lambda_i = \frac{(88,0 - 4,94 \cdot H_i) \cdot 10^{-3}}{\Delta S_i} \cdot c_{pmi} \cdot \rho_{mi}^{4/3}.$$

Параметр ΔS_i рассчитывается по формуле:

$$\Delta S_i = \frac{\Delta H_{mi}}{T_{ki}} + R \ln \left(\frac{273}{T_{ki}} \right),$$

где $R = 1,9891$ кал/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; ΔH_{mi} , кал/моль – мольная теплота парообразования при нормальной температуре кипения T_{ki} , К.

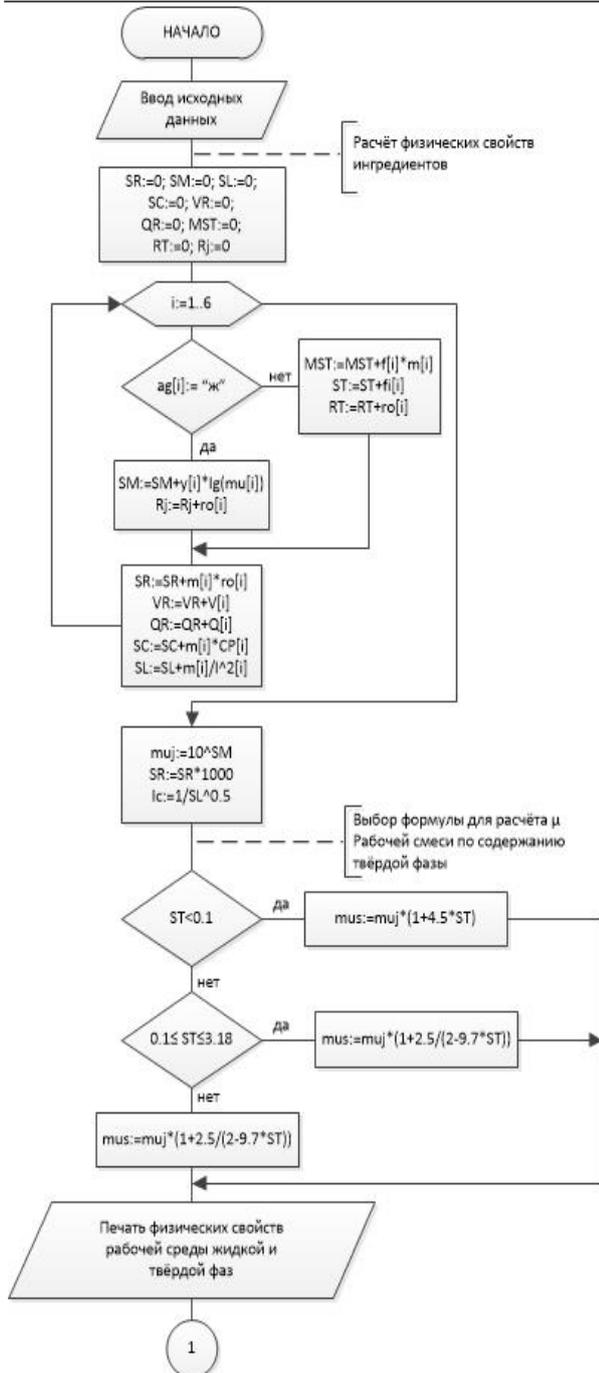


Рис. 4. Блок-схема подпрограммы расчета физических свойств рабочей среды и выбор типа мешалок

Fig 4. Block diagram of the subroutine for calculating the physical properties of the working environment and the choice of the type of mixers

Результаты расчета по подпрограмме физических свойств среды, жидких и твердых ингредиентов с размером частиц твердой фазы $\delta = 1,5$ мм указаны в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета по подпрограмме физических свойств среды, жидких и твердых ингредиентов
Table 2. Calculation results for the subprogram of the physical properties of the medium, liquid and solid ingredients

Наименование ингредиента	μ_i , сП	λ_i , кал/(см·с·К)	ρ_i , кг/м ³	c_{pi} , Дж/(кг·К)
Щелочь (гран.) NaOH	–	0,00154	2 130	297
H ₂ O	1,0060	0,0014	998	4 200
Гидразин-гидрат	0,9693	0,00644	1 035	208,537
Сера	–	0,00154	2 070	710
Хлорлигнин (гирозинный)	–	0,00031	1 050	2 520
1,2,3-трихлорпропан	2,5494	0,00809	1 389	87,037
Рабочая среда	6,0146	0,00091	1 444	2 166,057

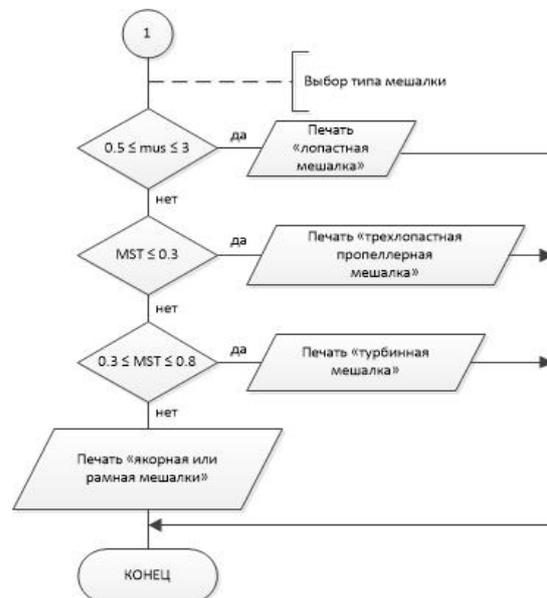


Рис. 5. Продолжение блок-схемы подпрограммы

Fig. 5. Continuation of block diagram of a subroutine

Гидродинамический расчет проводится для определения усредненных характеристик полей скоростей в объеме реактора и глубины образующейся воронки. Необходимо также вычислить мощность, затрачиваемую на перемешивание рабочей среды [19, 21].

Принимаем отношение $\Gamma_D = D/d_m = 3,75$. Тогда диаметр пропеллерной мешалки типа 01M $d_m = D/\Gamma_D = 1,2/3,75 = 0,32$ м. Диаметр вала мешалки $d_b = 0,08$ м, высота лопасти 0,077 м, ее длина 0,064 м, толщина 0,004 м [21].

Примем для реактора высоту h расположения мешалки над днищем $h = d_m = 0,32$ м. Полагаяем окружную скорость мешалки $\omega = 4$ м/с. Тогда частота вращения мешалки будет равна

$$n = \frac{\omega}{\pi \cdot d_m} = \frac{4}{3,14 \cdot 0,32} = 3,9809 \approx 3,981 \text{ с}^{-1}.$$

Значение n должно удовлетворять условию:

$$n \geq n_{\min} = C_1 \cdot \left(\frac{D \cdot \delta \cdot (\rho_T - \rho_{ж})}{d_m^4 \cdot \rho_{ж}} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где константа $C_1 = 4,72$ при перемешивании в системе «твердое – жидкость»:

$$n_{\min} = 4,72 \cdot \left(\frac{1,2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot (865,1 - 579,2)}{0,32^4 \cdot 572} \right)^{0,5} \approx 1,382 \text{ с}^{-1}.$$

Так как $n = 3,981 > 1,382$, то условие (2) выполняется.

Принимаем в соответствии с ГОСТ 20680-75 частоту вращения выходного вала редуктора $n = 4,17 \text{ с}^{-1}$.

Центробежный критерий Рейнольдса вычислялся по формуле:

$Re_{ц} = n \cdot d_m^2 \cdot \rho_c / \mu_c = 4,17 \cdot 0,32^2 \cdot 1444,3 / 0,06 = 10278,8$.
Полученное значение $Re_{ц}$ свидетельствует о турбулентном режиме перемешивания суспензии.

Найдем величину параметра γ для реактора со свободной поверхностью суспензии по формуле:

$$\gamma = 4N_{ж} / D + 1 = 4 \cdot 1,16 / 1,2 + 1 \approx 3,87.$$

Найдем величину параметра E по формуле:

$$E = \gamma / (\xi_{ж} \cdot Re_{ц}^{0,25}) = 3,87 / (0,56 \cdot 10352,74^{0,25}) \approx 0,6863.$$

В гладкостенном реакторе поле скоростей характеризуется тангенциальной W_t , радиальной W_r и осевой W_z составляющими скорости W .

Значение ψ_1 по полиномиальной аппроксимации:

$$\psi_1 = 1,200075 + 0,433541x - 0,024198x^2 - 0,04901x^3 - 0,0000961x^4,$$

где $x = \ln E = -0,3782$ [23]. Вычисленное в основной программе значение $\psi_1 = 2,01098$. Зная значение ψ_1 , можно определить параметр распределения скорости ψ_2 по формуле:

$$\psi_2 = 0,5 - 1,25 \cdot \psi_1 = -2,0137.$$

Для пропеллерных мешалок с $\Gamma_D \geq 1,5$ функция относительной средней скорости зависит от параметра ψ_1 :

$$V_{cp} = \frac{1 + 0,4\psi_1 + 0,5\psi_2 + 2(1 + \psi_1 + \psi_2)\ln \Gamma_D}{2\Gamma_D} = 0,46 \text{ м/с}.$$

На рис. 6 представлен график окружной скорости суспензии в зоне трехлопастной пропеллерной мешалки, рассчитанный в программе по формулам:

$$W_{t1} = 2\pi nr \left[\psi_1 \left(\frac{2r}{d_m} \right)^2 + \psi_2 \left(\frac{2r}{d_m} \right)^2 + 1 \right], \quad 0 \leq r \leq 0,5d_m,$$

$$W_{t2} = \pi d_m^2 n \frac{\psi_1 + \psi_2 + 1}{2r}, \quad 0,5d_m \leq r \leq 0,5D.$$

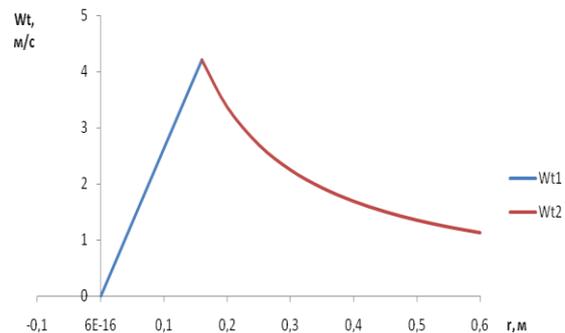


Рис. 6. Окружная скорость суспензии в реакторе в зоне трехлопастной пропеллерной мешалки
Fig. 6. The peripheral velocity of the suspension in the reactor in the zone of a three-blade propeller agitator

Как видно из рис. 6, окружная скорость почти линейно возрастает до максимального значения на диаметре мешалки. В периферийной зоне окружная скорость гиперболически убывает вплоть до стенки реактора.

Для пропеллерных мешалок коэффициент $K_1(\psi_1)$ найдем по графику 2.19 [23]: $K_1 = 0,0018$. Параметр глубины воронки определялся по формуле:

$$B = -17,2 + \exp(3,33 - 0,2\psi_1) = 1,4865.$$

Тогда глубина воронки по РД 26-01-90-85М составит:

$$h_B = B \frac{n^2 d_m^2}{2g} = 1,4865 \frac{4,20^2 \cdot 0,32^2}{2 \cdot 9,81} \approx 0,1369 \text{ м}.$$

Примем высоту установки мешалки над днищем аппарата $h_m = d_m = 0,32$ м и $b = 0,1d_m = 0,032$ м.

Высота суспензии в реакторе при перемешивании должна быть больше чем h_m , т. е. должно выполняться неравенство:

$$H_{ж} - h_B > h_m. \quad (3)$$

Неравенство (3) выполняется: $1,16 - 0,14 = 1,02 > 0,32$.

По РД 26-01-90-85М коэффициент сопротивления корпуса реактора для $G_D > 2$ составит $\lambda = 0,095$, коэффициент сопротивления трехлопастной мешалки $\xi_m = 0,56$.

Критерий мощности перемешивания

$$K_N = 3,87 \cdot \xi_m \cdot K_1 = 3,87 \cdot 0,56 \cdot 0,018 \approx 0,0390.$$

Мощность, которая потребляется при перемешивании, составит

$$N = K_{Np} \rho_c n^3 d_m^5 = 0,039 \cdot 1444,3 \cdot 4,20^3 \cdot 0,32^5 \approx 13,705 \text{ Вт.}$$

Уточним необходимую мощность привода с учетом пусковых нагрузок, принимая во внимание, что коэффициент $K_n = 1,5$ по РД 26-01-90-85М для пропеллерных мешалок с $G_D > 1,5$ при отсутствии внутренних устройств при числах Re_n больше 500:

$$N_N = K_n \cdot N = 1,5 \cdot 14,0064 \approx 20,2276 \text{ Вт.}$$

Погрешность использованного метода расчета 10–15 %.

Выбор мощности привода реактора с мешалкой производят по результатам гидродинамического расчета с учетом механического КПД привода. Расчетная мощность привода $N_{пр}$ определяется по формуле:

$$N_{пр} = N_N / (\eta_{пр} \cdot \eta_{упл})$$

где $\eta_{пр}$ – КПД привода; $\eta_{упл}$ – КПД уплотнения, которые могут принимать следующие значения в зависимости от исполнения и мощности привода, конструкции уплотнения:

$$\eta_{пр} \approx 0,75 - 0,95; \eta_{упл} \approx 0,9 - 0,98.$$

Принимаем $\eta_{пр} = 0,75$, $\eta_{упл} = 0,9$. Тогда мощность привода будет равна

$$N_{пр} = 21,00961 / (0,9 \cdot 0,9) = 25,38 \text{ Вт.}$$

По значению $N_{пр}$ выбираем стандартный привод, который удовлетворяет ближайшему целому значению $N_{пр}$: мотор-редуктор с номинальной мощностью $N_p = 0,25$ кВт по табл. 11 приложения [18].

Заключение

С использованием расчетных методов выполнен масштабный переход от лабораторной установки к малой производственной установке производительностью 200 кг серосодержащего сорбента на один цикл. Разработана технологическая схема производства новых серосодержащих сорбентов. Выполненная алгоритмизация и автоматизация расчетов физических свойств ингредиентов двухфазной рабочей среды и гидродинамики трехлопастной пропеллерной мешалки обеспечивает сокращение времени и высокую точность расчетов.

Список литературы

1. Малявко О.И., Елагин М.С., Орешкин А.С. Автоматизация механических расчетов валов технологического оборудования // В.И. Вернадский: устойчивое развитие регионов: материалы Международной научно-практической конференции. В 5 т. Т. 1 / под научн. ред. В.А. Грачева и др. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. С. 142–144.
2. Борисенко А.Б., Антоненко А.В., Осовский А.В., Филимонова О.А. Система автоматизированного выбора вспомогательного оборудования многоассортиментных химических производств // Вестник Тамбовского ГТУ. 2012. Т. 18. № 3. С. 569–572.
3. Малявко О.И., Мокрозуб В.Г. Автоматизированный расчет валов в среде Internet // Техника и технологии машиностроения: материалы IV международной студенческой научно-практической конференции. Омск: Изд-во ОмГУ, 2015. С. 154–157.
4. Немтинов В.А., Мокрозуб А.В., Ерохина И.Н. Автоматизированный расчет заготовок днищ емкостных аппаратов // В.И. Вернадский: устойчивое развитие регионов: материалы Международной научно-практической конференции. В 5 т. Т. 1 / под научн. ред. В.А. Грачева и др. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. С. 151–154.
5. Домрачева В.А., Вещева Е.Н. Модифицирование углеродных сорбентов для повышения эффективности извлечения тяжелых металлов из сточных вод и техногенных образований // Вестник ИрГТУ. 2010. № 4 (44). С. 134–138.
6. Шалунц Л.В., Асламова В.С. Экспериментальные данные извлечения ионов меди, никеля и цинка из водных растворов реальных сточных вод модифицированным цеолитом // Научное и образовательное пространство: перспективы развития: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 28 февраля 2020 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2020. С. 86–91. URL: <https://interactive-plus.ru/ru/action/686/imprint> (дата обращения 14.03.2020).
7. Пат. № 2558896. Российская Федерация. Способ получения сорбента для очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов / Е.А. Чернышева, В.А. Грабельных, Е.П. Леванова, О.Н. Игнатова, И.Б. Розенцвейг, Н.В. Руссавская [и др.]; заявл. 06.06.2014, опублик. 10.08.2015 г. Бюл. № 22.
8. Aslamova V.S., Chernysheva E.A., Grabelnykh V.A., Levanova E.P., Russavskaya N.V. Regression analysis of zinc and cadmium ion extraction from aqueous solutions using a lignin-based sulphur-containing sorbent. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]*. 2018. Vol. 8, No. 4. Pp. 174–183.
9. Чернышева Е.А., Асламова В.С., Грабельных В.А., Леванова Е.П. Регрессионные зависимости адсорбции ионов ртути из водных растворов серосодержащим сорбентом на основе лигнина // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы Девятой международной научно-практической конференции, г. Иркутск.: в 2 т. Т. 1. Иркутск: ИрГУПС, 2018. С. 286–291.
10. Чернышева Е.А., Асламова В.С. Регрессионные модели извлечения ионов кадмия из водных растворов серосодержащим сорбентом на основе лигнина // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 2 / под общ. ред. А.А. Большакова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 21–24.

11. Борсков Г.К. Моделирование химических процессов // Вестник Академии наук СССР. 1964. № 5. С. 47–56.
12. Розен А.М., Мартюшин Е.И., Олевский В.М. и др. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования. М.: Химия, 1980. 320 с.
13. Рид Р., Праусниц ДЖ., Шервуд Т. Свойства жидкостей и газов: справочное пособие. Л.: Химия, 1982. 592 с.
14. Расчет физико-химических свойств реакционной смеси. URL: http://www.fptl.ru/files/oborudovanie/ras4et_fiziko-himi4eskih-svoystv.pdf (дата обращения 20.12.2019).
15. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <https://chem21.info/info/1754159/> (дата обращения 16.01.2020).
16. Барабаш В.М., Абиев Р.Ш., Кулов Н.Н. Обзор работ по теории и практике перемешивания // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. № 4. С. 367–383.
17. Cudak M., Domanski M., Szoplik J., Karcz J. An effect of the impeller eccentricity on the process characteristics in an agitate of vessel // Proceedings of 15th European Conference on Mixing. St. Petersburg: Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), 2015. P. 75.
18. Доманский И.В., Исаков В.П., Островский Г.М. и др. Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи: учебное пособие. Под общ. ред. В.Н. Соколова. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1982. 384 с.
19. Карпушкин С.В., Краснянский М.Н., Борисенко А.Б. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 168 с.
20. Асламова В.С., Шнейгельбергер Е.А., Асламов А.А. Технология и оборудование производства серосодержащих сорбентов для извлечения тяжелых металлов из сточных вод // Сб. статей междуна. науч.-практ. конф. «Проблемы технико-технологических систем и физико-математических моделей» (1 марта 2020, г. Самара). Уфа: Аэтерна, 2020. С. 18–22.
21. Альбом типовых конструкций. Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования. АТК 24.201.17-90.
22. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1968. 848 с.
23. Беляев В.М., Миронов В.М. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. 288 с.

References

1. Malyavko O.I., Elagin M.S., Oreshkin A.S. Automation of mechanical calculations of process equipment shafts [Automation of mechanical calculations of process equipment shafts]. *IN AND. Vernadsky: sustainable development of regions: materials of the International scientific and practical conference. In 5 volumes. T. 1 / under scientific. ed. V.A. Gracheva and others [IN AND. Vernadsky: sustainable development of regions: materials of the International scientific and practical conference. In 5 volumes. T. 1 / under scientific. ed. V.A. Gracheva and others].* Tambov: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "TSTU", 2016. pp. 142–144.
2. Borisenko A.B., Antonenko A.V., Osovsky A.V., Filimonova O.A. The system of automated selection of auxiliary equipment for multi-assortment chemical production [The system of automated selection of auxiliary equipment for multi-assortment chemical production]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tambov State Technical University].* 2012. Vol. 18. No. 3. pp. 569–572.
3. Malyavko O.I., Mokrozub V.G. Automated calculation of shafts in the Internet environment [Automated calculation of shafts in the Internet environment]. *Engineering and technology of mechanical engineering: materials of the IV international student scientific and practical conference. [Engineering and technology of mechanical engineering: materials of the IV international student scientific and practical conference].* Omsk: Publishing house of OMGU, 2015. pp. 154–157.
4. Nemtinov V.A., Mokrozub A.V., Erokhina I.N. Automated calculation of blanks for the bottoms of tank devices [Automated calculation of blanks for the bottoms of tank devices]. *IN AND. Vernadsky: sustainable development of regions: materials of the International scientific and practical conference. In 5 volumes. T. 1 / under scientific. ed. V.A. Gracheva and others [IN AND. Vernadsky: sustainable development of regions: materials of the International scientific and practical conference. In 5 volumes. T. 1 / under scientific. ed. V.A. Gracheva and others].* Tambov: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "TSTU", 2016. pp. 151–154.
5. Domracheva V.A., Veshcheva E.N. Modification of carbon sorbents to improve the efficiency of extraction of heavy metals from wastewater and industrial formations [Modification of carbon sorbents to improve the efficiency of extraction of heavy metals from wastewater and industrial formations]. *Vestnik IrGTU. [ISTU Bulletin].* 2010. No. 4 (44). pp. 134–138.
6. Shalunts L.V., Aslamova V.S. Experimental data on the extraction of copper, nickel and zinc ions from aqueous solutions of real wastewater by modified zeolite [Experimental data on the extraction of copper, nickel and zinc ions from aqueous solutions of real wastewater by modified zeolite]. *Scientific and educational space: development prospects: materials of the XVI Intern. scientific-practical conf. (Cheboksary, February 28, 2020) / editorial board: O. N. Shirokov [and others]. [Scientific and educational space: development prospects: materials of the XVI Intern. scientific-practical conf. (Cheboksary, February 28, 2020) / editorial board: O. N. Shirokov [and others]].* Cheboksary: Central nervous system "Interactive plus", 2020. pp. 86–91. URL: <https://interactive-plus.ru/ru/action/686/imprint> (date of treatment 03.14.2020).
7. Chernysheva E.A., Grabelnyh V.A., Levanova E.P., Ignatova O.N., Rozencvejg I.B., Russavskaya N.V., et al. Sposob polucheniya sorbenta dlya ochistki stochnyh vod ot soedinenij tyazhelyh metallov. zayavl; Patent RF. No. 2558896, 2015.
8. Aslamova V.S., Chernysheva E.A., Grabelnykh V.A., Levanova E.P., Russavskaya N.V. Regression analysis of zinc and cadmium ion extraction from aqueous solutions using a lignin-based sulphur-containing sorbent. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology].* 2018. Vol. 8. No. 4. pp. 174–183.
9. Chernysheva E.A., Aslamova V.S., Grabelnyh V.A., Levanova E.P. Regressionnyye zavisimosti adsorbtsii ionov rtuti iz

vodnyh rastvorov serosoderzhashim sorbentom na osnove lignin [Regression dependences of the adsorption of mercury ions from aqueous solutions by a sulfur-containing sorbent based on lignin]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy Devyatoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Transport infrastructure of the Siberian region: Proceedings of the Ninth International Scientific and Practical Conference, Irkutsk : in 2 volumes]. Vol. 1. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. pp. 286–291.

10. Chernysheva E.A., Aslamova V.S. Regressionnyye modeli izvlecheniya ionov kadmiya iz vodnyh rastvorov serosoderzhashim sorbentom na osnove lignin [Regression models for the extraction of cadmium ions from aqueous solutions with a sulfur-containing sorbent based on lignin]. *Matematicheskie metody v tehnikе i tehnologiyah: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf.: in 12 volumes* [Mathematical methods in engineering and technology: collection of articles. tr. international scientific. Conf. : in 12 volumes. Vol. 2 / pod obsh. red. A. A. Bolshakova]. SPb.: Politehn. un-t Publ., 2018. pp. 21–24.

11. Borekov G.K. Modelirovanie himicheskikh processov [Simulation of chemical processes]. *Vestnik Akademii nauk SSSR* [Bulletin of the USSR Academy of Sciences]. 1964. No. 5. pp. 47–56.

12. Rozen A.M., Martyushin E.I., Olevskiy V.M. i dr. Masshabnyj perehod v himicheskoy tehnologii: razrabotka promyshlennykh apparatov metodom gidrodinamicheskogo modelirovaniya [Large-scale transition in chemical technology: the development of industrial devices by the method of hydrodynamic modeling]. Moscow: Himiya, 1980. 320 p.

13. Rid R., Prausnic D.Zh., Shervud T. Svoystva zhidkostey i gazov: spravocnoe posobie [Properties of liquids and gases: a reference guide]. Leningrad: Himiya, 1982, 592 p.

14. Calculation of the physicochemical properties of the reaction mixture. URL: http://www.fptl.ru/files/oborudovanie/ras4et_fiziko-himi4eskih-svoystv.pdf (date of treatment 12/20/2019).

15. Chemist's Handbook 21. Chemistry and Chemical Technology. URL: <https://chem21.info/info/1754159/> (date of access 01/16/2020).

16. Barabash V.M., Zelenskij V.E. Peremeshivanie suspenzij [Review of papers on mixing theory and practice]. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii* [Theoretical foundations of chemical technology]. 1997. Vol. 31. No. 5. pp. 465–473.

17. Cudak M., Domanski M., Szoplik J., Karcz J. An effect of the impeller eccentricity on the process characteristics in an agitate of vessel. *Proceedings of 15th European Conference on Mixing. St. Petersburg: Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2015. 75 p.

18. Domansky I.V., Isakov V.P., Ostrovsky G.M. and other Machines and devices of chemical production [Machines and devices of chemical production: Examples and tasks]: examples and tasks: a tutorial. Under total. ed. V.N. Sokolov. *Mechanical engineering*. L.: Leningrad branch, 1982. 384 p.

19. Karpushkin S.V., Krasnyansky M.N., Borisenko A.B. Calculations and selection of mechanical mixing devices for vertical capacitive devices [Calculations and selection of mechanical mixing devices for vertical vessels]. Tambov: Publishing house of Tamb. state tech. University, 2009. 168 p.

20. Aslamova V.S., Shneigelberger E.A., Aslamov A.A. Technology and equipment for the production of sulfur-containing sorbents for the extraction of heavy metals from wastewater [Technology and equipment for the production of sulfur-containing sorbents for the extraction of heavy metals from wastewater]. *Sat. articles of international. scientific-practical conf. "Problems of technical and technological systems and physical and mathematical models" (March 1, 2020, Samara)* [Sat. articles of international. scientific-practical conf. "Problems of technical and technological systems and physical and mathematical models" (March 1, 2020, Samara)]. Ufa: Aeterna, 2020. pp. 18–22.

21. Albom tipovykh konstrukcij. Meshalki. Tipy, parametry, konstrukciya, osnovnye razmery i tehicheskie trebovaniya. ATK 24.201. pp 17-90.

22. Planovsky A.N., Ramm V.M., Kagan S.Z. Processes and devices of chemical technology [Processes and devices of chemical technology]. Moscow: Chemistry, 1968. 848 p.

23. Belyaev V.M., Mironov V.M. Calculation and design of the main equipment of the industry [Calculation and design of the main equipment of the industry]: a tutorial. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic. University, 2009. 288 p.

Информация об авторах

Асламова Вера Сергеевна – д-р техн. наук, профессор, кафедра техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: aslamovav@yandex.ru.

Асламов Александр Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: aaa_mx@angtu.ru.

Головкова Елена Александровна – канд. техн. наук, доцент, кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: temnikova_ea@bk.ru.

Шнегельбергер Евгения Александровна – инженер-эколог, ООО «АйкьюЭкологджи», г. Иркутск, e-mail: chern5218@yandex.ru.

Information about the authors

Vera S. Aslamova – Dr. Sci., Professor, Department of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aslamovav@yandex.ru.

Alexander A. Aslamov – Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Machines and Devices of Chemical Production, Angarsk State Technical University, e-mail: aaa_mx@angtu.ru.

Elena A. Golovkova – Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Industrial Electronics and Information and Measuring Technology, Angarsk State Technical University, e-mail: temnikova_ea@bk.ru.

Evgeniya A. Shnegelberger – environmental engineer, “AykyuEkology” LLC, Irkutsk, e-mail: chern5218@yandex.ru.