

УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

CONTROL, MODELING, AUTOMATION

Научная статья
УДК 681.5
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2023-1-7-15>
EDN BYFSJY

Автоматизация теплового расчета реактора для производства серосодержащего сорбента при разогреве реакционной смеси

*В. С. Асламова¹, А. А. Асламов², Е. А. Головкова³✉,
Е. А. Шнейгельбергер⁴, А. А. Истомина⁵*

^{1, 4}*Иркутский государственный университет путей сообщения,
Иркутск, Россия*

^{2, 3, 5}*Ангарский государственный технический университет,
Ангарск, Россия, temnikova_ea@bk.ru✉*

⁴*ООО «АйкьюЭкологджи»,
Иркутск, Россия*

Аннотация. Рассматривается задача автоматизации теплового расчета реактора для синтеза серосодержащего сорбента, полученного на основе использования отходов производства эпихлоргидрина, хлорированного лигнина и полисульфидов натрия. Автоматизированный расчет способствует сокращению трудоемкости процесса, повышению качества принимаемых проектных решений, существенно снижает производственные затраты и себестоимость готовой продукции. Установлено, что из-за несовместимости критериев подобия химических и массообменных процессов масштабный переход в реакторе на основе физического подобия осуществить практически невозможно. При масштабном переходе от лабораторной установки к малой производственной установке были использованы расчетные методы, основанные на инженерном опыте и позволяющие увеличить достоверность полученных результатов. Определены начальные значения, на основании которых будут осуществляться расчеты реактора с пропеллерной мешалкой, которая используется для перемешивания рабочей смеси с коэффициентом динамической вязкости 6,01 сП и содержанием твердой фазы 31,8 %. Тип мешалки был определен исходя из результатов расчета физических свойств ингредиентов, обзора конструкций перемешивающих устройств. Приводятся блок-схема и формальное описание алгоритма расчета теплообмена при разогреве реакционной смеси; интерфейс программы, написанной на языке C#, отображающий результаты теплового расчета нагрева рабочей смеси. В результате расчета вычислены количество теплоты и время, необходимые для нагрева рабочей смеси, коэффициент теплоотдачи от рабочей среды к стенке реактора, массовый расход воды и ее затраты, скорости воды в тепловой рубашке, режим течения воды в рубашке и другие критерии подобия.

Ключевые слова: тепловой расчет реактора, алгоритм теплового расчета, блок-схема, серосодержащий сорбент, время нагрева, коэффициент теплоотдачи, массовый расход воды

Для цитирования: Асламова В. С., Асламов А. А., Головкова Е. А., Шнейгельбергер Е. А., Истомина А. А. Автоматизация теплового расчета реактора для производства серосодержащего сорбента при разогреве реакционной смеси // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика 2023. № 1. С. 7–15. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2023-1-7-15>. EDN BYFSJY.

Original article

Automated thermal design of reactor for producing sulfur-containing sorbent in heating reaction mixture

V. S. Aslamova¹, A. A. Aslamov², E. A. Golovkova³✉,
E. A. Shneigelberger⁴, A. A. Istomina⁵

^{1, 4}Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russia

^{2, 3, 5}Angarsk State Technical University,
Angarsk, Russia, temnikova_ea@bk.ru✉

⁴LLC "Aikyuekolodzhi",
Irkutsk, Russia

Abstract. The article highlights the problem of automation the thermal design of a reactor for the synthesis of a sulfur-containing sorbent obtained from the use of waste products of epichlorohydrin, chlorinated lignin and sodium polysulfides is considered. Automated design helps to reduce the intensity of the process, improve the quality of design decisions, significantly reduce production costs, which has a positive effect on the cost of finished products. It has been found that due to the incompatibility of the similarity criteria of chemical and mass transfer processes there is little possibility to carry out a large-scale transition in a reactor based on physical similarity. In the course of a large-scale transition from a laboratory unit to a small production unit there were used the computational methods based on engineering experience that allow increasing the reliability of the results obtained. There have been determined the initial values, which will be used in the design for a reactor with a propeller agitator to mix a working mass having a dynamic viscosity coefficient of 6.01 sP and a solid phase content of 31.8%. The agitator type was determined by calculating the physical properties of the ingredients and selecting the mixer designs. A flowchart and a formal description of the algorithm for calculating heat transfer during a reaction mixture heating are given; the program interface is written in C# displaying the results of thermal design of the working mixture heating. As a result of the calculation, there has been calculated the amount of heat and time required to heat the working mixture, coefficient of heat transfer from the working mass to the reactor wall, mass flow rate of water and its costs, velocity of water in the thermal jacket, mode of water flow in the jacket and other similarity criteria.

Keywords: thermal design of the reactor, thermal calculation algorithm, flowchart, sulfur-containing sorbent, heating time, heat transfer coefficient, water mass flow rate

For citation: Aslamova V. S., Aslamov A. A., Golovkova E. A., Shneigelberger E. A., Istomina A. A. Automated thermal design of reactor for producing sulfur-containing sorbent in heating reaction mixture. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2023;1:7-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-7-15>. EDN BYFSJY.

Введение

Серосодержащий сорбент для эффективной очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов получают на основе использования отходов производства эпихлоргидрина, хлорированного лигнина и полисульфидов натрия, получаемых из элементарной серы и гидроксида натрия в водном растворе в присутствии гидразингидрата [1]. Технология и аппаратное оформление процесса получения серосодержащего сорбента подробно описаны в [2, 3]. Процесс осуществляется в емкостном химическом реакторе идеального смешения периодического действия при непрерывном перемешивании ингредиентов, физические свойства которых автоматически рассчитаны в подпрограмме, в которой приводятся рекомендации по выбору перемешивающего устройства [4].

Еще в 70-х гг. XX в. было установлено, что из-за изменения соотношения отдельных стадий процесса в реакторе масштабирование практически невоз-

можно осуществить на основе физического подобия в связи с несовместимостью критериев подобия химических и массообменных процессов [5]. Поэтому для расчета химического реактора будем использовать расчетные методы, основанные на инженерном опыте и позволяющие увеличить достоверность получаемых результатов [6, 7].

Следует отметить, что увеличение масштаба производственной установки не отразится на соотношении ингредиентов, которые используются для получения серосодержащего сорбента, так же, как не изменяется рецептура приготовления блюда в большем количестве и в большей посуде. Масса ингредиентов увеличивается согласно масштабу, изменится только время перемешивания, нагрева рабочей смеси до 45 °С и последующего ее охлаждения до 20 °С.

Известно, что автоматизированный расчет способствует сокращению трудоемкости процесса, повышению качества принимаемых проектных реше-

ний, существенно снижает производственные затраты и, соответственно, себестоимость готовой продукции [8–10], поэтому разработка алгоритма и программы автоматизированного теплового расчета реактора для определения времени разогрева рабочей смеси до 45 °С является актуальной задачей.

Алгоритм теплового расчета реактора при разогреве реакционной смеси

Для корректности выполнения алгоритма программой необходимо определить начальные значения, на основании которых будут осуществляться расчеты реактора, выполненного из стали 20, с пропеллерной мешалкой, которая используется для перемешивания рабочей смеси с коэффициентом динамической вязкости 6,01 сП и содержанием твердой

фазы 31,8 %. Зададим номинальный объем реактора $V_n = 1,6 \text{ м}^3$, внутренний диаметр реактора $D = 1,2 \text{ м}$, выберем стандартное эллиптическое днище с площадью поверхности F_d и объемом V_d [11]:

$$F_d = 1,24 \cdot D^2 = 1,24 \cdot 1,2^2 = 1,7856 \text{ м}^2;$$

$$V_d = \pi \cdot D^3 / 24 = \pi \cdot 1,2^3 / 24 \approx 0,226 \text{ м}^3.$$

Объем цилиндрической части реактора, м^3 , $V_{\text{ц}} = V_n - V_d = 1,6 - 0,226 = 1,374$.

Длина цилиндрической части реактора, которая является определяющим размером при конвективной теплоотдаче, м:

$$L_{\text{ц}} = V_{\text{ц}} / S_{\text{ц}} = 4V_{\text{ц}} / (\pi D^2) = 4 \cdot 1,374 / (\pi \cdot 1,2^2) \approx 1,214,$$

где $S_{\text{ц}}$ – толщина стенки реактора. Назначаем $S_{\text{ц}} = 6 \text{ мм}$, тогда наружный диаметр реактора (внутренний диаметр пространства тепловой рубашки), м, $D_1 = D + 2 S_{\text{ц}} = 1,212$.

Согласно ГОСТ Р 52857.8-2007 внутренний диаметр обечайки наружной цилиндрической рубашки $D_2 \leq 1,2 \cdot D_1$. Принимаем $D^2 = 1,3 \text{ м}$. Объем донной части рубашки, м^3 :

$$V_{\text{руб.д}} = \pi \cdot D_2^3 / 24 - \pi \cdot D_1^3 / 24 = \pi \cdot 1,3^3 / 24 - \pi \cdot 1,212^3 / 24 \approx 0,054.$$

Полный объем рубашки $V_{\text{руб}}$, м^3 :

$$V_{\text{руб}} = \pi (D_2^2 - D_1^2) \cdot L_{\text{ц}} / 4 + V_{\text{руб.д}} = \pi (1,3^2 - 1,212^2) \cdot 1,214 / 4 + 0,054 \approx 0,265.$$

Общая площадь теплообмена со стороны рубашки F_1 , м^2 :

$$F_1 = L_{\text{ц}} \cdot \pi \cdot D_1 + 1,24 \cdot D_1^2 = 1,214 \cdot \pi \cdot 1,212 + 1,24 \cdot 1,212^2 \approx 6,444.$$

Рабочая среда нагревается от $T_{11} = 20 \text{ °С}$ (293 К) до $T_{12} = 45 \text{ °С}$ (318 К) горячей водой, которая охлаждается от $T_{21} = 90 \text{ °С}$ (363 К) до $T_{22} = 80 \text{ °С}$ (353 К).

Средняя разность температур $\Delta T_{\text{ср}}$, К в процессе нагрева равна

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} = \frac{(363 - 293) - (353 - 318)}{\ln \left(\frac{363 - 293}{353 - 318} \right)} \approx 50,494,$$

где ΔT_1 – начальная разность температур на входе теплоносителя в рубашку; ΔT_2 – конечная разность температур на выходе теплоносителя из рубашки.

Количество теплоты Q , кДж, необходимое для нагрева суспензии и стенки реактора:

$$Q = 0,001 [V_{\text{ср}} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot c_{\text{ср}} \cdot (T_{12} - T_{11}) + F_1 \cdot s \cdot \rho_{\text{с}} \cdot c_{\text{р.с}} \cdot (T_{22} - T_{11})] = \\ = 0,001 [1,097 \cdot 1444,3 \cdot 2166,057 (318 - 293) + 6,444 \cdot 0,006 \cdot 7800 \cdot 469 (353 - 293)] = 94 \text{ 283,7},$$

где $V_{\text{ср}} = 1,097 \text{ м}^3$; $\rho_{\text{ср}} = 1 \text{ 444,3 кг/м}^3$ и $c_{\text{ср}} = 2 \text{ 166,057 Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ – объем загружаемой реакционной смеси, ее плотность и удельная теплоемкость; $\rho_{\text{с}} = 7 \text{ 800 кг/м}^3$ и $c_{\text{р.с}} = 469 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ – плотность и удельная теплоемкость стали 20.

Время нагрева среды:

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{1000 \cdot Q}{k \cdot F_1 \cdot \Delta T_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

при этом коэффициент теплопередачи k :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{с}}} + \frac{s}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{т}}}}, \quad (2)$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи от суспензии к стенке реактора; $\lambda_m = 79,64$ Вт/(м · К) – коэффициент теплопроводности стали 20 при 353 К; α_r – коэффициент теплоотдачи горячей воды (теплоноситель) к стенке реактора.

Смоченный периметр сечения рубашки в цилиндрической части, м:

$$\Pi = \pi(D_2 + D_3) = \pi(1,212 + 1,3) \approx 7,892,$$

где D_3 – номинальный диаметр реактора. Живое сечение рубашки в цилиндрической части, м²:

$$S_{ж} = \pi(D_3^2 - D_2^2) / 4 = \pi(1,3^2 - 1,212^2) / 4 \approx 0,174.$$

Эквивалентный диаметр рубашки в цилиндрической части, м:

$$Pr = \mu \cdot c_p / \lambda_b = 335 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 202 / 0,677 \approx 2,079,$$

где μ – коэффициент динамической вязкости воды при 85 °С; λ_b – коэффициент теплопроводности воды.

$$Nu = 0,33 \cdot Re^{0,5} Pr^{0,33} = 0,33 \cdot 2 \cdot 866,45^{0,5} \cdot 2,079^{0,33} = 22,495.$$

Коэффициент теплоотдачи α_r , Вт/(м² · К), в рубашке от воды к стенке, учитывая, что коэффициент теплопроводности воды при 385 К · $\lambda_b = 0,677$, Вт/(м · К), имеет значение

$$\alpha_r = \frac{Nu \cdot \lambda_b}{D_{экр}} = \frac{22,495 \cdot 0,677}{0,088} = 173,055.$$

$$a_1 = (c_{p,c} \cdot \lambda_{см}^2)^{0,33} = (2 \cdot 284,994 \cdot 1,2147^2)^{0,33} \approx 14,5942;$$

$$a_2 = 0,0237 \cdot a_1 \cdot \rho_c^{0,58} \cdot \mu_c^{-0,54} = 0,0237 \cdot 14,5942 \cdot 1393,13^{0,58} \cdot 6,0139^{-0,54} \approx 8,7438;$$

$$a_3 = 0,93 \cdot a_1 \cdot \rho_c^{0,36} \cdot \mu_c^{-0,24} = 0,93 \cdot 14,5942 \cdot 1393,13^{0,36} \cdot 6,0139^{-0,24} \approx 77,4219,$$

где $\lambda_{см}$ – коэффициент теплопроводности реакционной смеси; μ_c – коэффициент динамической вязкости смеси.

$$\alpha_c = 8,7438 \cdot 38,928^{0,29} \cdot 1,2^{-0,71} + 77,4219 \cdot 38,928^{0,18} \cdot 1,2^{0,82} = 196,0115.$$

Найдем значение коэффициента теплопередачи k , Вт/(м² · К), по формуле (2):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{196,0115} + \frac{0,006}{79,64} + \frac{1}{173,055}} = 91,28.$$

Определяем значение $\tau_{нагр}$ по формуле (1):

$$\tau_{нагр} = \frac{1000 \cdot 94283,7}{91,28 \cdot 6,444 \cdot 50,49} = 3173,13 \text{ с} = 52,88 \text{ мин} = 0,88 \text{ ч}.$$

$$D_{экр} = 4 \cdot S_{ж} / \Pi = 4 \cdot 0,174 / 7,892 = 0,088.$$

Зададим скорость воды в рубашке $W = 0,02$ м/с. Тогда значение критерия Рейнольдса составит

$$Re = D_{экр} \cdot W / \nu = 0,088 \cdot 0,02 \cdot 10^6 / 0,614 \approx 2 \cdot 866,45,$$

где коэффициент кинематической вязкости воды $\nu = 0,614 \cdot 10^{-6}$ м²/с при температуре 45 °С.

Так как $Re > 2 \cdot 320$, то режим движения горячей воды в рубашке переходный [12]. Физические свойства воды для средней температуры 85 °С определяли методом линейной интерполяции. Значение критерия Прандтля равно [12]:

Критерий Нуссельта для переходного режима [12] равен

При применении быстроходных пропеллерных мешалок коэффициент теплоотдачи α_c от суспензии к стенке реактора вычисляется по формуле

$$\alpha_c = a_2 \cdot N^{0,29} \cdot D^{-0,71} + a_3 \cdot N^{0,18} \cdot D^{0,82},$$

где N – мощность, израсходованная на перемешивание суспензии, Вт, при этом коэффициенты теплоотдачи α_1 – α_3 первого, второго и третьего приближения определяются так:

Значение α_c находим по формуле

Массовый расход воды, кг/с, вычисляется по формуле

$$M_b = \frac{1 \cdot 000 \cdot Q}{c_b \cdot \Delta T_{ср} \cdot \tau_{нагр}},$$

где c_b – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг · К), при температуре 358 К.

Затраты Z горячей воды, кг, с учетом 5 % тепловых потерь определяются по формуле

$$Z = M_b \cdot \tau_{нагр} / 0,95.$$

Скорость воды W в рубашке рассчитывается по формуле $W = V / S_{ж}$, где V – объемный расход воды, м³/с, определяемый по формуле

$$V = M_B / \rho_B,$$

где ρ_B – плотность воды при средней температуре 358 К, найденная методом линейной интерполяции и равная 968,7 кг/м³.

Блок-схема алгоритма теплового расчета реактора

На рис. 1, 2 представлена блок-схема алгоритма теплового расчета реактора.

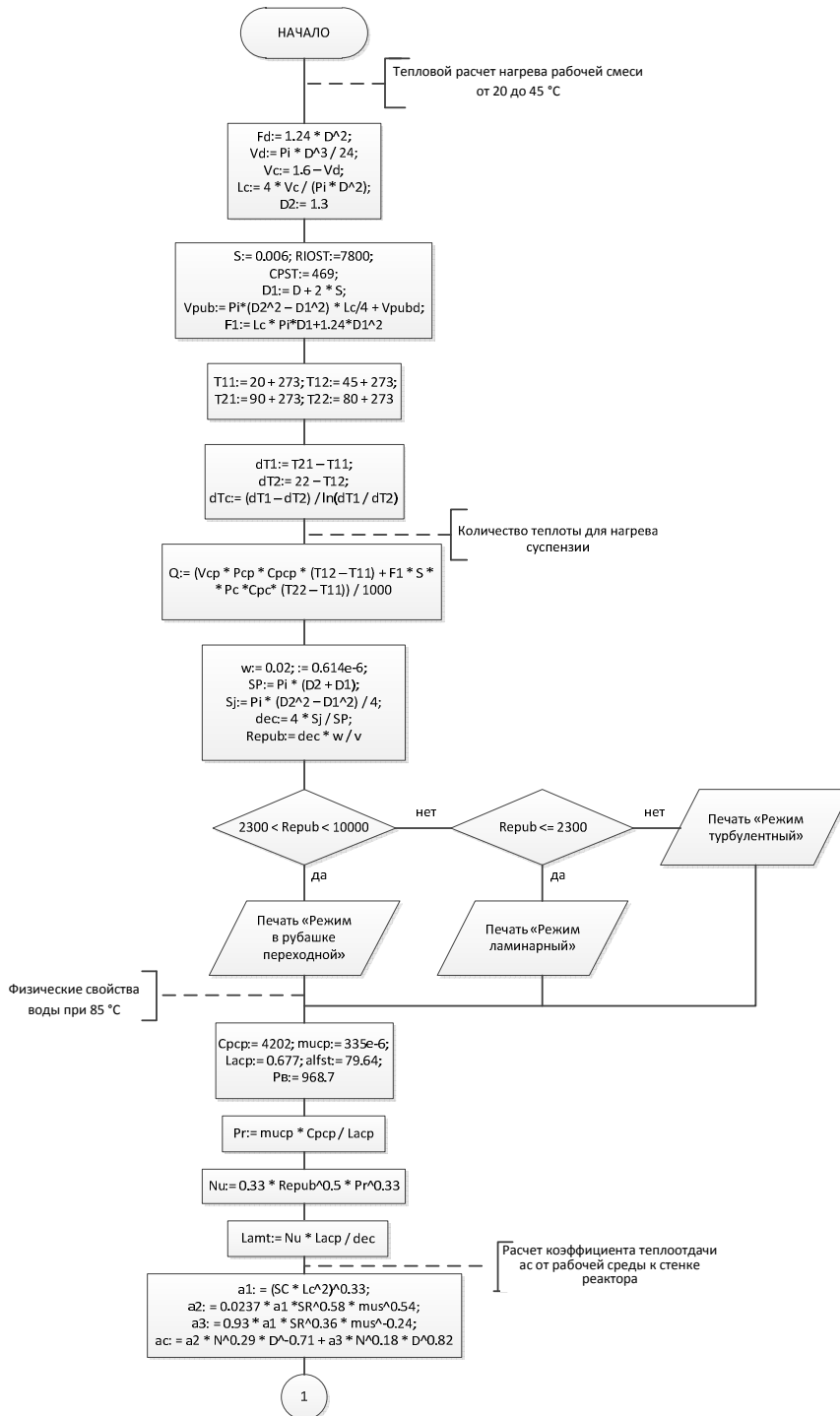


Рис. 1. Начало блок-схемы

Fig. 1. Beginning of the flowchart

Асламова В. С., Асламов А. А., Головкова Е. А., Шнейгельбергер Е. А., Истомина А. А. Автоматизация теплового расчета реактора для производства серосодержащего сорбента при разогреве реакционной смеси

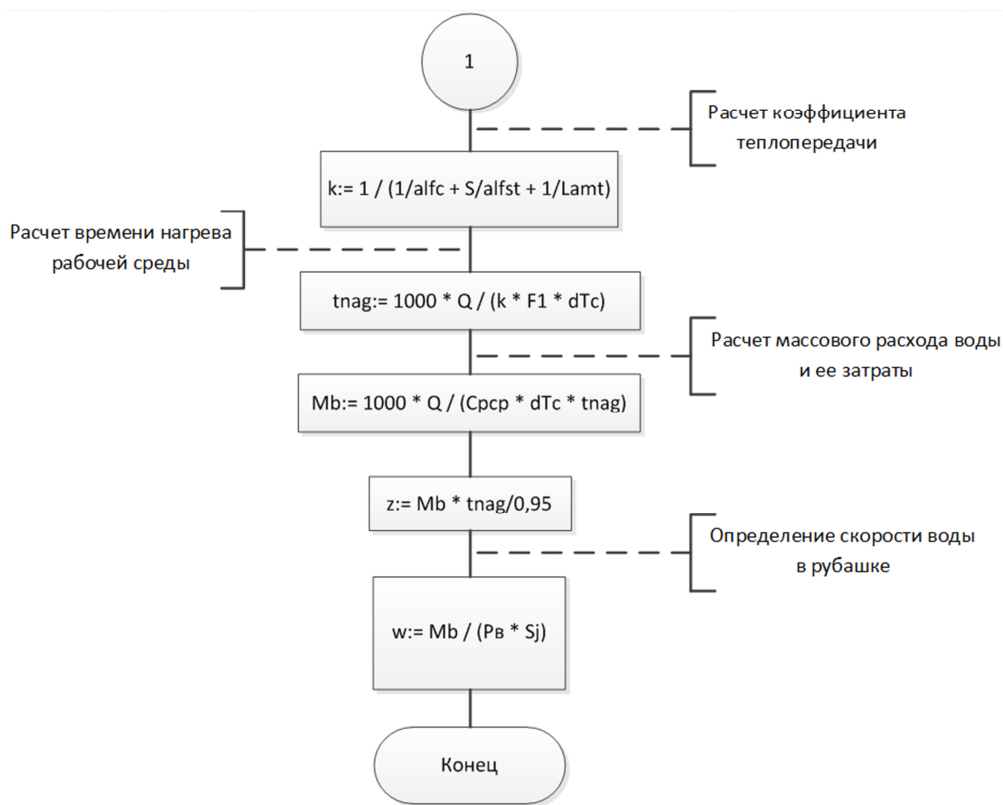


Рис. 2. Окончание блок-схемы

Fig. 2. Ending of the flowchart

Программа расчета реактора

На рис. 3, 4 представлены результаты автоматизированного теплового расчета химического реак-

тора по описанному алгоритму, а также интерфейс программы, созданной на языке C#.

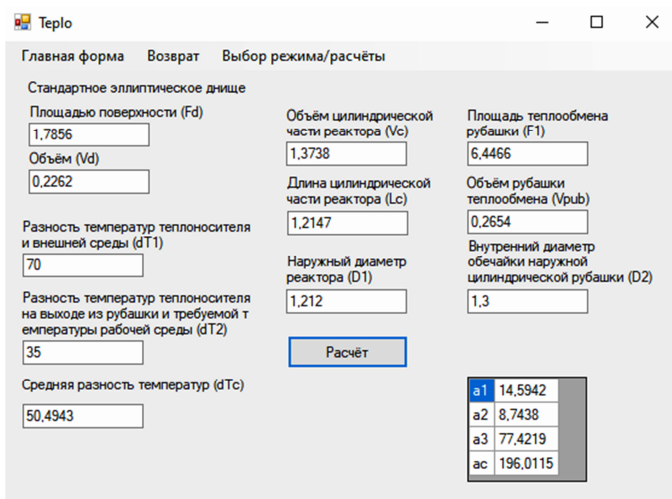


Рис. 3. Интерфейс программы теплового расчета химического реактора: определение температуры теплоносителя, размерных характеристик реактора и рубашки

Fig. 3. Program interface of the chemical reactor thermal design: determination of the temperature of the coolant, the dimensional characteristics of the reactor and the jacket

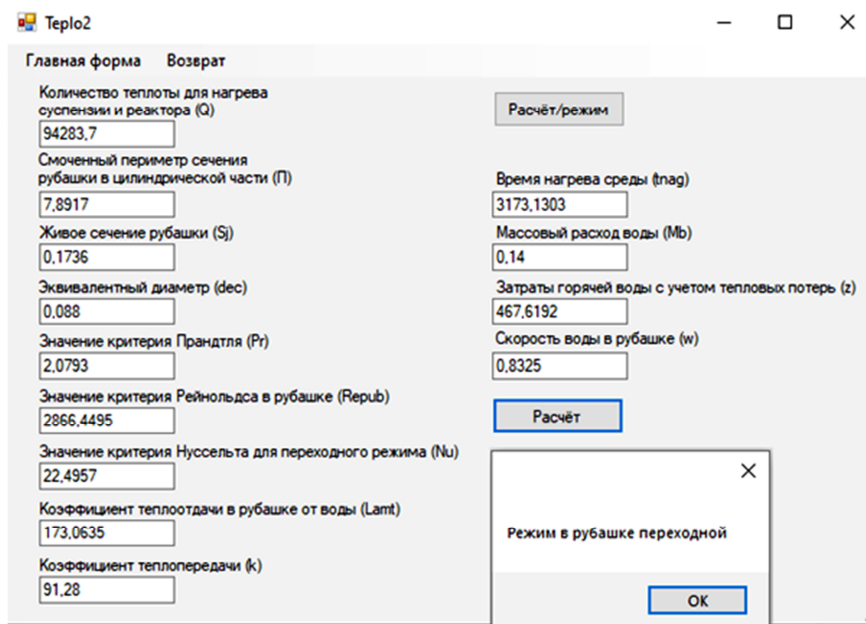


Рис. 4. Интерфейс программы теплового расчета химического реактора: определение Q , массового расхода воды, времени нагрева среды, режима и др.

Fig. 4. Program interface of the thermal design of a chemical reactor: calculating Q , water mass flow rate, working mass heating time, mode, etc.

В результате автоматизации расчетов по описанному алгоритму вычислены количество теплоты (нагрев реакционной смеси производится горячей водой 90 °С) и время (52,88 мин) нагрева рабочей смеси, коэффициент теплоотдачи от рабочей среды к стенке реактора, массовый расход воды и ее затраты, скорость воды в тепловой рубашке, режим течения воды в рубашке и другие критерии подобия.

Заключение

Описан алгоритм теплового расчета реактора для приготовления нового сорбента. Разработаны блок-схема и компьютерная программа.

Благодаря автоматизации расчетов повысилась их скорость и точность. В дальнейшем планируется расширить функционал программы для осуществления расчета реактора при охлаждении реакционной смеси.

Список источников

1. Пат. РФ № 2558896. Способ получения сорбента для очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов / Чернышева Е. А., Грабельных В. А., Леванова Е. П., Игнатова О. Н., Розенцвейг И. Б., Руссавская Н. В., Терек С. В., Корчевин Н. А.; заявл. 06.06.2014, опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.
2. Асламова В. С., Шнейгельбергер Е. А., Асламов А. А. Технология и оборудование производства серосодержащих сорбентов для извлечения тяжелых металлов из сточных вод // Проблемы технико-технологических систем и физико-математических моделей: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Самара, 1 марта 2020 г.). Уфа: Азтерна, 2020. С. 18–22.
3. Асламова В. С., Асламов А. А., Головкова Е. А., Шнейгельбергер Е. А. Автоматизированный расчет трехлопастной пропеллерной мешалки для производства серосодержащего сорбента на основе хлорлигнина, селективного к ионам тяжелых металлов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 4 (72). С. 48–58.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618080. Расчет физических свойств гетерогенной рабочей среды (жидкость – твердое) и выбор типа мешалки / Асламова В. С., Асламов А. А., Головкова Е. А., Шнейгельбергер Е. А.; заявл. 21.04.2022, зарег. 27.04.2022.
5. Боресков Г. К. Моделирование химических процессов // Вестн. Акад. наук СССР. 1964. № 5. С. 47–56.
6. 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.
7. Борисенко А. Б., Антоненко А. В., Осовский А. В., Филимонова О. А. Система автоматизированного выбора вспомогательного оборудования многоассортиментных химических производств // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2012. Т. 18. № 3. С. 569–572.
8. Малявко О. И., Мокрозуб В. Г. Автоматизированный расчет валов в среде Internet // Техника и технологии машиностроения: материалы IV Междунар. студенч. науч.-практ. конф. Омск: Изд-во ОмГУ, 2015. С. 154–157.

9. Немтинов В. А., Мокрозуб А. В., Ерохина И. Н. Автоматизированный расчет заготовок днищ емкостных аппаратов // В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 5 т. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2016. Т. 1. С. 151–154.

10. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <https://chem21.info/info/1754159/> (дата обращения: 16.01.2020).

11. Михалев М. Ф., Третьяков Н. П., Мильченко А. И., Зобнин В. В. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: примеры и задачи. Л.: Машиностроение, 1984. 301 с.

12. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

References

1. Chernysheva E. A., Grabel'nykh V. A., Levanova E. P., Ignatova O. N., Rozentsveig I. B., Russavskaya N. V., Terek S. V., Korchevin N. A. *Sposob polucheniia sorbenta dlia ochistki stochnykh vod ot soedinenii tiazhelykh metallov* [Method of obtaining sorbent for wastewater treatment from heavy metal compounds]. Patent RF no. 2558896, 10.08.2015.

2. Aslamova V. S., Shneigel'berger E. A., Aslamov A. A. *Tekhnologiya i oborudovanie proizvodstva serosoderzhashchikh sorbentov dlia izvlecheniia tiazhelykh metallov iz stochnykh vod* [Technology and equipment for production of sulfur-containing sorbents for extraction of heavy metals from wastewater]. *Problemy tekhniko-tehnologicheskikh sistem i fiziko-matematicheskikh modelei: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Samara, 1 marta 2020)*. Ufa, Aeterna Publ., 2020. Pp. 18-22.

3. Aslamova V. S., Aslamov A. A., Golovkova E. A., Shneigel'berger E. A. *Avtomatizirovannyi raschet trekhlopnastnoi propellernoi meshalki dlia proizvodstva serosoderzhashchego sorbenta na osnove khlorlignina, selektivnogo k ionam tiazhelykh metallov* [Automated design of three-bladed propeller mixer for production of sulfur-containing sorbent based on chlorlignin selective to heavy metal ions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*, 2021, no. 4 (72), pp. 48-58.

4. Aslamova V. S., Aslamov A. A., Golovkova E. A., Shneigel'berger E. A. *Raschet fizicheskikh svoystv geterogennoi rabochei sredy (zhidkost' – tverdoe) i vybor tipa meshalki* [Design of physical properties of heterogeneous working medium (liquid - solid) and choice of mixer type]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 202261808*; 27.04.2022.

5. Boreskov G. K. *Modelirovanie khimicheskikh protsessov* [Chemical processes modeling]. *Vestnik Akademii nauk SSSR*, 1964, no. 5, pp. 47-56.

6. Rozen A. M., Martiushin E. I., Olevskii V. M. i dr. *Masshabnyi perekhod v khimicheskoi tekhnologii: razrabotka promyshlennykh apparatov metodom gidrodinamicheskogo*

modelirovaniia [Large-scale transition in chemical technology: development of industrial apparatuses by hydrodynamic modeling]. Moscow, Khimiia Publ., 1980. 320 p.

7. Borisenko A. B., Antonenko A. V., Osovskii A. V., Filimonova O. A. *Sistema avtomatizirovannogo vybora vspomogatel'nogo oborudovaniia mnogoassortimentnykh khimicheskikh proizvodstv* [System for automated selection of auxiliary equipment for multi-assortment chemical production]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 569-572.

8. Maliavko O. I., Mokrozub V. G. *Avtomatizirovannyi raschet valov v srede Internet* [Automated calculation of rolls in Internet environment]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniia: materialy IV Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Omsk, Izd-vo OMGU, 2015. Pp. 154-157.

9. Nemtinov V. A., Mokrozub A. V., Erokhina I. N. *Avtomatizirovannyi raschet zagotovok dnishch emkostnykh apparatov* [Automated calculation of workpieces for bottoms of capacitive apparatuses]. *V. I. Vernadskii: ustoichivoe razvitie regionov: materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 5 t.* Tambov, Izd-vo TGTU, 2016. Vol. 1. Pp. 151-154.

10. *Spravochnik khimika 21. Khimiia i khimicheskaiia tekhnologiya* [Chemist's guide 21. Chemistry and chemical technology]. Available at: <https://chem21.info/info/1754159/> (accessed: 16.01.2020).

11. Mikhalev M. F., Tret'iakov N. P., Mil'chenko A. I., Zobnin V. V. *Raschet i konstruirovaniie mashin i apparatov khimicheskikh proizvodstv: primery i zadachi* [Calculation and design of machines and apparatuses for chemical production: examples and problems]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1984. 301 p.

12. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Principles of heat transfer]. Moscow, Energiia Publ., 1977. 344 p.

Статья поступила в редакцию 24.10.2022; одобрена после рецензирования 24.11.2022; принята к публикации 20.12.2022
The article is submitted 24.10.2022; approved after reviewing 24.11.2022; accepted for publication 20.12.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Вера Сергеевна Асламова – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры техносферной безопасности; Иркутский государственный университет путей сообщения; aslamovav@yandex.ru

Vera S. Aslamova – Doctor of Sciences in Technology, Professor; Professor of the Department of Technosphere Safety; Irkutsk State Transport University; aslamovav@yandex.ru

Александр Анатольевич Асламов – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры машин и аппаратов химических производств; Ангарский государственный технический университет; aaa_mx@angtu.ru

Alexander A. Aslamov – Candidate of Sciences in Technology, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Machinery and Apparatus of Chemical Production; Angarsk State Technical University; aaa_mx@angtu.ru

Елена Александровна Головкова – кандидат технических наук; доцент кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники; Ангарский государственный технический университет; temnikova_ea@bk.ru

Elena A. Golovkova – Candidate of Sciences in Technology; Assistant Professor of the Department of Industrial Electronics and Information and Measuring Equipment; Angarsk State Technical University; temnikova_ea@bk.ru

Евгения Александровна Шнейгельбергер – соискатель кафедры техносферной безопасности; Иркутский государственный университет путей сообщения; инженер-эколог; ООО «АйкьюЭколожи»; chern5218@yandex.ru

Evgeniya A. Shneigelberger – Applicant of the Department of the Department of Technosphere Safety; Irkutsk State Transport University; Environmental Engineer; LLC “Aikyuekolodzhi”; chern5218@yandex.ru

Алена Андреевна Истомина – кандидат технических наук; доцент кафедры технологии электрохимических производств; Ангарский государственный технический университет; alenaist@ya.ru

Alena A. Istomina – Candidate of Sciences in Technology; Assistant Professor of the Department of Electrochemical Production Technology; Angarsk State Technical University; alenaist@ya.ru

