

УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

CONTROL, MODELING, AUTOMATION

Научная статья
УДК 004.9+ 66.011
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-1-7-17>
EDN EJAJIS

Автоматизация расчета реактора для синтеза серосодержащего сорбента, предназначенного для извлечения из сточных вод ионов тяжелых металлов

*Вера Сергеевна Асламова¹, Александр Анатольевич Асламов²,
Елена Александровна Головкова³✉, Евгения Александровна Шнейгельбергер⁴*

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

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

⁴ООО «АйкьюЭкологджи»,
Иркутск, Россия

Аннотация. Представлен автоматизированный алгоритм расчета времени полного цикла работы, стадий термостабилизации и охлаждения реакционной смеси в реакторе, предназначенном для реактора синтеза серосодержащего сорбента, производимого на основе отходов производств металлургии, нефтехимии (сера), эпихлоргидрина (1, 2, 4-трихлорпропан) и целлюлозно-бумажной промышленности (лигнин) для извлечения из сточных вод ионов тяжелых металлов. Использование алгоритмов и программы автоматизированного расчета реактора способствует снижению трудоемкости производственных затрат и себестоимости готового сорбента, повышает надежность расчетов и качество проектных решений. Разработанные алгоритмы и программа включают в себя следующие подпрограммы расчета: физико-химических свойств компонентов реакционной смеси и выбора перемешивающего устройства (пропеллерная трехлопастная мешалка) с учетом вязкости смеси; гидродинамического расчета перемешивающего устройства и теплообмена при нагреве смеси от 20 до 45 °С; теплообмена при термостабилизации и охлаждении рабочей смеси, а также времени полного цикла работы реактора. В основе предлагаемого алгоритма теплообмена при термостабилизации реакционной массы лежит определение температурного диапазона водяного подогрева, компенсирующего тепловые потери. Для этого сформулирована и решена обратная задача теплообмена с неизвестными температурами по горячему теплоносителю, такими, что среднее значение между ними составляет термостабилизируемую величину. Приведен алгоритм расчета процесса охлаждения реакционной смеси в реакторе синтеза серосодержащего сорбента, учитывающий тепловые потери в окружающую среду в объеме 5 %. Разработана программа, реализующая представленные алгоритмы на языке C#, предназначенная для автоматизации расчета реактора синтеза серосодержащего сорбента, предназначенного для извлечения из сточных вод ионов тяжелых металлов.

Ключевые слова: алгоритм, охлаждение, термостабилизация, теплотери, время полного цикла работы реактора

Для цитирования: Асламова В. С., Асламов А. А., Головкова Е. А., Шнейгельбергер Е. А. Автоматизация расчета реактора для синтеза серосодержащего сорбента, предназначенного для извлечения из сточных вод ионов тяжелых металлов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 1. С. 7–17. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-1-7-17>. EDN EJAJIS.

Original article

Reactor calculation automation for the synthesis of a sulfur-containing sorbent intended for heavy metal ions extraction from wastewater

Vera S. Aslamova¹, Alexander A. Aslamov², Elena A. Golovkova^{3✉}, Evgeniya A. Shneygelberger⁴

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

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

⁴LLC Aikyuekolodzhi,
Irkutsk, Russia

Abstract. An automated algorithm for calculating the time of the full cycle of operation, the stages of thermal stabilization and cooling of the reaction mixture in a reactor designed for the synthesis of a sulfur-containing sorbent produced on the basis of waste products from metallurgy, petrochemistry (sulfur), epichlorohydrin (1, 2, 4-trichloropropane) and the pulp and paper industry (lignin) for extraction from wastewater of heavy metal ions. The use of algorithms and a program for automated calculation of the reactor helps to reduce the complexity of production costs and the cost of the finished sorbent, increases the reliability of calculations and the quality of design solutions. The developed algorithms and program include the following calculation routines: physico-chemical properties of the components of the reaction mixture and the choice of a mixing device (propeller three-bladed agitator), taking into account the viscosity of the mixture; hydrodynamic calculation of the mixing device and heat transfer when heating the mixture from 20 to 45 °C; heat transfer during thermal stabilization and cooling of the working mixture, as well as the time of the full cycle of the reactor. The proposed algorithm of heat transfer during thermal stabilization of the reaction mass is based on the determination of the temperature range of water heating, compensating for heat losses. For this purpose, the inverse problem of heat transfer with unknown temperatures over a hot heat carrier is formulated and solved, such that the average value between them is a thermostabilizable value. An algorithm for calculating the cooling process of the reaction mixture in a sulfur-containing sorbent synthesis reactor, taking into account heat losses to the environment in the amount of 5%, is presented. A program has been developed that implements the presented algorithms in C#, designed to automate the calculation of a sulfur-containing sorbent synthesis reactor designed to extract heavy metal ions from wastewater.

Keywords: algorithm, cooling, thermal stabilization, heat loss, full cycle time of the reactor

For citation: Aslamova V. S., Aslamov A. A., Golovkova E. A., Shneygelberger E. A. Reactor calculation automation for the synthesis of a sulfur-containing sorbent intended for heavy metal ions extraction from wastewater. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2024;1:7-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-1-7-17>. EDN EJAJIS.

Введение

Эффективность извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов предложенным серосодержащим сорбентом доказана в [1, 2], аппаратное оформление технологического процесса его синтеза приводится в [3]. Для синтеза сорбента используется химический емкостной реактор периодического действия с непрерывным перемешиванием ингредиентов. Масштаб производственной установки не отражается на пропорциях ингредиентов, используемых при синтезе сорбента, т. к. их масса повышается согласно масштабу [3]. Изменяется только время перемешивания, нагрева, термостабилизации и охлаждения реакционной смеси.

При расчете реактора использовались инженерные методы расчета, поскольку еще в XX в. было доказано, что невозможно выполнить масштабный

переход, используя физическое подобие, из-за несовместности одновременного моделирования массообменных и химических процессов [4, 5]. Актуальность работы обосновывается важностью и необходимостью автоматизированного расчета реактора, обеспечивающего сокращение трудоемкости, времени разработки проекта установки, производственных затрат и себестоимости продукта [6, 7].

Алгоритм теплового расчета стадии термостабилизации реакционной смеси

На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма расчета реактора, исполненного из стали 20, со стандартным эллиптическим днищем. Для перемешивания реакционной смеси используется пропеллерная мешалка [3].

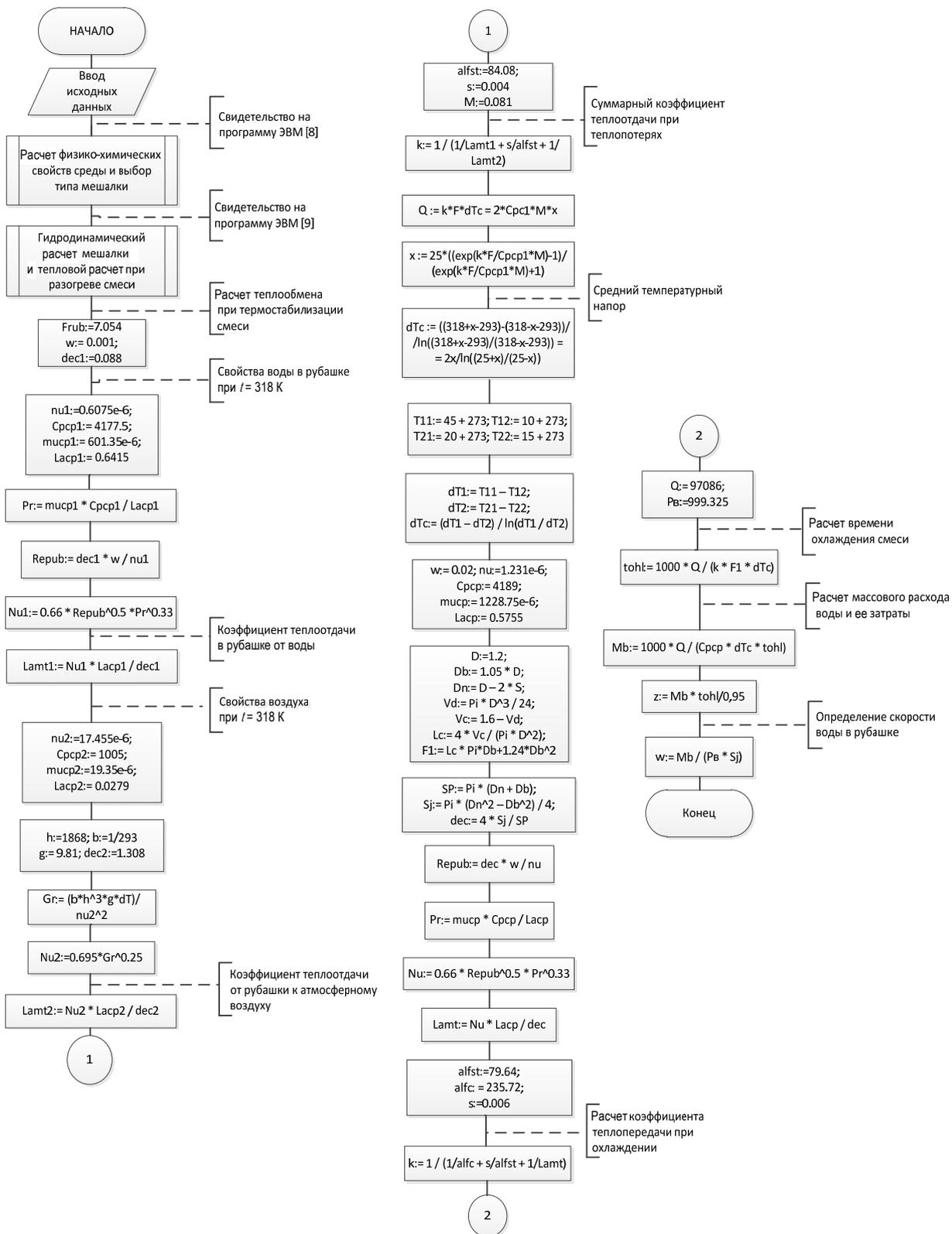


Рис. 1. Алгоритм расчета реактора с пропеллерной мешалкой

Fig. 1. Calculation algorithm of a propeller stirrer reactor

Конструктивные размеры реактора приведены в [10] и табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Конструктивные размеры реактора с рубашкой
Structural dimensions of a jacket reactor

Показатель	Обозначение	Значение
Внутренний диаметр реактора, м	D	1,20
Толщина стенки реактора, м	s	0,006
Наружный диаметр реактора, м	D_1	1,212
Длина цилиндрической части реактора, м	$L_{ц}$	1,214
Объем цилиндрической части реактора, м ³	$V_{ц}$	1,374
Объем реактора, м ³	$V_{н}$	1,6
Площадь поверхности эллиптического днища реактора, м ²	$F_{д}$	1,786
Объем эллиптического днища реактора, м ³	$V_{д}$	0,226
Внутренний диаметр цилиндрической обечайки рубашки, м	D_2	1,300
Внешний диаметр рубашки, м	D_3	1,308
Объем донной части рубашки, м ³	$V_{руб.д}$	0,054
Полный объем рубашки, м ³	$V_{руб}$	0,265
Площадь теплообмена рубашки с реактором при охлаждении смеси, м ²	$F_{охл}$	6,444
Площадь рубашки при термостабилизации смеси, м ²	$F_{руб}$	7,054

Этап формирования полимерной молекулы сорбента характеризуется изотермичностью реакционной зоны при $t = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (318 К). Для обеспечения изотермичности вода в рубашке должна иметь среднюю температуру, равную этому значению. При этом на внешней стенке рубашки будут иметь место теплотери в окружающую среду (ОС). Исходя из сказанного, вода изменяет температуру от $(318 + x)$ до $(318 - x)$ К, где x – отклонение температуры относительно среднего значения, являющегося целевым при термостабилизации реакционной смеси. Таким образом, технология термостабилизации заключается в регулировке температуры воды, поступающей в рубашку, на уровне $(318 + x)$ К при заданном ее расходе.

Примем температуру ОС $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (293 К). Оценим значение x при скорости теплоносителя $W = 0,001$ м/с.

Средняя разность температур ΔT_{cp} определяется по формуле среднелогарифмической разности температур [11]

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}, \quad (1)$$

где ΔT_1 – разность температур теплоносителя на входе в рубашку $(318 + x)$ и ОС (293), К; ΔT_2 – разность температур теплоносителя на выходе из рубашки $(318 - x)$ и температуры ОС:

$$\Delta T_{cp} = \frac{(318 + x - 293) - (318 - x - 293)}{\ln\left(\frac{318 + x - 293}{318 - x - 293}\right)} = \frac{2x}{\ln\left(\frac{25 + x}{25 - x}\right)}.$$

При этом тепловые потери через стенку рубашки в окружающую среду Q_1 , Дж, составят

$$Q_1 = kF_{руб}\Delta T_{cp} = kF_{руб} \frac{2x}{\ln\left(\frac{25 + x}{25 - x}\right)},$$

где k – коэффициент теплопередачи через стенку рубашки, Вт/(м²·град).

Источником теплотери является охлаждение воды в рубашке:

$$Q_2 = c_p M_b \Delta t = c_p M_b [(318 + x) - (318 - x)] = 2c_p M_b x,$$

где Q_2 – объем тепла, отдаваемого водой в рубашке, Дж; c_p – удельная теплоемкость воды в рубашке, Дж/(кг·град); M_b – массовый расход воды на термостабилизацию, кг/с; Δt – изменение температуры воды от входа в рубашку до выхода из нее, К.

Тепловой баланс в данной ситуации выражается равенством $Q_1 = Q_2$, которое приводит к уравнению относительно неизвестного x :

$$kF_{руб} \frac{2x}{\ln\left(\frac{25 + x}{25 - x}\right)} = 2c_p M_b x.$$

Решение данного уравнения:

$$x = 25 \left[\exp\left(\frac{kF_{руб}}{c_p M_b}\right) - 1 \right] / \left[\exp\left(\frac{kF_{руб}}{c_p M_b}\right) + 1 \right].$$

Для оценки x необходимо определить входящие в формулу параметры. При средней температуре

$t = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (318 K) вода в рубашке имеет свойства, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Свойства воды и воздуха при заданной средней температуре
Water and air properties at a given average temperature

Свойства	Значение свойств воды		Значение свойств воздуха при средней температуре 318 К
	при средней температуре 288,4 К	при средней температуре 318 К	
Плотность ρ , кг/м ³	999,325	990,1	1,1105
Динамическая вязкость μ , Па·с	$1\,228,75 \cdot 10^{-3}$	$601,35 \cdot 10^{-3}$	$19,35 \cdot 10^{-6}$
Кинематическая вязкость ν , м ² /с	$1,231 \cdot 10^{-6}$	$0,6075 \cdot 10^{-6}$	$17,455 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность λ , Вт/(м·град)	0,5755	0,6415	0,02795
Удельная теплоемкость c_p , Дж/(кг·град)	4 189	4 177,5	1 005
Скорость воды в рубашке W , м/с	0,02	0,001	–

Поскольку задача не имеет однозначного решения, каким-то параметром необходимо задаться априори. Для этого удобно задаться скоростью потока теплоносителя. Примем скорость воды в рубашке $W = 0,001$ м/с. Тогда критерий Рейнольдса в рубашке составит

$$Re = D_{\text{экв}} \cdot W / \nu = 0,088 \cdot 0,001 / (0,6075 \cdot 10^{-6}) = 144,6,$$

где $D_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр рубашки в цилиндрической части, м, равный

$$D_{\text{экв}} = \frac{4S}{\Pi} = 4 \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)/4}{\pi(D_2 + D_1)} = \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_2 + D_1} = \frac{1,3^2 - 1,212^2}{1,3 + 1,212} = 0,088,$$

где S , Π – площадь и смоченный периметр поперечного сечения потока жидкости.

Вычислим M_b , кг/с:

$$M_b = \pi(D_2^2 - D_1^2) \rho W / 4 = \pi(1,3^2 - 1,212^2) \cdot 990,1 \cdot 0,001 / 4 = 0,081.$$

Число Прандтля Pt для воды в рубашке [12]:

$$Pt = \mu \cdot c_p / \lambda = 601,35 \cdot 10^{-3} \cdot 4177,5 / 0,6415 \approx 3916,04.$$

ственно меньше 2 000, то режим движения воды в рубашке ламинарный. Для ламинарного режима критерий Нуссельта Nu определяется по формуле [12]

Так как значение критерия Рейнольдса суще-

$$Nu = 0,66 \cdot Re^{0,5} Pt^{0,33} = 0,66 \cdot 144,86^{0,5} \cdot 3\,916,04^{0,33} = 121,8.$$

Коэффициент теплоотдачи в рубашке от воды, Вт/(м²·К):

$$\alpha_T = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{\text{экв}}} = \frac{3916,04 \cdot 0,6415}{0,088} \approx 887,9.$$

ром наружной поверхности 1,308 м. При средней температуре $t = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (318 К) сталь 20 имеет теплопроводность $\lambda_{\text{ст}} = 84,08$ Вт/(м·град) На наружной поверхности происходит охлаждение воздухом. Воздух при средней температуре $t = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (318 К) имеет свойства, значения которых приведены в табл. 2. Высота реактора с двумя стандартными эллиптическими днищами, м, равна

Стенка рубашки выполнена из стали 20 толщиной 4 мм с внутренним диаметром 1,3 м и диамет-

$$h = L_{\text{ц}} + 2h_{\text{эл}} = L_{\text{ц}} + 2 \cdot D / 4 = 1,214 + 2 \cdot 1,312 / 4 = 1,868,$$

где $h_{\text{эл}} = D / 4$ – высота стандартного эллиптического днища, м. Для стенки такой высоты критерий

Грасгофа равен [12]

$$Gr = \frac{\beta \cdot h^3 \cdot g \cdot \Delta t}{\nu^2} = \frac{1,868^3 \cdot 9,81 \cdot (318 - 293)}{293 \cdot (17,455 \cdot 10^{-6})^2} = 1,791 \cdot 10^{10},$$

где параметр $\beta = 1 / 293, K^{-1}$; g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

Охлаждение рубашки происходит путем свободной конвекции атмосферного воздуха вдоль вертикальной стенки, для которой в ламинарном режиме критерий Нуссельта равен [12]:

$$Nu = 0,695 \cdot Gr^{0,25} = 0,695 (1,791 \cdot 10^{10})^{0,25} = 254,24.$$

Тогда коэффициент теплоотдачи от рубашки к атмосферному воздуху, $Вт/(м^2 \cdot К)$, равен

$$\alpha_B = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{D_{эКВ}} = \frac{254,24 \cdot 0,02795}{1,308} \approx 5,433,$$

где λ_B – теплопроводность воды, $Вт/(м \cdot град)$.

Суммарный коэффициент теплопередачи при теплопотерях от рубашки в окружающий атмосферный воздух, $Вт/(м^2 \cdot К)$, равен

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_T} + \frac{s}{\lambda_{СТ}} + \frac{1}{\alpha_B}} = \frac{1}{\frac{1}{887,9} + \frac{0,004}{84,08} + \frac{1}{5,433}} = 5,386.$$

Возвращаясь к определению неизвестного значения $x, ^\circ C$, получим:

$$x = 25 \frac{\exp\left(\frac{5,386 \cdot 7,054}{4 \cdot 177,5 \cdot 0,0814}\right) - 1}{\exp\left(\frac{5,386 \cdot 7,054}{4 \cdot 177,5 \cdot 0,0814}\right) + 1} = 2,032.$$

Тогда $\Delta T_{ср}$ между рубашкой и ОС, $^\circ C$, составит

$$\Delta T_{ср} = \frac{(318 - 283) - (293 - 288)}{\ln\left(\frac{318 - 283}{293 - 288}\right)} = \frac{35 - 5}{\ln\left(\frac{35}{5}\right)} = 15,41695 \approx 15,42.$$

Критерий Рейнольдса в рубашке в режиме охлаждения реакционной смеси вычисляется по формуле

$$Re = D_{эКВ} \cdot W / \nu = 0,088 \cdot 0,02 / 1,231 \cdot 10^{-6} = 1\,429,7.$$

$$Pr = \mu \cdot c_p / \lambda = 1\,228,75 \cdot 10^{-3} \cdot 4\,189 / 0,5755 \approx 8\,943,9.$$

Критерий Нуссельта для ламинарного режима [12]:

$$\Delta T_{ср} = \frac{2 \cdot 2,032}{\ln\left(\frac{25 + 2,032}{25 - 2,032}\right)} \approx 24,96.$$

Массовый расход воды для термостабилизации смеси $M_B = 0,081$ кг/с. Температура воды на входе в рубашку должна быть $46,81$ $^\circ C$, а на выходе $43,19$ $^\circ C$.

Таким образом, применительно к тепловому расчету химического реактора для синтеза серосодержащего сорбента получен новый алгоритм, описывающий процесс термостабилизации реакционной смеси при подаче теплоносителя в рубашку с заранее заданной скоростью $0,001$ м/с и вычисленной входной и выходной температурами, такими, что теплопотери от рубашки в окружающую среду сбалансированы таким образом, что средняя температура в рубашке была равна стабилизируемой температуре реакционной смеси.

Алгоритм теплового расчета стадии охлаждения реакционной смеси

Охлаждению подвергается реакционная масса с температуры 45 до 20 $^\circ C$.

При условии постоянства потока теплоносителя (вода 10 $^\circ C = 283$ К, нагреваемая до 15 $^\circ C = 288$ К) и неизменности его термодинамических свойств $\Delta T_{ср}$ определяется по формуле (1), где ΔT_1 – разность начальных температур рабочей среды (45 $^\circ C = 318$ К) и охлаждающей воды (10 $^\circ C = 283$ К); ΔT_2 – разность конечных температур рабочей среды (20 $^\circ C = 293$ К) и охлаждающей воды (15 $^\circ C = 288$ К).

Для режима охлаждения значение $\Delta T_{ср}, К$, вычисляется по формуле

Так как критерий Рейнольдса менее $2\,000$, режим движения ламинарный.

Значение критерия Прандтля Pr определяется по формуле [12]

$$Nu = 0,66 \cdot Re^{0,5} Pr^{0,33} = 0,66 \cdot 1\,429,7^{0,5} \cdot 8\,943,9^{0,33} \approx 502,5.$$

Коэффициент теплоотдачи в рубашке от воды, Вт/(м²·К), рассчитывается как отношение [12]

$$\alpha_T = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{эКВ}} = \frac{502,5 \cdot 0,5755}{0,088} \approx 3\,286,5.$$

Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м²·К), определяется по формуле [12]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \frac{s}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_T}} = \frac{1}{\frac{1}{235,7} + \frac{0,006}{84,08} + \frac{1}{3\,286,5}} \approx 216,6,$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи от реакционной смеси к стенке реактора; α_T – коэффициент теплоотдачи от стенки реактора к охлаждающей воде; коэффициент теплопроводности стали 20

$\lambda_m = 79,64$ Вт/(м·К) при 353 К.

Время охлаждения реакционной смеси $\tau_{охл}$, ч, рассчитывается по формуле

$$\tau_{охл} = \frac{1\,000 \cdot Q}{k \cdot F_{охл} \cdot \Delta T_{ср}} = \frac{1\,000 \cdot 97\,086}{216,6 \cdot 6,444 \cdot 15,42} = 4\,512,8 \text{ с} \approx 1,254 \text{ ч},$$

где Q – тепловая нагрузка, кДж.

вычисляется по формуле

Массовый расход воды при охлаждении смеси, кг/ч,

$$M_B = \frac{1\,000 \cdot Q}{c_p \cdot \Delta T_{ср} \cdot \tau_{охл}} = \frac{1\,000 \cdot 97\,086}{4\,189 \cdot 15,42 \cdot 4\,512,8} \approx 0,333 \text{ кг/с} \approx 1\,199,2 \text{ кг/ч}.$$

Затраты Z холодной воды, кг, при учете 5 % тепловых потерь составят

$$Z = \frac{M_B \cdot \tau_{охл}}{0,95} \approx \frac{0,365 \cdot 4\,512,8}{0,95} \approx 1\,582,4.$$

Тогда можно определить значения объемного расхода воды V в рубашке, м³/с, ее скорость W , мм/с:

$$V = M_B / \rho = 0,333 / 999,325 = 0,000333;$$

$$W = V / S_{ж} = 0,000333 / 0,174 = 0,00192 \text{ м/с} = 1,9.$$

Здесь $S_{ж} = 0,174 \text{ м}^2$ – площадь кольцевого сечения рубашки с диаметрами 1,212 и 1,3 м.

Таким образом, применительно к тепловому расчету химического реактора для синтеза серосодержащего сорбента разработан алгоритм для расчета стадии охлаждения реакционной смеси, реализующий задачу теплопередачи через стенку реактора. Для оценки сопутствующих теплотерь в окружающую среду на внешней границе рассматриваемой системы теплоносителей взята приемлемая величина в 5 % от общего теплового потока в процессе охлаждения реакционной смеси.

Время полного цикла работы реактора

Целесообразность использования химического реактора периодического действия обуславливается его КПД [13]:

$$\text{КПД} = \tau_p / \tau_{ц} = \tau_p / (\tau_p + \tau_b) = 0,7 \div 0,8, \quad (2)$$

где $\tau_p = 9$ ч – продолжительность химических реакций [1]; $\tau_{ц}$ – время полного цикла работы химического реактора; τ_b – время проведения вспомогательных операций:

$$\tau_b = \tau_{п.зп} + \tau_{нагр} + \tau_{охл}, \quad (3)$$

где $\tau_{п.зп}$ – время подготовки реактора, заполнения его суспензией и выгрузки продукта; $\tau_{нагр} = 0,88$ ч – время нагрева суспензии [10]; $\tau_{охл} = 1,254$ ч – время охлаждения суспензии.

Примем КПД = 0,7. Тогда из (2) получаем:

$$0,7 = 9 / (9 - \tau_b);$$

$$\tau_b = 3,857 \text{ ч}.$$

Тогда из формулы (3) следует:

$$\tau_{п.зп} = \tau_b - \tau_{нагр} - \tau_{охл} = 3,857 - 0,88 - 1,254 = 1,723 \text{ ч}.$$

Время полного цикла работы реактора, ч, составит:

$$\tau_{ц} = \tau_p + \tau_b = 9 + 3,857 = 12,857 \approx 12,86.$$

В данном разделе, исходя из взятого КПД = 0,7 для химического реактора периодического действия и вычисленных продолжительностей основных стадий синтеза серосодержащего сорбента,

получена оценка времени полного цикла работы реактора на одну загрузку.

Программа автоматизированного расчета

На рис. 2, 3 представлен интерфейс программы, реализованной на языке C#, с результатами автоматизированного теплового расчета реактора по описанным алгоритмам.

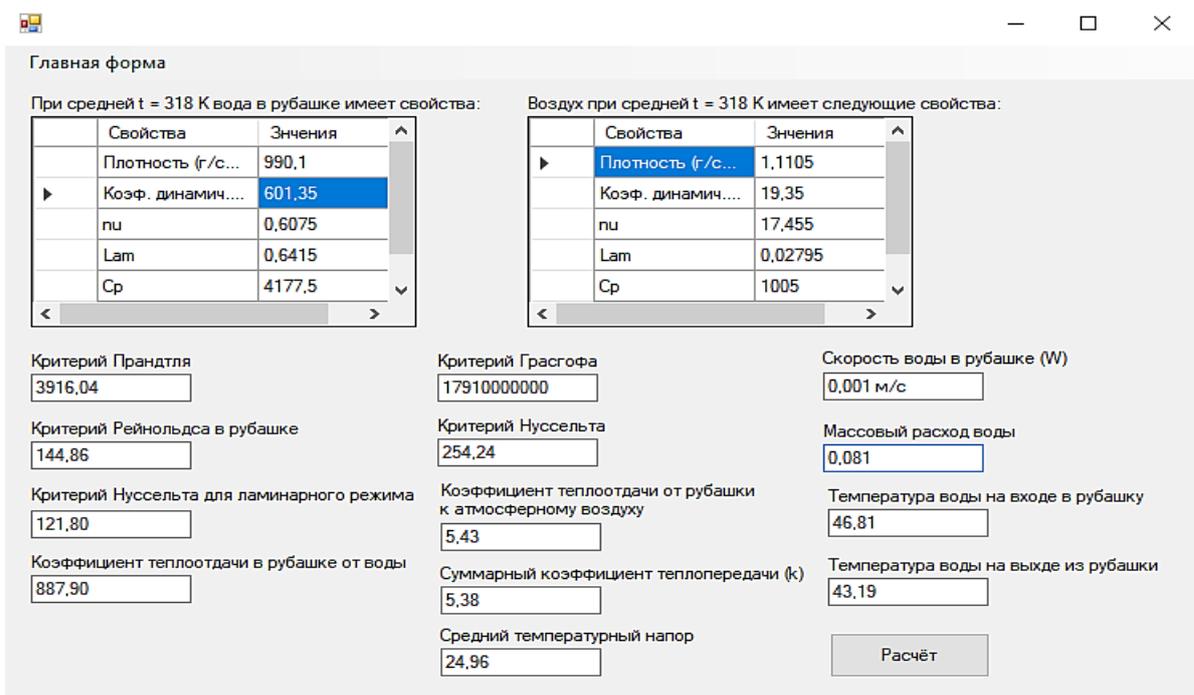


Рис. 2. Интерфейс программы расчета реактора при термостабилизации реакционной смеси

Fig. 2. Interface of the reactor calculation program at reaction mixture thermal stabilization

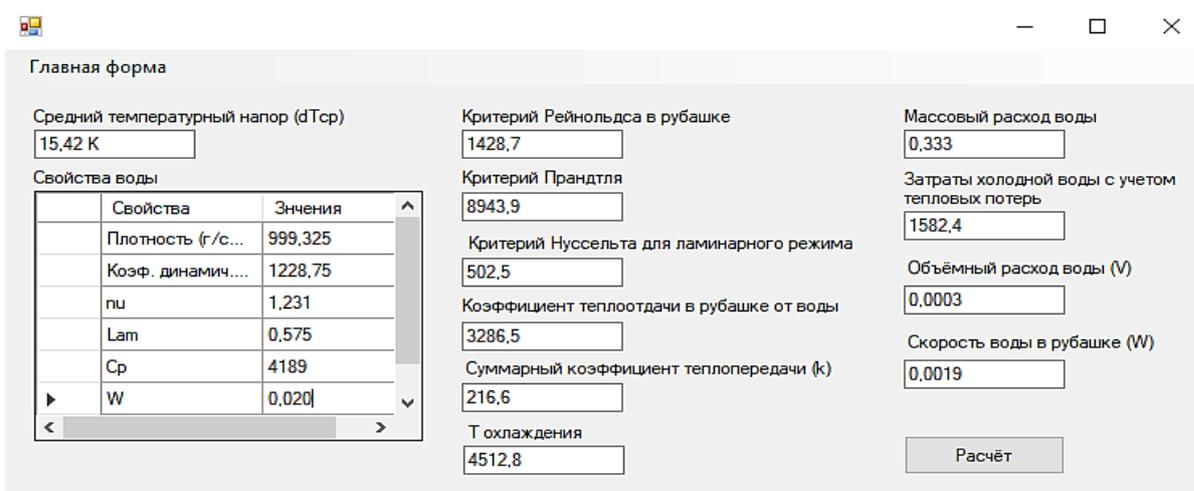


Рис. 3. Интерфейс программы расчета реактора при охлаждении реакционной смеси

Fig. 3. Interface of the reactor calculation program at reaction mixture cooling

Работоспособность программы расчета реактора для синтеза серосодержащего сорбента подтверждается совпадением ее результатов расчета с результатами ручного расчета.

Заключение

Предложены новые алгоритмы расчета теплообмена при термостабилизации и охлаждении ре-

акционной массы, а также времени полного цикла работы реактора синтеза серосодержащего сорбента периодического действия. Создана компьютерная программа, выполняющая автоматизированный расчет реактора по заданным и вычисленным параметрам, а также расчет времени полного цикла работы реактора.

Список источников

1. Пат. № 2558896. Российская Федерация. 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., Дронов В. Г., Гоготов А. Ф., Корчевин Н. А.; заявл. 06.06.2014, опублик. 10.08.2015. Бюл. № 22.
2. 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 // Изв. вузов. Приклад. химия и биотехнология. 2018. Т. 8, № 4. С. 174–183. DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-4-174-183.
3. Асламова В. С., Асламов А. А., Головкова Е. А., Шнегельбергер 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. 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.
5. Боресков Г. К. Моделирование химических процессов // Вестн. Акад. наук СССР. 1964. № 5. С. 47–56.
6. Борисенко А. Б., Антоненко А. В., Осовский А. В., Филимонова О. А. Система автоматизированного выбора вспомогательного оборудования многоассортиментных химических производств // Вестн. Тамбов. гос. техн. ун-та. 2012. Т. 18, № 3. С. 569–572.
7. 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. (Тамбов, 07–09 июня 2016 г.): в 5 т. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2016. Т. 1. С. 151–154.
8. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022618080. Расчет физических свойств гетерогенной рабочей среды (жидкость-твердое) и выбор типа мешалки / В. С. Асламова, Е. А. Головкова, Е. А. Шнегельбергер. Заяв. № 2022617237 от 21.04.2022, зарег. в Реестре программ для ЭВМ 27.04.2022.
9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023666764. Гидродинамический расчет трехлопастной пропеллерной мешалки и тепловой расчет реактора при разогреве реакционной смеси для производства серосодержащего сорбента / В. С. Асламова, Е. А. Головкова, Е. А. Шнегельбергер. Заяв. № 2023666087 от 24.07.2023, зарег. в Реестре программ для ЭВМ 04.08.2023.
10. 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 // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 1. С. 7–15.
11. Kurmanova D. Y., Jaichibekov N. Zh., Karpenko A. G., Volkov K. N. Numerical modeling and calculation of heat transfer between heat carriers in heat exchangers // Вестн. Караганд. ун-та. Сер.: Физика. 2023. № 1 (109). С. 59–70.
12. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
13. Доманский И. В., Исаков В. П. и др. Машины и аппараты химических производств: примеры и задачи. Л.: Машиностроение, 1982. 384 с.

References

1. Chernysheva E. A., Grabelnykh V. A., Levanova E. P., Ignatova O. N., Rozentsveig I. B., Russavskaya N. V., Dronov V. G., Gogotov A. F., Korchevin N. A. *Sposob polucheniia sorbenta dlia ochistki stochnykh vod ot soedinenii tiazhelykh metallov* [A method for obtaining a sorbent for wastewater treatment from heavy metal compounds]. Patent № 2558896. Rossiiskaia Federatsiia, 10.08.2015.
2. 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. *Izvestiia vuzov. Prikladnaia khimiia i biotekhnologiya*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 174–183. DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-4-174-183.
3. Aslamova V. S., Aslamov A. A., Golovkova E. A., Shnegel'berger E. A. Avtomatizirovannyi raschet trekhlopastnoi propellernoi meshalki dlia proizvodstva serosoderzhashchego sorbenta na osnove khlorlignina, selektivnogo k ionam tiazhelykh metallov [Automated calculation of a three-bladed propeller agitator for the production of sulfur-containing sorbent based on chlorolignin, selective to heavy metal ions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*, 2021, no. 4 (72), pp. 48–58.
4. Rozen A. M., Martiushin E. I., Olevskii V. M. i dr. *Masshtabnyi perekhod v khimicheskoi tekhnologii:*

razrabotka promyshlennykh apparatov metodom gidrodinamicheskogo modelirovaniia [Large-scale transition in chemical technology: development of industrial devices by hydrodynamic modeling]. Moscow, Khimiia Publ., 1980. 320 p.

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

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

7. Nemtinov V. A., Mokrozub A. V., Erokhina I. N. Avtomatizirovannyi raschet zagotovok dnishch emkostnykh apparatov [Automated calculation of billets of the bottoms of capacitive devices]. *V. I. Vernadskii: ustoichivoe razvitie regionov: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Tambov, 07–09 iyunia 2016 g.): v 5 t.* Tambov, Izd-vo TGTU, 2016. Vol. 1. Pp. 151-154.

8. Aslamova V. S., Golovkova E. A., Shnegel'berger E. A. *Raschet fizicheskikh svoystv geterogennoi rabochei sredy (zhidkost'-tverdoe) i vybor tipa meshalki* [Calculation of the physical properties of a heterogeneous working medium (liquid-solid) and selection of the type of agitator]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM N. 2022618080; 27.04.2022.

9. Aslamova V. S., Golovkova E. A., Shnegel'berger E. A. *Gidrodinamicheskii raschet trekhlopastnoi propellernoi*

meshalki i teplovoi raschet reaktora pri razogreve reaktsionnoi smesi dlia proizvodstva serosoderzhashchego sorbenta [Hydrodynamic calculation of a three-bladed propeller agitator and thermal calculation of the reactor during heating of the reaction mixture for the production of sulfur-containing sorbent]. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlia EVM N. 2023666764; 04.08.2023.

10. Aslamova V. S., Aslamov A. A., Golovkova E. A., Shneigel'berger E. A., Istomina A. A. Avtomatizatsiia tep-lovogo rascheta reaktora dlia proizvodstva serosoderzhashchego sorbenta pri razogreve reaktsionnoi smesi [Automation of the thermal calculation of the reactor for the production of sulfur-containing sorbent during heating of the reaction mixture]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2023, no. 1, pp. 7-15.

11. Kurmanova D. Y., Jaichibekov N. Zh., Karpenko A. G., Volkov K. N. Numerical modeling and calculation of heat transfer between heat carriers in heat exchangers. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya: Fizika*, 2023, no. 1 (109), pp. 59-70.

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

13. Domanskii I. V., Isakov V. P. i dr. *Mashiny i apparaty khimicheskikh proizvodstv: primery i zadachi* [Chemical production machines and apparatuses: examples and tasks]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982. 384 p.

Статья поступила в редакцию 25.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 15.01.2024
The article was submitted 25.10.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 15.01.2024

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

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

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

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

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

Евгения Александровна Шнейгельбергер – соискатель
ученой степени кандидата технических наук; Иркутский
государственный университет путей сообщения; инженер-
эколог; ООО «АйкьюЭкологджи»; chem5218@yandex.ru

Evgeniya A. Shneygelberger – Applicant for the degree of
Candidate of Technical Sciences; Irkutsk State Transport
University; Environmental Engineer; LLC Aikyuekolodzhi;
chem5218@yandex.ru

