

УДК 004.9+ 66.011

Асламов Александр Анатольевич,

*к.т.н., доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств»  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»**e-mail: aaa\_mx@angtu.ru*

Асламова Вера Сергеевна,

*д.т.н., профессор кафедры «Техносферная безопасность»  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей и сообщения»**e-mail: aslatovav@yandex.ru*

Головкова Елена Александровна,

*к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»**тел.: +7(924)825-34-77, e-mail: temnikova\_ea@bk.ru*

Шнейгельбергер Евгения Александровна

*инженер-эколог ООО «АйкьюЭкологджи»***АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО РАСЧЁТА РЕАКТОРА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
СЕРОСОДЕРЖАЩЕГО СОРБЕНТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ РЕАКЦИОННОЙ СМЕСИ***Aslamov A.A., Aslamova V.S., Golovkova E.A., Shneigelberger E.A.***AUTOMATION OF THERMAL CALCULATION OF THE REACTOR FOR PRODUCTION  
SULFUR-CONTAINING SORBENT DURING COOLING OF THE REACTION MIXTURE**

**Аннотация.** Рассматривается задача автоматизации расчёта реактора для синтеза серосодержащего сорбента, применяемого для очистки сточных вод от соединений тяжёлых металлов при охлаждении реакционной смеси. Определены начальные значения для осуществления автоматизированного расчёта реактора с пропеллерной мешалкой, выбор которой основан на результатах расчётов физических свойств ингредиентов и обзора конструкций перемешивающих устройств. Приводится математический алгоритм расчёта теплообмена при охлаждении реакционной смеси, а также интерфейс компьютерной программы, написанной на языке C#, с результатами автоматизированных расчётов.

**Ключевые слова:** серосодержащий сорбент, охлаждение смеси, алгоритм теплового расчёта реактора, программное приложение.

**Abstract.** The problem of automating the calculation of a reactor for the synthesis of a sulfur-containing sorbent used for wastewater treatment from heavy metal compounds during cooling of the reaction mixture is considered. The initial values for the automated calculation of a reactor with a propeller agitator have been determined, the choice of which is based on the results of calculations of the physical properties of ingredients and a review of the designs of mixing devices. A mathematical algorithm for calculating heat transfer during cooling of the reaction mixture is given, as well as the interface of a computer program written in C# with the results of automated calculations.

**Keywords:** sulfur-containing sorbent, mixture cooling, reactor thermal calculation algorithm, software application.

**Введение.** Для эффективной очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов предложено применять серосодержащий сорбент [1], технология и аппаратное оформление процесса его получения подробно описаны в [3,4]. Процесс осуществляется в ёмкостном химическом реакторе идеального смешения периодического действия при непрерывном перемешивании ингредиентов, физические свойства которых автоматически рассчитаны в подпрограмме, которая также рекомендовала выбор перемешивающего устройства [5].

Масштаб производственной установки не отражается на соотношении ингредиентов, которые используются для получения серосодержащего сорбента [2], так как масса ингредиентов увеличивается согласно масштабу, а изменяется только время перемешивания, нагрева рабочей смеси до 45 °С и последующего ее охлаждения до 20 °С.

Для расчета химического реактора использовались расчетные методы [6], базируемые на инженерном опыте. Известно, что правильно написанный алгоритм и программа автоматизированного теплового

расчёта реактора – актуальная задача, решив которую можно снизить трудоемкость и продолжительность вычислений, повысить качество принимаемых проектных решений, и, как следствие, уменьшить производственные затраты.

**Алгоритм теплового расчёта реактора при охлаждении реакционной смеси.**

Охлаждению подвергается реакционная масса с температуры 45 °С до 20 °С.

При условии постоянства потока теплоносителя (вода 10 °С = 283 К, нагревающаяся до 15 °С = 288 К) и его неизменности термодинамических свойств, средняя разность температур  $\Delta T_{cp}$  определяется по формуле [7]:

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

где  $\Delta T_1$  – разность начальных температур рабочей среды (45° С = 318 К) и охлаждающей воды;  $\Delta T_2$  – разность конечных температур рабочей среды (20° С = 293 К) и охлаждающей воды.

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

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

При скорости воды  $W = 0,02$  м/с критерий Рейнольдса в рубашке::

$$Re = D_{э\text{кв}} \cdot W / \nu = 0,088 \cdot 0,02 / 1,231 \cdot 10^{-6} = 1429,7,$$

где  $D_{э\text{кв}}$  – эквивалентный диаметр рубашки в цилиндрической части, равный 0,088 м.

Режим движения – ламинарный.

Значение критерия Прандтля Pr определяется по формуле:

$$Pr = \mu \cdot c_p / \lambda = 122875 \cdot 10^{-3} \cdot 4189 / 0,5755 \approx 89439,$$

где  $c_p$  – удельная теплоёмкость, Дж/(кг · град); динамическая вязкость, ( $\mu$ ), Па · с; теплопроводность, Вт/(м · град).

Критерий Нуссельта для ламинарного режима:

$$Nu = 0,66 \cdot Re^{0,5} Pr^{0,33} = 0,66 \cdot 1429,7^{0,5} \cdot 8943,9^{0,33} \approx 502,5.$$

Коэффициент теплоотдачи Вт/(м<sup>2</sup>·К) в рубашке от воды рассчитывается как отношение [12]:

$$\alpha_T = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{э\text{кв}}} = \frac{502,5 \cdot 0,5755}{0,088} \approx 3286,5.$$

Коэффициент теплопередачи  $k$  определяется по формуле [12]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \frac{s}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_T}} = \frac{1}{\frac{1}{235,7} + \frac{0,006}{84,08} + \frac{1}{3286,5}} \approx 216,6,$$

где  $\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи от суспензии к стенке реактора;  $\alpha_T$  – коэффициент теплоотдачи от стенки реактора к охлаждающей воде;  $s$  – толщина стенки реактора (м);  $\lambda_m = 84,08$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности стали 20.

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

$$\tau_{охл} = \frac{1000 \cdot Q}{k \cdot F_{охл} \cdot \Delta T_{cp}} = \frac{1000 \cdot 97086}{216,6 \cdot 6,444 \cdot 15,42} = 4512,8 \text{ с},$$

где  $Q$  – это тепловая нагрузка в кДж,  $F_{охл}$  – общая площадь теплообмена рубашки.

Массовый расход воды при охлаждении реакционной смеси вычисляется по формуле:

$$M_w = \frac{1000 \cdot Q}{c_p \cdot \Delta T_{cp} \cdot \tau_{охл}} = \frac{1000 \cdot 97086}{4189 \cdot 15,42 \cdot 4512,8} \approx 0,333 \text{ кг/с}.$$

Затраты  $Z$  холодной воды с учетом 5% тепловых потерь составят:

$$Z = \frac{M_w \cdot \tau_{охл}}{0,95} \approx \frac{0,365 \cdot 45128}{0,95} \approx 15824 \text{ кг}.$$

Тогда можно определить значение объёмного расхода воды  $V$  и скорость воды  $W$  в рубашке:

$$V = M_w / \rho = 0,333 / 999,325 = 0,000333, \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$W = V / S_{э\text{с}} = 0,000333 / 0,174 = 0,00192 \text{ м/с}$$

где  $\rho$  – плотность воды кг/м<sup>3</sup>;  $S_{э\text{с}} = 0,174$  м<sup>2</sup> – площадь кольцевого сечения рубашки с диаметрами 1,212 и 1,3 м.

Главная форма

Средний температурный напор (dTср)  
15,42 K

Свойства воды

| Свойства          | Значения |
|-------------------|----------|
| Плотность (г/с... | 999,325  |
| Козф. динамич.... | 1228,75  |
| nu                | 1,231    |
| Lam               | 0,575    |
| Ср                | 4189     |
| W                 | 0,020    |

Критерий Рейнольдса в рубашке  
1428,7

Критерий Прандтля  
8943,9

Критерий Нуссельта для ламинарного режима  
502,5

Кoeffициент теплоотдачи в рубашке от воды  
3286,5

Суммарный коэффициент теплопередачи (k)  
216,6

T охлаждения  
4512,8

Массовый расход воды  
0,333

Затраты холодной воды с учетом тепловых потерь  
1582,4

Объёмный расход воды (V)  
0,0003

Скорость воды в рубашке (W)  
0,0019

Расчёт

Рисунок 1 – Интерфейс программы расчёта реактора при охлаждении реакционной смеси

### Заключение

Описан алгоритм теплового расчёта реактора для производства серосодержащего сорбента при охлаждении реакционной

смеси. Создана компьютерная программа, выполняющая автоматизированный расчёт реактора по заданным и вычисленным параметрам, а также расчёт времени полного цикла работы реактора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 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, опубл. 10.08.2015 г. Бюл. № 22.

2. Домрачева, В. А. Модифицирование углеродных сорбентов для повышения эффективности извлечения тяжелых металлов из сточных вод и техногенных образований / В. А. Домрачева, Е. Н. Вещева // Вестник ИргТУ. – 2010. – № 4 (44). – С. 134-138.

3. Асламова, В. С. Технология и оборудование производства серодержащих сорбентов для извлечения тяжёлых металлов из сточных вод / В. С. Асламова, Е. А. Шнейгельбергер, А. А. Асламов // 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.

4. Асламова, В. С. Автоматизированный расчет 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. Шнейгельбергер // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4(72). – С. 48-58.

5. 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. ; патентообладатели: ФГБОУ ВО ИргУПС, ФГБОУ ВО АнГТУ, заявка № 2022617237 от 21.04.2022, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.04.2022.

6. Борисенко, А. Б. Система автоматизированного выбора вспомогательного оборудования многоассортиментных химических производств / А. Б. Борисенко, А. В. Антоненко, А. В. Осовский, О. А. Филимонова // Вестник Тамбовского ГТУ. – 2012. – Т. 18. – № 3. – С. 569-572.

7. Немтинов, В. А. Автоматизированный расчет заготовок днищ емкостных аппаратов / В. А. Немтинов, А. В. Мокрозуб, И. Н. Ерохина // В.И. Вернадский: устойчивое развитие регионов. – 2016. – Т. 1. – С. 151-154.