

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 29.11.2023 16:11:41  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«Юго-Западный государственный университет»**  
**(ЮЗГУ)**

**Кафедра фундаментальной химии и химической технологии**



**ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ**  
**В ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

Методические указания по выполнению  
практических и самостоятельных работ  
для студентов направления подготовки 18.03.01

Курс 2023

УДК 66.012.3

Составитель: А.В. Лысенко

*Рецензент*

*Кандидат химических наук, доцент Е.А. Фатьянова*

**Тепловые расчеты в химико-технологических процессах:** методические указания по выполнению практических и самостоятельных работ для студентов направления подготовки 18.03.01 / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.В. Лысенко. Курск, 2023, 13 с.

Методические указания по выполнению практических и самостоятельных работ для студентов направления подготовки 18.03.01 «Тепловые расчеты в химико-технологических процессах» предназначены для изучения дисциплин «Балансовые расчеты», «Балансовые расчеты в химической практике», «Технохимические расчеты», «Химические процессы химической технологии», «Общая химическая технология».

Содержат основные понятия и формулы, применяемые в энергетическом балансе. Рассмотрено применение закона сохранения энергии к тепловому балансу и представлен расчет теплового баланса кристаллизации плава аммиачной селитры. Приведены задание для самостоятельного выполнения по каждой практической работе, а также контрольные вопросы для углубленного изучения данной темы.

Методические указания соответствуют требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования и учебному плану направления подготовки 18.03.01 Химическая технология, квалификация - бакалавр.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Усл.печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,68.

Тираж 100 экз. Заказ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## Практическая работа №1. «Применение закона сохранения энергии к тепловому балансу»

**Цель работы** - изучить основные понятия и формулы, применяемые в энергетическом расчёте

**Энергетический баланс** составляют на основе закона сохранения энергии: в замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна.

Обычно в химико-технологических процессах составляется тепловой баланс. Применительно к тепловому балансу закон сохранения энергии может быть сформулирован следующим образом: приход теплоты в данном цикле производства должен быть точно равен расходу ее в этом же цикле. При этом должны быть учтены вся теплота, подводимая к аппарату и выделяющаяся (поглощающаяся) в результате химической реакции или физического превращения; теплота, вносимая каждым компонентом, как входящим в процесс или аппарат, так и выходящим из него, а также теплообмен с окружающей средой.

Тепловой баланс выражают в виде формул, таблиц и диаграмм. В уравнение теплового баланса входят следующие величины.

### **Приход:**

1)  $Q_{\text{ф}}$  - физическая теплота материалов, поступающих в процесс или аппарат;

2)  $Q_{\text{р}}$  - теплота, выделяющаяся в результате химической реакции;

3)  $Q_{\text{ф.п}}$  - теплота, выделяющаяся в результате физических превращений вещества (адсорбции, кристаллизации или др.);

4)  $Q_{\text{о}}$  - теплота, подводимая в аппарат извне, например, обогрев.

### **Расход:**

1)  $Q_{\text{ф}}'$  - физическая теплота продуктов, выходящих из аппарата;

2)  $Q_{\text{р}}'$  - теплота, которая затрачивается на эндотермическую реакцию;

3)  $Q_{\text{ф.п}}'$  - теплота, поглощающаяся в результате физических превращений вещества (плавление, испарение или др.);

4)  $Q_{\text{п}}$  - потери теплоты в окружающее пространство.

Таким образом, полное уравнение теплового баланса, составленное для одновременного протекания процессов с выделением ( $Q_p$ ,  $Q_{ф.п}$ ) и поглощением ( $Q_p'$ ,  $Q_{ф.п}'$ ) теплоты, принимает вид:

$$Q_{ф} + Q_p + Q_{ф.п} + Q_o = Q_{ф}' + Q_p' + Q_{ф.п}' + Q_n' \quad (1)$$

Теплоту, вносимую с материалом, обычно подсчитывают по уравнению

$$Q_{ф} = Gc^{-}TT, \quad (2)$$

где  $G$  - масса материала;

$c^{-}$  - средняя удельная теплоемкость материала;

$T$  - температура.

Теплоту, выделяющуюся в результате химической реакции, можно рассчитать по формуле

$$Q_p = \frac{(\Delta H_o)_T 10^3}{e M} \quad (3)$$

где  $M$  - молярная масса вещества, кг;

$(\Delta H_o)_T$  - энтальпия образования вещества при температуре  $T$ ;

$e$  - стехиометрический коэффициент при готовом продукте.

Подвод теплоты в аппарат (обогрев)  $Q_o$  можно учитывать по потере теплоты теплоносителем, например, для греющей воды:

$$Q_o = Gc^{-}(T_H - T_X), \quad (4)$$

для пара

$$Q_o = Gr, \quad (5)$$

или по формуле теплопередачи через греющую поверхность

$$Q_o = k_T F (T_G - T_X) \tau, \quad (6)$$

где  $T_H$  и  $T_K$  - начальная и конечная температура воды;

$r$  - удельная теплота парообразования;

$k_T$  - общий коэффициент теплопередачи;

$F$  - поверхность, через которую осуществляется теплопередача;

$T_G$  - температура греющего вещества;

$T_X$  - температура нагреваемого (холодного) материала;

$\tau$  - время теплопередачи.

Потери теплоты в окружающую среду рассчитываются по последнему уравнению.

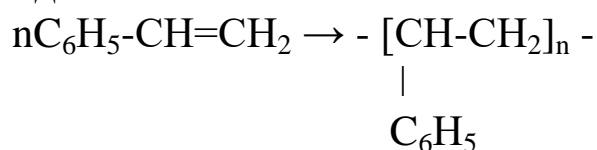
**Пример 1.** Плотность стирола  $0,906 \text{ г/см}^3$ . При  $20^\circ\text{C}$  Теплоемкость стирола  $c=1,742 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ , при  $145^\circ\text{C}$   $c=2,479 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ . Теплоемкость полистирола при  $20^\circ\text{C}$  равна  $c=1,457 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ , при  $145^\circ\text{C}$   $3,119 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ . Рассчитать объем полимеризатора и составить тепловой баланс первого полимеризатора в килоджоулях на 1 тонну исходного стирола при коэффициенте заполнения реактора  $\varphi_3(\text{фи})=0,65$  и рабочем объеме аппарата на 1 т  $1,8 \text{ м}^3$ .

**Решение:** При производстве пластической массы - блочного полистирола - в каскаде аппаратов с мешалками процесс проводят при изотермическом режиме, для чего используют дисковые мешалки с развитой поверхностью. Исходные параметры процесса представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные параметры процесса

Аппарат	$T_{\text{нач}},$ $^\circ\text{C}$	$T_{\text{кон}},$ $^\circ\text{C}$	Степень полимеризации	Время пребывания, ч
Полимеризатор 1	50	145	48	2
Полимеризатор 2	145	160	75	2
Полимеризатор 3	160	180	90	2

Реакция полимеризации мономера - стирола - с образованием полистирола имеет вид



(тепловой эффект взят на основе опытных данных из расчета на мономер, молекулярная масса которого составляет  $104 \text{ г/моль}$ ).

Определяем вместимость полимеризатора

$$\varphi_3 = \frac{v_p}{v_{\text{п}}}$$

тогда

$$v_{\text{П}} = \frac{v_{\text{р}}}{\varphi_3} = 1,8/0,65 = 2,77 \text{ м}^3.$$

Тепловой эффект полимеризации будет равен  
 $68700 / 104 = 661 \text{ кДж/кг}.$

Приход теплоты:

$$Q_{\text{ф}} = 1000 \cdot 1,742 \cdot 50 = 87089 \text{ кДж}.$$

$$Q_{\text{полимер}} = 480 \cdot 661 = 317280 \text{ кДж}.$$

Итого 404369 кДж.

Расход теплоты:

$$Q = (\Delta H_0)_T \cdot T \cdot G$$

(G находят как 1000 · степень полимеризации 48 = для полистирола 480, для стирола 520)

$$\text{с полистиролом } Q = 3,119 \cdot 145 \cdot 480 = 217082 \text{ кДж},$$

$$\text{со стиролом } Q = 2,479 \cdot 145 \cdot 520 = 186916 \text{ кДж}.$$

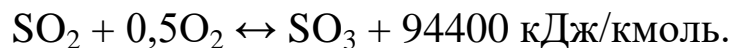
Итого 403998 кДж.

Процесс идет с небольшим выделением теплоты:

$$404369 - 403998 = 371 \text{ кДж}.$$

### Задание для самостоятельного выполнения

Степень окисления  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$  составляет:  $x\text{SO}_2$  и  $x\text{SO}_3$ .  
 Рассчитать изменение температуры в зоне реакции, если средняя теплоемкость газовой смеси, содержащей  $\text{SO}_2 = \text{А} \%$ ,  $\text{O}_2 = \text{Б} \%$ ,  $\text{N}_2 = \text{В} \%$ , условно принимается неизменной и составляет  $1,382 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ . Расчет вести на  $100 \text{ м}^3$  газовой смеси:



Варианты условий приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Исходные данные для самостоятельного выполнения

Вариант	$x\text{SO}_2$	$x\text{SO}_3$	А, %	Б, %	В, %
1	0,55	0,96	8	11	81
2	0,54	0,94	8	11	81
3	0,55	0,96	9	10	81
4	0,55	0,96	10	9	81
5	0,54	0,95	8	11	81
6	0,54	0,93	9	10	81
7	0,56	0,98	10	9	81
8	0,56	0,98	8	11	81
9	0,56	0,98	9	10	81
10	0,55	0,91	8	11	81
11	0,55	0,91	9	10	81
12	0,53	0,93	5	15	80
13	0,53	0,93	6	14	80
14	0,53	0,93	7	13	80
15	0,53	0,93	8	12	80
16	0,53	0,93	9	11	80
17	0,53	0,93	10	10	80
18	0,58	0,89	8	12	80
19	0,58	0,89	9	11	80
20	0,58	0,89	10	10	80
21	0,56	0,98	10	9	81
22	0,56	0,98	8	11	81
23	0,55	0,91	9	10	81
24	0,55	0,91	10	9	81
25	0,53	0,93	8	11	81
26	0,53	0,93	9	10	81
27	0,53	0,93	8	11	81
28	0,53	0,93	9	10	81
29	0,53	0,93	5	15	80
30	0,55	0,96	6	14	80



**Практическая работа №2.**  
**«Расчет теплового баланса кристаллизации плава аммиачной селитры»**

**Цель работы** - составить тепловой расчет кристаллизации плава аммиачной селитры в грануляционной башне.

При составлении теплового расчета кристаллизации плава аммиачной селитры в грануляционной башне для выполнения работы используйте следующие исходные данные:

- температура воздуха на входе в грануляционную башню 30°C, на выходе 60°C;
- температура плава, поступающего в башню, 150°C;
- температура гранул, выходящих из башни, 80°C.

Расчет ведем на 1000 кг аммиачной селитры (1015,2 кг 98,5%-ного плава).

**Решение:**

1. Приход теплоты

Определяем теплоту, выделяющуюся при кристаллизации.

$$Q_1 = q \cdot m_1 = 138,88 \cdot 1000 = 138\,880 \text{ кДж}, \quad (7)$$

где  $q$  - тепловой эффект превращения расплавленного нитрата аммония в кристаллическую модификацию, стабильную при 80°C, кДж/кг;

$m_1$  - масса кристаллического нитрата аммония, кг.

Теплота, вносимая плавом:

$$Q_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot t_2 = 1015,2 \cdot 1,758 \cdot 150 = 267\,710 \text{ кДж}, \quad (8)$$

где  $m_2$  - масса 98,5%-ного плава, кг;

$c_2$  - теплоемкость 98,5%-ного плава, кДж/(кг·°C);

$t_2$  - температура плава, поступающего в башню, °C.

С воздухом поступает

$$Q_3 = V \cdot c_3 \cdot t_3 = V \cdot 1,260 \cdot 30 = V \cdot 37,80 \text{ кДж}, \quad (9)$$

где  $V$  - объем воздуха, поступающего в грануляционную башню на 1000 кг 100%-ного нитрата аммония, м<sup>3</sup> (при н.у.);

$c_3$  - теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C) (отнесенная к 1 м<sup>3</sup> при н.у.);

$t_3$  - температура воздуха на входе в грануляционную башню, °С.

Общее количество теплоты, поступающей в грануляционную башню:

$$Q_{\text{прих}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 138880 + 267708 + V \cdot 37,80 \\ = 406588 + V \cdot 37,80 \text{ кДж}, \quad (10)$$

## 2. Расход теплоты

Количество теплоты, уносимое выходящими из башни гранулами:

$$Q_4 = m_4 \cdot c_4 \cdot t_4 = 1\,015,2 \cdot 1,758 \cdot 80 = 142\,780 \text{ кДж}, \quad (11)$$

где  $m_4$  - масса гранул, выходящих из башни, кг;

$c_4$  - теплоемкость гранул, кДж/(кг·°С);

$t_4$  - температура гранул на выходе, °С.

С воздухом, уходящим из башни, отводится

$$Q_5 = V \cdot c_5 \cdot t_5 = V \cdot 1,260 \cdot 60 = V \cdot 75,60 \text{ кДж}, \quad (12)$$

где  $V$  - объем воздуха, поступающего в грануляционную башню на 1000 кг 100%-ного нитрата аммония, м<sup>3</sup> (при н.у.);

$c_5$  - теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С) (отнесенная к 1 м<sup>3</sup> при н.у.);

$t_5$  - температура воздуха на входе в грануляционную башню, °С.

Общий расход теплоты:

$$Q_{\text{расх}} = Q_4 + Q_5 = 142\,778 + V \cdot 75,60 \text{ кДж}, \quad (13)$$

Из уравнения теплового баланса

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}$$

находим  $V$  - количество воздуха, которое необходимо подать в грануляционную башню:

$$406,588 + V \cdot 37,80 = 142\,778 + V \cdot 75,60 \\ V = 6979 \text{ м}^3$$

Следовательно, воздух:

- вносит в башню  $V \cdot 37,80 = 6979 \cdot 37,80 = 263\,810$  кДж

- уносит из башни  $V \cdot 75,60 = 6979 \cdot 75,60 = 527\,620$  кДж

В сводной таблице 3 представлены данные расчета теплового баланса кристаллизации плава  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .

Таблица 3 - Сводная таблица теплового баланса кристаллизации плава  $\text{NH}_4\text{NO}_3$

Приход тепла	кДж	Расход тепла	кДж
Теплота, выделяющаяся при кристаллизации, $Q_1$	138880	Теплота, уходящая с гранулами, $Q_4$	142780
Теплота, вносимая плавом, $Q_2$	267710	Теплота, уносимая из башни с воздухом, $Q_5$	527620
Теплота, поступающая с воздухом, $Q_3$	263810		
Всего приход, $Q_{\text{прих}}$	670400	Всего расход, $Q_{\text{расх}}$	670400

Выводы: в результате проведенной работы был составлен тепловой баланс кристаллизации плава аммиачной селитры и рассчитано количество воздуха, которое необходимо подавать в башню для проведения процесса.

### *Задание для самостоятельного выполнения*

При составлении теплового расчета кристаллизации плава аммиачной селитры в грануляционной башне для выполнения работы используйте следующие исходные данные:

- температура воздуха на входе в грануляционную башню  $45^\circ\text{C}$ , на выходе  $40^\circ\text{C}$ ;

- температура плава, поступающего в башню,  $170^\circ\text{C}$ ;

- температура гранул, выходящих из башни,  $90^\circ\text{C}$ .

Расчет ведем на 1000 кг аммиачной селитры (1659,8 кг 97,5%-ного плава).

## Контрольные вопросы

1. Тепловой коэффициент полезного действия и пути полного использования энергетических ресурсов
2. Тепловой баланс. Общие положения
3. Тепловой балансы ХТС. Методика составления и расчета статей прихода и расхода тепловых балансов ХТС и ее подсистем. Примеры.
4. Термодинамические расчеты химико-технологических процессов.
5. Тепловой баланс реакторов, работающих в изотермическом, адиабатическом и политермическом режимах.
6. Выбор оптимального температурного режима для проведения экзо-, эндотермических необратимых реакций. Примеры процессов.
7. Выбор оптимального температурного режима для проведения экзо-, эндотермических обратимых реакций. Примеры процессов.
8. Адиабатические реакторы
9. Модель РИВ. Режим без внешнего теплообмена. Статическая форма
10. Модель РИВ. Режим без внешнего теплообмена. Динамическая форма теплового баланса
11. Политермические реакторы. Модель РИВ. Режим с внешним теплообменом
12. Политермические реакторы. Модель РПД
13. Изотермические реакторы
14. Реальные реакторы. Трубчатая конструкция. Модель диффузионная
15. Реальные реакторы. Модель с радиальным переносом в круглой трубе
16. Реальные реакторы. Емкостная аппаратура с мешалками (типа кубовой)

## Список литературы

1. Козадерова О. А. Расчеты материальных и тепловых балансов в технологии минеральных удобрений: учебное пособие / О. А. Козадерова С. И. Нифталиев; Воронежский государственный университет инженерных технологий. - Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2018. - 57 с. -URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=488010> (дата обращения: 17.08.2023). - Режим доступа: по подписке. - Текст: электронный.

2. Козадерова О. А. Материальные и тепловые балансы в технологии аммиака и азотной кислоты: учебное пособие / О. А. Козадерова, С. И. Нифталиев, К. Б. Ким; науч. ред. С. И. Нифталиев; Воронежский государственный университет инженерных технологий. - Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2020. - 73 с. - URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=612392> (дата обращения: 17.08.2023). - Режим доступа: по подписке. - Текст: электронный.

3. Бородулин Д. М. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие / Д. М. Бородулин, В. Н. Иванец; ред. Н. В. Шишкина; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. - Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), 2007. - 168 с. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=141314> (дата обращения: 18.08.2023). - Режим доступа: по подписке. - Текст: электронный.

4. Общая химическая технология и химические реакторы: сборник задач: учебное пособие / Н. Ю. Санникова, А. С. Губин, Л. А. Власова [и др.]; науч. ред. О. В. Карманова; Воронежский государственный университет инженерных технологий. - Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2021. - 61 с. -URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=688149> (дата обращения: 18.08.2023). - Режим доступа: по подписке - Текст: электронный.

5. Брянкин К. В. Общая химическая технология: учебное пособие: в 2 частях / К. В. Брянкин, А. И. Леонтьева, В. С. Орехов; Тамбовский государственный технический университет. - Тамбов: Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), 2012. - Часть 2. - 172 с. - URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277912> (дата обращения: 18.08.2023). - Режим доступа: по подписке - Текст: электронный.

6. Ляпков А.А. Материальные и тепловые расчеты в химической технологии. Учебное пособие. - Томск: Изд. ТПУ, 2005. - 105 с.

7. Сутягин В.М., Лопатинский В.П., Ляпков А.А. Основы проектирования и оборудование производства полимеров. Учебное пособие. - Томск: Изд. ТПУ, Часть 1. - 1998. - 118 с., Часть 2. - 1999. - 114 с., Часть 3. - 2004. - 68 с.

8. Сутягин В.М., Ляпков А.А. Полимеризаторы в примерах и задачах. Сборник примеров и задач. - Томск: Изд. ТПУ, 2003. - 72 с.

9. Ляпков А.А., Иванов Г.Н., Бочкарев В.В. Расчеты реакционной аппаратуры химических производств. Учебное пособие. - Томск: Изд. ТПУ, 2002. - 122 с.

10. Ровкина Н.М., Ляпков А.А. Технологические расчеты в процессах синтеза полимеров. Сборник примеров и задач. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - 167 с.

11. Беркман Б.Е. Основы технологического проектирования производств органической химии. - М.: Химия, 1970. - 368 с.

12. Вольфсон С.А., Ениколопан Н.С. Расчеты высокоэффективных полимеризационных процессов. - М.: Химия, 1980. - 312 с.