

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Невинномысский технологический институт

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В РЕАКТОРЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Химические реакторы» для студентов направления подготовки
18.03.01 – Химическая технология

Невинномысск, 2020

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Химические реакторы» разработаны в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования в части содержания и уровня подготовки выпускников по направлению 18.03.01 – Химическая технология и в соответствии с рабочей программой дисциплины.

В методических указаниях дано теоретическое обоснование лабораторных работ, указана методика их выполнения, приведены требования к оформлению отчета, вопросы для защиты работы и примеры выполнения лабораторных работ.

В приложении А приведены варианты заданий для выполнения лабораторных работ.

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры ХТМиАХП и рекомендованы к внутривузовскому использованию.

Составитель доц. А.Л. Проскурнин

Рецензент доц. А.И. Свидченко

Содержание

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Цель и содержание работы | 5 |
| 2 | Теоретическое обоснование | 5 |
| 2.1 | Типовые гидродинамические модели..... | 5 |
| 2.2 | Модель идеального перемешивания..... | 6 |
| 2.3 | Модель идеального вытеснения | 7 |
| 2.4 | Диффузионная модель..... | 8 |
| 2.5 | Ячеечная модель..... | 10 |
| 2.6 | Комбинированные модели | 12 |
| 3 | Методика и порядок выполнения работы..... | 14 |
| 4 | Лабораторная работа на тему «Определение параметра диффузионной модели гидродинамического потока» | 14 |
| 4.1 | Методика и порядок выполнения работы..... | 14 |
| 4.2 | Содержание отчета по лабораторной работе | 15 |
| 5 | Лабораторная работа на тему «Определение параметра ячейечной модели гидродинамического потока» | 16 |
| 5.1 | Методика и порядок выполнения работы..... | 16 |
| 5.2 | Содержание отчета по лабораторной работе | 17 |
| 6 | Вопросы для защиты работы | 17 |
| 7 | Список рекомендуемой литературы..... | 18 |
| | Приложение А | 19 |
| | Приложение Б | 21 |
| | Приложение В | 24 |

Предисловие

Целью освоения дисциплины является формирование набора профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки 18.03.01 Химическая технология.

В результате лабораторного практикума у студентов формируются следующие компетенции или их части:

ПК-4 – способностью принимать конкретные технические решения при разработке технологических процессов, выбирать технические средства и технологии с учетом экологических последствий их применения;

ПК-7 – способностью проверять техническое состояние, организовывать профилактические осмотры и текущий ремонт оборудования, готовить оборудование к ремонту и принимать оборудование из ремонта;

ПК-8 – готовностью к освоению и эксплуатации вновь вводимого оборудования.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В РЕАКТОРЕ

1 Цель и содержание работ

Целью работ является практическое освоение методики определения параметров диффузионной и ячеечной моделей гидродинамического режима потока в реакторе по экспериментальной С-кривой – дифференциальной функции распределения времени пребывания частиц потока в аппарате.

Содержание работы: на основании экспериментальных данных строят функцию распределения времени пребывания, осуществляют преобразование экспериментальных данных в безразмерные величины, вычисляют вероятностные характеристики и определяют значение критерия Пекле, являющийся параметром диффузионной модели или количество ячеек в ячеечной модели.

2 Теоретическое обоснование

2.1 Типовые гидродинамические модели

К типовым гидродинамическим моделям, прежде всего, относятся модель идеального перемешивания и модель идеального вытеснения. Хотя указанные модели – теоретические и соответствуют идеальным потокам, однако в ряде случаев их можно использовать для характеристики реальных потоков. Кроме перечисленных, к типовым моделям гидродинамических потоков относятся диффузионная, ячеечная и комбинированные модели (потоки с застойной зоной, байпасированием и др.). Диффузионная и ячеечная модели характеризуют реальные потоки. Эти модели при предельных идеализированных условиях переходят в одну из теоретических моделей – идеального вытеснения или идеального перемешивания. Комбинированные модели строятся сочетанием более простых (идеальных) моделей.

2.2 Модель идеального перемешивания

Модель идеального перемешивания представляет идеализированный поток и является теоретической моделью. Согласно этой модели принимается, что поступающий в аппарат поток мгновенно распределяется по всему объему вследствие полного (идеального) перемешивания частиц среды. При этом концентрация распределенного вещества во всех точках аппарата и в потоке на выходе из него одинакова.

Схема аппарата идеального перемешивания приведена на рисунке 1.

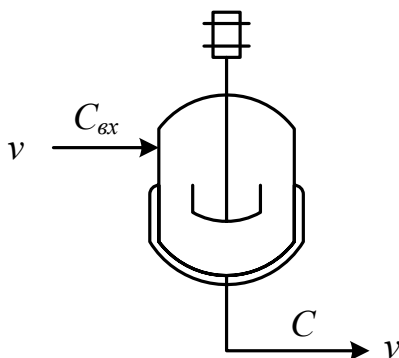


Рисунок 1 – Схема аппарата идеального смешения

Математическое описание модели идеального перемешивания в дифференциальном виде:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{v}{V}(C_{вх} - C), \quad (1)$$

где $C_{вх}$ – концентрация вещества на входе; C – концентрация вещества в аппарате и на выходе из него; V – объем аппарата; v – объемный расход потока через аппарат; τ – текущее время.

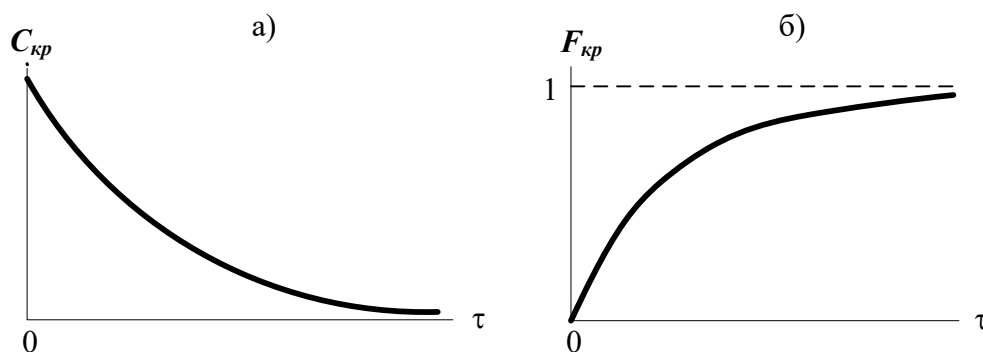
Отношение v/V характеризует среднее время нахождения частиц в зоне идеального перемешивания; его принято называть временем пребывания частиц в аппарате и обозначать $\bar{\tau}$. Время пребывания является параметром модели идеального перемешивания, который обычно определяется экспериментально либо расчетом.

Дифференциальное уравнение модели идеального перемешивания обычно записывают с учетом параметра $\bar{\tau}$:

$$\frac{d}{d\tau} \frac{C}{\bar{\tau}} = \frac{1}{\bar{\tau}} (C_{в} \bar{x} - C). \quad (2)$$

Данные уравнения показывают, что это модель с сосредоточенными параметрами, т.к. основная переменная изменяется только во времени.

На рисунке 2 представлен вид С-кривой и F-кривой для данной модели.



а – при импульсном возмущении (С-кривая)
б – при ступенчатом возмущении (F-кривая);

Рисунок 2 – Вид функции отклика модели идеального смешения

Наилучшим образом эта модель отвечает реальным потокам в проточных аппаратах с мешалкой, у которых высота ℓ мало отличается от диаметра d , мешалка создает высокую степень перемешивания и объемная скорость потоков u невелика.

2.3 Модель идеального вытеснения

В соответствии с моделью идеального вытеснения принимается поршневое течение без перемешивания вдоль потока при равномерном распределении концентрации вещества в направлении, перпендикулярном движению. При этом время пребывания всех частиц в зоне идеального вытеснения одинаково и равно отношению объема зоны вытеснения к объемному расходу жидкости (или газа) $t = u/V$. Схематическое изображение модели идеального вытеснения (ИВ) показано на рисунке 3.

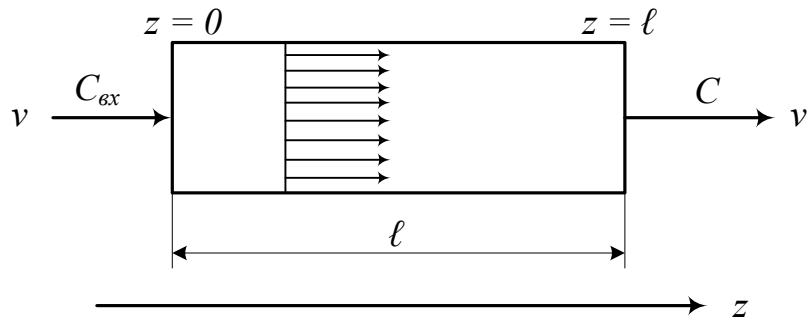


Рисунок 3 – Схематичное изображение модели ИВ

Дифференциальное уравнение модели идеального вытеснения имеет вид:

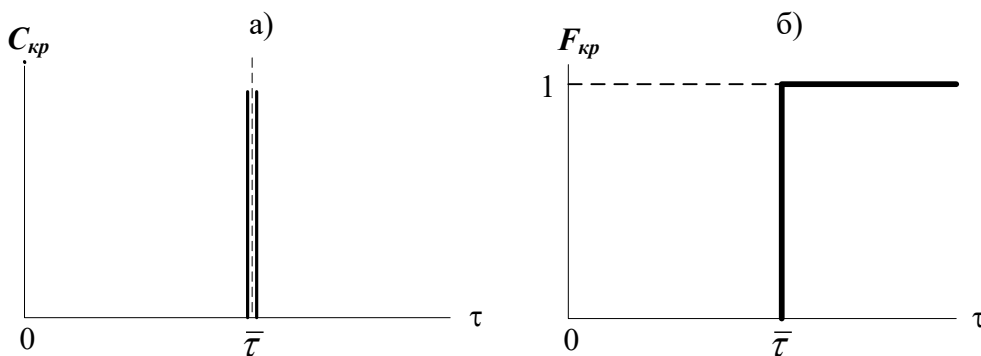
$$\frac{d C}{d \tau} = -u \frac{d C}{d z}, \quad (3)$$

где u – средняя линейная скорость потока, м/с, которая находится по формуле $u = v/S$; S – сечение зоны идеального вытеснения, м²; z – пространственная координата.

Такая модель называется моделью с распределенными параметрами. Если вместо средней скорости u подставить в уравнение ее значение, то уравнение примет следующий вид:

$$S \frac{d C}{d \tau} = -v \frac{d C}{d z}. \quad (4)$$

На рисунке 4 представлен вид С-кривой и F-кривой для данной модели.



а – при импульсном возмущении (С-кривая);
б – при ступенчатом возмущении (F-кривая)

Рисунок 4 – Вид функции отклика модели идеального вытеснения

Модель идеального вытеснения широко используется в химической технологии при описании трубчатых реакторов и

теплообменников. Трубчатые аппараты с большим отношением длины трубок к их диаметру ($\ell/d > 20$) при турбулентном движении жидкости или газа могут описываться как модели идеального вытеснения. Это объясняется тем, что при $\ell/d > 20$ продольное перемешивание незначительно и мало искажает поток вытеснения, а турбулентное движение при этом обеспечивает равномерное распределение концентрации по сечению аппарата.

2.4 Диффузионная модель

Диффузионная модель получила широкое распространение при оценке реальных потоков в аппаратах, в которых происходит продольное или продольное и радиальное перемешивание (например, поток в слоях насадки колонных аппаратов). Различают однопараметрическую и двухпараметрическую диффузионные модели.

Основой однопараметрической модели является модель вытеснения, осложненная обратным перемешиванием, подчиняющимся формальному закону диффузии. Параметром, характеризующим модель, служит коэффициент турбулентной диффузии, или коэффициент продольного перемешивания D_L .

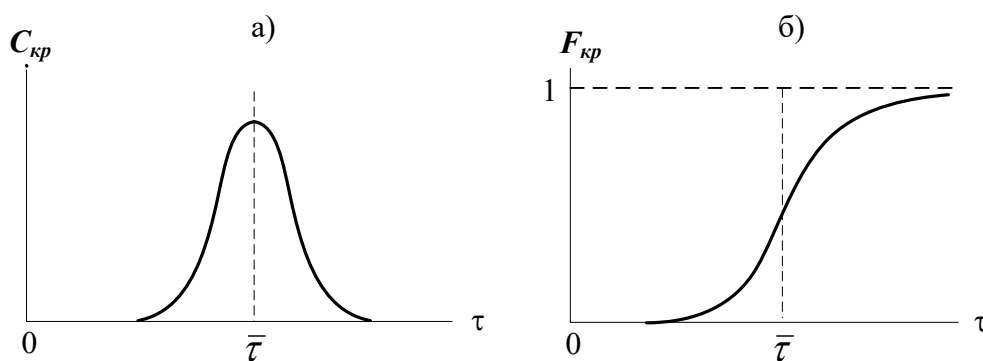
Принимаются следующие допущения:

- изменение концентрации вещества является непрерывной функцией координаты (расстояния);
- концентрация вещества в данном сечении постоянна (отсутствует перемешивание в радиальном направлении);
- объемный расход потока ν и коэффициент продольного перемешивания D_L не изменяются по длине и сечению потока.

При таких допущениях модель описывается уравнением

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (5)$$

На рисунке 5 представлен вид С-кривой и F-кривой для данной модели.



а – при импульсном возмущении (С-кривая);
 б – при ступенчатом возмущении (F-кривая)

Рисунок 5 – Вид функции отклика диффузионной модели

Если математическое описание учитывает и радиальное перемешивание, то модель становится двухпараметрической. При составлении модели необходимо ввести дополнительно второй параметр – коэффициент радиального перемешивания – D_R . Она более точно отражает процесс, но ее описание и решение значительно усложняются, поэтому двухпараметрическая модель используется сравнительно редко и рассматриваться не будет.

В практике технологических расчетов однопараметрическая диффузионная модель дает возможность достаточно точно воспроизводить свойства реального потока при исследовании многих аппаратов, в частности, пленочных, распылительных, барботажных, пульсационных, насадочных колонн, роторно-дисковых экстракторов, а также трубчатых аппаратов (полых и заполненных насадкой).

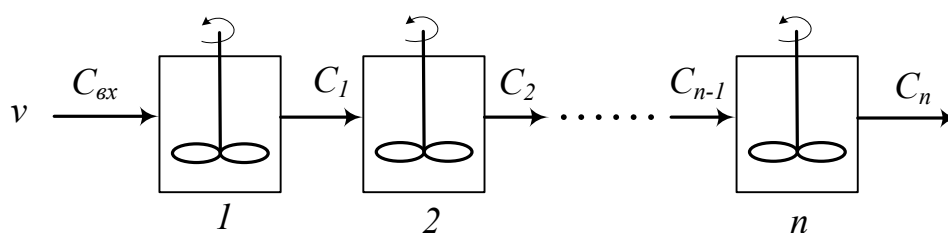
2.5 Ячеечная модель

Типовые модели идеального перемешивания, идеального вытеснения, диффузионная модель с определенной степенью точности могут применяться для воспроизведения структуры и гидродинамических свойств потоков в различных аппаратах химической технологии. Однако идеальные модели в ряде случаев неадекватны реальному процессу, а диффузионная модель отличается сложностью. По этой причине для трубчатых и колонных аппаратов,

а также для каскадов последовательно расположенных реакторов удобнее представлять реальные потоки в виде так называемой ячеечной модели.

Физическая сущность ячеечной модели заключается в том, что движущийся материальный поток рассматривается состоящим из ряда последовательно соединенных ячеек. При этом принимается, что в каждой из таких ячеек поток имеет структуру полного перемешивания, а между ячейками перемешивание отсутствует. Количество предполагаемых ячеек идеального перемешивания n является параметром, характеризующим ячеечную модель реального потока. Если $n = 1$ ячеечная модель переходит в модель идеального перемешивания, а если $n \rightarrow \infty$ – в модель идеального вытеснения.

Схематическое изображение ячеечной модели дано на рисунке 6.



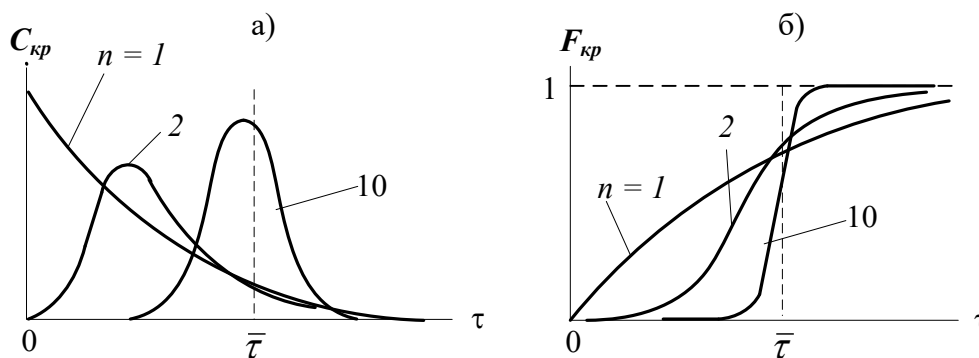
$1, 2, \dots, n$ – номера ячеек

Рисунок 6 – Схема ячеечной модели

Математическое описание ячеечной модели имеет вид:

$$\frac{1}{n} \cdot \frac{d C_i}{d \tau} = \frac{1}{\bar{\tau}} (C_{i-1} - C_i). \quad (6)$$

Вид функции отклика представлен на рисунке 7.



а – при импульсном возмущении (С-кривая) ;
б – при ступенчатом возмущении (F-кривая)

Рисунок 7 – Вид функции отклика ячеечной модели

Ячеечная модель достаточно точно воспроизводит свойства потоков в последовательно соединенных аппаратах с мешалками, создающими интенсивное перемешивание (каскады реакторов), в абсорбционных и экстракционных колоннах при некоторых гидродинамических режимах, и удовлетворительно в аппаратах с псевдооживленным слоем.

2.6 Комбинированные модели

Принцип построения комбинированных моделей состоит в том, что исследуемый процесс рассматривается расчлененным на отдельные участки (зоны), соединенные последовательно, параллельно или по схеме с обратной связью, которые отличаются неодинаковой структурой потоков. При этом комбинированная модель представляет собой сочетание математических описаний всех зон, составляющих процесс.

В ходе построения комбинированных моделей следует оценить возможность применения для различных участков аппарата математических описаний типовых моделей, а также учесть застойные зоны.

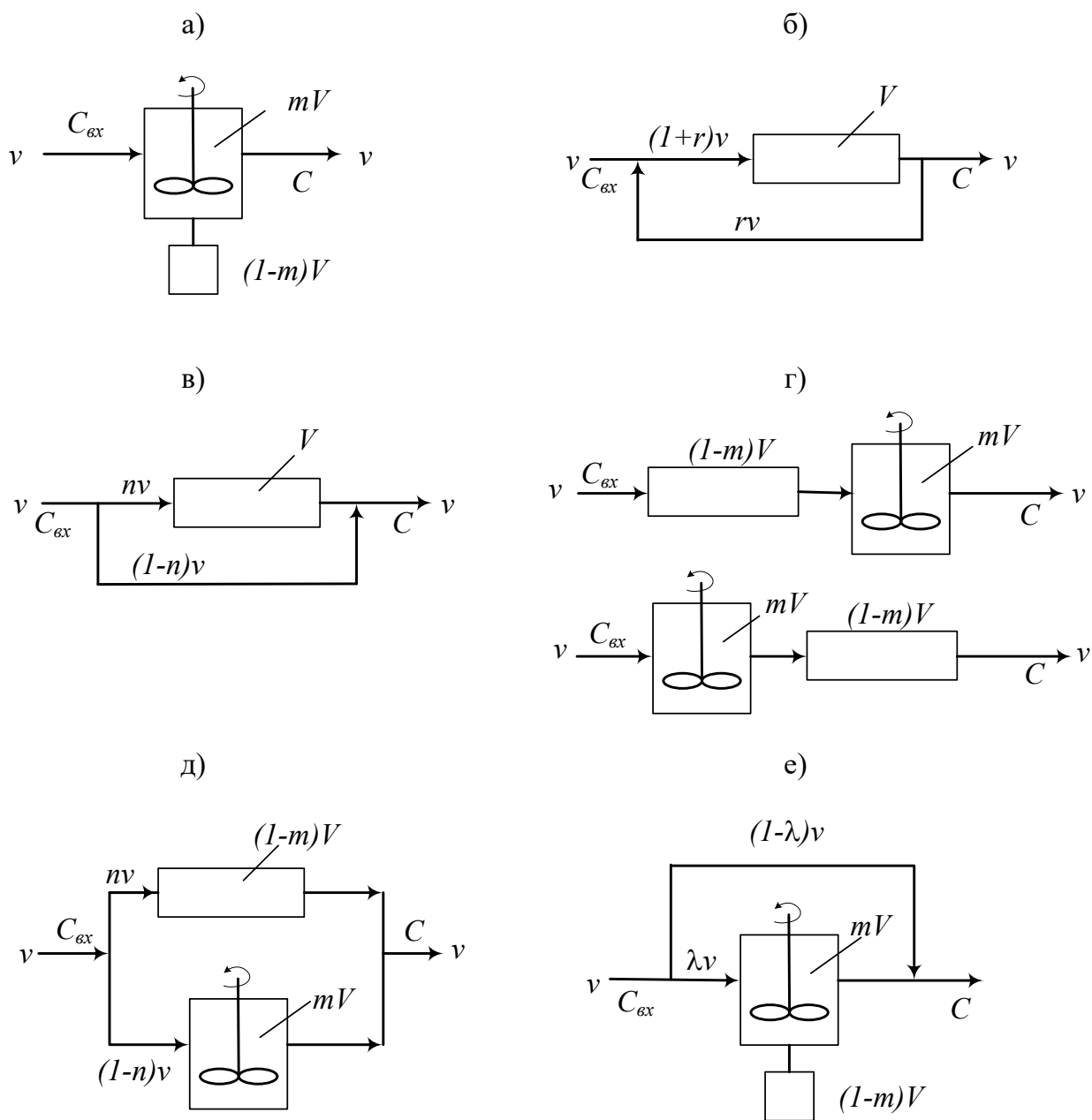
Кроме перечисленных выше структур, при построении комбинированных моделей необходимо учитывать и другие виды течения жидкости (газа), которые могут возникать в реальных аппаратах:

– **байпасный поток** – часть жидкости (газа), движущаяся параллельно сосуду или некоторой его зоне, в результате чего часть потока попадает на выход аппарата, не претерпевая никаких изменений (проскок части потока).

– **циркуляционные потоки** (рециклы или обратные потоки) – это всякого рода возвраты потока. Они возникают потому, что часть жидкости (газа), которая выводится за пределы сосуда или определенной его части, возвращается в него снова и затем смешивается со свежими порциями вещества на входе в сосуд или в некоторую его зону.

– **струйный поток** – местный поток, мгновенно переносящий вещество непосредственно из одной зоны сосуда в другую.

На рисунке 8 представлены простейшие комбинированные модели.



- а) аппарат идеального смешения с застойной зоной;
- б) аппарат идеального вытеснения с обратным потоком (циркуляционный);
- в) аппарат идеального вытеснения с байпасом;
- г) последовательное соединение аппаратов идеального вытеснения и смешения;
- д) параллельное соединение аппаратов идеального вытеснения и смешения;
- е) аппарат идеального смешения с застойной зоной и байпасом.

Рисунок 8 – Схемы комбинированных моделей

Практическое использование гидродинамических моделей в процессе математического моделирования химико-технологических систем возможно только тогда, когда известны численные значения параметров гидродинамических моделей.

К таким параметрам относят:

- для модели идеального смешения – среднее время пребывания продукта в реакторе $\tau_{\text{ср}}$.
- для модели идеального вытеснения – время τ .
- для диффузионной модели – время τ и коэффициент продольного перемешивания D_L .
- для ячеечной модели – время τ и число ячеек смешения N .

Эти параметры можно вычислить в ходе обработки экспериментальной функции отклика аппарата на импульсное возмущение при помощи статистических моментов [2].

3 Аппаратура, оборудование и материалы

Лабораторная работа проводится в компьютерном классе с использованием программы Mathcad.

4 Лабораторная работа на тему «Определение параметра диффузионной модели гидродинамического потока»

4.1 Методика и порядок выполнения работы

Работа выполняется каждым студентом самостоятельно. Исходные данные приведены в приложении А. Номер варианта выбирается по номеру студента в списке группы.

Для выполнения работы необходимо:

1. Изучить теоретические основы экспериментальных методов исследования гидродинамической структуры потока;
2. Освоить методы расчета статистических моментов при обработке экспериментальной функции отклика на импульсное возмущение потока.

2. На основе экспериментальных данных исследования структуры потока при импульсном вводе индикатора в аппарат определить параметр диффузионной модели.

Последовательность выполнения работы:

Задание 1. По экспериментальным данным построить С-кривую – график зависимости концентрации индикатора на выходе из аппарата от времени контактирования.

Задание 2. Определить среднее время пребывания индикатора (частиц потока) в аппарате.

Задание 3. Рассчитать безразмерное время пребывания индикатора в аппарате (Θ) и безразмерный шаг по времени ($\Delta\Theta$).

Задание 4. Определить нулевой начальный момент функции распределения времени пребывания (массу вводимого индикатора).

Задание 5. Построить график безразмерной (приведенной) дифференциальной функции распределения $C(\Theta)$ от безразмерного времени Θ , предварительно определив $C(\Theta)$.

Задание 6. Рассчитать второй центральный момент безразмерной функции распределения и вычислить дисперсию.

Задание 7. Методом подбора найти значение параметра диффузионной модели - критерий Пекле.

Задание 8. Рассчитать коэффициент продольной диффузии D_L .

Задание 9. Сравнить теоретическую кривую, построенную на основе кривой нормального распределения, с экспериментальной С-кривой.

Сделать выводы по проделанной работе.

4.2 Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать: название работы, цель, фамилию и инициалы студента, шифр группы, исходные данные, результаты выполнения работы, выводы. Пример выполнения лабораторной работы в среде программы Mathcad приведен в приложении Б.

5 Лабораторная работа на тему «Определение параметра ячеечной модели гидродинамического потока»

5.1 Методика и порядок выполнения работы

Работа выполняется каждым студентом самостоятельно. Исходные данные приведены в приложении А. Номер варианта выбирается по номеру студента в списке группы.

Для выполнения работы необходимо:

1. Изучить теоретические основы экспериментальных методов исследования гидродинамической структуры потока;

2. Освоить методы расчета статистических моментов при обработке экспериментальной функции отклика на импульсное возмущение потока.

2. На основе экспериментальных данных исследования структуры потока при импульсном вводе индикатора в аппарат определить параметр диффузионной модели.

Последовательность выполнения работы:

Задание 1. По экспериментальным данным построить С-кривую – график зависимости концентрации индикатора на выходе из аппарата от времени контактирования.

Задание 2. Определить среднее время пребывания индикатора (частиц потока) в аппарате.

Задание 3. Рассчитать безразмерное время пребывания индикатора в аппарате (Θ) и безразмерный шаг по времени ($\Delta\Theta$).

Задание 4. Определить нулевой начальный момент функции распределения времени пребывания (массу вводимого индикатора).

Задание 5. Построить график безразмерной (приведенной) дифференциальной функции распределения $S(\Theta)$ от безразмерного времени Θ , предварительно определив $S(\Theta)$.

Задание 6. Рассчитать второй центральный момент безразмерной функции распределения и вычислить дисперсию.

Задание 7. Найти значение параметра ячеечной модели – количество ячеек смешения N .

Задание 8. Построить теоретические кривые с нижним и верхним целочисленным значением N . Выбрать N .

Задание 9. Сравнить теоретическую кривую, построенную с выбранным значением N , с экспериментальной S -кривой.

Сделать выводы по проделанной работе.

5.2 Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать: название работы, цель, фамилию и инициалы студента, шифр группы, исходные данные, результаты выполнения работы, выводы. Пример выполнения лабораторной работы в среде программы Mathcad приведен в приложении В.

6 Вопросы для защиты работы

1. Какие модели гидродинамической структуры потока относят к типовым?

2. Каково математическое описание модели идеального перемешивания (ИП)? Почему эту модель относят к модели с сосредоточенными параметрами?

3. Как определяется среднее время нахождения частицы в зоне идеального перемешивания?

4. Приведите вид функции отклика модели ИП:

- а) при импульсном возмущении (S -кривая);
- б) при ступенчатом возмущении (F -кривая).

5. Каковы условия идеальности модели идеального вытеснения?

6. Приведите дифференциальное уравнение модели идеального вытеснения (ИВ).

7. Приведите вид функции отклика модели ИВ:

- а) при импульсном возмущении (S -кривая);
- б) при ступенчатом возмущении (F -кривая).

8. При описании каких аппаратов используется модель ИП, а каких ИВ?
9. Что является основой однопараметрической диффузионной модели?
10. Каковы допущения, принимаемые при описании гидродинамики потока диффузионной моделью?
11. Приведите дифференциальное уравнение однопараметрической диффузионной модели.
12. Приведите вид функции отклика диффузионной модели:
 - а) при импульсном возмущении (С-кривая);
 - б) при ступенчатом возмущении (F-кривая).
13. В чем заключается физическая сущность ячеечной модели?
14. Что является параметром ячеечной модели?
15. Приведите схематическое изображение ячеечной модели.
16. Дайте математическое описание ячеечной модели.
17. Приведите вид функции отклика ячеечной модели:
 - а) при импульсном возмущении (С-кривая);
 - б) при ступенчатом возмущении (F-кривая).
18. Каков принцип построения комбинированных схем?
19. Приведите простейшие комбинированные модели.

7 Список рекомендуемой литературы

1. Холоднов В.А. Системный анализ и принятие решений. Математическое моделирование гидродинамической структуры однофазных потоков в химических реакторах: учебное пособие / В.А. Холоднов, В.П. Решетиловский, Е.С. Боровинская, В.П. Андреева, СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2009.– 35 с. Доступно: <http://mm.lti-gti.ru/data/-Metodichka2.04.2009.pdf>
2. Чистякова Т.Б. Структурно-параметрический синтез математических моделей гидродинамики: учебное пособие / Т.Б. Чистякова, Гольцева Л.В. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2002. – 48 с.

Приложение А

Таблица П1 – Варианты заданий для выполнения лабораторных работ 1 и 2

| № варианта | Размеры аппарата | | Скорость подачи $V, \text{ м}^3/\text{с}$ | Экспериментальные данные изменения концентрации индикатора на выходе из реактора | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------------|----------------|---|--|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| | $V, \text{ м}^3$ | $D, \text{ м}$ | | $\tau_{и, с}$ | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | | | | |
| 1 | 1,4 | 1 | 0,072 | $C_{и}$ | 0 | 2 | 12 | 48 | 57 | 60 | 50 | 37 | 9 | 2 | 0 | | | | |
| | | | | $\tau_{и, с}$ | 16 | 24 | 32 | 40 | 48 | 56 | 64 | 72 | 80 | 88 | 96 | 104 | 112 | | |
| 2 | 2,3 | 1,2 | 0,0463 | $C_{и}$ | 1 | 15 | 42 | 44 | 38 | 32 | 24 | 16 | 10 | 6 | 3 | 1,5 | 0 | | |
| | | | | $\tau_{и, с}$ | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | | | | |
| 3 | 4,6 | 1,4 | 0,383 | $C_{и}$ | 1 | 4 | 11 | 32 | 44 | 41 | 28 | 12 | 5 | 1,2 | 0,1 | | | | |
| | | | | $\tau_{и, с}$ | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | | | |
| 4 | 6,4 | 1,6 | 0,548 | $C_{и}$ | 0,1 | 2 | 7 | 25 | 49 | 40 | 25 | 16 | 8 | 4 | 0,5 | 0 | | | |
| | | | | $\tau_{и, с}$ | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | | | |
| 5 | 9 | 1,8 | 0,795 | $C_{и}$ | 1 | 3 | 6 | 11 | 25 | 60 | 45 | 22 | 6 | 2 | 0 | | | | |
| | | | | $\tau_{и, с}$ | 2 | 6 | 10 | 14 | 18 | 22 | 26 | 30 | 34 | 38 | 42 | 48 | 52 | | |
| 6 | 11 | 2 | 0,461 | $C_{и}$ | 0 | 3 | 11 | 65 | 120 | 154 | 150 | 100 | 47 | 16 | 8 | 2 | 0 | | |
| | | | | $\tau_{и, с}$ | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | | | |
| 7 | 15 | 2,2 | 0,221 | $C_{и}$ | 0 | 2 | 11 | 40 | 50 | 45 | 26 | 17 | 10 | 7 | 2 | 0,1 | | | |
| | | | | $\tau_{и, с}$ | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | | | |
| 8 | 22,5 | 2,4 | 0,37 | $C_{и}$ | 0 | 1 | 10 | 40 | 62 | 55 | 30 | 15 | 8 | 4 | 1 | 0 | | | |
| | | | | $\tau_{и, с}$ | | | | | | | | | | | | | | | |

Продолжение таблицы П1

| № варианта | Размеры аппарата | | Скорость подачи $v, \text{ м}^3/\text{с}$ | Экспериментальные данные изменения концентрации индикатора на выходе из реактора | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------------|----------------|--|--|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----|----|
| | $V, \text{ м}^3$ | $D, \text{ м}$ | | $\tau_{ис}, \text{ с}$ | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | | |
| 9 | 1,7 | 1 | 0,0412 | $C_{и}$ | 0,1 | 4 | 9 | 21 | 43 | 57 | 54 | 27 | 18 | 10 | 5 | 1 | | | |
| | | | | $\tau_{ис}, \text{ с}$ | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | |
| 10 | 2,3 | 1,2 | 0,094 | $C_{и}$ | 0 | 1 | 5 | 21 | 87 | 163 | 159 | 82 | 40 | 15 | 5 | 2 | | | |
| | | | | $\tau_{ис}, \text{ с}$ | 12 | 20 | 28 | 36 | 44 | 52 | 60 | 68 | 76 | 84 | 92 | 100 | 108 | 116 | |
| 11 | 3,8 | 1,4 | 0,0748 | $C_{и}$ | 0,5 | 5 | 30 | 48 | 53 | 49 | 33 | 22 | 15 | 10 | 6 | 3 | 1,5 | 0,1 | |
| | | | | $\tau_{ис}, \text{ с}$ | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | |
| 12 | 6 | 1,6 | 0,243 | $C_{и}$ | 1 | 3 | 5 | 7 | 21 | 49 | 77 | 79 | 32 | 12 | 8 | 5 | 3 | 1 | |
| | | | | $\tau_{ис}, \text{ с}$ | 7 | 11 | 15 | 19 | 23 | 27 | 31 | 35 | 39 | 43 | 47 | 51 | 55 | 59 | 63 |
| 13 | 9 | 1,8 | 0,315 | $C_{и}$ | 0,5 | 3 | 21 | 43 | 54 | 50 | 45 | 34 | 27 | 16 | 10 | 4 | 1 | 0,3 | 0 |
| | | | | $\tau_{ис}, \text{ с}$ | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 |
| 14 | 12 | 2 | 0,216 | $C_{и}$ | 0 | 2 | 14 | 25 | 34 | 36 | 34 | 28 | 20 | 15 | 11 | 6 | 3 | 1 | 0 |
| | | | | $\tau_{ис}, \text{ с}$ | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | |
| 15 | 14 | 2,2 | 0,754 | $C_{и}$ | 0 | 6 | 100 | 124 | 110 | 71 | 45 | 28 | 16 | 8 | 5 | 3 | 1 | 0 | |
| | | | | $\tau_{ис}, \text{ с}$ | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 | | |
| Пример | 5 | 1,6 | 0,05 | $C_{и}$ | 0 | 0 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,030 | 0,001 | | |
| | | | | $\tau_{ис}, \text{ с}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Приложение Б (информационное)

Лабораторная работа ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ДИФфуЗИОННОЙ МОДЕЛИ

Цель работы - практическое освоение методики расчета параметров диффузионной модели по экспериментальной дифференциальной функции распределения среднего времени пребывания частиц в аппарате.

Выполнил: студент группы ХТН-111

Петров А.А.

Исходные данные

Экспериментальная С-кривая, снятая на выходе из аппарата при импульсном вводе индикатора на входе в аппарат, приведена в виде транспонированных матриц

$$\tau := (0 \ 20 \ 40 \ 60 \ 80 \ 100 \ 120 \ 140 \ 160 \ 180 \ 200 \ 220 \ 240)^T$$

$$C_{ind} := (0 \ 0.12 \ 0.3 \ 0.48 \ 0.54 \ 0.48 \ 0.40 \ 0.30 \ 0.23 \ 0.15 \ 0.09 \ 0.03 \ 0.001)^T$$

Размеры аппарата $V_a := 5 \text{ м}^3$, $D := 1.6 \text{ м}$. Скорость потока $v := 0.05 \text{ м}^3/\text{с}$.

Результаты выполнения работы:

Задание 1. По экспериментальным данным построить график зависимости концентрации индикатора на выходе из аппарата от времени контактирования (С-кривая)

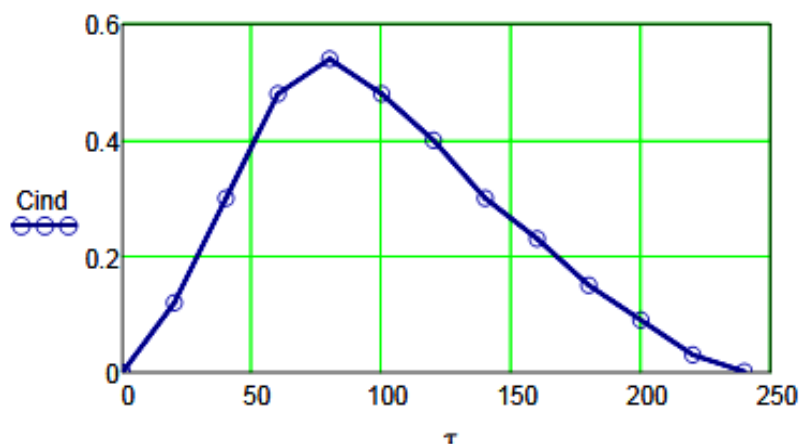


Рисунок 1 – График зависимости концентрации индикатора на выходе аппарата от времени контактирования

Задание 2. Определить время пребывания индикатора (частиц потока) в аппарате.

$$\tau_S := \frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(\tau)} (\tau_i \cdot C_{ind_i})}{\sum_{i=0}^{\text{last}(\tau)} C_{ind_i}} \quad \tau_S = 100.3$$

Задание 3. Рассчитать безразмерное время пребывания индикатора в аппарате (Θ) и безразмерный шаг по времени ($\Delta\Theta$).

$$\Theta := \frac{\tau}{\tau_S} \quad \Delta\tau := 20 \quad \Delta\Theta := \frac{\Delta\tau}{\tau_S} \quad \Delta\Theta = 0.199$$

$$\Theta^T =$$

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 0 | 0 | 0.1994 | 0.3988 | 0.5982 | 0.7976 | 0.997 | 1.1964 | 1.3958 | 1.5952 | 1.7946 | 1.994 | 2.1934 | 2.3928 |

Задание 4. Определить нулевой начальный момент функции распределения времени пребывания (массу вводимого индикатора).

$$M_0 := \sum_{i=0}^{\text{last}(C_{ind})} (C_{ind}_i \cdot \Delta\tau) \quad M_0 = 62.4$$

Задание 5. Построить график безразмерной (приведенной) дифференциальной функции распределения C от безразмерного времени Θ .

$$C1 := \frac{C_{ind} \cdot \tau_S}{M_0}$$

$$C1^T =$$

| | | | | | | | | | | |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0 | 0 | 0.1928 | 0.4821 | 0.7713 | 0.8677 | 0.7713 | 0.6428 | 0.4821 | 0.3696 | ... |

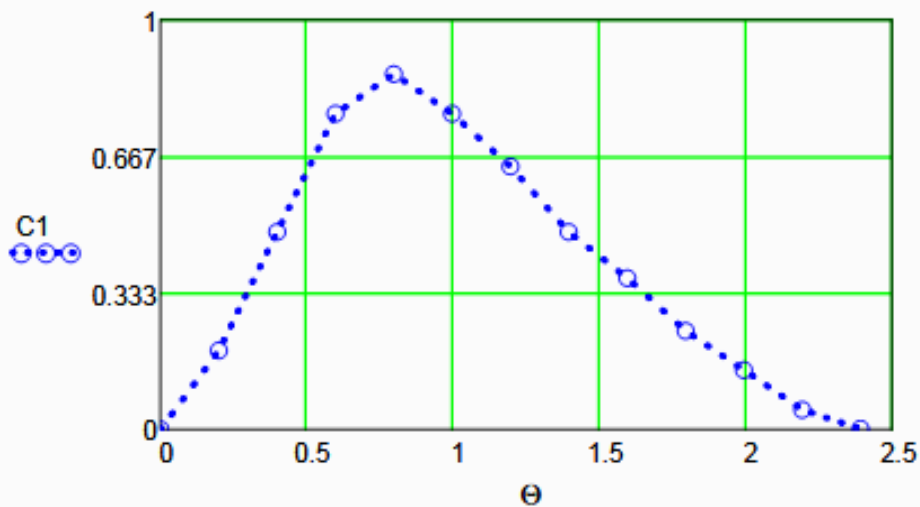


Рисунок 2 – График зависимости безразмерной функции распределения от Θ

Задание 6. Рассчитать второй центральный момент безразмерной функции распределения и вычислить дисперсию.

$$\mu_2 := \left[\sum_{i=0}^{\text{last}(C_{ind})} [(\Theta_i)^2 \cdot C1_i \cdot \Delta\Theta] \right] \quad \mu_2 = 1.2106$$

$$\sigma_2 := \mu_2 - 1 \quad \sigma_2 = 0.2106$$

Задание 7. Методом подбора найти значение критерия Пекле - параметра диффузионной модели.

$Pe := 2$ - Начальное приближение

Given

$$\sigma_2 - \frac{2}{Pe^2}(Pe - 1 + \exp(-Pe)) = 0 \quad \underline{Pe} := \text{Find}(Pe) \quad Pe = 8.4$$

Задание 8. Рассчитать коэффициент продольной диффузии

$$\underline{S} := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \underline{H} := \frac{Va}{S} \quad u := \frac{\nu}{S} \quad DL := \frac{u \cdot H}{Pe} \quad DL = 7.395 \times 10^{-3} \frac{1}{c}$$

Задание 9. Сравнить теоретическую кривую, построенную с учетом найденного значения DL на основе кривой нормального распределения, с экспериментальной C-кривой

$$i := 0 \dots \text{last}(Cind) \quad \Theta_1 := 0, 0.001 \dots 2.5 \quad \underline{C}(i, Pe) := \frac{1}{2 \sqrt{\frac{\pi}{Pe}}} \cdot \exp\left[-(1 - \Theta_i)^2 \cdot \frac{Pe}{4}\right]$$

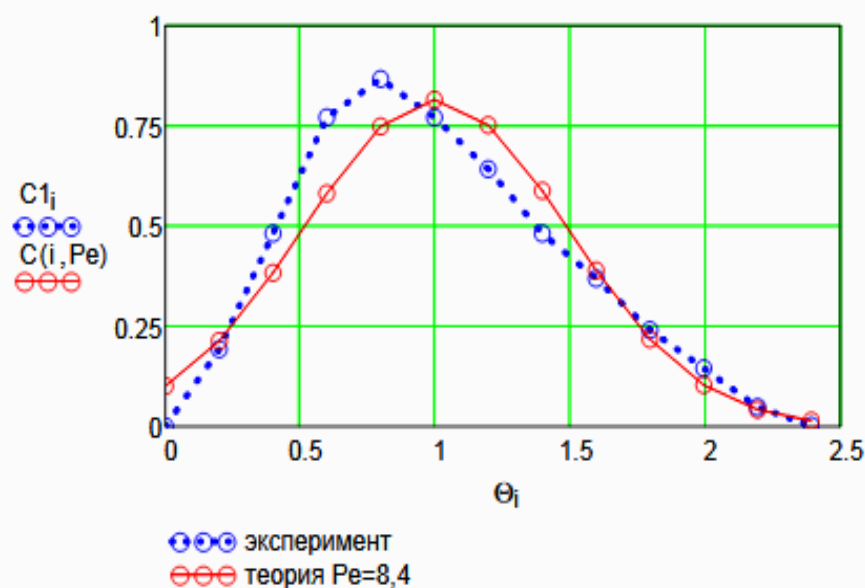


Рисунок 3 – Экспериментальная и теоретическая функции распределения времени пребывания

Выводы:

- Проведено исследование гидродинамического режима аппарата на основе экспериментальных данных распределения времени пребывания индикатора в аппарате при его импульсном вводе в аппарат;
- Построена дифференциальная функция распределения времени пребывания в размерных и безразмерных координатах;
- Найден параметр диффузионной модели - критерий Пекле. Значение $Pe=8.4$.
- Рассчитан коэффициент продольной диффузии, равный $DL = 0.007395 \text{ 1/с}$.
- Проведено сравнение экспериментальной и теоретической функции распределения времени пребывания. В отличие от теоретической функции, экспериментальная не является симметричной функцией, поэтому имеются расхождения в значениях.

Приложение В (информационное)

Лабораторная работа ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ЯЧЕЕЧНОЙ МОДЕЛИ

Цель работы - практическое освоение методики расчета параметров ячеечной модели по экспериментальной дифференциальной функции распределения среднего времени пребывания частиц в аппарате.

Выполнил: студент группы ХТН-111

Петров А.А.

Исходные данные

Экспериментальная С-кривая, снятая на выходе из аппарата при импульсном вводе индикатора на входе в аппарат, приведена в виде транспонированных матриц

$$\tau := (0 \ 20 \ 40 \ 60 \ 80 \ 100 \ 120 \ 140 \ 160 \ 180 \ 200 \ 220 \ 240)^T$$

$$C_{ind} := (0 \ 0.12 \ 0.3 \ 0.48 \ 0.54 \ 0.48 \ 0.40 \ 0.30 \ 0.23 \ 0.15 \ 0.09 \ 0.03 \ 0.001)^T$$

Размеры аппарата $V_a := 5 \text{ м}^3$, $D := 1.6 \text{ м}$ Скорость потока $v := 0.05 \text{ м}^3/\text{с}$.

Результаты выполнения работы:

Задание 1. По экспериментальным данным построить график зависимости концентрации индикатора на выходе из аппарата от времени контактирования (С-кривая)

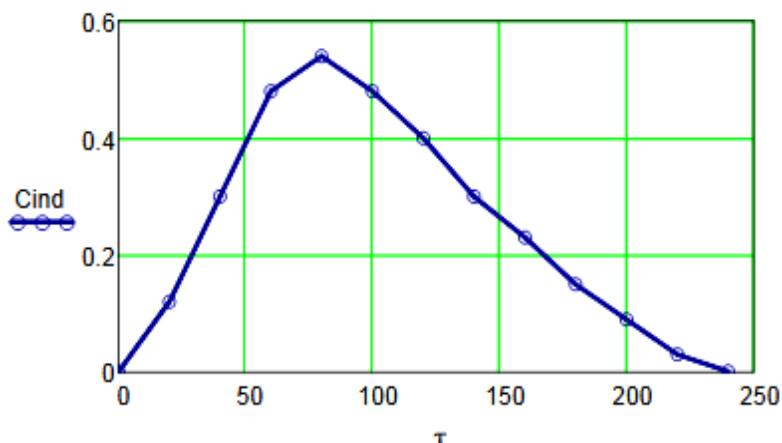


Рисунок 1 – График зависимости концентрации индикатора на выходе аппарата от времени контактирования

Задание 2. Определить время пребывания индикатора (частиц потока) в аппарате.

$$\tau S := \frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(\tau)} (\tau_i \cdot C_{ind_i})}{\sum_{i=0}^{\text{last}(\tau)} C_{ind_i}} \quad \tau S = 100.3$$

Задание 3. Рассчитать безразмерное время пребывания индикатора в аппарате (Θ) и безразмерный шаг по времени ($\Delta\Theta$).

$$\Theta := \frac{\tau}{\tau_S} \quad \Delta\tau := 20 \quad \Delta\Theta := \frac{\Delta\tau}{\tau_S} \quad \Delta\Theta = 0.199$$

$$\Theta^T =$$

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 0 | 0 | 0.1994 | 0.3988 | 0.5982 | 0.7976 | 0.997 | 1.1964 | 1.3958 | 1.5952 | 1.7946 | 1.994 | 2.1934 | 2.3928 |

Задание 4. Определить нулевой начальный момент функции распределения времени пребывания (массу вводимого индикатора).

$$M_0 := \sum_{i=0}^{\text{last}(C_{ind})} (C_{ind}_i \cdot \Delta\tau) \quad M_0 = 62.4$$

Задание 5. Построить график безразмерной (приведенной) дифференциальной функции распределения C от безразмерного времени Θ .

$$C1 := \frac{C_{ind} \cdot \tau_S}{M_0}$$

$$C1^T =$$

| | | | | | | | | | | |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0 | 0 | 0.1928 | 0.4821 | 0.7713 | 0.8677 | 0.7713 | 0.6428 | 0.4821 | 0.3696 | ... |

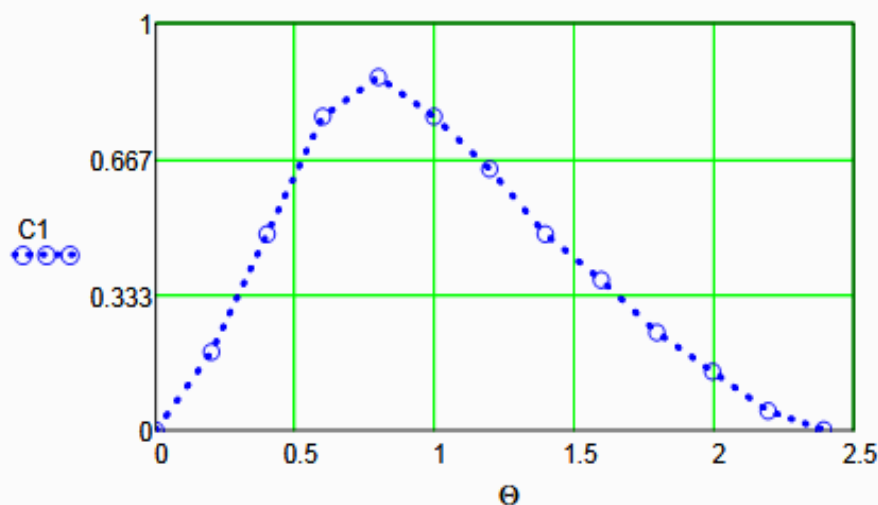


Рисунок 2 – График зависимости безразмерной функции распределения от Θ

Задание 6. Рассчитать второй центральный момент безразмерной функции распределения и вычислить дисперсию.

$$\mu_2 := \sum_{i=0}^{\text{last}(C_{ind})} [(\Theta_i)^2 \cdot C1_i \cdot \Delta\Theta] \quad \mu_2 = 1.2106 \quad \sigma_2 := \mu_2 - 1 \quad \sigma_2 = 0.2106$$

Задание 7. Определить параметр ячеечной модели.

$$N := \frac{1}{\sigma_2} \quad N = 4.7$$

Задание 8. Построить теоретические кривые при нижнем и верхнем целочисленном значении N.

$$Ct(\Theta t, N) := \frac{N^N \cdot (\Theta t)^{N-1} \cdot e^{-N \cdot \Theta t}}{(N-1)!}$$

$$\Theta t := 0, 0.01 \dots 2.5$$

$$i := 0 \dots \text{last}(Cind)$$

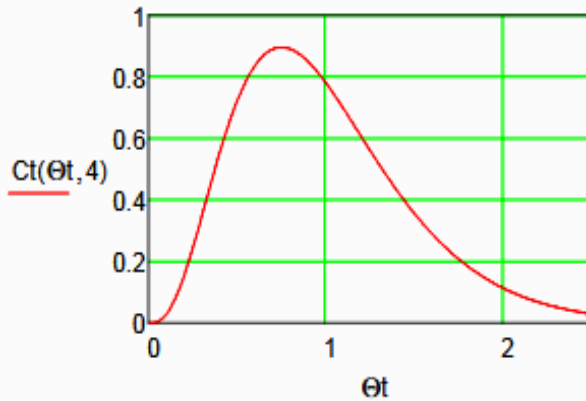


Рисунок 3 – Теоретическая кривая при N = 4

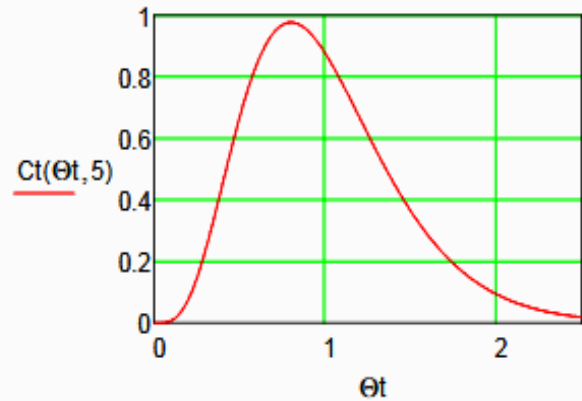


Рисунок 4 – Теоретическая кривая при N = 5

Вывод: при N = 4 теоретическая кривая лучше описывает экспериментальные данные.

Задание 9. Сравнить теоретическую кривую, построенную с учетом найденного значения N, с экспериментальной С-кривой

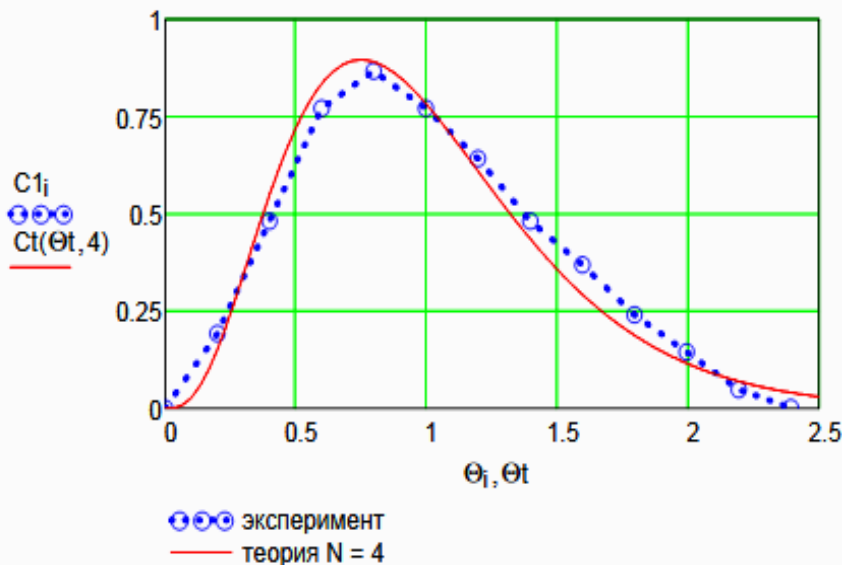


Рисунок 5 – Экспериментальная и теоретическая функции распределения времени пребывания

Выводы:

- Проведено исследование гидродинамического режима аппарата на основе экспериментальных данных распределения времени пребывания индикатора в аппарате при его импульсном вводе в аппарат;
- Построена дифференциальная функция распределения времени пребывания в размерных и безразмерных координатах;
- Найден параметр ячеечной модели - N = 4.
- Проведено сравнение экспериментальной и теоретической функции распределения времени пребывания. Экспериментальные данные хорошо описываются ячеечной моделью.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ПОТОКА В РЕАКТОРЕ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Химические реакторы» для студентов направления подготовки
18.03.01 – Химическая технология

Составитель доц. А.Л. Проскурнин

Рецензент доц. А.И. Свидченко

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Невинномысский технологический институт

РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНОГО И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям

по дисциплине «Химические реакторы» для студентов направления
18.03.01 – Химическая технология

Невинномысск, 2020

Методические указания составлены в соответствии с утвержденной программой по дисциплине «Химические реакторы». В указаниях даны теоретические основы составления материального и теплового балансов и методика выполнения работ. Особое внимание уделено взаимодействию программы MathCAD с программой Excel для вывода данных и представления результатов расчета в виде таблиц. Приводятся примеры выполнения заданий в программе MathCAD. Настоящие указания разработаны для направления 18.03.01 – Химическая технология. Могут быть использованы студентами других направлений технологического профиля.

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры ХТМиАХП и рекомендованы к внутривузовскому изданию.

Составил доц. А.Л. Проскурнин

Рецензент: доц. А.И. Свидченко

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| Практическое занятие 1 «РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА» | 5 |
| 1.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ..... | 5 |
| 1.2 ЗАДАНИЯ | 7 |
| 1.3 МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ..... | 8 |
| 1.3.1 Методика составления материального баланса | 8 |
| 1.3.2 Использование таблицы Excel для вывода данных в документе MathCAD | 8 |
| 1.3.3 Оператор суммирования элементов вектора | 10 |
| 1.4 ПРИМЕР РАСЧЕТА МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА..... | 11 |
| 1.5 ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ..... | 14 |
| Практическое занятие 2 «РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА» | 15 |
| 2.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ..... | 15 |
| 2.2 ЗАДАНИЯ | 16 |
| 2.3 МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ..... | 16 |
| 2.3.1 Методика составления теплового баланса..... | 16 |
| 2.3.2 Использование в документе MathCAD внешних файлов..... | 18 |
| Ссылка на файлы MathCAD..... | 18 |
| Ввод данных из файлов Excel..... | 19 |
| 2.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА | 21 |
| ПРИМЕР РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА | 22 |
| 2.6 ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ..... | 24 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... | 24 |

Введение

Дисциплина «Химические реакторы» изучается студентами по профилю подготовки «Химическая технология неорганических веществ» направления подготовки 18.03.01 Химическая технология на 5 курсе для студентов ЗФО. Основой технологических расчетов реакционных аппаратов являются расчеты материальных и тепловых потоков при протекании химико-технологических процессов. Знание этих потоков необходимо для проведения конструктивных расчетов производственного оборудования и оценки экономической эффективности процесса. Правильное сочетание теоретических знаний с практикой обеспечивает высокое качество подготовки выпускников.

В результате освоения теоретического и практического материала соответствующих разделов дисциплины «Химические реакторы» образовательной программы студент приобретает следующие компетенции:

ПК-4 – способностью принимать конкретные технические решения при разработке технологических процессов, выбирать технические средства и технологии с учетом экологических последствий их применения;

ПК-7 – способностью проверять техническое состояние, организовывать профилактические осмотры и текущий ремонт оборудования, готовить оборудование к ремонту и принимать оборудование из ремонта;

ПК-8 – готовностью к освоению и эксплуатации вновь вводимого оборудования.

Практическое занятие 1

«РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА»

Цель: приобретение практических навыков расчета материальных балансы технологических процессов с использованием программы MathCAD;

1.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Основой технологических расчетов являются расчеты материальных потоков при протекании химико-технологических процессов. Знание материальных потоков необходимо для проведения конструктивных расчетов производственного оборудования и коммуникаций, оценки экономической эффективности процесса. Самым распространенным видом материальных расчетов является составление материальных балансов. Материальные балансы составляют на основе *закона сохранения массы вещества*:

во всякой замкнутой системе масса веществ, вступивших в реакцию, равна массе веществ, получившихся в результате реакции.

Применительно к материальному балансу любого технологического процесса это означает, что масса веществ, поступивших на технологическую операцию (**приход**), равна массе веществ, получившихся в результате ее (**расход**).

$$G_{\text{прих}} = G_{\text{расх}} \quad \text{или} \quad G_{\text{прих}} - G_{\text{расх}} = 0.$$

Эти уравнения справедливы для установившегося (стационарного) процесса. Определение массы вводимых компонентов и полученных продуктов производят отдельно для твердой, жидкой и газообразной фаз согласно уравнению

$$G_{\Gamma} + G_{\text{Ж}} + G_{\text{T}} = G_{\Gamma}'' + G_{\text{Ж}}'' + G_{\text{T}}''. \quad (1.1)$$

В процессе не всегда присутствуют все фазы, а в одной фазе могут содержаться несколько веществ, что приводит к упрощению или усложнению уравнения (1.1).

Материальный баланс по всем реагирующим компонентам

$$\sum_{i=1}^k m_i^{\text{вх}} = \sum_{j=1}^k m_j^{\text{вых}}, \quad (1.2)$$

где m_i , m_j – массы компонентов; k – количество компонентов.

При проведении исследований материальный баланс составляют на основе данных о количестве и составе подаваемых в реактор реагентов, составе и количестве образующихся продуктов реакции. Он используется для расчета основных показателей процесса: степени превращения реагента, избирательности, выхода продукта.

При проектировании новых или реконструкции действующих производств материальный баланс составляют по уравнению основной суммарной реакции с учетом параллельных и побочных реакций. Поскольку на практике приходится иметь дело не с чистыми веществами, а с сырьем сложного химического и механического состава, при составлении материального баланса учитывают массу всех компонентов. Для этого пользуются данными анализов. Расчет обычно выполняют в единицах массы (кг, т), а также в единицах количества вещества (моль, кмоль) и в единицах объема (м^3). Эти данные используются для расчета энергетических балансов, конструктивных размеров оборудования и в других расчетах.

На производстве материальный баланс составляют на основе показаний приборов по измерению расходов и данных анализа состава потоков.

Обычно составляют материальные балансы для реактора, установки, цеха, завода, отрасли.

Различают балансы на единицу времени и единицу продукции.

Материальный баланс на единицу времени составляют чаще всего для непрерывных процессов с целью расчета размеров аппаратов, диаметров трубопроводов, а также для определения входных и выходных значений концентраций реагирующих компонентов.

Материальный баланс на единицу продукции составляют как для непрерывных, так и для периодических процессов с целью определения теоретических и практических расходных коэффициентов.

Материальные балансы выражают в виде формул, таблиц и диаграмм. Чаще всего его представляют в виде таблиц, содержащих приходную и расходную части.

1.2 ЗАДАНИЯ

Задание 1. Составить материальный баланс реакционной печи, в которой протекает процесс паровой конверсии метана.

Исходные данные:

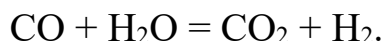
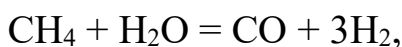
Объем подаваемого газа в реакционную печь – $V_2 = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Газ имеет следующий состав, %(об.): $\text{CH}_4 - 95,1$; $\text{CO}_2 - 1,9$; $\text{N}_2 - 2,2$; $\text{Ar} - 0,8$.

Мольное отношение $\text{H}_2\text{O} / \text{CH}_4$ составляет – m .

Процесс протекает при температуре $t \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $P \text{ МПа}$.

В процесс паровой конверсии метана протекают две реакции:



Степень превращения $\text{CH}_4 - x_1 \%$, степень превращения $\text{CO} - x_2 \%$.

Конкретные значения параметров процесса приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Варианты заданий

| Вариант | $\text{H}_2\text{O} / \text{CH}_4$ | $t, \text{ }^\circ\text{C}$ | $P, \text{ МПа}$ | Степень превращения, % | |
|-------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------|-------------------|
| | | | | $\text{CH}_4 (x_1)$ | $\text{CO} (x_2)$ |
| 1 | 2 : 1 | 527 | 0,1 | 40,9 | 22,5 |
| 2 | | 627 | 0,5 | 42,8 | 27,7 |
| 3 | | 727 | 0,5 | 71,1 | 26,4 |
| 4 | | 727 | 1,0 | 56,6 | 25,7 |
| 5 | 4 : 1 | 527 | 0,1 | 61,5 | 51,2 |
| 6 | | 527 | 0,5 | 35,5 | 32,2 |
| 7 | | 627 | 0,5 | 63,1 | 46,2 |
| 8 | | 827 | 0,5 | 98,6 | 41,6 |
| 9 | 6 : 1 | 527 | 0,5 | 75,5 | 65,3 |
| 10 | | 827 | 3,0 | 51,4 | 12,3 |
| 11 (пример) | 4 : 1 | 627 | 3,0 | 33,3 | 28,4 |

Задание 2. Представить сводный материальный баланс в виде таблицы Excel.

Задание 3. Рассчитать влажность конвертированного газа.

Задание 4. Определить состав влажного и сухого газа на выходе из реакционной печи.

1.3 МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.3.1 Методика составления материального баланса

Материальный баланс составляют по уравнениям реакций, протекающих в реакционной печи согласно закону сохранения массы вещества. Последовательность расчета дана в примере.

1.3.2 Использование таблицы Excel для вывода данных в документе MathCAD

Материальный баланс наиболее часто представляют в виде таблицы. Для вывода материального баланса технологического процесса в виде таблицы используют программу Excel. Для вставки в документ MathCAD таблицы Excel выполните следующие действия:

- Выберите в меню **Вставка** команду **Компонент**;
- В появившемся диалоговом окне **Component Wizard** (рисунок 1.1) в списке выберите Excel и нажмите кнопку Next >.

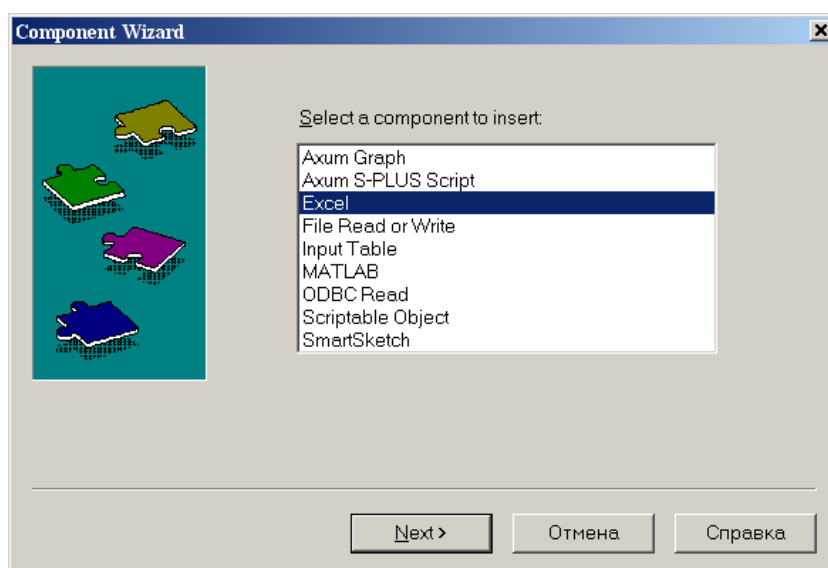


Рисунок 1.1 – Диалоговое окно «Component Wizard»

- В появившемся диалоговом окне **Excel setup Wizard** (рисунок 1.2) установите флажок на пункте **Create an empty Excel worksheet**, нажмите кнопку **Далее >**.

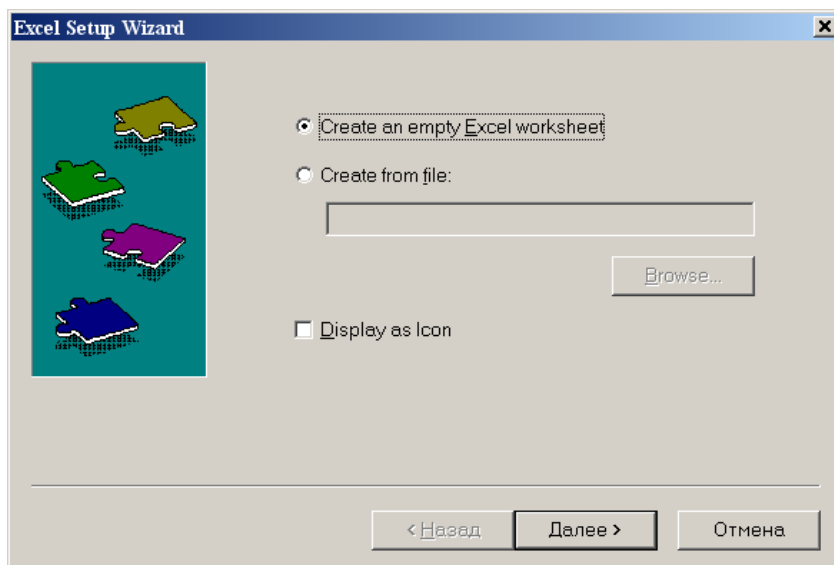


Рисунок 1.2 – Диалоговое окно *Excel setup Wizard*

- В появившемся новом диалоговом окне **Excel setup Wizard** (рисунок 1.3) в окне **Inputs** укажите для каждой переменной имена ячеек электронной таблицы, в которые будут введены данные, и нажмите кнопку **Готово**. Если вводится массив данных, то указывают имя начальной ячейки.

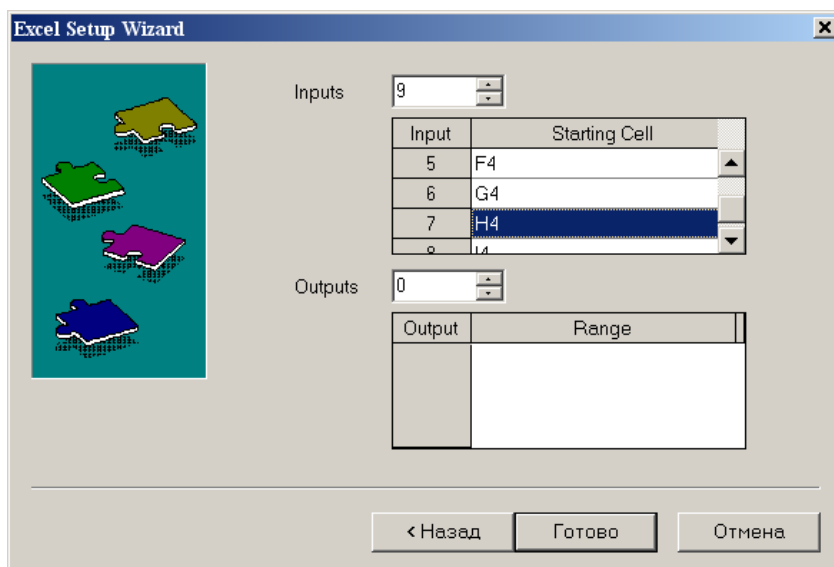


Рисунок 1.3 – Новое диалоговое окно *Excel setup Wizard*

- В документе MathCAD появятся электронные таблицы Excel и *местозаполнители*, обозначаемые черными прямоугольниками, в которые необходимо ввести имена переменных, содержащие вводимые данные.

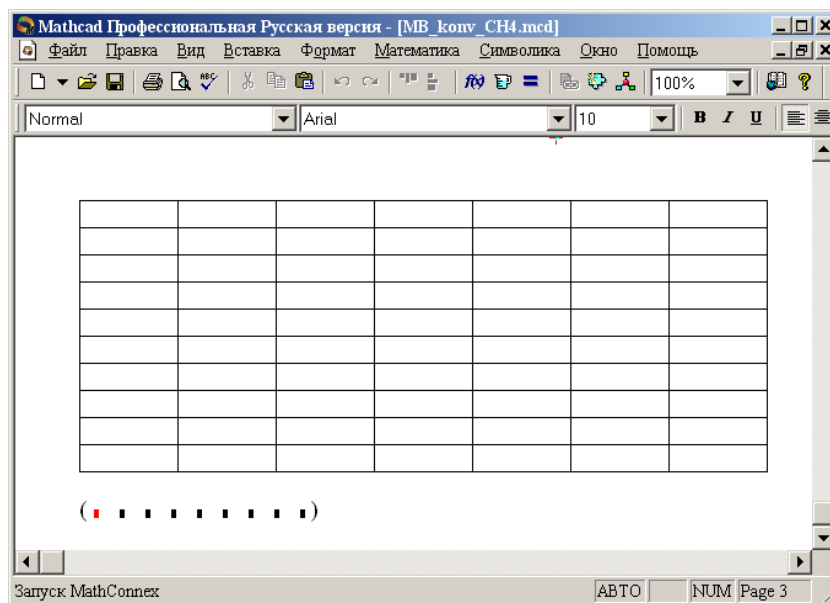


Рисунок 1.4 – Документ MathCAD

После ввода переменных, происходит заполнение таблицы. При двойном щелчке мыши на таблице подключается программа Excel. Можно форматировать таблицу, добавлять заголовки, данные, использовать все функции и возможности программы Excel.

При щелчке на таблице правой кнопкой мыши появляется контекстное меню, использование команд которого позволяет добавлять и удалять переменные, изменять выбранный диапазон ячеек таблицы Excel.

1.3.3 Оператор суммирования элементов вектора

Чтобы вычислить сумму всех элементов вектора \mathbf{v} , определенного где-либо в рабочем документе, выполните следующие действия:

Щёлкните в свободном месте или в поле. Затем нажмите клавиши **[Ctrl]+4**. Появится знак суммы и местозаполнитель в виде черного прямоугольника.

$$\sum \blacksquare$$

Введите имя вектора или выражения, принимающего векторные значения. Mathcad вернет сумму всех элементов вектора.

1.4 ПРИМЕР РАСЧЕТА МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

ОТЧЕТ

по лабораторной работе

на тему: "РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА"

Цель: Расчет материального баланса с использованием программы MathCAD.

Выполнил: студент группы ХТН-051 Петров А.Л.

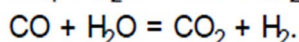
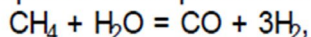
Задание 1 Составить материальный баланс реакционной печи, в которой протекает процесс паровой конверсии метана.

Исходные данные: Объем подаваемого газа в реакционную печь $V_m = 10000$ м³/ч. Газ имеет следующий состав, %(об.): CH₄ - 95,1; CO₂ - 1,9; N₂ - 2,2; Ar - 0,8.

Мольное отношение H₂O/ CH₄ составляет m .

Процесс протекает при температуре T и давлении P МПа.

В процесс паровой конверсии метана протекают две реакции



Степень превращения CH₄ - x_1 %, степень превращения CO - x_2 %.

Расчет:

Вариант 11 $SV_m := 10000$ $m := 4$ $x_1 := 0.333$ $x_2 := 0.284$

$N_m := (0.951 \ 0.019 \ 0 \ 0.022 \ 0 \ 0.008 \ 0)^T$

Примем следующие обозначения:

| | |
|--|--|
| SV_m - общий объем газа, подаваемого в реакционную печь, м ³ /ч; | nk - количество компонентов в реакционной смеси; |
| N_{m_i} - мольная (объемная) доля <i>i</i> -го компонента в газе; | M_i - мольная масса <i>i</i> -го компонента; |
| SN_m - сумма мольных долей компонентов; | V_{p_i} - объем <i>i</i> -го компонента реакционных газов |
| V_{m_i} - объем <i>i</i> -го компонента газа, подаваемого в реактор, м ³ /ч; | SV_p - объем реакционного газа, выходящего из реакционной печи, м ³ /ч; |
| V_n - объем водяных паров, подаваемых в реактор, м ³ /ч; | N_{p_i} - мольная (объемная) доля <i>i</i> -го компонента в реакционном газе; |
| V_{c_i} - объем <i>i</i> -го компонента парогазовой смеси, м ³ /ч; | SN_p - сумма мольных долей компонентов; |
| SV_c - объем парогазовой смеси, м ³ /ч; | G_{p_i} - масса <i>i</i> -го компонента реакционного газа, кг/ч; |
| N_{c_i} - мольная (объемная) доля <i>i</i> -го компонента в парогазовой смеси; | SG_p - масса реакционных газов, выходящих из реакционной печи, г/ч; |
| SN_c - сумма мольных долей компонентов; | w_{p_i} - массовая доля <i>i</i> -го компонента реакционного газа |
| G_{c_i} - масса <i>i</i> -го компонента парогазовой смеси, кг/ч; | Sw_p - сумма массовых долей компонентов реакционного газа; |
| SG_c - масса парогазовой смеси, подаваемой в реактор, кг/ч; | VI - влажность конвертированного газа |
| w_{c_i} - массовая доля <i>i</i> -го компонента парогазовой смеси; | |
| Sw_c - сумма массовых долей компонентов ПГС; | |

Расчет количества и состава парогазовой смеси на входе в реакционную печь:

ORIGIN := 1

$$\text{Name} := \begin{pmatrix} \text{"CH4"} \\ \text{"CO2"} \\ \text{"CO"} \\ \text{"N2"} \\ \text{"H2"} \\ \text{"Ar"} \\ \text{"H2O"} \end{pmatrix} \quad \text{M} := \begin{pmatrix} 16 \\ 44 \\ 28 \\ 28 \\ 2 \\ 39.9 \\ 18 \end{pmatrix} \quad \text{Vm} := \text{SVm} \cdot \text{Nm} \quad \text{Vm} = \begin{pmatrix} 9510 \\ 190 \\ 0 \\ 220 \\ 0 \\ 80 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{Vn} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ m \cdot \text{Vm}_1 \end{pmatrix}$$

$V_c := V_m + V_n$

$$V_c = \begin{pmatrix} 9510 \\ 190 \\ 0 \\ 220 \\ 0 \\ 80 \\ 38040 \end{pmatrix} \quad \text{SVc} := \sum V_c \quad \text{SVc} = 48040 \quad \text{Nc} := \frac{V_c}{\text{SVc}} \quad \text{Nc} = \begin{pmatrix} 0.198 \\ 0.004 \\ 0 \\ 0.0046 \\ 0 \\ 0.0017 \\ 0.7918 \end{pmatrix} \quad \text{SNc} := \sum \text{Nc} \quad \text{Проверка: SNc} = 1$$

$$\text{Gc} := \frac{(V_c \cdot M)}{22.4} \quad \text{Gc} = \begin{pmatrix} 6793 \\ 373 \\ 0 \\ 275 \\ 0 \\ 143 \\ 30568 \end{pmatrix} \quad \text{SGc} := \sum \text{Gc} \quad \text{SGc} = 38151 \quad \text{wc} := \frac{\text{Gc}}{\text{SGc}} \quad \text{wc} = \begin{pmatrix} 0.178 \\ 0.0098 \\ 0 \\ 0.0072 \\ 0 \\ 0.0037 \\ 0.8012 \end{pmatrix} \quad \text{Swc} := \sum \text{wc} \quad \text{Проверка: Swc} = 1$$

Расчет количества и состава парогазовой смеси на выходе из реакционной печи:

$$\text{Vp} := \begin{pmatrix} V_{c1} \cdot (1 - x_1) \\ V_{c2} + V_{c1} \cdot x_1 \cdot x_2 \\ V_{c1} \cdot x_1 \cdot (1 - x_2) \\ V_{c4} \\ V_{c1} \cdot 3 \cdot x_1 + V_{c1} \cdot x_1 \cdot x_2 \\ V_{c6} \\ V_{c7} - V_{c1} \cdot x_1 - V_{c1} \cdot x_1 \cdot x_2 \end{pmatrix} \quad \text{Vp} = \begin{pmatrix} 6343 \\ 1089 \\ 2267 \\ 220 \\ 10400 \\ 80 \\ 33974 \end{pmatrix} \quad \text{SVp} := \sum \text{Vp} \quad \text{SVp} = 54374 \quad \text{Np} := \frac{\text{Vp}}{\text{SVp}} \quad \text{Np} = \begin{pmatrix} 0.1167 \\ 0.02 \\ 0.0417 \\ 0.004 \\ 0.1913 \\ 0.0015 \\ 0.6248 \end{pmatrix}$$

Проверка: $\text{SNp} = 1$

$$G_p := \frac{\overrightarrow{(V_p \cdot M)}}{22.4}$$

$$G_p = \begin{pmatrix} 4531 \\ 2140 \\ 2834 \\ 275 \\ 929 \\ 143 \\ 27300 \end{pmatrix} \quad S_{Gp} := \sum G_p \quad S_{Gp} = 38151$$

$$w_p := \frac{G_p}{S_{Gp}} \quad w_p = \begin{pmatrix} 0.1188 \\ 0.0561 \\ 0.0743 \\ 0.0072 \\ 0.0243 \\ 0.0037 \\ 0.7156 \end{pmatrix} \quad S_{w_p} := \sum w_p$$

Проверка:
S_{w_p} = 1

Задание 2. Представить сводный материальный баланс в виде таблицы, созданной в программе Excel.

| Материальный баланс процесса паровой конверсии метана | | | | | | | | |
|---|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ПРИХОД | | | | | РАСХОД | | | |
| Компонент | V _c , м ³ /ч | N _c , доли | G _c , кг/ч | w _c , доли | V _p , м ³ /ч | N _p , доли | G _p , кг/ч | w _p , доли |
| CH ₄ | 9510 | 0,1980 | 6792,9 | 0,1780 | 6343 | 0,1167 | 4530,8 | 0,1188 |
| CO ₂ | 190 | 0,0040 | 373,2 | 0,0098 | 1089 | 0,0200 | 2139,9 | 0,0561 |
| CO | 0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 2267 | 0,0417 | 2834,3 | 0,0743 |
| N ₂ | 220 | 0,0046 | 275,0 | 0,0072 | 220 | 0,0040 | 275,0 | 0,0072 |
| H ₂ | 0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 10400 | 0,1913 | 928,6 | 0,0243 |
| Ar | 80 | 0,0017 | 142,5 | 0,0037 | 80 | 0,0015 | 142,5 | 0,0037 |
| H ₂ O | 38040 | 0,7918 | 30567,9 | 0,8012 | 33974 | 0,6248 | 27300,4 | 0,7156 |
| Итого: | 48040 | 1,0000 | 38151,4 | 1,0000 | 54374 | 1,0000 | 38151,4 | 1,0000 |

(Name V_c N_c G_c w_c V_p N_p G_p w_p)

Задание 3. Рассчитать влажность конвертированного газа.

Расчет:
$$Vl := \frac{V_{p7}}{\sum_{i=1}^{nk} V_{pi}} \cdot 100 \quad Vl = 62.5\%$$

Задание 4. Определить состав влажного и сухого газа на выходе из реакционной печи.

Расчет:

Состав влажного газа $N_p = \begin{pmatrix} 0.1167 \\ 0.02 \\ 0.0417 \\ 0.004 \\ 0.1913 \\ 0.0015 \\ 0.6248 \end{pmatrix}$

Состав сухого газа $S_{Vps} := \sum_{i=1}^{nk} V_{pi}$ $S_{Vps} = 20400$ $S_{Nps} := \sum_{i=1}^{nk} N_{pi}$ $S_{Nps} = 1$

$V_{ps} := V_p$ $V_{ps7} := 0$ $N_{ps} := \frac{V_{ps}}{S_{Vps}}$ $N_{ps} = \begin{pmatrix} 0.3109 \\ 0.0534 \\ 0.1112 \\ 0.0108 \\ 0.5098 \\ 0.0039 \\ 0 \end{pmatrix}$

Проверка: $S_{Nps} = 1$

1.5 ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

- 1 Дайте определение закона сохранения массы вещества применительно к материальному балансу технологического процесса.
- 2 С какой целью составляют материальный баланс на единицу времени?
- 3 Каким образом составляют материальный баланс при проектировании новых производств?
- 4 В каком виде выражают материальные балансы?
- 5 Какие действия необходимо выполнить, чтобы вставить в документ MathCAD таблицу Excel?
- 6 Каким образом можно изменять переменные и их связь с таблицей Excel?

Практическое занятие 2

«РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА»

Цель: приобретение практических навыков расчета тепловых балансов технологических процессов с использованием программы MathCAD.

2.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Энергетический баланс составляют по данным материального баланса на основе закона сохранения энергии:

в замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна.

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.

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}} \text{ ИЛИ } Q_{\text{прих}} - Q_{\text{расх}} = 0. \quad (2.1)$$

Эти уравнения справедливы для установившегося (стационарного) процесса. Для нестационарного (динамического) процесса

$$Q_{\text{прих}} - Q_{\text{расх}} = dQ/d\tau.$$

При составлении теплового баланса должна быть учтена вся теплота, подводимая в аппарат или отводимая из него, теплота выделяющаяся (поглощающаяся) в результате химических реакций или физических превращений, теплота, вносимая каждым компонентом, как входящим в процесс или аппарат, так и выходящим из него, а также теплообмен с окружающей средой. В общем случае уравнение теплового баланса можно представить в виде

$$Q_{в} + Q_{фх}^e + Q_p^e + Q_n = Q_{в} + Q_{ф}^n + Q_{pp}^n + Q_o + Q_{nx} . \quad (2.2)$$

Здесь $Q_{в\ x}$ и $Q_{в\ ы}$ – соответственно количество теплоты, вносимое в аппарат входным потоком или выносимое из него выходным потоком;

Q_{ϕ}^{δ} и Q_{ϕ}^n – теплота физических процессов, происходящих с выделением или поглощением теплоты; Q_p^{δ} и Q_p^n – теплота экзотермических (δ) и эндотермических (n) химических реакций; $Q_{нагр}$ и $Q_{охл}$ – соответственно количество теплоты, подводимое в аппарат извне для нагрева реакционной смеси и отводимое через холодильник для поддержания заданного температурного режима; $Q_{пот}$ – потери теплоты в окружающую среду.

2.2 ЗАДАНИЯ

Задание 1. Составить тепловой баланс реакционной печи, в которой протекает процесс паровой конверсии метана.

Исходные данные: Материальный баланс процесса, рассчитанный в предыдущей работе. $T_{вх}$ парогазовой смеси равна 450°C .

Задание 2. Построить график зависимости величины теплового эффекта процесса от температуры.

2.3 МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.3.1 Методика составления теплового баланса

Определение каждой из величин уравнения является одной из главных задач при расчете технологического процесса и проектировании химической аппаратуры.

Теплоту, вносимую потоком, обычно подсчитывают по уравнениям:

$$Q_{\delta} = G_x \cdot \bar{c} \cdot t, \quad Q_{\delta} = n_x \cdot c_p \cdot t, \quad Q_{\delta} = V_x \cdot c_v \cdot t, \quad (2.3)$$

где G , n , V – соответственно масса, количество, объем входного потока; \bar{c} , c_p , c_v – соответственно удельная, мольная и объемная теплоемкость потока при температуре t .

Мольную теплоемкость индивидуальных газообразных компонентов рассчитывают по уравнению

$$c_p = A_0 + A_1 \cdot \left(\frac{T}{1} \right) + A_2 \cdot \left(\frac{T}{1} \right)^2 + A_3 \cdot \left(\frac{T}{1} \right)^3 + A_4 \cdot \left(\frac{T}{1} \right)^{-2}, \quad (2.4)$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – коэффициенты уравнения.

Значения коэффициентов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Термодинамические свойства компонентов

| № | Компоненты | М | H_f , кДж/моль | Параметры уравнения $C_p = f(T)$, Дж/(моль·К) | | | | |
|---|------------------|------|---------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | | | A_0 | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 |
| 1 | CH ₄ | 16,0 | -74,8 | 0,0 | 105,8 | -38,6 | 4,9 | 0,66 |
| 2 | CO ₂ | 44,0 | -393,5 | 23,6 | 59,9 | -39,4 | 10,2 | -0,10 |
| 3 | CO | 28,0 | -110,5 | 28,1 | -3,3 | 16,1 | -7,8 | 0,07 |
| 4 | N ₂ | 28,0 | 0,0 | 31,0 | -12,4 | 24,7 | -10,5 | 0,00 |
| 5 | H ₂ | 2,0 | 0,0 | 32,8 | -10,4 | 10,1 | -2,2 | -0,15 |
| 4 | Ar | 39,9 | 0,0 | 31,0 | -12,4 | 24,7 | -10,5 | 0,00 |
| 6 | H ₂ O | 18,0 | -241,8 | 30,2 | 6,7 | 6,5 | -2,3 | 0,08 |
| 7 | O ₂ | 32,0 | 0,0 | 20,5 | 26,7 | -15,6 | 3,1 | 0,20 |

Теплоемкость смеси рассчитывают по формуле

$$\bar{c}_p = \sum_{i=1}^{nk} y_i c_{p,i} \quad (2.5)$$

где y_i – мольная доля i -го компонента в смеси; $c_{p,i}$ – теплоемкость i -го компонента, кДж/кмоль·°С; nk – число компонентов.

При расчете теплового эффекта учитывается протекания реакций горения водорода, паровой конверсии метана и оксида углерода, являющихся как эндо-, так и экзотермическими. Общая величина теплового эффекта при температуре 298 °С рассчитывается по уравнению

$$\Delta_r H^0(298) = \sum_{i=1}^7 [n_p \cdot \Delta_f H_i^0(298)]_n - \sum_{i=1}^7 [n_{0i} \cdot \Delta_f H_i^0(298)]_u, \quad (2.6)$$

где $\Delta_f H_i^0(298)$ – стандартное значение энтальпии образования i -го компонента.

Значение энтальпии реакции $\Delta_r H^0(T)$ определяют при средней температуре $T = (T_{вх} + T_{вых})/2$ по уравнению Кирхгофа

$$\Delta_r H^0(T) = \Delta_r H^0(298) + \int_{298}^T \Delta c_p dT, \quad (2.7)$$

где Δc_p – изменение энтальпии при протекании реакции;

$$\Delta c_p = \Delta A_0 + \Delta A_1 \cdot \left(\frac{T}{1}\right) + \Delta A_2 \cdot \left(\frac{T}{1}\right)^2 + \Delta A_3 \cdot \left(\frac{T}{1}\right)^3 + \Delta A_4 \cdot \left(\frac{T}{1}\right)^{-2}, \quad (2.8)$$

где
$$\Delta A_i = \sum_{j=1}^7 [(n_{pj} \cdot A_j)]_{n_i} - \sum_{j=1}^7 [(n_{0ij} \cdot A_j)]_{n_i} . \quad (2.9)$$

Потери теплоты в окружающую среду $Q_{\text{пот}}$ рассчитывают или принимают в количестве 1-5% от $Q_{\text{прих}}$.

В данной работе на основе теплового баланса рассчитывают количество теплоты, которое необходимо подвести в реакционную зону для обеспечения заданного температурного режима.

2.3.2 Использование в документе MathCAD внешних файлов

Ссылка на файлы MathCAD

При составлении теплового баланса необходимо использовать данные материального баланса, которые содержатся в файле *MB_konv_CH4.mcd*. Для использования этих данных в другом файле программы MathCAD необходимо выполнить следующие операции:

- Выберите в меню **Вставка** команду **Ссылка**;
- В появившемся диалоговом окне **Вставить ссылку** (рисунок 2.1) нажмите кнопку **Обзор**, найдите файл *MB_konv_CH4.mcd* и откройте его.
- Выберите переключатель **Относительный путь для ссылки**.
- Нажмите кнопку **ОК**.

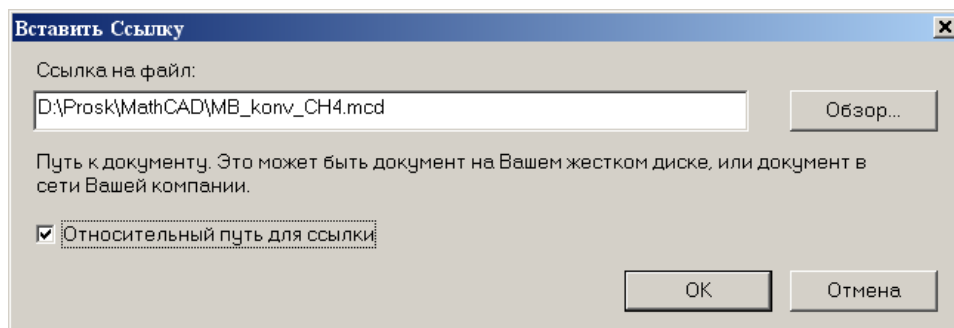


Рисунок 2.1 – Диалоговое окно «Вставить ссылку»

В создаваемом документе появится ссылка на файл (рисунок 2.2).

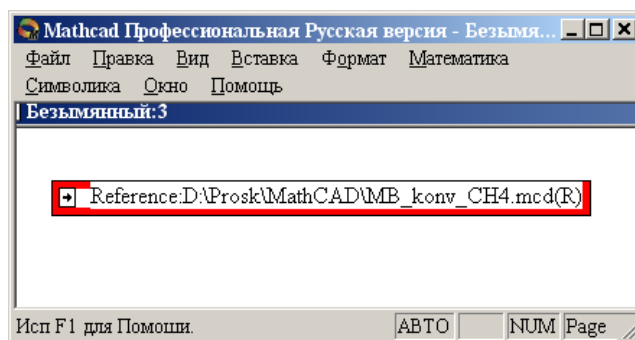


Рисунок 2.2 – Документ MathCAD со ссылкой на файл

После этого можно использовать все данные и функции пользователя, содержащиеся в присоединенном файле. При двойном щелчке мыши на ссылке открывается присоединенный файл.

Ввод данных из файлов Excel

Для расчета теплоты потоков, поступающих в реактор и покидающих его, теплового эффекта протекающих в аппарате реакций требуются данные по теплоемкости, энтальпии отдельных компонентов, которые могут содержаться в других файлах, например, таблицах Excel. Для использования этих данных в документе MathCAD необходимо выполнить следующие действия:

- Выберите в меню **Вставка** команду **Компонент**;
- В появившемся диалоговом окне **Component Wizard** в списке выберите Excel и нажмите кнопку **Next >**. Появится диалоговое окно **Excel setup Wizard** (рисунок 2.3).

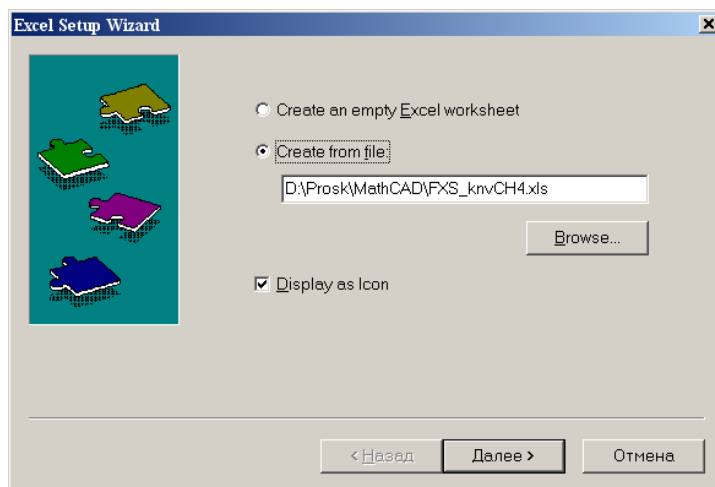


Рисунок 2.3 – Диалоговое окно *Excel setup Wizard*

- В окне **Excel setup Wizard** установите флажок на пункте **Create from file**, нажмите кнопку **Обзор (Browse...)**, найдите файл **FXS_knvCH4.xls** и откройте его.
- Установите переключатель **Display as icon**.
- Нажмите кнопку **Далее >**.
- В появившемся новом диалоговом окне **Excel setup Wizard** (рисунок 2.4) в окне **Output** укажите для каждой переменной диапазон ячеек электронной таблицы Excel, из которых будут выводиться данные.

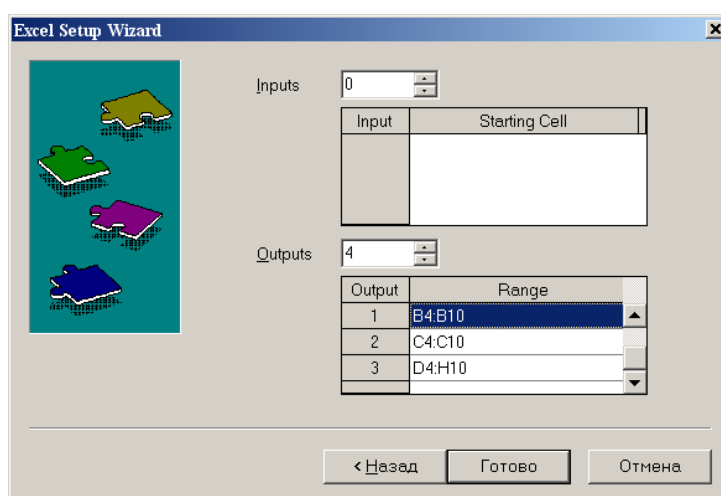


Рисунок 2.4 – Новое диалоговое окно «Excel setup Wizard»

- Нажмите кнопку **Готово**.
- В документе MathCAD появится значок электронной таблицы Excel и *местозаполнители*, обозначаемом черным прямоугольником, в которые необходимо ввести имена переменных.

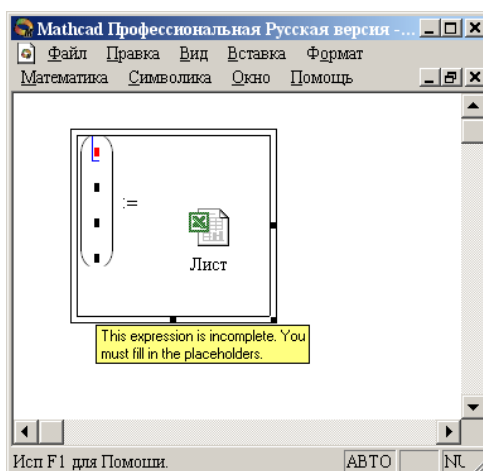


Рисунок 2.5 – Документ MathCAD

При двойном щелчке мыши на значке открывается файл Excel. При щелчке на значке правой кнопкой мыши появляется контекстное меню, использование команд которого позволяет добавлять и удалять переменные, изменять выбранный диапазон ячеек таблицы Excel. Например, при выборе в контекстном меню команды **Properties...** открывается диалоговое окно **Excel Component Properties** (рисунок 2.6), позволяющее производить изменения выбранных ячеек таблицы.

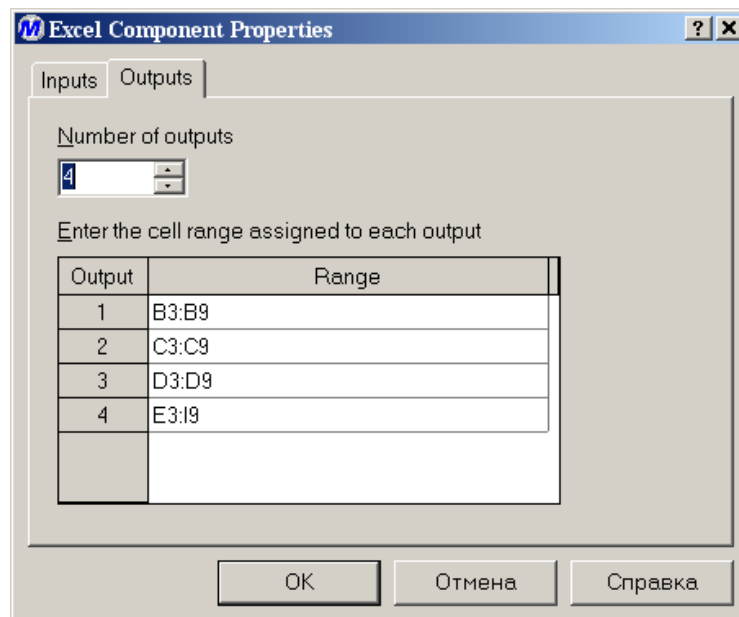


Рисунок 2.6 – Диалоговое окно *Excel Component Properties*

2.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе должен содержать название работы, цель работы, исходные данные, расчет и выводы. Представляется отчет в виде документа MathCAD.

Ниже приведен пример отчета по лабораторной работе.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

ОТЧЕТ

по лабораторной работе

на тему: "РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА"

Цель: Расчет теплового баланса с использованием программы MathCAD.

Выполнил: студент группы ХТН-051 Петров А.Л.

Задание 1 Составить тепловой баланс реакционной печи, в которой протекает процесс паровой конверсии метана.

Исходные данные: Для расчета использовать материальный баланс процесса, рассчитанный в предыдущей лабораторной работе.

Температуру на входе в реакционную печь принять равной $t_{вх} = 480$.

Расчет:

☞ Reference:F:\готовые МУ\Лаб 9 10\MB konv CH4.mcd(R)

| | |
|------|----|
| Name | := |
| M | |
| Hf | |
| Kf | |

Для использования данных материального баланса, которые содержатся в файле MB_konv_CH4.mcd устанавливаем связь с этим файлом. Устанавливаем также связь с файлом FXS_knvCH4.xls, содержащим необходимые для расчетов данные.

$t_{вх} := 480$ $t_{вых} := 550$
 ORIGIN := 1 $T_{вх} := t_{вх} + 273.15$ $T_{вых} := t_{вых} + 273.15$ $i := 1..nk$

$$\text{Name} = \begin{pmatrix} \text{"CH4"} \\ \text{"CO2"} \\ \text{"CO"} \\ \text{"N2"} \\ \text{"I2"} \\ \text{"Ar"} \\ \text{"I2I"} \end{pmatrix} \quad \text{M} = \begin{pmatrix} 16 \\ 44 \\ 28 \\ 28 \\ 2 \\ 39.9 \\ 18 \end{pmatrix} \quad \text{Hf} = \begin{pmatrix} -74.8 \\ -393.5 \\ -110.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -241.8 \end{pmatrix} \quad \text{Kf} = \begin{pmatrix} 0 & 105.8 & -38.6 & 4.9 & 0.66 \\ 23.6 & 59.9 & -39.4 & 10.2 & -0.1 \\ 28.1 & -3.3 & 16.1 & -7.8 & 0.07 \\ 31 & -12.4 & 24.7 & -10.5 & 0 \\ 32.8 & -10.4 & 10.1 & -2.2 & -0.15 \\ 31 & -12.4 & 24.7 & -10.5 & 0 \\ 30.2 & 6.7 & 6.5 & -2.3 & 0.08 \end{pmatrix}$$

$$C_p(T, i) := Kf_{i,1} + Kf_{i,2} \cdot \frac{T}{1000} + Kf_{i,3} \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^2 + Kf_{i,4} \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^3 + Kf_{i,5} \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^{-2}$$

Рассчитываем теплоты потоков

$$Q_c := \sum_{i=1}^{nk} \frac{V_{c_i}}{22.4} \cdot C_p(T_{вх}, i) \cdot t_{вх} \quad Q_c = 4.39 \times 10^7 \text{ кДж/ч}$$

$$Q_p := \sum_{i=1}^{nk} \frac{V_{p_i}}{22.4} \cdot C_p(T_{вых}, i) \cdot t_{вых} \quad Q_p = 5.353 \times 10^7 \text{ кДж/ч}$$

Рассчитываем теплоту химических реакций при $T := \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2}$

$$\Delta H_{r298} := \sum_{i=1}^{nk} \frac{V_{p_i}}{22.4} \cdot H_{f_i} \cdot 1000 - \sum_{i=1}^{nk} \frac{V_{c_i}}{22.4} \cdot H_{f_i} \cdot 1000 \quad \Delta H_{r298} = 2.748 \times 10^7 \text{ кДж/ч}$$

$$j := 1..5 \quad \Delta K_{f_j} := \sum_{i=1}^{nk} \frac{V_{p_i}}{22.4} \cdot K_{f_{i,j}} - \sum_{i=1}^{nk} \frac{V_{c_i}}{22.4} \cdot K_{f_{i,j}}$$

$$\Delta C_p(T) := \Delta K_{f_1} + \Delta K_{f_2} \cdot \frac{T}{1000} + \Delta K_{f_3} \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^2 + \Delta K_{f_4} \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^3 + \Delta K_{f_5} \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^{-2}$$

$$\Delta H_r(T) := \Delta H_{r298} + \int_{298}^T \Delta C_p(T) dt \quad \Delta H_r(T) = 2.901 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad Q_r(T) := \Delta H_r(T)$$

Рассчитываем потери теплоты $Q_{\text{пот}} := 0.05 \cdot Q_c \quad Q_{\text{пот}} = 2.195 \times 10^6 \text{ кДж/ч}$

Рассчитываем количество теплоты, которое необходимо подвести в реактор

$$Q_t := (Q_p - Q_c) + Q_r(T) + Q_{\text{пот}} \quad Q_t = 4.084 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad \text{или} \quad \frac{Q_t}{3600} = 11345 \text{ кВт}$$

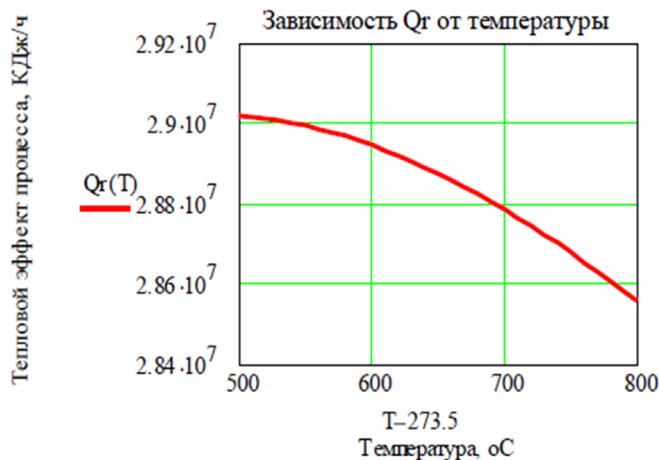
Рассчитанные данные сводим в таблицу

| Тепловой баланс процесса паровой конверсии | | | |
|--|----------|---------------------|----------|
| Приход | | Расход | |
| Статья | кДж/ч | Статья | кДж/ч |
| Входной поток | 43896427 | Выходной поток | 53531780 |
| Подвод теплоты | 40840597 | Теплота хим.реакций | 29010423 |
| | | Потери | 2194821 |
| Итого: | 84737024 | Итого: | 84737024 |
| | | | |
| | | | |

($Q_c \quad Q_t \quad Q_p \quad Q_r(T) \quad Q_{\text{пот}}$)

Задание 2 Построить график зависимости теплоты химической реакции от температуры.

$$T := 500 + 273.15, 510 + 273.15.. 800 + 273.15$$



2.6 ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

- 1 Дайте определение закона сохранения энергии применительно к тепловому балансу химического процесса.
- 2 Приведите уравнение теплового баланса.
- 3 Как подсчитывают теплоту потока?
- 4 Приведите уравнение расчета средней теплоемкости потока.
- 5 Каким образом рассчитывают тепловой эффект реакции при заданной температуре?
- 6 Как осуществляют использование в документе MathCAD данных, содержащихся в других документах?
- 7 Приведите порядок действий для использования данных, содержащихся в электронной таблице Excel.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондауров, Б. П. Общая химическая технология: учеб. пособие / Б. П. Кондауров, В. И. Александров, А. В. Артемов. – М.: Академия, 2011. – 336 с.
2. Общая химическая технология: Учебник для технических вузов / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.С. Беренгартен и др. – М.: ИКЦ «АКАДЕМКНИГА», 2003. – 528 с.
3. Расчеты химико-технологических процессов: Учебное пособие для вузов / А.Ф. Туболкин, А.С. Тумаркина, Э.Я. Тарат и др.; под ред. И.П. Мухленова. – Л.: Химия, 1982. – 248 с.
4. Справочник азотчика: Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака. – М.: Химия, 1986.– 512с.
5. Справочник нефтехимика. В двух томах. Т.1. /Под ред. С.К. Огородникова. – Л.: Химия, 1978. – 496 с.

РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНОГО И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям

по дисциплине «Химические реакторы» для студентов направления
18.03.01 – Химическая технология

Составитель доцент А.Л. Проскурнин

Отв. ред. доцент А.И. Свидченко

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическому занятию 3

по дисциплине «Химические реакторы» для студентов направления

18.03.01 – Химическая технология

Невинномысск 2020

Методические указания составлены в соответствии с утвержденной программой по дисциплине по дисциплине «Химические реакторы» для студентов направления 18.03.01 – Химическая технология.

В указаниях дана классификация химических реакторов, основные показатели работы реакторов и показатели химико-технологического процесса, протекающего в реакторе. Приведены примеры решения задач и вопросы для контроля знаний.

Методические указания могут быть использованы студентами при изучении других дисциплин технологического профиля.

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры ХТМиАХП и рекомендованы к внутривузовскому изданию.

Составил: доцент А.Л. Проскурнин

Отв. редактор: доцент А.Л. Свидченко

Содержание

| | |
|---|----|
| Тема «РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ» | 4 |
| 1.1 Классификация химических реакторов | 4 |
| 1.2 Анализ процессов в химических реакторах | 5 |
| 1.3 Основные показатели работы реакторов | 5 |
| 1.4 Технологические показатели работы реакторов | 6 |
| 1.5 Технологические показатели химико-технологического процесса | 8 |
| 1.5.1 Степень превращения | 8 |
| 1.5.2 Селективность (избирательность) | 11 |
| 1.5.3 Выход продукта | 13 |
| 1.5.4 Расходные коэффициенты | 16 |
| 1.6 Расчет основных размеров реактора | 17 |
| 1.7 Примеры решения задач | 20 |
| 1.8 Задачи для самостоятельного решения | 24 |
| 1.9 Вопросы для контроля | 26 |
| Литература | 27 |

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3

Тема «РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ»

1.1 Классификация химических реакторов

Аппараты, в которых протекает химико-технологический процесс (ХТП), называются **химическими реакторами**.

В промышленности используют тысячи различных химических реакторов, характеризующихся конструктивными особенностями, режимами протекания процессов.

В каждом реакторе можно выделить реакционную зону (реакционный объем), в которой непосредственно осуществляется химический процесс и через которую проходят потоки реагентов.

Учитывая, что конструкция реакторов должна обеспечивать заданный гидродинамический и температурный режим потока, именно характерные свойства потока определяют многообразие реакторов и положены в основу классификации реакторов.

По **временному** фактору все реакторы разделяются на:

- а) непрерывнодействующие;
- б) периодические;
- в) полунепрерывные.

По **гидродинамическому** режиму реакторы непрерывного действия подразделяются на:

- а) реакторы вытеснения;
- б) реакторы смешения;
- в) реакторы промежуточного режима.

По **температурному** режиму реакторы разделяются на:

- а) адиабатические;
- б) изотермические;
- в) политермические.

Конструктивные особенности реакторов определяются также фазовым состоянием реагирующих компонентов и термодинамиче-

скими параметрами протекания ХТП, т.е. температурой и давлением.

1.2 Анализ процессов в химических реакторах

При проведении анализа протекания химико-технологического процесса в реакторе исследуют влияние условий процесса и характеристик (свойств) его составляющих на показатели работы реактора, а также выявляют особенности работы и режима.

Условия процесса – состав исходной реакционной смеси (начальные концентрации реагентов), величина поступающего потока (нагрузка на реактор), температура входного потока, температура хладагента (для процессов с теплоотводом) или в реакторе (для изотермического процесса).

Свойства составляющих процесса – характеристики химического процесса: схема превращения и тип реакций (вид кинетических уравнений), энергия активации, тепловой эффект; для неизотермических процессов – параметры теплоотвода (коэффициент теплоотдачи, поверхность теплообмена, теплофизические свойства реактантов).

Показатели работы реакторов – технологические: степень превращения, селективность, выход продукта, а также профили концентраций, степени превращения и температуры в реакторе, их изменение во времени. Зная эти показатели, можно далее определить и другие: конструктивные параметры реактора, энергетические затраты, экономические характеристики и пр.

Особенности процесса и режима – влияние условий и свойств процесса на его показатели, управление процессом (изменение условий и свойств для достижения желаемых показателей), критические режимы (например, их существование, неустойчивость).

Анализ протекания процесса в реакторе проводят, как правило, с использованием метода математического моделирования.

1.3 Основные показатели работы реакторов

Основные показатели работы реакторов условно разделяют на:

- а) технологические;
- б) конструктивные;
- в) энергетические;
- г) эксплуатационные;
- д) экономические.

К **конструктивным** характеристикам реактора относятся объем реакционной зоны или катализатора, диаметр и высота аппарата, наличие встроенных теплообменников, характер потока и др.

Энергетические показатели работы реакторов характеризуют затраты энергии на преодоление гидравлического сопротивления потоком реагирующих веществ и на их перемешивание, а также эффективность использования теплоты, подводимой в реактор для проведения эндотермических процессов или выделяющейся при протекании экзотермических процессов.

К **эксплуатационным характеристикам** относят легкость управления и обеспечения устойчивого режима и безопасности работы реактора. Эти характеристики зависят от конструктивного совершенства реактора, которое определяет также его ремонтоспособность.

Экономические характеристики реактора определяют стоимость его изготовления и монтажа, а также затраты на проведение ремонтных работ.

1.4 Технологические показатели работы реакторов

К технологическим характеристикам работы реакторов можно отнести:

- а) производительность реактора;
- б) интенсивность реактора;
- в) показатели ХТП, протекающего в реакторе.

Производительностью Π называют количество выработанного продукта G или переработанного сырья за единицу времени τ (кг/ч, т/ч, т/сут)

$$П = \frac{G}{\tau}. \quad (1)$$

В ряде производств количество выработанного продукта измеряют его объемом $V_{П}$, тогда размеренность $П$ будет м³/ч или м³/сут

$$П = \frac{V_{П}}{\tau}. \quad (2)$$

Увеличение размеров и повышение производительности работы аппаратов приводит, как правило, к экономии металла в расчете на единицу реакционного объема, снижению эксплуатационных расходов, расходных коэффициентов по сырью, повышению производительности труда.

Однако увеличение объема аппарата без значительного усложнения его конструкции возможно лишь до некоторого предела и уже достигнутого в ряде крупномасштабных систем. Поэтому много эффективнее повышение производительности аппаратов за счет интенсификации их работы.

Интенсивностью работы аппарата I называется производительность, отнесенная к какой-либо величине, характеризующей размеры аппарата, – его объему (V), площади поперечного сечения (S) и т.д.

$$I = \frac{П}{V} = \frac{G_{П}}{\tau \cdot V} \quad \text{или} \quad I = \frac{П}{S} = \frac{G_{П}}{\tau \cdot S}. \quad (3)$$

Интенсивность измеряется в кг/(ч·м³), т/(сут·м³), кг/(ч·м²) и т.д.

Интенсификация работы реакторов достигается двумя путями:

- 1) улучшением конструкции аппарата;
- 2) совершенствованием технологического процесса в аппаратах данного вида.

Интенсивность работы реактора пропорциональна скорости процесса, поэтому, изучая кинетику технологического процесса, стремятся создать такую конструкцию реактора и технологический режим в нем, которые обеспечили бы максимальную скорость процесса.

Основными технологическими путями интенсификации работы

реакционных аппаратов являются изменения температуры, давления и концентраций реагирующих веществ в сочетании с применением катализаторов и улучшением массообмена.

1.5 Технологические показатели химико-технологического процесса

Для оценки эффективности отдельных этапов химического процесса используются такие критерии эффективности, как степень превращения исходного реагента, селективность, выход продукта, которые отражают физико-химическую сущность процесса, протекающего в реакторе.

1.5.1 Степень превращения

Степень превращения (глубина превращения, степень конверсии) показывает полноту использования сырья по всем направлениям.

Степень превращения – это доля исходного реагента, использованного на химический процесс. Она определяется как отношение количества (массы, объема) одного из реагентов, вступившего в реакцию, к начальному количеству (массе, объему) этого реагента.

Например, для реакции



степень превращения реагента A определяется по уравнению

$$x_A = \frac{n_A^0 - n_A}{n_A^0} = \frac{|\Delta n_A|}{n_A^0}, \quad (5)$$

где n_A^0 – количество реагента A в исходной реакционной смеси, кмоль; n_A – количество реагента A в реакционной смеси, выходящей из аппарата, кмоль; Δn_A – изменение количества реагента A в ходе химической реакции.

Степень превращения выражается в долях единицы или в процентах.

Можно рассчитывать степень превращения, используя массу

или объем реагирующих веществ.

$$x_A = \frac{n_A^0 - n_A}{n_A^0} = \frac{G_A^0 - G_A}{G_A^0} = \frac{V_A^0 - V_A}{V_A^0}, \quad (6)$$

где G_A^0 , V_A^0 – соответственно масса и объем реагента A в исходной реакционной смеси; G_A , V_A – соответственно масса и объем реагента A в реакционной смеси, выходящей из реактора.

Если реакция протекает без изменения объема реакционной смеси, то степень превращения может быть определена через концентрации реагентов

$$x_A = \frac{C_A^0 - C_A}{C_A^0}, \quad (7)$$

где C_A^0 , C_A – концентрация реагента A в исходной реакционной смеси и реакционной смеси, выходящей из реактора соответственно.

Когда в реакции участвуют два или более реагента, то рассчитывают степень превращения каждого реагента отдельно.

Если протекает реакция (4), то в соответствии с ее стехиометрическим уравнением изменения количества ее участников Δn_i связаны между собой следующими соотношениями

$$\frac{|\Delta n_A|}{a} = \frac{|\Delta n_E|}{e} = \frac{|\Delta n_B|}{b} = \frac{|\Delta n_D|}{d}. \quad (8)$$

Степени превращения реагентов A и E , участвующих в реакции (4)

$$x_A = \frac{n_A^0 - n_A}{n_A^0} = \frac{|\Delta n_A|}{n_A^0}, \quad x_E = \frac{n_E^0 - n_E}{n_E^0} = \frac{|\Delta n_E|}{n_E^0}. \quad (9)$$

Из уравнений (8) и (9) следует

$$x_E = \frac{|\Delta n_E|}{n_E^0} = \frac{e \cdot |\Delta n_E|}{a \cdot n_E^0} = \frac{e}{a} \cdot \frac{n_A^0 \cdot x_A}{n_E^0} = \frac{\frac{n_A^0}{n_E^0}}{\frac{e}{a}} \cdot x_A. \quad (10)$$

Уравнение (10) устанавливает связь между степенями превра-

щения реагентов A и E и позволяет рассчитывать неизвестную степень превращения исходного реагента, зная степень превращения другого.

$$\text{Если} \quad \frac{n_A^0}{n_E^0} = \frac{e}{a}, \quad (11)$$

т.е. реагенты A и E взяты для проведения реакции в стехиометрическом соотношении, то $x_A = x_E$.

$$\text{Если} \quad \frac{n_A^0}{n_E^0} > \frac{e}{a}, \quad (12)$$

то реагент A взят в избытке и $x_A < x_E$.

$$\text{Если} \quad \frac{n_A^0}{n_E^0} < \frac{e}{a}, \quad (13)$$

то реагент E взят в избытке и $x_A > x_E$.

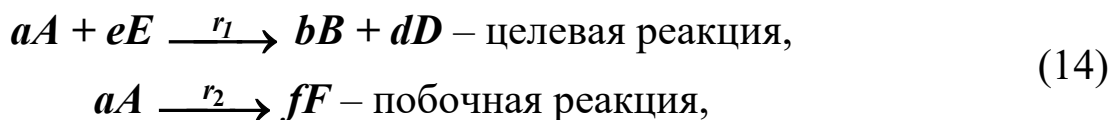
Обычно при выборе первоначального состава реакционной смеси берут в избытке более дешевый реагент (например, вода, воздух и т.д.) с целью повышения степени превращения более ценного сырья.

$$x_A^* = \frac{n_A^0 - n_A^*}{n_A^0} = \frac{G_A^0 - G_A^*}{G_A^0} = \frac{V_A^0 - V_A^*}{V_A^0}.$$

1.5.2 Селективность (избирательность)

Интегральная, или полная, селективность S – это отношение количества исходного реагента, расходуемого на целевую реакцию, к общему количеству исходного реагента, пошедшего на все реакции.

Например, для параллельных реакций

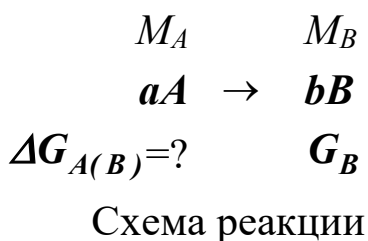


целевым продуктом которых является вещество B , интегральная селективность выражается уравнением

$$S_{B(A)} = \frac{\Delta G_{A(B)}}{G_A^0 - G_A} = \frac{\Delta n_{A(B)}}{n_A^0 - n_A}, \quad (15)$$

где $S_{B(A)}$ – селективность образования продукта B по реагенту A ; $\Delta G_{A(B)}$ – масса реагента A , пошедшая на образование продукта B , кг/ч; $\Delta n_{A(B)}$ – количество реагента A , пошедшее на образование B , кмоль/ч.

Значения $\Delta G_{A(B)}$ и $\Delta n_{A(B)}$ рассчитывают по стехиометрическому уравнению реакции, исходя из количества образующегося продукта B (n_B, G_B).



$$\Delta n_{A(B)} = \frac{a}{b} \cdot n_B, \quad \Delta G_{A(B)} = G_B \cdot \frac{a \cdot M_A}{b \cdot M_B}. \quad (16)$$

Тогда полная селективность равна

$$S_{B(A)} = \frac{\frac{a}{b} \cdot n_B}{n_A^0 - n_A} = \frac{\frac{a \cdot M_A}{b \cdot M_B} \cdot G_B}{G_A^0 - G_A}. \quad (17)$$

Аналогично можно рассчитать общую селективность (избирательность) превращения сырья в другие продукты.

Сумма селективностей превращения исходного реагента по всем направлениям равна единице (или 100%).

$$\sum S_{i(A)} = 1.$$

В отдельных случаях, когда сырье представляет сложную смесь (например, газойль в процессе каталитического крекинга), общую селективность (избирательность) рассчитывают как отношение количества целевого продукта к сумме всех получаемых продуктов.

Так, для параллельной реакции (14) селективность образования продукта B можно рассчитать как отношение количества образующе-

гося продукта B (G_B) к сумме образующихся продуктов ($G_B + G_D + G_F$)

$$S_{B(A)} = \frac{G_B}{G_B + G_D + G_F} \cdot 100, \% \text{ (масс.)}. \quad (18)$$

Дифференциальной (мгновенной) селективностью φ называют отношение скоростей превращения исходных реагентов в целевой продукт к суммарной скорости расходования исходных реагентов.

Применительно к параллельной реакции (14) мгновенная селективность равна

$$\varphi_{B(A)} = \frac{r_1}{r_1 + r_2},$$

где r_1 – скорость образования целевого продукта B ; r_2 – скорость образования побочного продукта F .

1.5.3 Выход продукта

Степень превращения характеризует эффективность проведения процесса с точки зрения использования исходного сырья, но этой величины не всегда достаточно для характеристики процесса с точки зрения получения продукта реакции. Поэтому вводят еще один критерий эффективности – выход продукта.

Выход – это далеко не однозначное понятие. Иногда под выходом понимают абсолютное количество полученного продукта (в кг, кмоль), но чаще его выражают в долях единицы или в процентах на взятое сырье. Кроме того, выход применяют для характеристики систем разного масштаба – только реакционного аппарата (химический выход) какого-либо узла производства или технологической схемы в целом, когда учитывают не только расход сырья на химические реакции, но и различные потери (технологический выход). В химической технологии чаще применяют понятие химического выхода).

Химический выход продукта Φ – это отношение реально полученного количества продукта к максимально возможному его количе-

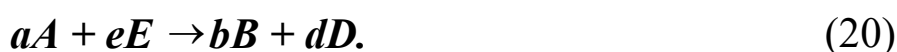
ству, которое могло бы быть получено при данных условиях осуществления химической реакции.

Обозначим выход продукта B через Φ_B . Тогда

$$\Phi_B = \frac{n_B}{n_{B,m}} \quad \text{и} \quad \Phi_B = \frac{G_B}{G_{B,m}}. \quad (19)$$

Максимально возможное (*теоретическое*) количество продукта, которое может быть получено, определяется по уравнению химической реакции. Рассмотрим несколько различных реакций.

Необратимая химическая реакция



Максимально возможное количество продукта B в такой реакции будет получено, если весь реагент A (n_A^0, G_A^0) вступит в реакцию.

Тогда
$$n_{B,m} = n_A^0 \cdot \frac{b}{a}; \quad G_{B,m} = G_A^0 \cdot \frac{b \cdot M_B}{a \cdot M_A}. \quad (21)$$

В этом случае

$$\Phi_B = \frac{n_B}{n_A \cdot \frac{b}{a}} \quad \text{или} \quad \Phi_B = \frac{G_B}{G_A \cdot \frac{b \cdot M_B}{a \cdot M_A}}. \quad (22)$$

Количество образующегося продукта B можно определить используя степень превращения

$$n_B = |A_A| \cdot \frac{b}{a} = n_A^0 \cdot x_A \cdot \frac{b}{a}. \quad (23)$$

$$\text{Тогда } \Phi_B = \frac{n_A^0 \cdot x_A \cdot \frac{b}{a}}{n_A^0 \cdot \frac{b}{a}} = x_A. \quad (24)$$

Обратимая химическая реакция (4).

Для такой реакции максимально возможное количество продукта B определяются как равновесное количество этого продукта при данных условиях осуществления реакции.

$$n_B^* = n_A^0 \cdot x_A^* \cdot \frac{b}{a} \quad (25)$$

Тогда

$$\Phi_B = \frac{n_B}{n_B^*} = \frac{n_A^0 \cdot x_A \cdot \frac{b}{a}}{n_A^0 \cdot x_A^* \cdot \frac{b}{a}} = \frac{x_A}{x_A^*} \quad (26)$$

Таким образом, для обратимых реакций выход продукта равен доле, которую составляет реально достигнутая степень превращения от равновесной для данных условий протекания реакций.

Параллельные и последовательные реакции.

Рассмотрим две параллельно протекающие реакции (14), в которых наряду с целевым продуктом получают продукты побочной реакции.

Максимально возможное количество продукта **B** будет получено в том случае, если весь исходный реагент **A** при соблюдении условия (13) будет реагировать только по целевой реакции. Тогда

$$\Phi_B = \frac{n_B}{n_A^0 \cdot \frac{b}{a}} \quad \text{и} \quad \Phi_B = \frac{G_B}{G_A^0 \cdot \frac{b \cdot M_B}{a \cdot M_A}} \quad (27)$$

Также будет выглядеть и выражение для выхода целевого продукта для последовательных и параллельно-последовательных реакций.

Установим связь между Φ_B , x_A и $S_{B(A)}$. Реально полученное количество продукта **B** можно выразить через селективность, пользуясь уравнением (17)

$$n_B = S_{B(A)} (n_A^0 - n_A) \cdot \frac{b}{a} = S_{B(A)} \cdot n_A^0 \cdot x_A \cdot \frac{b}{a} \quad (28)$$

После подстановки в уравнение (27), получим

$$\Phi_B = \frac{S_{B(A)} \cdot n_A^0 \cdot x_A \cdot \frac{b}{a}}{n_A^0 \cdot \frac{b}{a}} = S_{B(A)} \cdot x_A \quad (29)$$

При протекание обратимых параллельных и последовательных

реакций максимально возможным количеством целевого продукта будет то количество B , которое было бы получено, если бы реагент A расходовался только на целевую реакцию и в момент равновесия продуктов побочных реакций не было бы. Таким образом, для обратимых реакций

$$\Phi_B = \frac{n_B}{(n_A^0 - n_A^*) \cdot \frac{b}{a}} = \frac{n_B}{n_A^0 \cdot x_A^* \cdot \frac{b}{a}}. \quad (30)$$

Подставив значение n_B (28), получим:

$$\Phi_B = \frac{S_{B(A)} \cdot n_A^0 \cdot x_A \cdot \frac{b}{a}}{n_A^0 \cdot x_A^* \cdot \frac{b}{a}} = S_{B(A)} \cdot \frac{x_A}{x_A^*}. \quad (31)$$

Из уравнений (29) и (31) следует, что при выборе условий проведения сложных химических реакций недостаточно обеспечить только высокое значение степени превращения или только высокую селективность; высокое значение выхода целевого продукта определяется некоторой совокупностью этих критериев эффективности.

Оптимальными значениями выхода, селективности и степени превращения будут, как правило, такие, достижение которых позволяет обеспечить максимальную экономическую эффективность процесса.

1.5.4 Расходные коэффициенты

Расходные коэффициенты характеризуют затраты сырья, реагентов или энергии на производство целевого продукта.

Расходный коэффициент по сырью – это отношение количества сырья, затраченного при проведении химико-технологического процесса, к количеству полученного целевого продукта.

Различают теоретические и практические расходные коэффициенты.

Теоретический расходный коэффициент ($\beta_{теор}$) рассчитывают по стехиометрическому уравнению основной реакции с учетом содержания исходного реагента в сырье.

Например, для реакции



теоретический (стехиометрический) расходный коэффициент равен

$$\beta_{теор} = \frac{a \cdot M_A}{b \cdot M_B} \cdot \alpha_A, \quad (32)$$

где α_A – массовая доля компонента A в сырье.

При расчете практических расходных коэффициентов ($\beta_{пр}$) пользуются данными материального баланса:

$$\text{– для открытых систем } \beta_{пр} = \frac{G_A^0}{G_B \cdot \alpha_A}; \quad (33)$$

$$\text{– для циркуляционных систем } \beta_{пр} = \frac{G_A^0 - G_A}{G_B \cdot \alpha_A}. \quad (34)$$

Практические расходные коэффициенты можно рассчитывать также на основе теоретического коэффициента, учитывая степень превращения исходного реагента x_A , избирательность ($S_{B(A)}$) или выход продукта Φ_B :

$$\text{– для открытых систем } \beta_{пр} = \frac{\beta_{теор}}{x_A \cdot S_{B(A)} \cdot \Phi_B}; \quad (35)$$

$$\text{– для циркуляционных систем } \beta_{пр} = \frac{\beta_{теор}}{S_{B(A)}}. \quad (36)$$

Так как x_A и $S_{B(A)}$ меньше единицы, практический расходный коэффициент всегда меньше теоретического.

Задача технологов – уменьшить отношение $\beta_{пр}/\beta_{теор}$ без увеличения себестоимости продукта. Это достигается путем повышения степени превращения, избирательности и, как следствие, увеличение выхода целевого продукта.

Для процессов, протекающих в несколько стадий расходный коэффициент рассчитывают, учитывая выход продуктов на каждой стадии

$$\beta_n = \bar{p} \frac{\beta_m \text{ e o f.}}{(\Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \dots \cdot \Phi_n)} \quad (37)$$

1.6 Расчет основных размеров реактора

Объем реакционной зоны аппарата непрерывного действия находят по формуле

$$V_p = \nu_0 \cdot \tau_0, \quad (38)$$

где V_p – объем реакционной зоны, м³; ν_0 – объемный расход реагентов, м³/с; τ_0 – время пребывания реагентов в аппарате, с.

Время пребывания реагентов в аппарате определяют из кинетических или экспериментальных данных.

Площадь сечения аппарата рассчитывают на основе объемного расхода реагентов при условиях в реакторе (T, P) и допустимой линейной скорости потока ($\omega_{\text{лин}}^{\text{дон}}$)

$$S = \frac{\nu_c}{\omega_{\text{лин}}^{\text{дон}}} \quad (39)$$

где $\nu_c = \nu_0 \cdot \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0}$ – секундный расход реагентов при температуре T и давлении P .

Если реакция протекает с изменением объема продуктов реакции, изменяются температура и давление по высоте реактора, то площадь сечения аппарата рассчитывают при средних значениях ν_c , T и P .

Диаметр аппарата цилиндрической формы (в м)

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \quad (40)$$

Высота (длина) реакционной зоны аппарата (в м)

$$H = \frac{v_p}{S}. \quad (41)$$

Для аппаратов, загруженных катализатором, объем рабочей зоны равен объему катализатора (v_k , м³), который определяют по объемной скорости газа (жидкости) или производительности катализатора, или на основе кинетических расчетов.

Объемная скорость – объем газовой смеси (или жидкости), проходящей через единицу насыпного объема катализатора в единицу времени

$$\omega_{об} = \frac{v_0}{v_k}, \text{ откуда } v_k = \frac{v_0}{\omega_{об}}. \quad (42)$$

Производительность катализатора – масса (объем) целевого продукта, получаемого с единицы объема (массы) катализатора в единицу времени

$$n_k = \frac{n_{npo}}{v_k}, \text{ откуда } v_k = n_{npo} / n_k. \quad (43)$$

Реакционный объем аппарата периодического действия равен

$$v_p = \frac{v_{сут} \tau}{2 \cdot 4 \varphi_{зап}}, \quad (44)$$

где $v_{сут}$ – суточный объем перерабатываемых веществ, м³;

τ – общее время технологического цикла, ч;

$\varphi_{зап}$ – степень заполнения аппарата (принимают от 0,4 до 0,9).

Диаметр штуцеров ввода и вывода реагентов определяется по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot v_p}{\pi \cdot \omega_{дон}}}, \quad (45)$$

где v_p – объем потока при реальных условиях, м³/с;

$\omega_{дон}$ – допустимая линейная скорость потока, м/с.

Рекомендуемые значения скорости газов и жидкостей в трубо-

проводах приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Рекомендуемые скорости газов и жидкостей в трубопроводах

| Среда | $\omega_{доп}$, м/с | Среда | $\omega_{доп}$, м/с |
|---|----------------------|--|----------------------|
| Газы: при стесненной тяге, при небольшом давлении, при большом давлении. | 2–4 4–15 15–25 | Водяной пар: насыщенный: $p = 20 - 50$ кПа $p > 50$ кПа | 40–60 15–40 |
| Жидкости: при движении самотеком, в напорных трубопроводах. | 0,1–0,3 0,5–2,5 | перегретый | 30–50 |

1.7 Примеры решения задач

Пример 1. В процессе пиролиза метана для получения ацетилена по реакции



в печь пиролиза подано 2000 м³ метана. Газ пиролиза содержит 570 кг метана и 533 кг ацетилена. Определить степень превращения метана, селективность и выход ацетилена. Процесс проводят при 1600 К, давлении 0,1 МПа.

Равновесная степень превращения – 84%.

Решение. Масса исходного метана

$$G_{\text{C}_4}^0 = \frac{V_{\text{C}_4}^0}{Z_{\text{C}_4}} \cdot M_{\text{C}_4} = \frac{2}{2,4} \cdot \frac{16}{2} = 16 \text{ кг}.$$

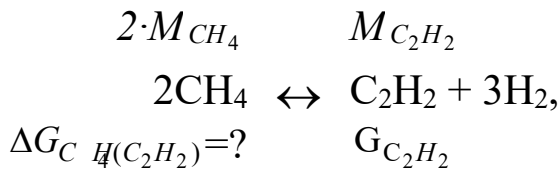
Прореагировало метана

$$G_{\text{C}_4}^0 - G_{\text{C}_4} = G_{\text{H}_2} - 3G_{\text{C}_2\text{H}_2} = 82 \text{ кг}.$$

Степень превращения метана

$$x_{C_4} = \frac{G_{C_4}^0 - G_{H_4}}{G_{C_4}^0 - G_{H_4}} = \frac{8}{1} = 0,6 \quad \text{и} \quad \frac{9}{2} = 0,6, 1\%.$$

Количество метана, расходуемого на получение ацетилена:



$$\Delta G_{C_4(C_2H_2)} = G_{C_2H_2} \cdot \frac{2 \cdot M_{C_4}}{M_{C_2H_2}} = 5 \cdot \frac{2 \cdot 13}{2} = 6,6 \text{ кДж}.$$

Селективность образования ацетилена из метана

$$S_{C_2H_2(C_4)} = \frac{\Delta G_{C_4(C_2H_2)}}{G_{C_4}^0 - G_{H_4}} = \frac{6}{8} = 0,75 \quad \text{и} \quad \frac{6}{9} = 0,67, 4\%.$$

Выход ацетилена можно определить двумя способами:

1 способ. Определим по уравнению реакции максимальное (равновесное) количество ацетилена, которое могло бы быть получено из метана, поданного в реактор $G_{CH_4}^0$.

$$G_{C_2H_2, m} = G_{C_4}^0 \cdot x_{C_4}^* \cdot \frac{M_{C_2H_2}}{2 \cdot M_{C_4}} = 1 \cdot 0,8 \cdot \frac{2}{2 \cdot 1} = 0,8 \text{ кДж}.$$

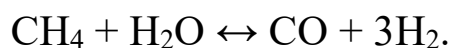
Выход ацетилена равен

$$\Phi_{C_2H_2} = \frac{G_{C_2H_2}}{G_{C_2H_2, m}} = \frac{5}{9} = 0,55 \quad \text{и} \quad \frac{3}{5} = 0,6, 7\%.$$

2 способ. Используя связь между выходом продукта и степенью превращения, селективностью и равновесной степенью превращения определяем

$$\Phi_{C_2H_2} = S_{C_2H_2(C_4)} \cdot \frac{x_{C_4}}{x_{C_4}^*} = 0,75 \cdot \frac{0,6}{0,8} = 0,56 = 0,56, 7\%.$$

Пример 2. Определить изменение состава парогазовой смеси при конверсии метана водяным паром, протекающей по реакции:



Температура в зоне катализа 840°C; степень конверсии метана 0,84, общее давление 2,0 МПа.

Таблица 1.2 – Состав исходной смеси и количество компонентов

| | CH ₄ | H ₂ | N ₂ | CO | CO ₂ | H ₂ O | Σ |
|---|-----------------|----------------|----------------|------|-----------------|------------------|--------|
| <i>V</i> ₀ , м ³ /ч | 97945 | 6709 | 948 | 152 | 606 | 272686 | 379046 |
| <i>C</i> _{<i>i</i>} , % | 25,84 | 1,77 | 0,25 | 0,04 | 0,16 | 71,94 | 100,00 |

Решение. При степени конверсии 0,84 прореагирует метана $97945 \cdot 0,84 = 82274$ м³/ч.

Остается непрореагировавшего метана:

$$97945 - 82274 = 15671 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расход водяного пара: 82274 м³/ч.

Остается непрореагировавшего водяного пара:

$$272686 - 82274 = 190412 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Образуется оксида углерода: 82274 м³/ч.

Общее количество оксида углерода в парогазовой смеси:

$$152 + 82274 = 82426 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Общее количество водорода в парогазовой смеси:

$$6709 + 246822 = 253531 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

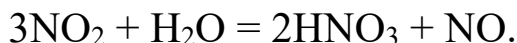
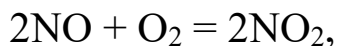
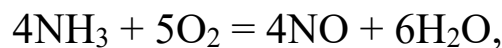
Таблица 1.3 – Состав и количество продуктов конверсии

| | CH ₄ | H ₂ | N ₂ | CO | CO ₂ | H ₂ O | Σ |
|---|-----------------|----------------|----------------|-------|-----------------|------------------|--------|
| <i>V</i> ₀ , м ³ /ч | 15671 | 253531 | 948 | 82426 | 606 | 190412 | 543594 |
| <i>C</i> _{<i>i</i>} , % | 2,88 | 46,64 | 0,18 | 15,16 | 0,11 | 35,03 | 100,00 |

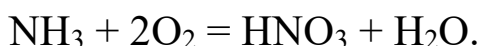
Пример 3. Определить количество аммиака, требуемое для производства 100000 т/год азотной кислоты и расход воздуха на окисление аммиака, если цех работает 355 дней в году, выход оксида азота 0,97, степень абсорбции 0,92, содержание аммиака в сухой аммиачно-воздушной смеси 7,13%

Решение. Окисление аммиака является первой стадией получения азотной кислоты из аммиака. По этому методу аммиак окисляет-

ся кислородом воздуха в присутствии платинового катализатора при 800–900°C до оксидов азота, после чего диоксид азота поглощается водой с образованием азотной кислоты. Схематично процесс можно изобразить уравнениями:



Для материальных расчетов можно в первом приближении записать суммарное уравнение этих стадий в виде:



Количество аммиака Π_{NH_3} для получения 100000 т HNO_3 с учетом степени окисления ($x_{ок}$) и степени абсорбции ($x_{аб}$)

$$\Pi_{\text{NH}_3} = \frac{\Pi_{\text{HNO}_3} \cdot M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{HNO}_3} \cdot x_{ок} \cdot x_{аб}}$$

$$\Pi_{\text{NH}_3} = \frac{100000 \cdot 17}{63 \cdot 0,93 \cdot 0,97} = 27000 \text{ т}.$$

Расход аммиака

$$G_{\text{NH}_3} = \frac{\Pi_{\text{NH}_3} \cdot 17}{25} = 18360 \text{ т}$$

или

$$V_{\text{NH}_3} = \frac{G_{\text{NH}_3}}{M_{\text{NH}_3}} \cdot 22,4 = \frac{18360}{17} \cdot 22,4 = 24200 \text{ м}^3.$$

Определим объемное содержание аммиака в сухой аммиачно-воздушной смеси.

$$C_{\text{NH}_3} = \frac{\omega_{\text{NH}_3}}{M_{\text{NH}_3} \cdot \omega_{\text{NH}_3} + M_{\text{O}_2} \cdot \omega_{\text{O}_2}} \cdot 100 = \frac{17 \cdot 7,1}{17 \cdot 7,1 + 32 \cdot 91,9} \cdot 100 = 15,0\%$$

где ω_i – содержание компонентов в смеси в % (масс.).

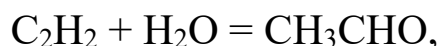
Расход воздуха на окисление

$$V_{\text{г}} = V_{\text{оN}_3} \cdot \left(\frac{1 - C_{\text{N}_3}^{\text{O}_3}}{C_{\text{N}_3}^{\text{H}_3}} \right) = 4^{\text{H}^0} \cdot \left(\frac{1 - 1,5}{1,5} \right) = 3^{\text{H}^0} \text{ м}^3 \text{ т}$$

Пример 4. Рассчитать расходный коэффициент природного газа, содержащего 97% (об.) метана, в производстве уксусной кислоты (на 1 т) из ацетальдегида. Выход ацетиленов из метана составляет 15% от теоретически возможного, ацетальдегида из ацетиленов – 60%, а уксусной кислоты из ацетальдегида 90% (масс.).

Молекулярная масса: C_2H_2 – 26; CH_3CHO – 44; CH_3COOH – 60; CH_4 – 16.

Решение. Уксусную кислоту получают из метана многостадийным методом согласно уравнениям



Теоретический расход метана на 1 т уксусной кислоты

$$\beta_m = 1 \cdot 2 \cdot \frac{M_{\text{C}_4\text{H}_4}}{M_{\text{C}_3\text{H}_3\text{O}}} \cdot \frac{\text{H}}{\text{O}} = 1 \cdot 2 \cdot \frac{1}{6} = 0,33 \text{ т}.$$

Практический расходный коэффициент метана

$$\beta_n = \frac{\beta_m}{\Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \Phi_3} = \frac{0,33}{0,1 \cdot 0,6 \cdot 0,9} = 6,5 \text{ т}$$

или $\frac{6,5 \cdot 16}{16} = 9 \text{ м}^3.$

Расход природного газа на 1 т уксусной кислоты

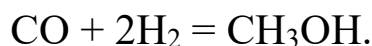
$$\beta_n = \frac{9}{0,97} = 9,2 \text{ м}^3.$$

1.8 Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитать расход колчедана, содержащего 40% S, на 1 т H_2SO_4 , если потери S и SO_2 составляют 3%, а степень абсорбции

SO₃ – 99%.

2. При термоокислительном крекинге метана (с целью получения ацетилена) смесь газов имеет состав [% (об.)]: C₂H₂ – 8,5; H₂ – 57,0; CO – 25,3; CO₂ – 3,7; C₂H₄ – 0,5; CH₄ – 4,0; Ar – 1,0. Определить количество метана, которое нужно подвергнуть крекингу, чтобы из отходов крекинга после отделения ацетилена получить 1 т метанола по реакции

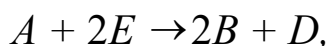


По практическим данным из 1 т исходного метана получается после выделения ацетилена 1160 кг смеси газов.

3. Рассчитать объем 65%-й серной кислоты (плотностью 1,56 г/л) с 5%-м избытком от теоретического количества, требуемый для разложения 100 кг апатитового концентрата (содержащего 38% P₂O₅) по реакции

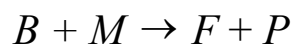
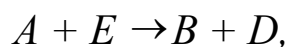


4. Определите состав смеси (N_A , N_E , N_B , N_D) и степень превращения вещества E (x_E) для реакции



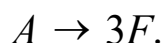
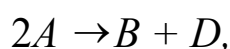
если $x_A = 0,6$, $N_A^0 = 1 \text{ к м}$, $N_E^0 = 1,5 \text{ к л м}$.

5. Рассчитайте выход продукта B , если известно, что при проведении последовательных реакций



получено 12 моль продукта B , 4 моль продукта F , а для проведения реакции взято по 20 моль реагентов A и E .

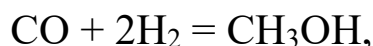
6. Протекают параллельные реакции



Определить выход продукта B , степень превращения x_A , полную селективность образования B ($S_{B(A)}$), если на выходе из реактора $N_A =$

2 кмоль/м^3 , $N_B = 3 \text{ кмоль/м}^3$, $N_F = 3,5 \text{ кмоль/м}^3$.

7. При термоокислительном пиролизе метана с целью получения ацетилена смесь газов имеет состав [% (об.)]: $\text{C}_2\text{H}_2 - 8,5$; $\text{H}_2 - 57,0$; $\text{CO} - 25,3$; $\text{CO}_2 - 3,7$; $\text{C}_2\text{H}_4 - 0,5$; $\text{CH}_4 - 4,0$; $\text{Ar} - 1,0$. Определить количество метана, которое нужно подвергнуть пиролизу, чтобы из отходящего газа, образующегося после отделения ацетилена, получить 1 т метанола по реакции



выход метанола по которой составляет 95%.

8. Определить количество и состав продуктов на выходе из контактного аппарата для каталитического окисления SO_2 в SO_3 . Производительность реактора $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ исходного газа следующего состава, % (об.): $\text{SO}_2 - 8,5$; $\text{O}_2 - 12,5$; $\text{N}_2 - 79$. Степень окисления SO_2 в SO_3 составляет 98%

9. Сколько потребуется сульфата железа $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и хромового ангидрида CrO_3 для получения 1 т железохромового катализатора конверсии оксида углерода, имеющего состав (%): $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 90$; $\text{CrO}_3 - 10$.

10. Определить расходный коэффициент технического карбида кальция в производстве ацетилена (на 1000 кг ацетилена). Содержание CaC_2 в техническом продукте 83%, а степень использования CaC_2 в производстве 0,88.

1.9 Вопросы для контроля

1. Перечислите основные характеристики реакторов.
2. Какие показатели работы реакторов относятся к технологическим?
3. Приведите классификацию химических реакторов.
4. Какими путями можно интенсифицировать работу реакторов?
5. Перечислите основные показатели химико-технологического процесса.
6. Чем отличается дифференциальная селективность от

интегральной?

7. Как рассчитывается степень превращения, равновесная степень превращения, выход продукта?

8. Как связаны между собой выход продукта, степень превращения и селективность?

9. Как рассчитываются расходные коэффициенты?

10. Дайте определение объемной скорости.

11. Как рассчитывается объем катализатора, высота катализаторного слоя?

12. Приведите формулу для расчета диаметра реактора, диаметра штуцеров.

Рекомендуемая литература

1. **Кутепов, А.М.** Общая химическая технология: Учеб. для вузов / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2003. – 528 с. – ISBN 5-94628-079-1.
2. **Расчеты химико-технологических процессов /** Туболкин А.Ф., Тумаркина Е.С., Тарат Э.Я. и др.; под редакцией И.М. Мухленова. – Л.: Химия, 1982.– 248 с.
3. **Гутник, С.П.** Расчеты по технологии органического синтеза / С.П. Гутник, В.Е. Сосонко, В.Д. Гутман. – М.: Химия, 1988. – 272 с. : ил. – ISBN 5-7245-0016-7.
4. **Эмирджанов, Р.Т.** Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии / Р.Т. Эмирджанов, Р.А.Лембаранский. – М.: Химия, 1989. – 192 с. : ил. – ISBN 5-7245-0015-9.

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическому занятию

по дисциплине «Химические реакторы» для студентов направления

18.03.01 – Химическая технология

Составитель доцент А.Л. Проскурнин

Отв. ред. доцент А.И. Свидченко

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР
НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Химические
реакторы» для студентов направления
18.03.01 – Химическая технология

Невинномысск, 2020

Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Химические реакторы» разработаны в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта в части содержания и уровня подготовки выпускников по направлению 18.03.01 – Химическая технология и в соответствии с рабочей программой дисциплины.

В методических указаниях дано теоретическое обоснование лабораторной работы, указана методика ее выполнения, приведены требования к оформлению отчета, вопросы для защиты работы.

В приложении А приведены варианты заданий для выполнения лабораторной работы, а в приложениях Б, В и Г – примеры выполнения различных вариантов работы.

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры ХТМиАХП и рекомендованы к внутривузовскому изданию.

Составитель доц. А.Л. Проскурнин

Рецензент доц. А.И. Свидченко

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Лабораторная работа 2 | |
| «ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ» | 4 |
| Цель и содержание работы..... | 4 |
| 1 Теоретическое обоснование | 4 |
| 1.1 Обратимые эндотермические реакции | 6 |
| 1.2 Обратимые экзотермические реакции | 6 |
| 2 Построение линии оптимальных температур | 8 |
| 2.1 Синтез аммиака | 8 |
| 2.2 Синтез метанола..... | 10 |
| 2.3 Окисление диоксида серы..... | 11 |
| 3 Аппаратура, оборудование и материалы | 12 |
| 4 Методика и порядок выполнения работы | 13 |
| 5 Содержание отчета, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе | 16 |
| 6 Вопросы для защиты работы | 16 |
| Список рекомендуемой литературы | 17 |
| Приложение А | 18 |
| Приложение Б (информационное)..... | 19 |
| Приложение В (информационное)..... | 22 |
| Приложение Г (информационное)..... | 25 |

Лабораторная работа 2

«ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ»

Цель и содержание работы

Целью работы является приобретение практических навыков в построении линии оптимальных температур (ЛОТ), обеспечивающую максимальную скорость процесса, на основе кинетических данных.

Выполнение лабораторной работы направлено на формирование у студентов компетенции ОК-7: способностью к самоорганизации и самообразованию и профессиональной компетенции ПК-4 – способностью принимать конкретные технические решения при разработке технологических процессов, выбирать технические средства и технологии с учетом экологических последствий их применения.

Содержание работы: для заданной обратимой экзотермической реакции на основе термодинамических данных и кинетического уравнения реакции проводится изучение влияния температуры на константы равновесия и скорости химической реакции, определяется зависимость скорости от температуры и степени превращения, рассчитываются максимальные значения скоростей при фиксированных значениях степени превращения и строится ЛОТ.

1 Теоретическое обоснование

Температурный (тепловой) режим проведения химического процесса, обеспечивающий экономически целесообразную максимальную производительность единицы объёма реактора (интенсивность) по целевому продукту, называют *ОПТ ИМАЛЬНЫМ*.

Очевидно, что максимальная интенсивность будет достигнута при проведении процесса с максимальной скоростью. Поэтому путь в разработке оптимального температурного режима зависит от типа химической реакции.

Для обратимой реакции первого порядка



кинетическое уравнение имеет вид:

$$r_A = k_1 \cdot C_A - k_2 \cdot C_B, \quad (2)$$

где k_1, k_2 – константы скорости соответственно прямой и обратной реакций;

C_A, C_B – концентрации реагента А и продукта В.

Выразив в уравнении (2) концентрации C_A и C_B через C_{A0} и x_A ($C_A = C_{A0} \cdot (1 - x_A)$, $C_B = C_{A0} \cdot x_A$) получим:

$$r_A = k_1 \cdot C_{A0} \cdot (1 - x_A) - k_2 \cdot C_{A0} \cdot x_A = k_1 \cdot C_{A0} \cdot \left(1 - \frac{(k_1 + k_2)}{k_1} \cdot x_A \right). \quad (3)$$

В условиях равновесия для обратимой реакции имеем:

$$k_1 \cdot C_{A0} \cdot (1 - x_A^*) = k_2 \cdot C_{A0} \cdot x_A^*, \quad (4)$$

откуда следует, что

$$x_A^* = k_1 / (k_1 + k_2). \quad (5)$$

Тогда кинетическое уравнение примет вид:

$$r_A = k_1 \cdot C_{A0} \cdot \left(1 - x_A / x_A^* \right), \quad (6)$$

$$r_A = k_0 \cdot e^{-(E_A - E_B)/R} \cdot C_{A0} \cdot \left(1 - (x_A / x_A^*) \right). \quad (7)$$

Анализ уравнения (7) показывает, что с одной стороны скорость обратимой реакции зависит от константы скорости k_1 и степени превращения x_A , а с другой – определяется степенью приближения реакционной системы к состоянию химического равновесия x_A^* . Поэтому характер изменения скорости при повышении температуры будет разным для эндо- и экзотермических реакций.

1.1 Обратимые эндотермические реакции

Повышение температуры проведения обратимой эндотермической реакции приводит одновременно и к росту константы равновесия k_l и к увеличению равновесной степени превращения x_A^* .

Следовательно, при фиксированной степени превращения x_A скорость обратимой эндотермической реакции с ростом температуры монотонно увеличивается.

Эндотермическая реакция сопровождается поглощением теплоты. Поэтому такие реакции невыгодно проводить в адиабатических условиях, так как по мере протекания реакции её скорость будет падать как за счёт увеличения степени превращения, так и за счёт снижения температуры. Более разумно проводить эндотермические процессы в реакторах с подводом теплоты, поддерживая максимально возможную температуру, которая ограничивается:

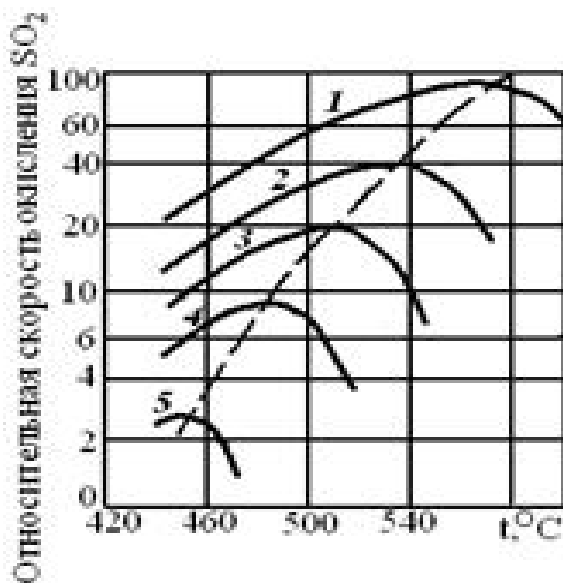
- а) побочными химическими реакциями или побочными физическими явлениями;
- б) прочностью конструкционных материалов;
- в) устойчивостью катализатора;
- г) экономической целесообразностью.

1.2 Обратимые экзотермические реакции

Для обратимой экзотермической реакции с ростом температуры увеличивается константа скорости прямой реакции k_l , но одновременно уменьшается равновесная степень превращения x_A^* . Таким образом, налицо два противоположных влияния. При низких температурах, когда влияние обратной реакции мало, наблюдается увеличение скорости процесса с ростом температуры. При приближении x_A к x_A^* скорость процесса снижается, приближаясь к нулю. Следовательно, существует температура T_m , при которой скорость реакции при заданной степени превращения является максимальной. Такая температура называется **оптимальной**.

На рисунке 1 представлена зависимость скорости реакции окисления диоксида серы при различных значениях степени превращения SO_2 при протекании процесса на ванадиевом (V_2O_5) катализаторе при составе исходной газовой смеси (в об. долях, %): 7% SO_2 и 11% O_2 .

Из рисунка видно, что с ростом температуры скорость окисления SO_2 проходит через максимум, причём с увеличением степени превращения скорость уменьшается, а значение T_m смещается в низкотемпературную область. Соединив точки максимумов на сечениях $r(T)$, получим *линию оптимальных температур* (ЛОТ).



1 – 75%; 2 – 80%; 3 – 85%; 4 – 90%; 5 – 95%

Рисунок 1 – Зависимость скорости окисления диоксида серы на ванадиевом катализаторе от температуры при различных степенях превращения SO_2

Проведение процесса по линии оптимальных температур предполагает, что по мере увеличения степени превращения температуру в реакторе надо снижать, чтобы скорость реакции всегда оставалась максимально возможной.

При решении практических задач линию оптимальных температур часто строят в координатах $x_A - T$. Тогда ЛОТ – это линия, абсциссы точек которой – температуры, обеспечивающие максимальную скорость реакции для степеней превращения, являющихся ординатами этих точек.

Определим зависимость $T_M=f(x_A)$, пользуясь методами математического анализа (определение экстремума функции).

Для этого продифференцируем функцию

$$r_A = k_1 \cdot C_A - k_2 \cdot C_B = k_1^0 \cdot e^{\left(-\frac{E_1}{R}x\right)} \cdot C_A - k_2^0 p e^{\left(-\frac{E_2}{R}x\right)} \cdot C_B \quad (8)$$

по температуре, считая концентрации C_A и C_B постоянными, и приравняем производную нулю:

$$\left(\frac{d}{d}\right)_{C_A, C_B} = \frac{k_1^0}{T^1} \cdot C_A \cdot \frac{E_1}{R} \cdot e^{\left(-\frac{E_1}{R}x\right)} - k_2^0 \cdot C_B \frac{E_2}{TR} \cdot e^{\left(-\frac{E_2}{R}x\right)} \quad (9)$$

Отсюда при $T = T_M$

$$\frac{E_2 - E_1}{R \cdot T_M} = l \frac{k_2^0 \cdot C_B \cdot E_2}{k_1^0 \cdot C_A \cdot E_1} \quad (10)$$

$$T_M = \frac{E_2 - E_1}{R \cdot l \frac{k_2^0 \cdot C_B \cdot E_2}{k_1^0 \cdot C_A \cdot E_1}} = \frac{E_2 - E_1}{R \cdot l \frac{k_2^0 \cdot E_2 \cdot x_A}{k_1^0 \cdot E_1 \cdot (1 - x_A)}} \quad (11)$$

или

Уравнение (11) позволяет определить оптимальную температуру для любой степени превращения (кроме $x_A=0$ и $x_A=1$, когда функция $r_A=f(T, x_A)$ не имеет максимума). Для расчета T_M необходимо знать константы скоростей и энергии активаций прямой и обратной реакций.

Как уже указывалось, проведение процесса по линии оптимальных температур обеспечивает максимальную интенсивность реактора.

2 Построение линии оптимальных температур

2.1 Синтез аммиака

Синтез аммиака из азота и водорода



относится к числу равновесных реакций, протекающих с выделением теплоты и уменьшением объёма.

Константу равновесия при давлении $P=29,4$ МПа вычисляют по формуле [6]:

$$k_g = \frac{-2}{T} + 2,4 \cdot 10^{-7} + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 2,2 \cdot 10^{-6} \quad (12)$$

Синтез аммиака протекает с заметной скоростью только в присутствии катализатора. Скорость синтеза аммиака на большинстве известных катализаторов описывается уравнением Темкина-Пыжева

$$r = k_1 \cdot P_{N_2} \cdot \left(\frac{P_{H_2}^3}{P_{NH_3}^2} \right)^\alpha - k_2 \cdot \left(\frac{P_{NH_3}^2}{P_{H_2}^3} \right)^{1-\alpha}, \quad (13)$$

где r – наблюдаемая скорость реакции, равная разности скоростей образования и разложения аммиака (отношение $k_1/k_2 = K_p$, где K_p – константа равновесия);

P_{H_2} , P_{N_2} , P_{NH_3} – парциальные давления водорода, азота и аммиака;

α – постоянная, удовлетворяющая неравенству $0 < \alpha < 1$.

Значение α характеризует степень покрытия поверхности катализатора азотом в условиях процесса синтеза аммиака. Для промышленных катализаторов в интервале температур 400–550°C величина α может быть принята равной 0,5.

Константу скорости вычисляют по уравнению:

$$k = 2 \cdot 10^4 \cdot \exp \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{6} \right), \quad (14)$$

$$k_1 = \frac{K(T)}{P^{1-0,5}} \cdot 0,7^{1,5}$$

Преобразуем уравнение Темкина-Пыжева к расчетному виду, выразив правую часть через степень превращения [6].

Зависимость скорости реакции от температуры и степени превращения:

$$r = 0,7^{1,5} 5k_1 \cdot \left[\left(\frac{P}{K} \right)^2 \frac{x^2 \cdot (1-x)^2}{p (0,2 - 0,5 \cdot x) \cdot (0,7 - 0,5 \cdot x)^3} \right] \cdot \frac{(0,2 - 0,5 \cdot x) \cdot (0,7 - 0,5 \cdot x)^{1,5}}{x \cdot (1-x)^{1,5}}, \quad (15)$$

где k_1 – константа скорости, рассчитанная при определенной температуре, учитывающая давление протекания процесса;

Kp – константа равновесия, вычисленная по уравнению (12);

P – давление процесса, атм.

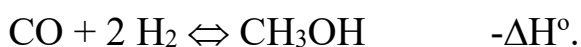
На рисунке 2 представлены зависимости скорости реакции от температуры при фиксированных значениях степени превращения в интервале $0,12 \div 0,20$, построенные на основании уравнения (15) в программе MathCAD. Интервал значений степеней превращения выбран близким к промышленным.

При $x < 0,10$ максимальное значение скорости реакции достигается при температурах, которые выше температуры разрушения катализатора, а при $x > 0,20$ наблюдаются низкие значения скоростей реакции синтеза аммиака.

На основе полученной зависимости скорости реакции от температуры для каждого значения x определяем максимальное значение скорости и температуру, которая обеспечивает максимальную скорость. Соединив найденные точки, получаем линию оптимальных температур.

2.2 Синтез метанола

Другим примером обратимого экзотермического процесса является синтез метанола, протекающей по реакции



Для определения константы равновесия при любом давлении удобно пользоваться уравнением [7]:

$$K = K_p \cdot \left(\frac{P}{P^0} \right)^{-2}, \quad (16)$$

$$1 \text{ кг} = \frac{3}{P_T} \cdot 7,7 \cdot 10^{-4} \cdot 8 \text{ г} \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4} - 4,2 \cdot 10^{-7} \cdot 10^2 + 1,38 \cdot 10^{-4} \quad (17)$$

где K_p и K_p – константы равновесия, выраженные через мольные доли и парциальные давления соответственно.

Для нахождения оптимальной температуры проведения процесса синтеза метанола по кинетическим данным необходимо знание константы скорости, которую определяют по формуле:

$$k = 7,7 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(\frac{-20000}{R \cdot T}\right) \quad (18)$$

Воспользовавшись приведенными уравнениями и зависимостью скорости процесса от температуры и степени превращения (19), можно построить зависимость скорости реакции от температуры при различных значениях x , определить максимальные значения скоростей и температуры их обеспечивающие и построить линию оптимальных температур ЛОТ.

$$r = k \cdot \frac{\left[\frac{1-x}{3-2x} \right]^{0,5} \cdot \frac{2-2x}{3-2x} \cdot \left(\frac{x}{3-2x} \right)^{0,3 \cdot 4}}{\left(\frac{x}{3-2x} \right)^{0,6 \cdot 6} \cdot \left[\frac{1-x}{3-2x} \right]^{0,5} \cdot \frac{2-2x}{3-2x} \cdot K} \quad (19)$$

Зависимости скорости процесса синтеза метанола от температуры при различных значениях степени превращения построены в программе MathCAD на основе уравнения (19) и ЛОТ, приведены на рисунке 3.

2.3 Окисление диоксида серы

Окисление SO_2 в SO_3 аналогично предыдущим примерам, является обратимой экзотермической реакцией, протекающей в присутствии катализатора, для которой кривая зависимости $x = f(T)$ или $r = \varphi(T)$ имеет максимум.

Зависимость константы равновесия реакции окисления SO₂ от температуры описывается уравнением:

$$\lg K_p^0 = 4905,5 / T - 7,1479, \text{ откуда } K_p^0 = 10^{\lg K_p^0}. \quad (20)$$

Для определения константы скорости при разных температурах воспользуемся уравнением Аррениуса:

$$k = k_0 \cdot e^{-E/RT}, \quad (21)$$

где E – энергия активации прямой реакции;

k_0 – предэкспоненциальный множитель.

E и k_0 зависят от применяемого катализатора и его диаметра. Для ванадиевого катализатора $E=59871$ кДж/моль.

Скорость процесса окисления SO₂ в SO₃ на ванадиевом катализаторе (в неподвижном слое) выражается уравнением:

$$r = \frac{d}{d\tau} = \frac{k \cdot R}{a} \cdot \frac{1-x}{1-0,2 \cdot x} \cdot \left[\frac{b - (a \cdot x / 2)}{1 - (a \cdot x / 2)} - \frac{x^2}{P \cdot K_p^2 (1-x)^2} \right], \quad (22)$$

где x – степень превращения, доли единицы;

τ – время контакта, с;

k – константа скорости реакции, с⁻¹·Па⁻¹;

a – начальная концентрация SO₂, доли единицы;

b – начальная концентрация O₂, доли единицы;

P – общее давление, Па;

K_p – константа равновесия, Па^{-0,5}.

3 АППАРАТУРА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Лабораторная работа проводится в компьютерном классе с использованием программы MathCad.

4 МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется каждым студентом самостоятельно. Исходные данные приведены в приложении А. Вариант выбирается по номеру студента в списке группы.

Задание 1. Изучить влияние температуры на константу равновесия и константу скорости реакции.

Задание 2. На основании кинетических данных определить зависимости скорости процесса (r) от температуры (t) при фиксированных значениях степени превращения (x) и представить их графически.

Задание 3. Рассчитать максимальные значения скорости процесса для различных значений степени превращения и определить температуры, при которых они достигаются.

Задание 4. Построить линию оптимальных температур в координатах $r-t$ и $x-t$.

Задание 5 (не обязательное). Добавить к линии оптимальных температур зависимость равновесной степени превращения от температуры.

Для выполнения работы необходимо:

1. Представить кинетическое уравнение зависимости констант равновесия и скорости химической реакции в виде функции пользователя, задать интервалы изменения параметров и построить график.

2. Для расчета максимальных значений скоростей можно воспользоваться встроенной функцией *max*. Данные для расчета должны быть представлены в векторной или матричной форме. Поскольку результаты расчета по кинетическому уравнению выводятся в скалярном виде, необходимо провести преобразования:

а) сформировать значения степеней превращения и значения температур, используемых для расчета скоростей реакции в векторной форме, где переменными являются i, j, l и др., имеющие целочисленные значения;

б) сформировать матрицу значений скоростей реакции. Для формирования значений степеней превращения используем вектор, содержащий один столбец и количество строк, равное числу значений.

$$\text{Например, } x := \begin{pmatrix} 0,75 \\ 0,85 \\ 0,9 \\ 0,94 \\ 0,98 \end{pmatrix}.$$

Значение переменной i меняется в интервале $i := 0 \dots 4$. Шаг между значениями x может быть любой.

Для формирования вектора значений температур лучше воспользоваться постоянным шагом, т.к. значений много и вводить их в вектор затруднительно.

Определяем количество необходимых значений и шаг изменения температуры.

Например:

$j := 0 \dots 100$ – количество значений 101;

$t_j := 380 + 2 \cdot j$ – шаг 2, начальное значение $t_n = 380^\circ\text{C}$, конечное значение $t_k = 580^\circ\text{C}$.

При формировании матрицы значений скорости реакции при различных t и x воспользуемся программой, которая будет приравнивать нулю все отрицательные значения скорости.

$$M_{i,j} := \begin{cases} R(x_i, t_j) & \text{if } (R(x_i, t_j) > 0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}.$$

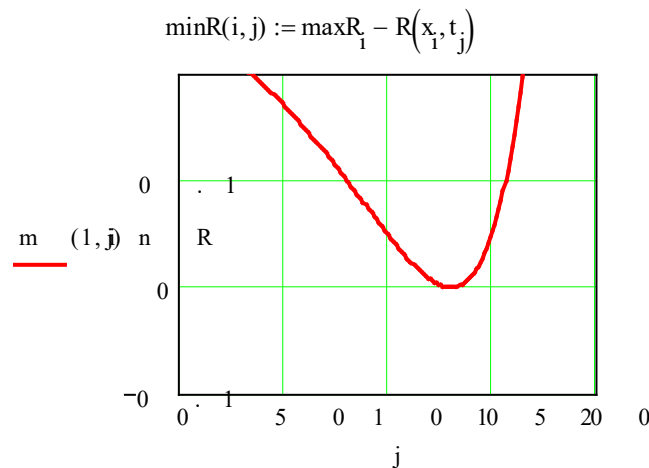
Полученная матрица будет содержать 5 строк, соответствующих 5 значениям степени превращения 101 столбец, соответствующих значениям температуры.

Поскольку функция *max* определяет максимальное значение в столбце, необходимо транспонировать матрицу и найти максимальное значение скорости в каждом столбце, т.е. при каждом значении степени превращения.

$$M1 := M^T \quad \max R_i := \max(M1^{\langle i \rangle})$$

Для расчета значений температур, соответствующих максимальным значениям скоростей, необходимо найти корень уравнения $F = \max R_i - R(x_i, t_i) = 0$.

Для этого можно воспользоваться встроенной функцией *root*. Но в данном случае эта функция работает плохо, результаты зависят от начального приближения температуры, которое необходимо задавать в области, далекой от искомого значения. Это связано с тем, что функция F не пересекает ось x , а только касается ее.



Поэтому лучше воспользоваться программой, в которой определяется значение температуры при $F = 0$.

| | |
|---|--|
| $tm := \left. \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..4 \\ \quad \text{for } j \in 0..100 \\ \quad \quad \text{if } \max R_i - R(x_i, t_j) = 0 \\ \quad \quad \quad \left \begin{array}{l} R_i \leftarrow t_j \\ \text{break} \end{array} \right. \\ \quad R \end{array} \right\}$ | <p>– Организуется цикл с изменением переменных i и j.</p> <p>– Сравниваются максимальное и текущее значения. Если разница равна нулю, запоминается значение температуры.</p> |
|---|--|

Рассчитанные значения $\max R$, t_m и исходные значения x заносят в таблицу Excel, которая вставляется в программу как компонент.

3. При построении линии оптимальных температур в координатах $r-t$ можно добавить зависимости скорости от температуры. При этом можно воспользоваться сформированной матрицей скоростей (см. пример).

4. На основе полученных зависимостей необходимо сделать выводы, обратив особое внимание на:

а) изменение скорости реакции в зависимости от степени превращения;

б) изменение температуры, обеспечивающей максимальную скорость процесса от степени превращения.

Желательно оценить во сколько раз изменяется максимальная скорость процесса в выбранном интервале степеней превращения.

5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА, ФОРМА И ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет по лабораторной работе должен содержать: название работы, цель, фамилию и инициалы студента, шифр группы, исходные данные, реализованную математическую модель, результаты выполнения работы, выводы.

Примеры выполнения расчетов в среде программы MathCad приведены в приложениях Б, В и Г.

6 ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1 Какой режим называется оптимальным?

2 Как влияет температура на константу равновесия обратимой экзотермической реакции?

3 Каков характер изменения скорости процесса для обратимых эндо- и экзотермических реакций?

4 От каких параметров зависит скорость обратимой каталитической реакции?

5 Как определяется оптимальная температура для обратимых экзотермических реакций?

6 Почему скорость обратимой экзотермической реакции при постоянной степени превращения проходит через максимум?

7 Как изменяется скорость химической реакции в зависимости от степени превращения?

8 Каким образом изменяется температура, обеспечивающая максимальную скорость процесса, в зависимости от степени превращения?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Кондауров, Б. П. Общая химическая технология: учеб. пособие /Б. П. Кондауров, В. И. Александров , А. В. Артемов. – М.: Академия, 2012. – 336 с.

2 Основы химической технологии /Под ред. И.П. Мухленова. – М.: Высш. шк., 1991. – 463 с.

3 Общая химическая технология: Учебник для технических вузов. /А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.С. Беренгартен и др. – М.: Высш. шк., 1990. – 520 с.

4 Расчеты химико-технологических процессов / Под ред. И.П. Мухленова. – Л.: Химия, 1982. – 248 с.

5 Амелин А.Г. Технология серной кислоты. Учебн. пособие. – М.: Химия, 1983. – 260 с.

6 Синтез аммиака./ Кузнецов Л.Д., Дмитриенко Л.М., Рабина П.Д., Соколинский Ю.А.– М.: Химия, 1982. – 296 с.

7 Технология синтетического метанола /Караев М.М., Леонов В.Е., Попов И.Г. Шепелев Е.Т. – М.: Химия, 1984. – 240 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Таблица П1 – Варианты заданий

| Вариант | Кинетическое уравнение | a | b | X _н | X _к | P |
|--------------|------------------------|-----|------|----------------|----------------|-----|
| 1 | 22 | 6,0 | 12,7 | 70 | 95 | 0,1 |
| 2 | 22 | 7,0 | 11,3 | 60 | 95 | 0,1 |
| 3 | 22 | 8,0 | 9,8 | 70 | 95 | 0,2 |
| 4 | 22 | 8,5 | 9,4 | 60 | 95 | 0,2 |
| 5 | 15 | – | – | 4 | 12 | 20 |
| 6 | 15 | – | – | 10 | 20 | 30 |
| 7 | 15 | – | – | 8 | 18 | 25 |
| 8 | 19 | – | – | 30 | 60 | 15 |
| 9 | 19 | – | – | 20 | 50 | 10 |
| 10 | 19 | – | – | 10 | 30 | 5 |
| 11 Пример | 22 | 7,5 | 10,5 | 70 | 95 | 0,1 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (ИНФОРМАЦИОННОЕ)

Лабораторная работа ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Цель работы: приобретение практических навыков в построении линии оптимальных температур для обратимой экзотермической реакции и определении оптимального температурного режима.

Выполнил: студент гр. ХТЛ-6-о-11-1

Петров А.Д.

Исходные данные:

Вариант 20 - Процесс синтеза аммиака $0.5N_2 + 1.5H_2 = NH_3$

В исходной смеси содержится: N_2 - 0,25 моль; H_2 - 0,75 моль; NH_3 - отсутствует

Количество образующегося NH_3 - x моль.

$$\underline{R} := 8.314 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)} \quad P := 300 \text{ атм.}$$

Математическое описание химического процесса окисления SO_2 :

Константа равновесия: $\beta := 1.256 \cdot 10^{-4}$

$$K_p(t) := \frac{1}{10^{\left[\frac{-2074}{t+273.15} + 2.4943 \cdot \log(t+273.15) + \beta \cdot (t+273.15) - 1.8564 \cdot 10^{-7} \cdot (t+273.15)^2 - 2.206 \right]}}$$

Константа скорости реакции: $\underline{K}(t) := 2150 \cdot \exp\left[-20000 \cdot \left(\frac{1}{t+273.15} - \frac{1}{673}\right)\right]$

$$k_1(t) := \frac{\underline{K}(t)}{P^{1-0.5}} \cdot 0.75^{1.5}$$

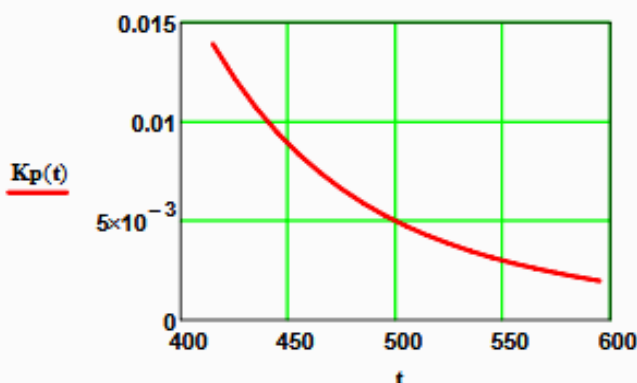
Уравнение скорости реакции:

$$\underline{R}(x, t) := 0.75^{1.5} \cdot k_1(t) \cdot \left[(P \cdot K_p(t))^2 - \frac{x^2 \cdot (1-x)^2}{(0.25 - 0.5 \cdot x) \cdot (0.75 - 1.5 \cdot x)^3} \right] \cdot \frac{(0.25 - 0.5 \cdot x) \cdot (0.75 - 1.5 \cdot x)^{1.5}}{x \cdot (1-x)^{1.5}}$$

Исследование процесса на основе математического описания:

Задание 1. Изучить влияние температуры на константу равновесия и константу скорости реакции.

$$t := 415, 425 \dots 600$$

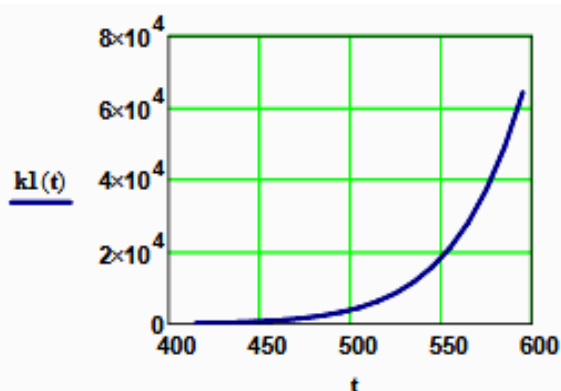


$$K_p(415) = 0.014$$

$$K_p(600) = 1.893 \times 10^{-3}$$

Вывод: При повышении температуры от 415 до 550°C константа равновесия уменьшается в 7,4 раза. Это характерно для обратимых экзотермических реакций.

Рисунок 1 – Зависимость константы равновесия от температуры



$$k_1(415) = 155.098$$

$$k_1(550) = 1.823 \times 10^4$$

Вывод: При повышении температуры константа скорости возрастает. Так повышение температуры от 415 до 550⁰C приводит к увеличению константы скорости в 118 раз.

Рисунок 2 – Зависимость константы скорости реакции от температуры

Задание 2. На основании кинетических данных определить зависимость скорости процесса (r) от температуры (t) при фиксированных значениях степени превращения (x) и представить их графически.

На основании кинетического уравнения $r(x, t)$ строим зависимость скорости реакции от температуры при фиксированных значениях степени превращения

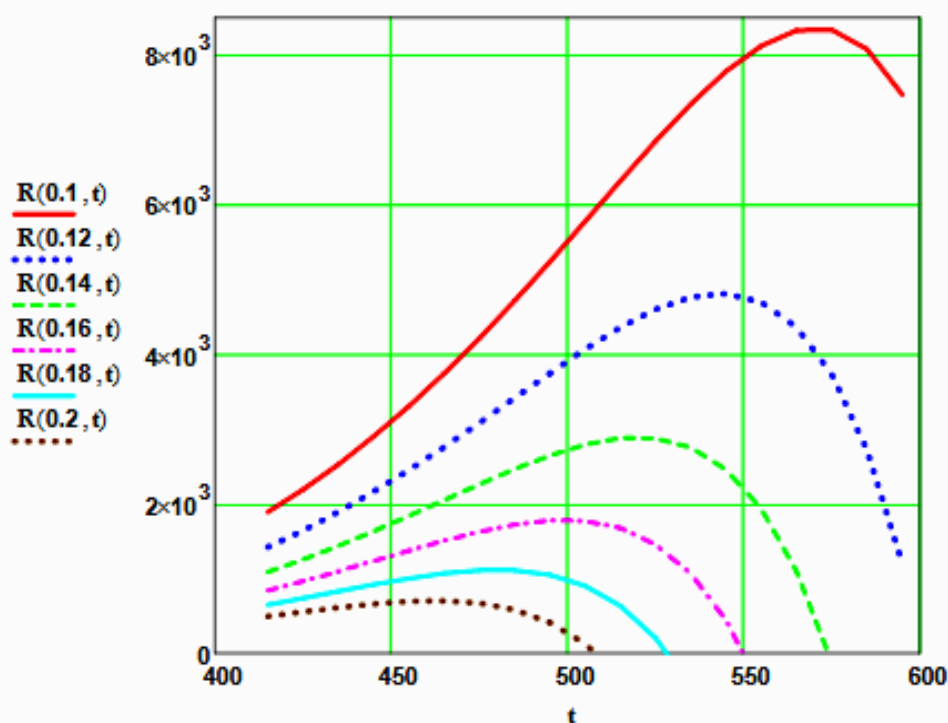


Рисунок 3 – Зависимость скорости реакции от температуры при различных значениях степени превращения

Выводы:

1. При повышении температуры скорость реакции вначале возрастает, достигает максимального значения, а затем резко снижается.
2. При заданной степени превращения существует температура (t_{opt}), при которой достигается максимальная скорость процесса (R_{max}).

Задание 3. Рассчитать максимальные значения скорости процесса для различных значений степени превращения и определить температуры, при которых они достигаются.

Формируем значения температур, используемых для поиска максимума, в виде вектора

$$x1 := (0.1 \ 0.12 \ 0.14 \ 0.16 \ 0.18 \ 0.2)^T$$

$$j := 0..150 \quad t1_j := 420 + j \quad i := 0..5$$

Формируем матрицу значений скорости реакции при изменении t и x , приравнивая значение скорости равной нулю, если по уравнению получается отрицательное значение:

$$M_{i,j} := \begin{cases} R(x1_i, t1_j) & \text{if } R(x1_i, t1_j) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad M1 := M^T$$

Определяем значения максимальных скоростей при фиксированных значениях $x1$.

$$\max R_i := \max(M1^{(i)})$$

Рассчитываем значения температур, соответствующие значениям максимальных скоростей

$$rr(t2, i) := (\max R_i - R(x1_i, t2)) \quad t2 := 600 \quad tm_i := \text{root}(rr(t2, i), t2)$$

Результаты:

$$x1 = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.12 \\ 0.14 \\ 0.16 \\ 0.18 \\ 0.2 \end{pmatrix} \quad tm = \begin{pmatrix} 570.959 \\ 543.807 \\ 520.162 \\ 499.607 \\ 480.618 \\ 463 \end{pmatrix} \quad \max R = \begin{pmatrix} 8.357 \times 10^3 \\ 4.809 \times 10^3 \\ 2.889 \times 10^3 \\ 1.782 \times 10^3 \\ 1.116 \times 10^3 \\ 703.246 \end{pmatrix}$$

Задание 4. Построить линию оптимальных температур в координатах $r - t$ и $x - t$.

На основе полученных значений строим график зависимости скорости реакции от температуры при различных значениях степени превращения и линию оптимальных температур в координатах $r - t$.

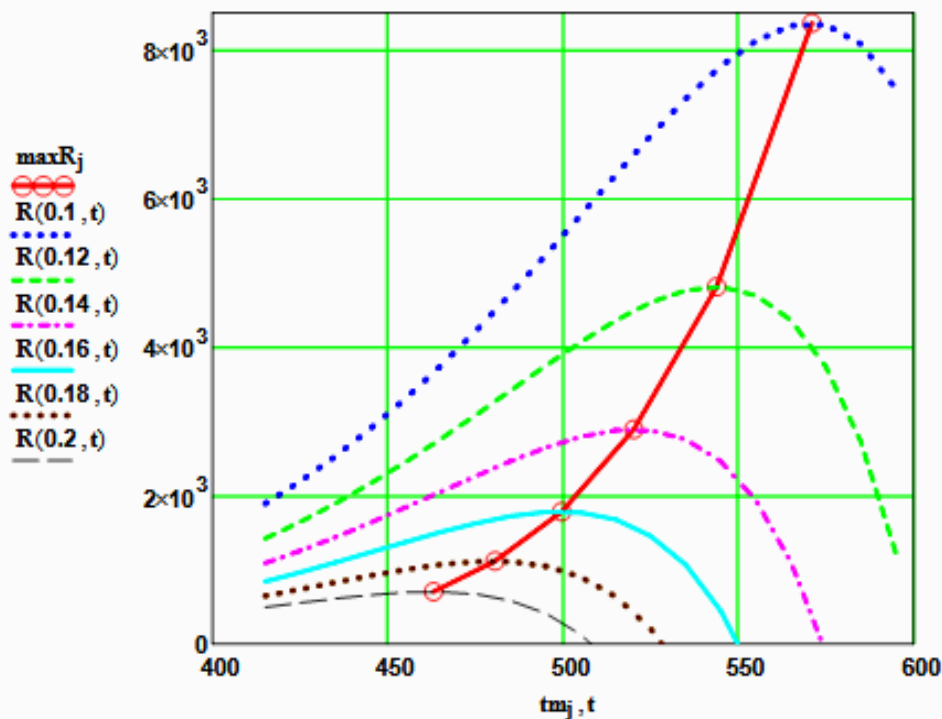


Рисунок 4 – Построение линии оптимальных температур (ЛОТ)

Построим график зависимости степени превращения от температуры, обеспечивающей максимальную скорость реакции

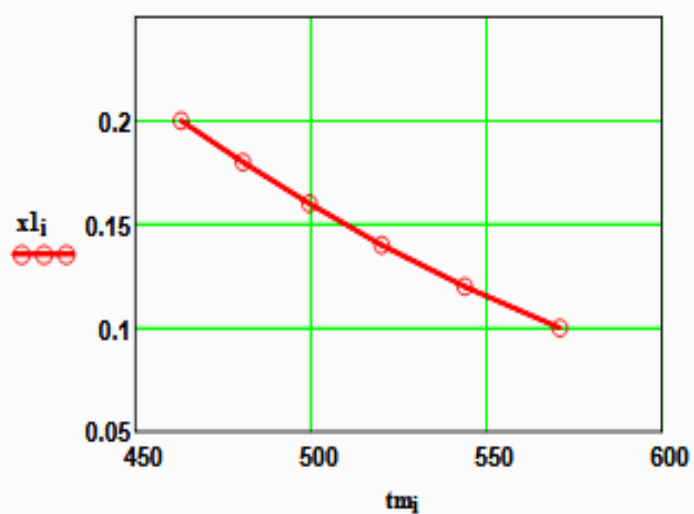


Рисунок 5 – Связь степени превращения и оптимальной температуры (оптимальная температурная последовательность или ЛОТ)

Вывод: При увеличении степени превращения температура, обеспечивающая максимальную скорость процесса (t_{opt}) снижается.

ПРИЛОЖЕНИЕ В (ИНФОРМАЦИОННОЕ)

Лабораторная работа ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Цель работы: приобретение практических навыков в построении линии оптимальных температур для обратимой экзотермической реакции и определении оптимального температурного режима.

Выполнил: студент гр. ХТЛ-6-о-11-1

Петров А.Д.

Исходные данные:

Вариант 19 - Процесс синтеза метанола $\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{OH}$

В исходной смеси содержится: CO - 1 моль; H_2 - 2 моль;

Степень превращения CO - x моль. Содержание инертнов - y

На основе материального баланса при степени превращения $\text{CO} = x$, содержание компонентов в реакционной смеси составит:

$$N1(x) := \frac{1-x}{3-2x} \quad N2(x) := \frac{2-2x}{3-2x} \quad N3(x) := \frac{x}{3-2x} \quad y := 0.2$$

$$E := 87800 \text{ Дж/моль} \quad R := 8.314 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)} \quad P := 50 \cdot (1-y) \text{ атм.}$$

Математическое описание химического процесса окисления SO_2 :

Константа равновесия:

$$K_p(t) := 10^{\frac{3748.7}{(t+273.15)} - 9.2833 \cdot \log(t+273.15) + 3.1475 \cdot 10^{-3} \cdot (t+273.15) - 4.2613 \cdot 10^{-7} \cdot (t+273.15)^2 + 13.8144}$$

Константа скорости реакции: $k_1(t) := 7.734 \cdot 10^8 \cdot e^{\left[\frac{-22700}{R \cdot (t+273.15)} \right]}$

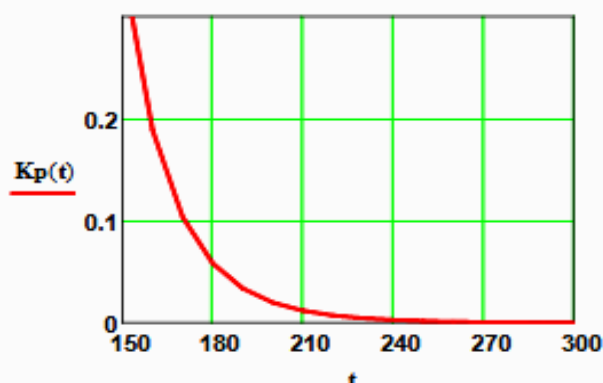
Уравнение скорости реакции:

$$r(x, t) := k_1(t) \cdot \left[\frac{\left[\frac{1-x}{(3-2x) \cdot P} \right]^{0.5} \cdot \frac{2-2x}{3-2x} \cdot P}{\left(\frac{x}{(3-2x) \cdot P} \right)^{0.66}} - \frac{\left(\frac{x}{(3-2x) \cdot P} \right)^{0.34}}{\left[\frac{1-x}{(3-2x) \cdot P} \right]^{0.5} \cdot \frac{2-2x}{3-2x} \cdot P \cdot K_p(t)} \right]$$

Исследование процесса на основе математического описания:

Задание 1. Изучить влияние температуры на константу равновесия и константу скорости реакции.

$$t := 150, 160 \dots 300$$

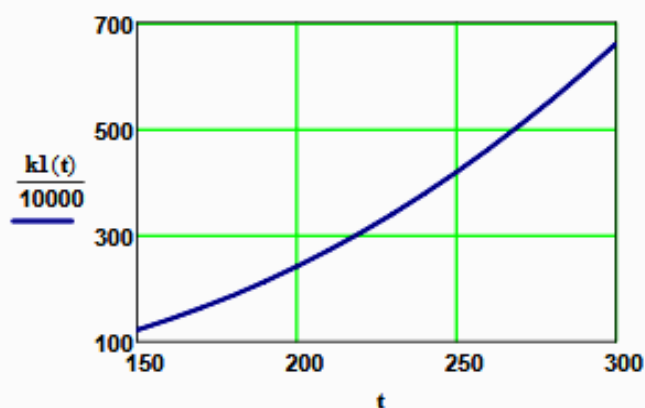


$$K_p(150) = 0.352$$

$$K_p(300) = 2.589 \times 10^{-4}$$

Вывод: При повышении температуры от 150 до 300°C константа равновесия уменьшается в 1300 раз. Это характерно для обратимых экзотермических реакций.

Рисунок 1 – Зависимость константы равновесия от температуры



$$k_1(150) = 1.219 \times 10^6$$

$$k_1(300) = 6.6 \times 10^6$$

Вывод: При повышении температуры константа скорости возрастает. Так повышение температуры от 150 до 300⁰C приводит к увеличению константы скорости в 5 раз.

Рисунок 2 – Зависимость константы скорости реакции от температуры

Задание 2. На основании кинетических данных определить зависимость скорости процесса (r) от температуры (t) при фиксированных значениях степени превращения (x) и представить их графически.

На основании кинетического уравнения $r(x, t)$ строим зависимость скорости реакции от температуры при фиксированных значениях степени превращения

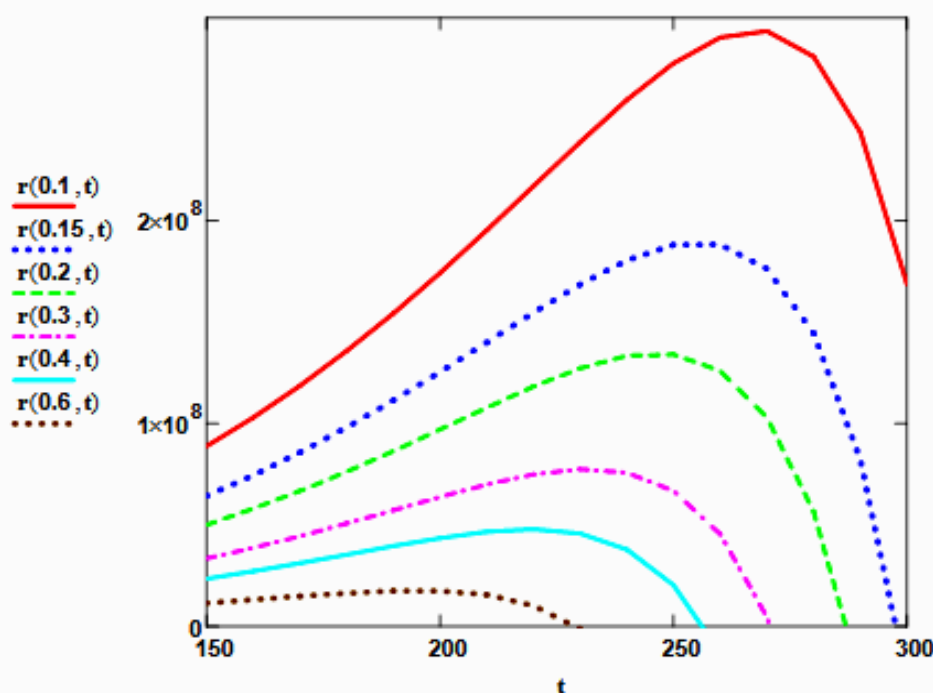


Рисунок 3 – Зависимость скорости реакции от температуры при различных значениях степени превращения

Выводы:

1. При повышении температуры скорость реакции вначале возрастает, достигает максимального значения, а затем резко снижается.
2. При заданной степени превращения существует температура (t_{opt}), при которой достигается максимальная скорость процесса (R_{max}).

Задание 3. Рассчитать максимальные значения скорости процесса для различных значений степени превращения и определить температуры, при которых они достигаются.

Формируем значения температур, используемых для поиска максимума, в виде вектора

$$\mathbf{x1} := (0.1 \ 0.15 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.6)^T$$

$$j := 0..500 \quad t1_j := 150 + j \quad i := 0..5$$

Формируем матрицу значений скорости реакции при изменении t и x , приравнявая значение скорости равной нулю, если по уравнению получается отрицательное значение:

$$M_{i,j} := \begin{cases} r(\mathbf{x1}_i, t1_j) & \text{if } r(\mathbf{x1}_i, t1_j) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad M1 := M^T$$

Определяем значения максимальных скоростей при фиксированных значениях $\mathbf{x1}$.

$$\max R_i := \max(M1^{(i)})$$

Рассчитываем значения температур, соответствующие значениям максимальных скоростей

$$rr(t2, i) := (\max R_i - r(\mathbf{x1}_i, t2)) \quad t2 := 200 \quad tm_j := \text{root}(rr(t2, i), t2)$$

Результаты:

$$\mathbf{x1} = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.15 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.6 \end{pmatrix} \quad \mathbf{tm} = \begin{pmatrix} 267.225 \\ 255 \\ 246 \\ 232 \\ 219.614 \\ 196 \end{pmatrix} \quad \mathbf{maxR} = \begin{pmatrix} 2.938 \times 10^8 \\ 1.894 \times 10^8 \\ 1.347 \times 10^8 \\ 7.767 \times 10^7 \\ 4.795 \times 10^7 \\ 1.775 \times 10^7 \end{pmatrix}$$

Задание 4. Построить линию оптимальных температур в координатах $\tau - t$ и $x - t$.

На основе полученных значений строим график зависимости скорости реакции от температуры при различных значениях степени превращения и линию оптимальных температур в координатах $\tau - t$.

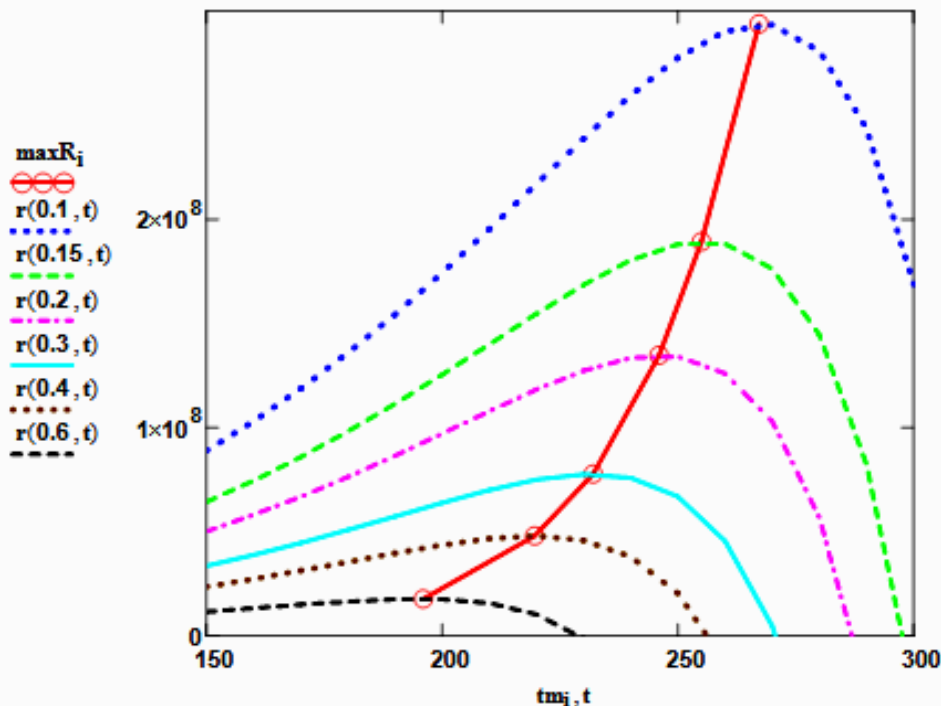


Рисунок 4 – Построение линии оптимальных температур (ЛОТ)

Построим график зависимости степени превращения от температуры, обеспечивающей максимальную скорость реакции

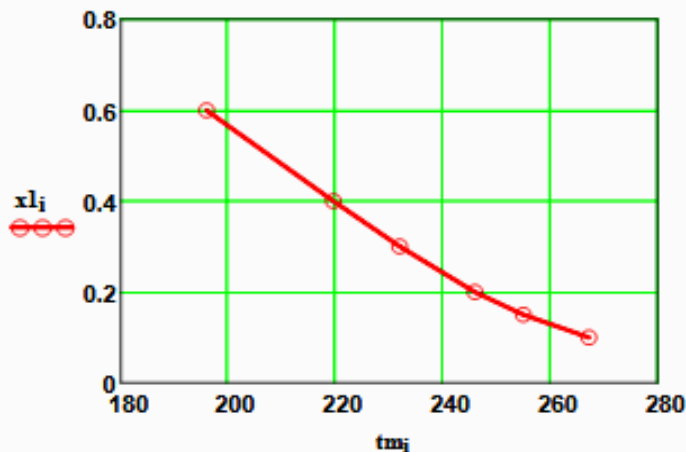


Рисунок 5 – Связь степени превращения и оптимальной температуры (оптимальная температурная последовательность или ЛОТ)

Вывод: При увеличении степени превращения температура, обеспечивающая максимальную скорость процесса (*topt*) снижается.

Задание 5 (не обязательное). Добавить к линии оптимальных температур зависимость равновесной степени превращения от температуры.

Составляем программу для расчета равновесной степени превращения при заданной *t*.

$$F(t, xp) := Kp(t) - \frac{xp \cdot (3 - 2 \cdot xp)^2}{(1 - xp) \cdot (2 - xp)^2 \cdot P^2}$$

```

xp(t) :=
  eps ← 0.0001
  a ← eps
  b ← 1 - eps
  while (b - a) > eps
    xp ← (a + b) / 2
    a ← xp if F(t, a) · F(t, xp) > 0
    b ← xp otherwise
  xp
  
```

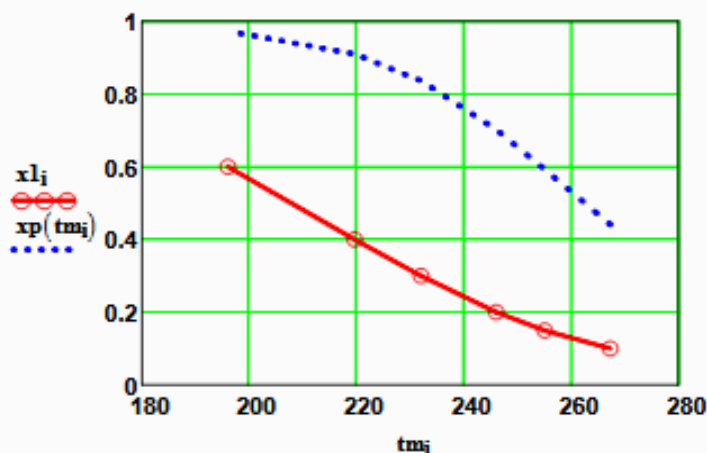


Рисунок 6 – ЛОТ и равновесная степень превращения

ПРИЛОЖЕНИЕ Г (ИНФОРМАЦИОННОЕ)

Лабораторная работа ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Цель работы: приобретение практических навыков в построении линии оптимальных температур для обратимой экзотермической реакции и определении оптимального температурного режима.

Выполнил: студент гр. ХТЛ-6-о-11-1

Петров А.Д.

Исходные данные:

Вариант 18 - Процесс окисления SO_2 в SO_3

Содержание SO_2 - а мольн. долей, содержание O_2 - b мольн. долей, остальное N_2 .

a := 0.075 b := 0.115 P := 1

E := 87800 Дж/моль R := 8.314 Дж/(моль·К) k₀ := 0.302 · 10⁷ 1/(с·P)

Математическое описание химического процесса окисления SO_2 :

Константа равновесия: $K_p(t) := 10^{\left(\frac{4905.5}{t+273.15} - 4.6455\right)}$

Константа скорости реакции: $k_l(t) := k_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot (t+273.15)}}$

Уравнение скорости реакции:

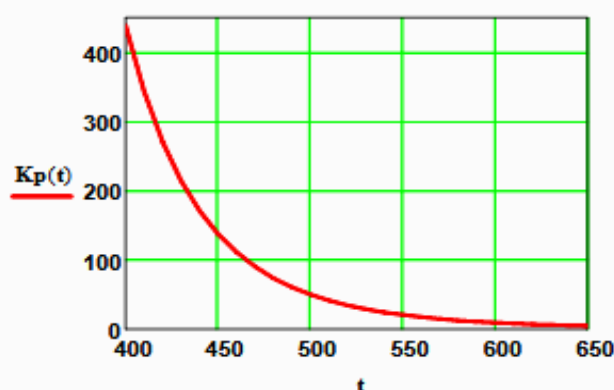
$$r(x, t) := \frac{k_l(t) \cdot P}{a} \cdot \frac{1-x}{1-0.2 \cdot x} \cdot \left[\frac{b-0.5a \cdot x}{1-0.5a \cdot x} - \frac{x^2}{P \cdot (K_p(t))^2 \cdot (1-x)^2} \right]$$

x – степень превращения SO_2 .

Исследование процесса на основе математического описания:

Задание 1. Изучить влияние температуры на константу равновесия и константу скорости реакции.

t := 400, 410 .. 660

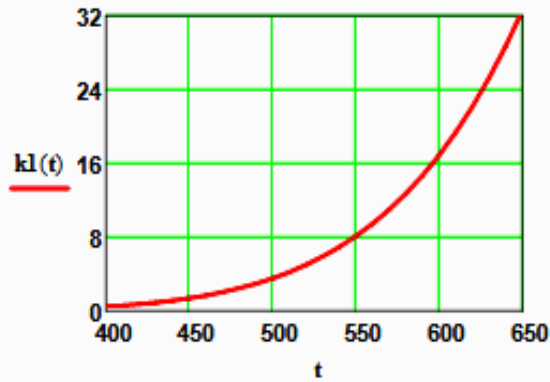


$$K_p(400) = 438.41$$

$$K_p(650) = 4.66$$

Вывод: При повышении температуры от 400 до 650°C константа равновесия уменьшается почти в 100 раз. Это характерно для обратимых экзотермических реакций.

Рисунок 1 – Зависимость константы равновесия от температуры



$$k_1(400) = 0.464$$

$$k_1(600) = 16.879$$

Вывод: При повышении температуры константа скорости возрастает. Так повышение температуры от 400 до 600°C приводит к увеличению константы скорости в 36 раз.

Рисунок 2 – Зависимость константы скорости реакции от температуры

Задание 2. На основании кинетических данных определить зависимость скорости процесса (r) от температуры (t) при фиксированных значениях степени превращения (x) и представить их графически.

На основании кинетического уравнения $r(x, t)$ строим зависимость скорости реакции от температуры при фиксированных значениях степени превращения

$$x := (0.8 \ 0.85 \ 0.9 \ 0.95 \ 0.98)^T$$

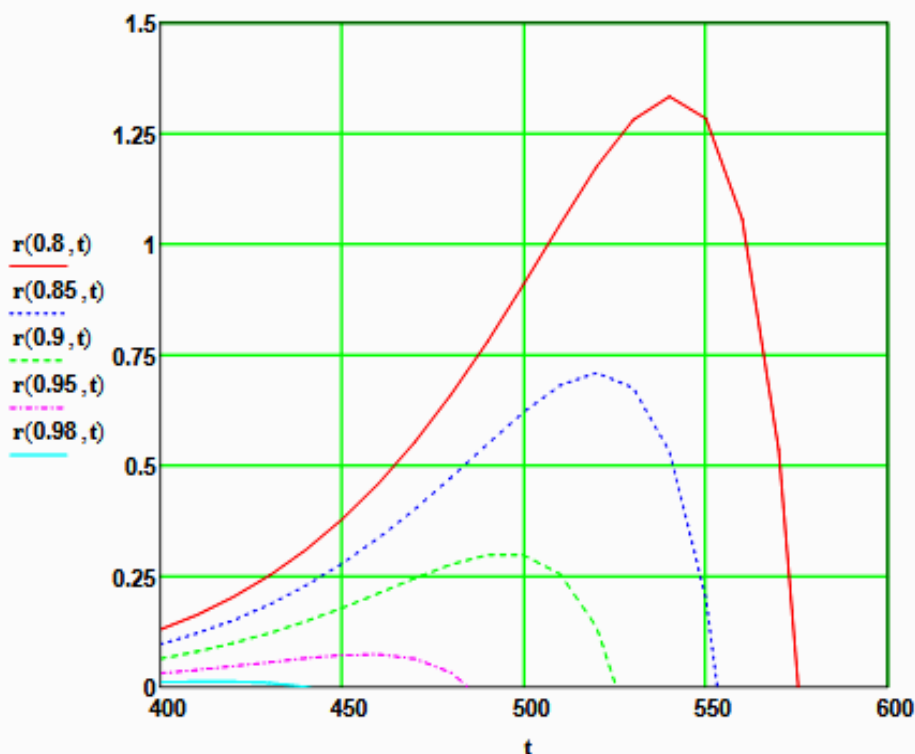


Рисунок 3 – Зависимость скорости реакции от температуры при различных значениях степени превращения

Выводы:

1. При повышении температуры скорость реакции вначале возрастает, достигает максимального значения, а затем резко снижается.
2. При заданной степени превращения существует температура (t_{opt}), при которой достигается максимальная скорость процесса (R_{max}).
3. При увеличении степени превращения t_{opt} снижается.

Задание 3. Рассчитать максимальные значения скорости процесса для различных значений степени превращения и определить температуры, при которых они достигаются.

Формируем значения температур, используемых для поиска максимума, в виде вектора

$$j := 0..200 \quad t_j := 380 + j$$

Значения степени превращения уже представлены в виде вектора при $i := 0..4$

Формируем матрицу значений скорости реакции при изменении t и x , приравняв значение скорости равной нулю, если по уравнению получается отрицательное значение:

$$M_{i,j} := \begin{cases} r(x_i, t_j) & \text{if } (r(x_i, t_j) > 0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad M = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 0 & 0.08 & 0.082 & 0.084 & 0.086 & 0.088 \\ \hline 1 & 0.059 & 0.061 & 0.062 & 0.064 & 0.065 \\ \hline 2 & 0.039 & 0.04 & 0.041 & 0.042 & 0.043 \\ \hline 3 & 0.019 & 0.02 & 0.02 & 0.021 & 0.021 \\ \hline 4 & 7.311 \cdot 10^{-3} & 7.47 \cdot 10^{-3} & 7.631 \cdot 10^{-3} & 7.793 \cdot 10^{-3} & \dots \\ \hline \end{array}$$

Определяем значения максимальных скоростей при фиксированных значениях x .

$$M1 := M^T \quad \max R_i := \max(M1^{(i)})$$

Рассчитываем значения температур, соответствующие значениям максимальных скоростей

$$tm := \begin{array}{|l} \text{for } i \in 0..4 \\ \quad \text{for } j \in 0..200 \\ \quad \quad \text{if } \max R_i - r(x_i, t_j) = 0 \\ \quad \quad \quad R_i \leftarrow t_j \\ \quad \quad \quad \text{break} \\ \text{R} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Результаты:} \\ x = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.85 \\ 0.9 \\ 0.95 \\ 0.98 \end{pmatrix} \quad \max R = \begin{pmatrix} 1.334 \\ 0.709 \\ 0.301 \\ 0.073 \\ 0.012 \end{pmatrix} \quad tm = \begin{pmatrix} 541 \\ 521 \\ 495 \\ 457 \\ 415 \end{pmatrix} \end{array}$$

Задание 4. Построить линию оптимальных температур в координатах $r - t$ и $x - t$.

На основе полученных значений строим график зависимости скорости реакции от температуры при различных значениях степени превращения и линию оптимальных температур в координатах $r - t$.

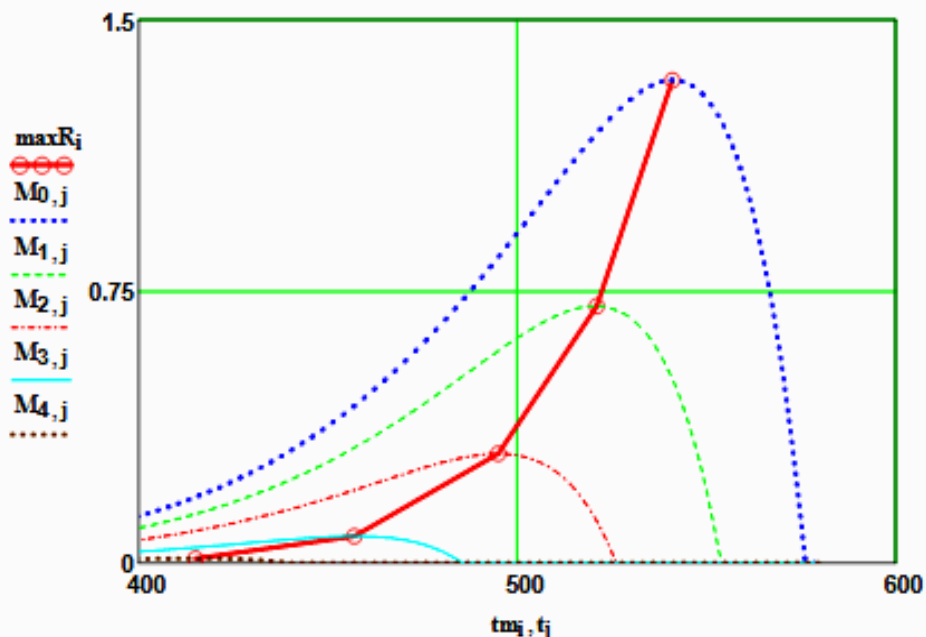


Рисунок 4 – Построение линии оптимальных температур (ЛОТ)

Построим график зависимости степени превращения от температуры, обеспечивающей максимальную скорость реакции

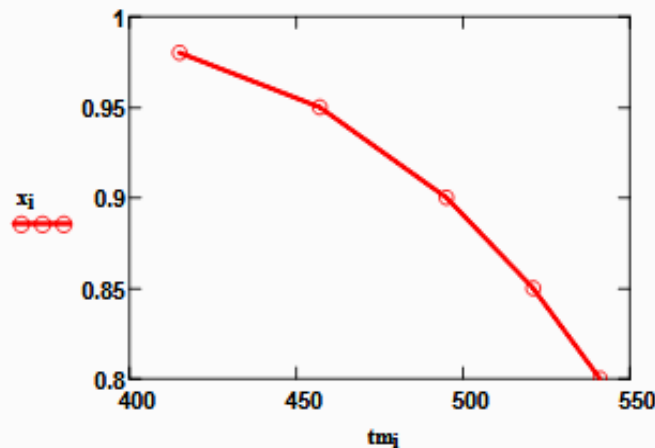


Рисунок 5 – Связь степени превращения и оптимальной температуры (оптимальная температурная последовательность или ЛОТ)

Вывод: При увеличении степени превращения температура, обеспечивающая максимальную скорость процесса (topt) снижается.

Задание 5 (не обязательное). Добавить к линии оптимальных температур зависимость равновесной степени превращения от температуры.

Составляем программу для расчета равновесной степени превращения при заданной t.

$$F(t, xp) := Kp(t) - \frac{xp \cdot \sqrt{1 - 0.5 \cdot a \cdot xp}}{(1 - xp) \cdot \sqrt{P \cdot (b - 0.5 \cdot a \cdot xp)}}$$

```

xp(t) :=
  eps ← 0.0001
  a ← eps
  b ← 1 - eps
  while (b - a) > eps
    xp ← (a + b) / 2
    a ← xp if F(t, a) · F(t, xp) > 0
    b ← xp otherwise
  xp
  
```

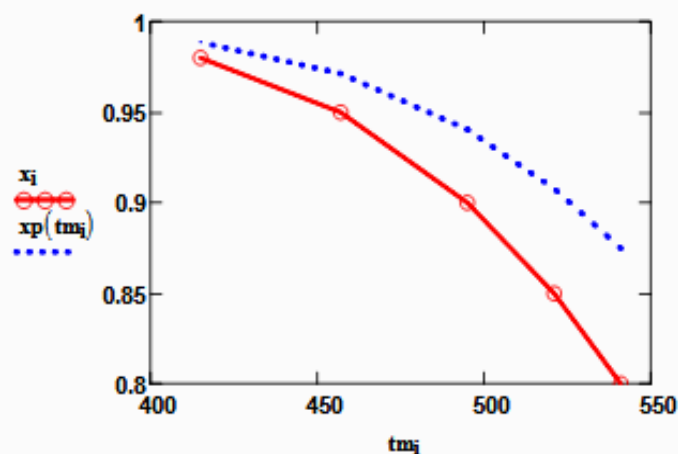


Рисунок 6 – ЛОТ и равновесная степень превращения

**ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР
НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторной работы №2 по дисциплине
«Химические реакторы» для студентов направления 18.03.01 –
Химическая технология

Составитель доц. А.Л. Проскурнин

Рецензент доц. А.И. Свидченко

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» Невинномысский
технологический институт (филиал)

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

Методические указания

по выполнению домашнего задания (контрольной работы) для
студентов направления 18.03.01 – «Химическая технология»

Невинномысск, 2020

Методические указания по выполнению контрольной работы по дисциплине «Химические реакторы» разработаны в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования в части содержания и уровня подготовки выпускников по направлению 18.03.01 – «Химическая технология» и предназначены для студентов очной формы обучения.

Методические указания включают требования к содержанию и оформлению контрольной работы (домашнего задания), указания по выполнению разделов работы, ее оформления и список рекомендуемой литературы.

Составил: доцент А.Л. Проскурнин

Отв. редактор: доцент А.Л. Свидченко

Содержание

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Цель контрольной работы | 4 |
| 2 | Содержание работы..... | 4 |
| 3 | Темы домашнего задания (контрольной работы)..... | 4 |
| 4 | Содержание разделов работы | 5 |
| 4.1 | Введение | 5 |
| 4.2 | Описание технологической схемы установки..... | 6 |
| 4.3 | Обзор и анализ существующих конструкций реакторных устройств | 6 |
| 4.4 | Оптимальные условия проведения процесса | 6 |
| 4.5 | Эксплуатация аппарата | 7 |
| 4.6 | Заключение..... | 7 |
| 4.7 | Список использованных источников | 7 |
| 5 | Список рекомендуемой литературы | 8 |
| 6 | Полезные ссылки..... | 10 |
| 7. | Рекомендации по оформлению работы | 11 |
| | Оформление текста | 11 |
| | Оформление рисунков | 11 |
| | Оформление графиков | 12 |
| | Оформление таблиц | 13 |
| | Формулы..... | 14 |
| | Список использованных источников | 15 |
| | Приложение | 16 |

1 Цель контрольной работы

Целью выполнения работы является закрепление и углубление теоретических знаний и приобретение практического опыта по выбору оптимальной конструкции реакторного устройства на основе литературных и патентных данных.

В результате выполнения самостоятельной работы у студентов формируются следующие компетенции или их части:

ПК-4 – способностью принимать конкретные технические решения при разработке технологических процессов, выбирать технические средства и технологии с учетом экологических последствий их применения;

ПК-7 – способностью проверять техническое состояние, организовывать профилактические осмотры и текущий ремонт оборудования, готовить оборудование к ремонту и принимать оборудование из ремонта;

ПК-8 – готовностью к освоению и эксплуатации вновь вводимого оборудования.

2 Содержание работы

Контрольная работа (домашнее задание) включает:

- титульный лист (по форме);
- содержание;
- введение;
- краткое описание технологической схемы установки (блока),

куда входит рассматриваемый аппарат;

- обзор и анализ существующих конструкций реакторных устройств (основного аппарата), являющихся темой домашнего задания (контрольной работы);

- оптимальные параметры работы реакционного аппарата;
- эксплуатация аппарата (загрузка и выгрузка катализатора);
- заключение;
- список использованных источников;
- приложение.

Графическая часть включает: технологическую схему, эскиз реакторного устройства, которые размещаются внутри работы.

3 Темы контрольной работы (домашнего задания)

В качестве объектов работы назначаются:

- печь обжига серного колчедана;
- реактор окисления SO_2 в SO_3 ;
- реактор гидрирования сернистых соединений, содержащихся в

природном газе;

- реакционная печь паровой конверсии природного газа;
- шахтный реактор паровоздушной конверсии метана;
- реактор паровой конверсии оксида углерода;
- реактор очистки синтез-газа от кислородосодержащих

соединений;

- колонна синтеза аммиака;
- реактор синтеза метанола;
- реакционная печь парового конверсии природного газа;

- реактор окисления аммиака;
- абсорбер нитрозных газов;
- реактор высокотемпературной очистки «выхлопных» газов;
- реактор низкотемпературной очистки «хвостовых» газов;
- реактор синтеза ацетилена;
- абсорбер поташной очистки синтез-газа от диоксида углерода;
- абсорбер очистки синтез-газа от диоксида углерода раствором

МЭА (МДЭА);

- аппарат синтеза аммиачной селитры;
- реактор синтеза сложных удобрений;
- экстрактор фосфорной кислоты;
- колонна синтез карбамида;
- комбинированный выпарной аппарат в производстве

аммиачной селитры.

В контрольной работе (домашнем задании) рассматривается реакционный аппарат одного из технологических процессов химической технологии неорганических веществ.

4 Содержание разделов работы

4.1 Введение

Во **введении** обосновывается необходимость и актуальность данной темы, ее современность, исходя из перспектив развития химической технологии неорганических веществ, разработке новых технологических процессов и реакторных устройств. Производится краткое описание целей и задач контрольной работы.

4.2 Описание технологической схемы установки

Приводится рисунок технологической схемы установки с указанием основных аппаратов и машин, а также линиями со стрелками – всех материальных потоков и дается ее описание. При описании технологической схемы дается краткий анализ

существующих или возможных мероприятий по энерго- и ресурсосбережению, включая: использование теплоты химических реакций, теплоты и энергии давления отходящих потоков; использование оборотного водоснабжения, выработку высокопотенциального и низкопотенциального тепла и др.

4.3 Обзор и анализ существующих конструкций реакторных устройств

В этом разделе рассматривают классификацию, устройство (с изображением эскизов), принципы работы, анализ достоинств и недостатков различных конструкций реакторных устройств, используемых для рассматриваемого технологического процесса. Большое внимание уделяют конструктивному оформлению аппарата с точки зрения условий гидродинамики, использованию тепла химической реакции, поддержания оптимального температурного режима, условий эксплуатации. Для этого используют данные производственной практики, учебников и технической и патентной литературы. На основании обзора выбирается принципиальная конструкция реакторного устройства для последующего рассмотрения.

4.4 Оптимальные условия проведения процесса

На основании термодинамических и кинетических закономерностей процесса, протекающего в реакционном аппарате, обосновывают параметры технологического режима (давление, температура, концентрации компонентов и др.), обеспечивающие максимальное использование сырья, получение большего выхода целевого продукта, подавление побочных процессов, совмещение технологических операций и т.д. Учитывается наличие катализатора, его активность и свойства.

4.5 Эксплуатация аппарата

В этом разделе рассматривают следующие вопросы:

- загрузка катализатора в аппарат;

- подготовка катализатора к пуску и остановке аппарата (продувка, восстановление);
- выгрузка катализатора;
- мероприятия, обеспечивающие безопасную работу аппарата.

4.6 Заключение

Подводят итоги проделанной работы: констатируют какой реакционный аппарат выбран и почему, какие его технико-экономические характеристики.

4.7 Список использованных источников

Литературные источники (включая регламенты, нормативно-технические документы) располагают в порядке упоминания в тексте пояснительной записки. Приводится список только тех литературных источников, на которые имеются ссылки в пояснительной записке. Оформляется он в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления [1].

В списке рекомендуемой литературы и списке использованных источников Вы на найдете ссылки на книги, учебники, справочники, патенты, статьи из научных журналов, статьи из сборников научных трудов, методические указания, электронные ресурсы удаленного доступа, оформленные в соответствии с этим ГОСТом.

Указанным ГОСТом допускается предписанный знак точку и тире, разделяющий области библиографического описания, заменять точкой.

5 Список рекомендуемой литературы

1. АММИАК: обзор современных технологий //NEWSCHEMISTRY.RU: аналитический портал химической промышленности. URL: http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=682 (дата обращения 15.01.19).
2. Воронцов К.Б. Химические реакторы. Учебное пособие - М: Эдитус, 2017. - 80 с. ISBN 978-5-00058-584-9. – Режим доступа: <https://narfu.ru/university/library/books/3217.pdf>.
3. Кондауров, Б. П. Общая химическая технология: учеб. пособие /Б. П. Кондауров, В. И. Александров, А. В. Артемов. – М.: Академия, 2012. – 336 с.
4. Основы проектирования химических производств: Учебник для вузов /Под ред. А. И. Михайличенко. – М.: ИКЦ «Академкнига» 2010.– 371. Доступно: <http://window.edu.ru/resource/145/75145/files/book-3.pdf>.
5. Атрощенко В.И., Каргин С.И. Технология азотной кислоты.– М.: Химия, 1970.– 496с.
6. Журналы: Техника и наука. Теоретические основы химической технологии. Процессы и аппараты. Ресурсосберегающие технологии. Химия и химическая технология. Экология. Экология и промышленность России. Химическое и нефтегазовое машиностроение. Проблемы машиностроения и надежность машин.
7. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химической технологии. Часть I. – СПб.: Проффессионал, 2004. 848 с.
8. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию /Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. Под. ред. Ю.И. Дытнерского.– М.: Химия, 1991.– 496 с.
9. Проскурнин А.А., Левченко Д.А. Совершенствование абсорбционной очистки синтез-газа от диоксида углерода при производстве уксусной кислоты. Материалы XL науч.-техн. конф. по итогам работы ППС СевКавГТУ за 2010 г., Т1. Естественные и

точные науки. Технические и прикладные науки.– Ставрополь: СевКавГТУ, 2011.– С. 177-179.

10. Синтез аммиака / Л.Д. Кузнецов [и др.]. Под ред. Л.Д. Кузнецова.– М.: Химия, 1982.– 296 с.

11. Способ получения метанола: пат. 2331625 / Рос. Федерация. № 2006106110/04: заявл. 28.02.2006; опубл. 20.09.2007.

12. Справочник азотчика: Производство разбавленной и концентрированной азотной кислоты. Производство азотных удобрений. Техника безопасности производств связанного азота и органических продуктов.– М.: Химия, 1987.– 455 с.

13. Справочник азотчика: Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака.– М.: Химия, 1986.– 512 с.

14. Справочник нефтехимика. В двух томах. Т.1. / Под ред. С.К. Огородникова.– Л.: Химия, 1978.– 496 с.

15. Справочник сернокислотчика.– М.: Химия, 1971.– 744 с.

16. Технология аммиачной селитры / Под ред. В.И. Олевского.– М.: Химия, 1978.– 311 с.

17. Технология синтетического метанола / Караваев М.М., Леонов В.Е., Попов И.Г., Шепелев Е.Т. Под ред. М.М. Караваева.– М.: Химия, 1984.– 240 с.

18. Общая химическая технология : Учебник для технических вузов / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.С. Беренгартен и др.– М.: Академкнига, 2007.– 528 с.

6 Полезные ссылки

<http://ru-patent.info/> – Патенты России. На данном сайте Вы можете ознакомиться с содержанием патентов на изобретения Российской Федерации. Представленные патентные документы содержат библиографические данные и описание изобретения.

<http://ru.espacenet.com/> – Сервер Российского патентного ведомства Espacenet хранит информацию о патентных документах

Российской Федерации и обеспечивает их поиск и отображение. Сервер также дает возможность доступа с интерфейсом на русском языке ко всемирной базе патентной информации и к патентным фондам различных стран и международных организаций.

<http://www.freepatentsonline.com/> – Доступ к патентной базе США, европейской и всемирной патентным базам.

<http://www.newchemistry.ru> – Аналитический портал химической промышленности «Новые химические технологии».

<http://www.abc.chemistry.bsu.by/current/a.htm> – списки бесплатных полнотекстовых научных химических журналов.

www.chemprom.org/ – Официальный сайт ежемесячного научно-технического журнала «Химическая промышленность сегодня». Позволяет достаточно быстро просмотреть содержание журналов, начиная с 2000 года. Оригиналы статей можно найти в библиотеке института.

window.edu.ru – Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" предоставляет свободный доступ к каталогу образовательных интернет-ресурсов и полнотекстовой электронной учебно-методической библиотеке.

<http://ru.wikipedia.org> – энциклопедия (русская), авторами, рецензентами и редакторами которой могут быть любые пользователи Интернета.

7. Рекомендации по оформлению работы

Оформление контрольной работы (домашнего задания) должно соответствовать требованиям, предъявляемым единой системой конструкторской документации – ЕСКД, которая представляет собой комплекс государственных стандартов, устанавливающих взаимосвязанные правила, требования и нормы по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации [2, 3].

В настоящих рекомендациях даются только некоторые общие требования к оформлению работы.

Оформление текста

Работа должна быть выполнена с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги формата А4 через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, шрифт Times New Roman, 14 пунктов. Текст работы следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: правое – 15 мм, левое – 30 мм, верхнее – 20 мм, нижнее – 25 мм., абзацный отступ 1,25 см. Нумерация страниц внизу по центру.

Разрешается использовать компьютерные возможности акцентирования внимания на определенных терминах, формулах, теоремах, применяя шрифты разной гарнитуры.

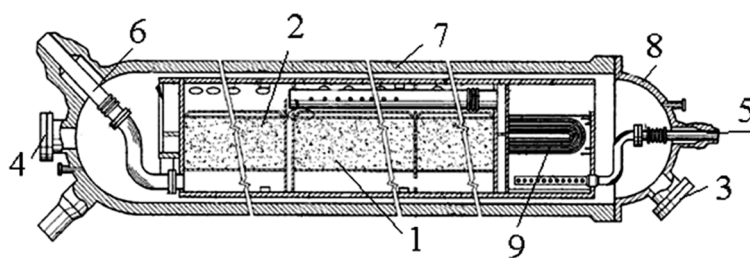
Оформление рисунков

В тексте помещают ссылку либо в виде заключенного в круглые скобки выражения (рисунок 3.1) либо в виде оборота: как это видно на рисунке 3.1.

Рисунки помещают непосредственно ниже абзацев, содержащих упоминание о них. Если места недостаточно, то в начале следующей страницы. Под рисунком располагают подрисуночную подпись. Подпись включает обозначение рисунка, порядковый номер и тематическое название. В состав подрисуночной подписи может входить также описание отдельных позиций рисунка.

Пример оформления рисунка:

На рисунке 3 приведена конструкция конвертера аммиака, позволяющая использовать высокоактивный катализатор.



1 – катализаторная корзина; 2 – высокоактивный катализатор;
3,4 – люк лаз; 5,6 – вход и выход синтез-газа; 7 – корпус колонны;
8 – крышка; 9 – теплообменные трубки.

Рисунок 3.4 – Горизонтальный конвертер аммиака с высокоактивным катализатором

Оформление графиков

Оси абсцисс и ординат графика вычерчиваются сплошными линиями. На концах координатных осей стрелок не ставят. Числовые значения масштаба шкал осей координат пишут за пределами графика (левее оси ординат и ниже оси абсцисс).

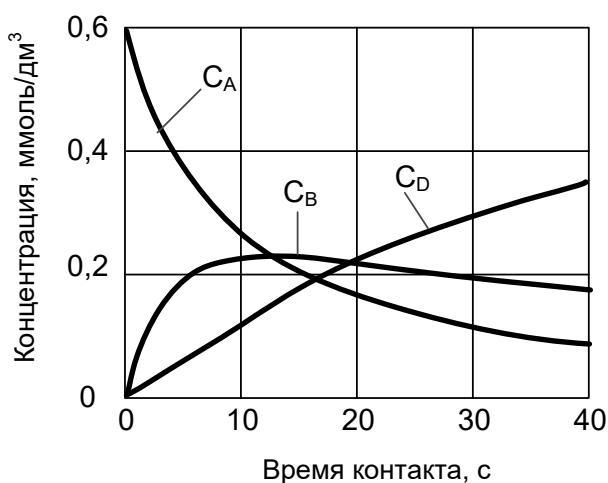


Рисунок 2.3 – Кинетические кривые реакции $A \rightarrow B \rightarrow D$

По осям координат должны быть указаны условные обозначения и размерности величин в принятых сокращениях. На графике следует писать только принятые в тексте условные буквенные обозначения. Под графиком располагают подпись, включающую в себя сокращенное обозначение графика, порядковый номер и тематическое название.

Оформление таблиц

Таблицы помещают после абзацев, содержащих ссылку на них, а если места недостаточно, то в начале следующей страницы.

Все таблицы должны быть пронумерованы. Над левым верхним углом таблицы помещают надпись: Таблица с указанием номера таблицы (например, Таблица 5.3). Таблицы снабжают тематическими заголовками, которые располагают после номера и тире и пишут прописным шрифтом без точки на конце. В таблице лучше использовать одинарный междустрочный интервал, а при выравнивании данных в ячейке – по левому краю или по центру.

Пример оформления таблицы:

Таблица 1.2 – Требования к карбамиду марки Б по ГОСТ 2081-2010

| Наименование показателя | Норма для марки Б | | | |
|---|--|------------|------------|-----------------------|
| | для растениеводства | | | для розничной продажи |
| | Высший сорт | 1-й сорт | 2-й сорт | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1. Внешний вид | Гранулы или кристаллы белого цвета или слегка окрашенные | | | |
| 2. Массовая доля азота в пересчете на сухое вещество, %, не менее | 46,2 | 46,2 | 46,2 | 46,2 |
| 3. Массовая доля биурета, %, не более | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,5 |
| 4. Массовая доля воды, %, не более: | | | | |
| гигроскопическая | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| общая | 0,5 | 0,5 | 0,6 | — |
| 5. Рассыпчатость, % | 100 | 100 | 100 | — |
| 6. Гранулометрический состав, %: | | | | |
| массовая доля гранул размером, мм: | | | | |
| от 1 до 4, не менее | 94 | 94 | 94 | — |
| от 2 до 4, не менее | 70 | 50 | — | — |
| менее 1, не более | 3 | 5 | 5 | — |
| остаток на сите 6 мм | Отсутствие | Отсутствие | Отсутствие | — |

Продолжение таблицы 1.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|----------|----------|----------|---|
| 7. Статическая прочность гранул, МПа (кг/см ²), не менее | 1,4 (14) | 1,2 (12) | 1,2 (12) | — |
| или в пересчете на 1 гранулу, Н, (кгс), не менее | 7 (0,7) | 5 (0,5) | 3 (0,3) | — |
| Примечание – Норма по показателю 6 установлена при использовании сит с круглыми отверстиями | | | | |

Формулы

В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные соответствующими государственными стандартами. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее в тексте, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова "где" без двоеточия после него.

Пример:

Диаметр реакционного аппарата рассчитываем по формуле [8, с. 213]

$$D_k = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}}, \quad (4.2)$$

где V – секундный объем газа, м³/с;

w – линейная скорость газа, м/с.

Оформление

В приложении приведен образец заполненного титульного листа контрольной работы.

Список использованных источников

1. ГОСТ Р 7.0.5–2008 Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. М., 2008. 19 с. (Система стандартов по информ., библи. и изд. делу).
2. Ганенко А.П., Лапсарь М.И. Оформление текстовых и графических материалов при подготовке дипломных проектов, курсовых и письменных экзаменационных работ: учеб. пособие для сред. проф. образования. 2-е изд., перераб. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 336 с.
3. Вольхин К.А. Конструкторские документы и правила их оформления: учеб. пособие для студ. техн. университетов. Новосибирск. 2004. URL: <http://www.propro.ru/graphbook/> (дата обращения 15.02.2015).

Приложение (обязательное)

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГАОУ ВО «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Невинномысский технологический институт

Кафедра химической технологии, машин и аппаратов химических производств

Контрольная работа

по дисциплине

«Химические реакторы»

на тему: _____

Выполнил:

(Фамилия, Имя, Отчество)

студент 4 курса, группы Н-ХТЛ-б-о-16-1
направления 18.03.01, очной ФО

(подпись)

Проверил:

Проскурнин А.Л., доцент каф. ХТМиАХП
(ФИО, должность, кафедра)

Невинномысск 201_

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

Методические указания

по выполнению контрольной работы для студентов заочной формы обучения направления 18.03.01 – «Химическая технология»

Составил: доц. А.Л. Проскурнин

Отв. редактор: А.Л. Свидченко

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

**Методические указания
для самостоятельных занятий по изучению дисциплины**

| | |
|-------------------------|---|
| Направление подготовки | 18.03.01 Химическая технология |
| Профиль | Химическая технология синтетических биологически активных веществ, химико-фармацевтических препаратов и косметических средств |
| Квалификация выпускника | бакалавр |
| Форма обучения | очная |
| Год начала обучения | 2020 |

Невинномысск 2020

Оглавление

| | |
|---|----|
| Оглавление | 3 |
| 1 Пояснительная записка..... | 4 |
| 2 Методические рекомендации по самостоятельному изучению дисциплины | 5 |
| 3 Подготовка к лекциям..... | 10 |
| 4 Самостоятельное изучение темы. Конспект..... | 11 |
| 5 Методические указания по подготовке к экзамену | 14 |
| Список рекомендуемой литературы..... | 15 |

1 Пояснительная записка

Дисциплина относится к вариативной части образовательной программы бакалавриата, в учебном плане она имеет индекс Б1.Б.06. Освоение дисциплины происходит в 6 семестре и заканчивается экзаменом.

Целью освоения дисциплины является формирование набора профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки 18.03.01 Химическая технология путем изучения основных принципов устройства и функционирования различных реакторных устройств, используемых в химической технологии неорганических веществ, теоретических основ проектирования химических реакторов в зависимости от протекающего химического процесса, наличия катализатора и эксплуатации аппаратов, их обслуживания.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен овладеть следующими общепрофессиональными компетенциями:

| Код | Формулировка: |
|------|---|
| ПК-4 | способностью принимать конкретные технические решения при разработке технологических процессов, выбирать технические средства и технологии с учетом экологических последствий их применения |
| ПК-7 | способностью проверять техническое состояние, организовывать профилактические осмотры и текущий ремонт оборудования, готовить оборудование к ремонту и принимать оборудование из ремонта |
| ПК-8 | готовностью к освоению и эксплуатации вновь вводимого оборудования |

Объем учебной дисциплины:

| | | |
|------------------------|---------|--------|
| | Астр. | |
| | часов | |
| Объем занятий: Итого | 135 ч. | 5 з.е. |
| В т.ч. аудиторных | 40,5 ч. | |
| Из них: | | |
| Лекций | 27 ч. | |
| Лабораторных работ | - | |
| Практических занятий | 13,5 ч. | |
| Самостоятельной работы | 94,5 ч. | |
| Экзамен 6 семестр | | |

В рамках курса дисциплины «Химические реакторы» самостоятельная работа студентов составляет 94,5 часов.

Самостоятельная работа студентов (СРС) – это активные формы индивидуальной и коллективной деятельности, направленные на закрепление, расширение и систематизацию пройденного материала по темам учебной дисциплины.

Самостоятельная работа является одним из видов учебных занятий студентов, целями которой являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать различные информационные источники: нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов, творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся, студентов могут быть использованы практические занятия, зачеты, тестирование, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и др.

2 Методические рекомендации по самостоятельному изучению дисциплины

На первом этапе необходимо ознакомиться с рабочей программой дисциплины, в которой рассмотрено содержание тем дисциплины

лекционного курса, взаимосвязь тем лекций с лабораторными и практическими занятиями, темы и виды самостоятельной работы. В таблице 1 приведена технологическая карта самостоятельной работы студента.

Таблица 1 – Технологическая карта самостоятельной работы студента

| Коды реализуемых компетенций | Вид деятельности студентов | Итоговый продукт самостоятельной работы | Средства и технологии оценки | Объем часов, в том числе (астр.) | | |
|------------------------------|---|---|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------|
| | | | | СРС | Контактная работа с преподавателем | Всего |
| 7 семестр | | | | | | |
| ОК-7 ПК-4 ПК-7 ПК-8 | Подготовка к практическому занятию | Отчет | Собеседование | 6.41 | 0.34 | 6.75 |
| ОК-7 ПК-4 ПК-7 ПК-8 | Самостоятельное изучение литературы | Конспект | Собеседование | 53.43 | 2.82 | 56.25 |
| ОК-7 ПК-4 ПК-7 ПК-8 | Выполнение домашнего задания (контрольной работы) | Контрольная работа | Контрольная работа | 10.69 | 0.56 | 11.25 |
| ОК-7 ПК-4 ПК-7 ПК-8 | Подготовка к экзамену | Экзамен | Вопросы к экзамену | 18.75 | 1.50 | 20.25 |
| Итого за 7 семестр | | | | 89.28 | 5,22 | 94.5 |

Самостоятельная работа студента в ходе лекционных занятий включает изучение вопросов теории, вынесенных на самостоятельное изучение в соответствии с рабочей программой дисциплины, проработку лекционных материалов для подготовки к практическим занятиям и контролю знаний на лекционных занятиях (опрос) и подготовку вопросов для обсуждения при консультации с преподавателем.

Работа с лекционным материалом не завершается по окончании лекции. На 2 часа лекции необходимо затратить около часа на работу с конспектом. За это время необходимо перечитать записи, пополнить их данными, которые удалось запомнить из речи преподавателя, но не удалось

записать. Работая с конспектом, нужно отметить непонятные вопросы для выяснения у преподавателя на консультации.

Самостоятельная работа в ходе **практических занятий** включает выполнение заданий к практическим занятиям, которые приведены в методических указаниях к практическим занятиям и фондах оценочных средств. **Контрольная работа** выполняется в соответствии с методическими указаниями.

Для успешного освоения дисциплины, необходимо самостоятельно детально изучить темы дисциплины. Рекомендуемые источники информации приведены в таблице 2, а перечень тем, их содержание и примерное время на их изучение представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Рекомендуемые источники информации

| № п/п | Темы для самостоятельного изучения | Рекомендуемые источники информации (№ источника) | | | |
|---|---|--|----------------|--------------|------------------|
| | | Основная | Дополнительная | Методическая | Интернет-ресурсы |
| 1 | Подготовка к практическим занятиям | 1, 2 | 1 | 1,4,5 | 4,7 |
| 2 | Самостоятельное изучение литературы | | | | |
| | Общие сведения о химических реакторах. | 1, 2 | 1 | 4 | 1,2,3,5 |
| | Моделирование химических реакторов. | 1, 2 | 1, 5, 6 | 2,3,4,5 | 7 |
| | Распределение времени пребывания в проточных реакторах. | 1, 2 | 5 | 2 | 7 |
| | Кинетика и макрокинетика химических процессов. | 1, 2 | 5 | 3 | 7 |
| | Теплоперенос в химических реакторах. | 1, 2 | 1, 2, 5 | 3 | 7 |
| | Промышленные химические реакторы. | 1, 2 | 2, 3, 4 | 4 | 5, 6 |
| | Эксплуатация химических реакторов. | 1, 2 | 3, 4 | 1 | 6 |
| Проектирование химических реакторов. Основные стадии проектирования химического оборудования. | 1, 2 | 1, 2 | 1, 5 | 6,7 | |

Таблица 3 – Темы для самостоятельного изучения дисциплины Химические реакторы и примерное время на изучение

| Наименование тем дисциплины, их краткое содержание | Объем часов (астр.) |
|---|---------------------|
| 1. Общие сведения о химических реакторах. Классификация химических аппаратов и режимов их работы. Влияние условий процесса на выбор конструкционных материалов. Требования, предъявляемые к реакторам. | 3,0 |

| | |
|--|-----|
| Технологические показатели работы химических реакторов. | |
| 2. Моделирование химических реакторов. | |
| 2.1. Моделирование химических реакторов и протекающих в них химических процессов. Структура математической модели химического реактора. Уравнения материального баланса для элементарного объема проточного химического реактора. | 4,5 |
| 2.2. Химические реакторы с идеальной структурой потока. Реактор идеального смешения. Условия идеальности. Модель периодического реактора идеального смешения. Модель проточного реактора идеального смешения. Модель реактора идеального вытеснения. | 3 |
| 2.3. Химические реакторы с неидеальной структурой потока. Причины отклонений от идеальности в проточных реакторах. Требования к моделям реакторов с неидеальной структурой потока. Ячеечная модель. Одно- и двухпараметрическая диффузионная модели. | 3 |
| 3. Распределение времени пребывания в проточных реакторах. | |
| 3.1. Функции распределения времени пребывания. Дифференциальная и интегральная функции распределения времени пребывания. Экспериментальное изучение функций распределения. Функции распределения времени пребывания в идеальных и неидеальных проточных реакторах. | 3,0 |
| 3.2. Распределение времени пребывания для разных моделей реакторов. Реактор идеального смешения. Реактор идеального вытеснения. Ячеечная модель (каскад реакторов идеального смешения). Диффузионная модель. Применение функций распределения времени пребывания при расчете химических реакторов. | 3,0 |
| 4. Кинетика и макрокинетика химических процессов. | |
| 4.1. Кинетика химических реакций. Скорость химической реакции. Простые и сложные реакции. Влияние факторов на скорость химических реакций. Влияние различных факторов на дифференциальную селективность. | 3,0 |
| 4.2. Макрокинетика гетерогенных некаталитических процессов. Макрокинетика в системе газ–твердое. Лимитирующая стадия – внешняя диффузия. Лимитирующая стадия – внутренняя диффузия. Лимитирующая стадия – химическая реакция. Определение лимитирующей стадии. Макрокинетика в системе газ–жидкость. Макрокинетика гетерогенных каталитических процессов. Области протекания химической реакции. Учет влияния внутренней диффузии. Степень использования внутренней поверхности катализатора. | 3,0 |
| 5. Теплоперенос в химических реакторах. | |
| 5.1. Тепловые режимы химических реакторов. Уравнение теплового баланса. Проточный реактор идеального смешения в неизотермическом режиме. Совместное решение уравнений материального и теплового балансов для стационарного адиабатического реактора идеального смешения. | 3,0 |
| 5.2. Способы увеличения степени превращения реагентов. Стационарный неадиабатический реактор идеального смешения. Периодический реактор идеального смешения в неизотермическом режиме. Реактор идеального вытеснения в неизотермическом режиме. | 2 |
| 5.3. Тепловая устойчивость реактора. Понятие устойчивости. Точки стационарности процесса. Параметрическая чувствительность. | 3 |
| 5.4. Оптимальный температурный режим и способы его осуществления. Температурный режим для простых необратимых реакций. Температурный режим для обратимых химических реакций. Линия оптимальных температур. Способы осуществления оптимального температурного режима. | 2,0 |
| 6. Промышленные химические реакторы. | |

| | |
|--|------|
| <p>6.1. Реакторы для проведения гомогенных реакций. Реакторы для проведения гомогенных реакций в газовой фазе. Пламенные экзотермические реакторы. Беспламенные экзотермические реакторы. Реакторы с теплообменной поверхностью. Реакторы для проведения гомогенных реакций в жидкой фазе. Реакторы с перемешиванием. Реакторы с полным вытеснением для проведения реакций в жидкой среде.</p> | 3,0 |
| <p>6.2. Реакторы для системы газ–жидкость. Виды реакторов для системы газ–жидкость. Реакторы с мешалками. Реакторы с механическим распылением жидкости. Реакционные аппараты колонного типа. Реакторы барботажного типа. Реакторы пленочного типа. Пенный реактор. Реакторы типа «эрлифт». Барботажный кожухотрубный реактор.</p> | 3,0 |
| <p>6.3. Реакторы для каталитических процессов. Состав катализаторов и требования к ним. Методы приготовления катализаторов. Регенерация катализатора. Реакторы с неподвижным слоем катализатора. Аппараты без теплообмена. Аксиальные аппараты. Радиальные аппараты. Горизонтальные реакторы. Реакторы с ситчатым слоем катализатора. Теплообмен в аппаратах с неподвижным слоем катализатора.</p> | 3,0 |
| <p>6.4. Новые промышленные реакторы. Основные направления совершенствования реакторов. Новые конструкции реакторов для производства аммиака, карбамида, метанола.</p> | 2 |
| <p>7. Эксплуатация химических реакторов.</p> | |
| <p>7.1. Обслуживание и ремонт химических реакторов. Показатели качества, характеризующие основные свойства реакторов. Оценка эксплуатационной надежности технологического оборудования. Техническая диагностика реакторов. Методы неразрушающего контроля. Выбор метода диагностики. Ремонт химических реакторов.</p> | 3,0 |
| <p>7.2. Безопасная эксплуатация реакторов. Важнейшие факторы, определяющие безопасность эксплуатации реакторов. Поддержание параметров процесса. Загрузка и выгрузка катализатора. Защита от коррозии. Методы и средства взрывозащиты химических реакторов. Обеспечение пожарной безопасности реакторов.</p> | 3,0 |
| <p>8. Проектирование химических реакторов. Основные стадии проектирования химического оборудования. Виды конструктивных документов. Данные для расчета, конструирования и выбора реакционного оборудования. Системы автоматизированного проектирования. Уравнения материального баланса. Стехиометрические расчеты. Термодинамический анализ. Расчет состава равновесной смеси. Кинетика реакции. Практический материальный баланс. Тепловой расчет реакторов. Практический тепловой баланс. Технологический расчет реакторов. Расчет объема реактора, высоты, диаметра штуцеров. Гидравлические расчеты. Расчет гидравлического сопротивления слоя катализатора.</p> | 4,25 |
| <p>Итого за 6 семестр</p> | |
| <p>56,25</p> | |

3 Подготовка к лекциям

Главное в период подготовки к лекционным занятиям – научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения. Четкое планирование своего рабочего времени и отдыха является необходимым условием для успешной самостоятельной работы. В основу его нужно положить рабочие программы изучаемых в семестре дисциплин.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на завтрашний день. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием успешной учебы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Слушание и запись лекций – сложный вид вузовской аудиторной работы. Внимательное слушание и конспектирование лекций предполагает интенсивную умственную деятельность студента. Краткие записи лекций, их конспектирование помогает усвоить учебный материал. Конспект является полезным тогда, когда записано самое существенное, основное и сделано это самим студентом. Не надо стремиться записать дословно всю лекцию. Такое «конспектирование» приносит больше вреда, чем пользы. Запись лекций рекомендуется вести по возможности собственными формулировками. Желательно запись осуществлять на одной странице, а следующую оставлять для проработки учебного материала самостоятельно в домашних условиях.

Конспект лекций лучше подразделять на пункты, параграфы, соблюдая красную строку. Этому в большой степени будут способствовать пункты плана лекции, предложенные преподавателям. Принципиальные места,

определения, формулы и другое следует сопровождать замечаниями «важно», «особо важно», «хорошо запомнить» и т.п. Можно делать это и с помощью разноцветных маркеров или ручек. Лучше если они будут собственными, чтобы не приходилось присить их у однокурсников и тем самым не отвлекать их во время лекции. Целесообразно разработать собственную «маркографию» (значки, символы), сокращения слов. Не лишним будет и изучение основ стенографии. Работая над конспектом лекций, всегда необходимо использовать не только учебник, но и ту литературу, которую дополнительно рекомендовал лектор. Именно такая серьезная, кропотливая работа с лекционным материалом позволит глубоко овладеть знаниями.

4 Самостоятельное изучение темы. Конспект

Конспект – наиболее совершенная и наиболее сложная форма записи. Слово «конспект» происходит от латинского «conspectus», что означает «обзор, изложение». В правильно составленном конспекте обычно выделено самое основное в изучаемом тексте, сосредоточено внимание на наиболее существенном, в кратких и четких формулировках обобщены важные теоретические положения.

Конспект представляет собой относительно подробное, последовательное изложение содержания прочитанного. На первых порах целесообразно в записях ближе держаться тексту, прибегая зачастую к прямому цитированию автора. В дальнейшем, по мере выработки навыков конспектирования, записи будут носить более свободный и сжатый характер.

Конспект книги обычно ведется в тетради. В самом начале конспекта указывается фамилия автора, полное название произведения, издательство, год и место издания. При цитировании обязательная ссылка на страницу книги. Если цитата взята из собрания сочинений, то необходимо указать соответствующий том. Следует помнить, что четкая ссылка на источник –

непременное правило конспектирования. Если конспектируется статья, то указывается, где и когда она была напечатана.

Конспект подразделяется на части в соответствии с заранее продуманным планом. Пункты плана записываются в тексте или на полях конспекта. Писать его рекомендуется четко и разборчиво, так как небрежная запись с течением времени становится малопонятной для ее автора. Существует правило: конспект, составленный для себя, должен быть по возможности написан так, чтобы его легко прочитал и кто-либо другой.

Формы конспекта могут быть разными и зависят от его целевого назначения (изучение материала в целом или под определенным углом зрения, подготовка к докладу, выступлению на занятии и т.д.), а также от характера произведения (монография, статья, документ и т.п.). Если речь идет просто об изложении содержания работы, текст конспекта может быть сплошным, с выделением особо важных положений подчеркиванием или различными значками.

В случае, когда не ограничиваются переложением содержания, а фиксируют в конспекте и свои собственные суждения по данному вопросу или дополняют конспект соответствующими материалами их других источников, следует отводить место для такого рода записей. Рекомендуется разделить страницы тетради пополам по вертикали и в левой части вести конспект произведения, а в правой свои дополнительные записи, совмещая их по содержанию.

Конспектирование в большей мере, чем другие виды записей, помогает вырабатывать навыки правильного изложения в письменной форме важные теоретических и практических вопросов, умение четко их формулировать и ясно излагать своими словами.

Таким образом, составление конспекта требует вдумчивой работы, затраты времени и труда. Зато во время конспектирования приобретаются знания, создается фонд записей.

Конспект может быть текстуальным или тематическим. В текстуальном конспекте сохраняется логика и структура изучаемого произведения, а запись ведется в соответствии с расположением материала в книге. За основу тематического конспекта берется не план произведения, а содержание какой-либо темы или проблемы.

Текстуальный конспект желательно начинать после того, как вся книга прочитана и продумана, но это, к сожалению, не всегда возможно. В первую очередь необходимо составить план произведения письменно или мысленно, поскольку в соответствии с этим планом строится дальнейшая работа. Конспект включает в себя тезисы, которые составляют его основу. Но, в отличие от тезисов, конспект содержит краткую запись не только выводов, но и доказательств, вплоть до фактического материала. Иначе говоря, конспект – это расширенные тезисы, дополненные рассуждениями и доказательствами, мыслями и соображениями составителя записи.

Как правило, конспект включает в себя и выписки, но в него могут войти отдельные места, цитируемые дословно, а также факты, примеры, цифры, таблицы и схемы, взятые из книги. Следует помнить, что работа над конспектом только тогда будет творческой, когда она не ограничена текстом изучаемого произведения. Нужно дополнять конспект данными из других источников.

В конспекте необходимо выделять отдельные места текста в зависимости от их значимости. Можно пользоваться различными способами: подчеркиваниями, вопросительными и восклицательными знаками, репликами, краткими оценками, писать на полях своих конспектов слова: «важно», «очень важно», «верно», «характерно».

В конспект могут помещаться диаграммы, схемы, таблицы, которые придадут ему наглядность.

Составлению тематического конспекта предшествует тщательное изучение всей литературы, подобранной для раскрытия данной темы. Бывает, что какая-либо тема рассматривается в нескольких главах или в разных

местах книги. А в конспекте весь материал, относящийся к теме, будет сосредоточен в одном месте. В плане конспекта рекомендуется делать пометки, к каким источникам (вплоть до страницы) придется обратиться для раскрытия вопросов. Тематический конспект составляется обычно для того, чтобы глубже изучить определенный вопрос, подготовиться к докладу, лекции или выступлению на семинарском занятии. Такой конспект по содержанию приближается к реферату, докладу по избранной теме, особенно если включает и собственный вклад в изучение проблемы.

5 Методические указания по подготовке к экзамену

Экзамен – это итоговый этап контроля полученных по предмету знаний. Для правильной организации этой части самостоятельной работы студент должен познакомиться с содержанием экзамена, уточнить форму его проведения; изучить вопросы для подготовки к экзамену. Чтобы успешно к нему подготовиться необходимо, провести большую самостоятельную работу по повторению и закреплению всего изученного материала. Повторение – процесс индивидуальный; каждый студент повторяет то, что для него трудно, неясно, забыто. Поэтому, прежде чем приступить к повторению, рекомендуется, сначала внимательно посмотреть вопросы к зачету, установить наиболее трудные, наименее усвоенные разделы и выписать их на отдельном листе. В процессе повторения анализируются и систематизируются все знания, накопленные при изучении программного материала: данные учебника, записи лекций, заметки, сделанные во время консультаций, практических и лабораторных занятий. Закончив работу над вопросом, необходимо воспроизвести материал вслух и сделать на черновике по памяти опорный план ответа, так как часто имен такой план, воспринимается зрительными анализаторами и позволяет лучше закрепить изученный материал.

Список рекомендуемой литературы

1. Основная литература:

1. Кондауров, Б. П. Общая химическая технология : [Учеб. пособ] / Б.П. Кондауров, В.И. Александров, А.В. Артемов. - М. : Академия, 2005. - 336 с. - На учебнике гриф: Рек.УМО. - Библиогр.: с. 328-328. - ISBN 5-7695-1792-1

2. Основы проектирования химических производств : учебник / В. И. Косинцев [и др.] ; Под ред. А. И. Михайличенко. - М. : Академкнига, 2008. - 332с. - Библиогр.: с. 325. - ISBN 978-5-94628-319-9

3. Техническая эксплуатация и ремонт технологического оборудования Электронный ресурс : Учебное пособие / Р. С. Фаскиев [и др.]. - Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2011. - 261 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 2227-83972.

Дополнительная литература:

4. Борщев, В. Я. Основы безопасной эксплуатации технологического оборудования Электронный ресурс : Учебное пособие / В. Я. Борщев. - Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2012. - 97 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 2227-8397

5. Новый справочник химика и технолога. Радиоактивные вещества. Вредные вещества. Гигиенические нормативы / [Л. А. Аликбаева, М. А. Афонин, А. П. Ермолаева-Маковская и др. ; [под ред. А.В. Москвина и др.]. - Санкт-Петербург : Профessional, 2005. - 1141 с. - (Профessional). - Библиогр.: с. 1099-1100. - Указатели: с. 1101-1135. - ISBN 5-98371-025-7

6. Справочник азотчика. Т1: Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака. / Н.М.Жаворонков, И.М.Кисиль, В.М.Олевский. - 2-е изд., перераб. - М:Химия,1986. - 512с.:ил. - с494.5. Иванов Г.Н., Ляпков А.А., Бочкарев В.В. Расчеты реакционной аппаратуры химических производств.

Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – 114 с. Доступно: <http://window.edu.ru/resource/931/73931/files/tutorial8.pdf>.

7. Математическое моделирование гидродинамических характеристик реактора [Электронный ресурс] : методические указания / сост. А. А. Гайфуллин, Ф. И. Воробьева, С. Н. Тунцева. — Электрон. текстовые данные. — Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2016. — 36 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/62187.html>

3. Учебно-методическая литература

1. Химические реакторы: методические указания по выполнению домашнего задания для студентов направления 18.03.01 – Химическая технология /Сост. А.Л. Проскурнин / отв. ред. А.И. Свидченко. – Невинномысск, НТИ, 2018. – 18 с.

2. Исследование гидродинамической структуры потока в реакторе : методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Химические реакторы» для студентов направления 18.03.01 – Химическая технология /Сост. А.Л. Проскурнин / отв. ред. А.И. Свидченко. – Невинномысск, НТИ, 2017. – 26 с.

3. Построение линии оптимальных температур на основе кинетических данных : методические указания по выполнению лабораторной работы №2 по дисциплине «Химические реакторы» для студентов направления 18.03.01 – Химическая технология /Сост. А.Л. Проскурнин / отв. ред. А.И. Свидченко. – Невинномысск, НТИ, 2018. – 31 с.

4. Расчет основных показателей работы реакторов : методические указания к практическому занятию №1 по дисциплине «Химические реакторы» для студентов направления 18.03.01 – Химическая технология /Сост. А.Л. Проскурнин / отв. ред. А.И. Свидченко. – Невинномысск, НТИ, 2016. – 28 с.

5. Расчет материального и теплового балансов : методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Химические реакторы» для

студентов направления 18.03.01 – Химическая технология /Сост. А.Л. Проскурнин / отв. ред. А.И. Свидченко. – Невинномысск, НТИ, 2016. – 25 с.

4. Интернет-ресурсы:

1. <http://ru.espacenet.com/> – Сервер Российского патентного ведомства Espacenet. Дает возможность доступа с интерфейсом на русском языке ко всемирной базе патентной информации.

2. <http://biblioclub.ru/> — ЭБС «Университетская библиотека онлайн»

3. <http://catalog.ncstu.ru/>— электронный каталог ассоциации электронных библиотек учебных заведений и организаций СКФО.

4. <http://www.iprbookshop.ru> - Электронная библиотечная система

5. <http://www.newchemistry.ru> – Аналитический портал химической промышленности «Новые химические технологии».

6. http://www.ence-gmbh.ru/rus/tech_chemical_processing_equipment.php – Химическое промышленное оборудование.

7. <http://window.edu.ru/> – единое окно доступа к образовательным ресурсам.

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

Методические указания для самостоятельных занятий по изучению дисциплины

| | |
|------------------------|----------------------------------|
| Составитель | канд. хим. наук А.Л. Проскурнин. |
| Ответственный редактор | канд. техн. наук А.И. Свидченко |