

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Кафедра химических технологий

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

«ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ»

для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению
18.03.01 «Химическая технология»

Владимир – 2016 г.

Данные методические указания включают рекомендации по содержанию и выполнению лабораторных работ по дисциплине «Химические реакторы» для студентов направления 18.03.01 «Химическая технология» ВлГУ.

Методические указания составлены на основе требований ФГОС ВО и ОПОП направления 18.03.01 «Химическая технология», рабочей программы дисциплины «Химические реакторы».

Рассмотрены и одобрены на
заседании УМК направления
18.03.01 «Химические реакторы»
Протокол № 1 от 5.09.2016 г.
Рукописный фонд кафедры ХТ ВлГУ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

"Изучение работы реактора идеального смешения периодического действия"

Данная работа представлена в учебном пособии автора УМКД Христофоровой И.А. "Общая химическая технология. Химико-технологические расчеты в процессах электролиза, синтеза материалов и химических реакторах": учебное пособие. Владимир: изд-во ВлГУ, 2012. – 51 с., которое представлено 72 экземплярами в библиотеке ВлГУ и электронной версией в электронной библиотеке по ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/2745/1/00273.pdf>.

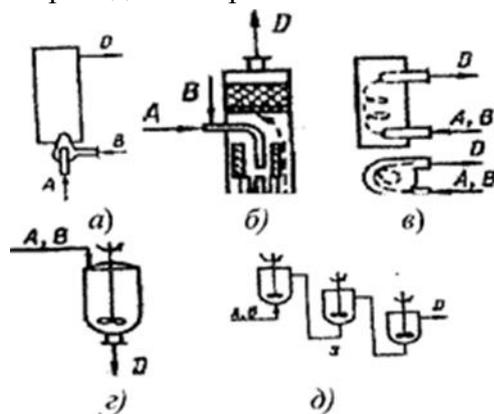
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

«Моделирование процесса проведения последовательной необратимой реакции $A \rightarrow B \rightarrow C$ с применением реактора идеального смешения, идеального вытеснения и каскада реактора идеального смешения»

I. Теоретическая часть.

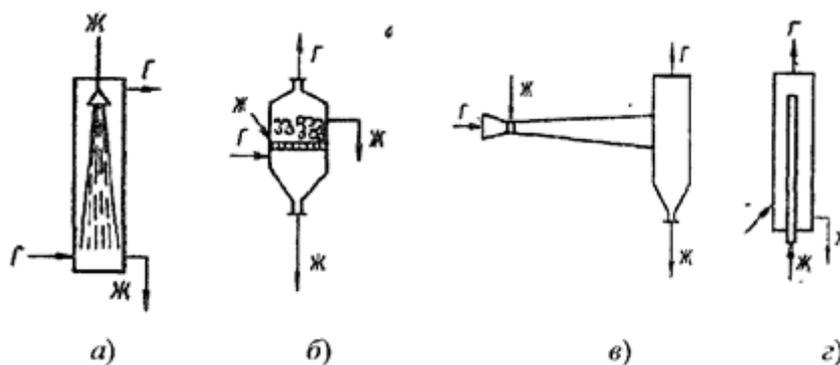
1.1. Понятие химических реакторов и их виды

Химический реактор – аппарат, предназначенный для проведения в нем химических превращений. Химический реактор – обобщенное понятие, относящееся к реакторам, колоннам, башням, автоклавам, камерам, печам, контактными аппаратам, полимеризаторам и другим аппаратам. Схемы приведены на рис. 1 – 2.



(Рис.1)

Типы реакторов на рис. 1 а) камерный реактор с горелками (РИВ); б) камерный реактор с горелками (промежуточный режим); в) камерный реактор с сильным перемешиванием, изотермический; д) каскад реакторов полного смешения.



(Рис.2)

Требования, предъявляемые к химическим реакторам: 1) обеспечение наибольшей производительности и интенсивности; 2) максимально высокая степень превращения при максимальной селективности процесса; 3) малые энергетические затраты на транспортировку и перемешиванием реагентов; 4) простота устройства и дешевизна; 5) наиболее полное использование теплоты экзотермических реакций и теплоты, подводимой извне, для осуществления эндотермических реакций; 6) надежность в работе, по возможности механизация и автоматизация ХТП.

Для реакторов характерны разнообразные конструктивные решения и различные способы их действия. Но несмотря на различия в конструкции, имеются общие для всех реакторов характеристики их функционирования. К ним относятся способ подвода реагентов и продуктов реакции; режим движения и перемешивания реагентов в реакционном пространстве реактора; условия теплообмена и температурный режим в аппарате; фазовый состав реагентов и продуктов реакции.

1.2. Классификация химических реакторов

Наиболее важными характеристиками работы реактора являются: 1) способ подвода и отвода реагентов; 2) режим движения и перемешивания реагентов; 3) температурный режим в реакционном объеме аппарата.

1. Способ подвода и отвода реагентов.

Реакторы периодического действия. Реагенты в эти реакторы загружают в начале технологического процесса. После наступления определенной степени превращения продукта аппарат разгружают. Основные параметры процесса (температура, давление, концентрация реагентов и продуктов реакции) изменяются во времени. Реакторы периодического действия, как правило, работают при сильном перемешивании компонентов, близком к полному смешению, при одинаковой температуре во всем реакционном объеме в любой момент работы.

Реакторы непрерывного действия (проточные) от пуска до выгрузки непрерывно загружаются исходными веществами и выводят из них продукты реакции. Величина, обратная времени пребывания, называется объемной скоростью V , которую можно определить как отношение расхода материала (т.е. объем поступающего вещества Vp за время τ) к полезному реакционному объему v : $V = Vp/v$.

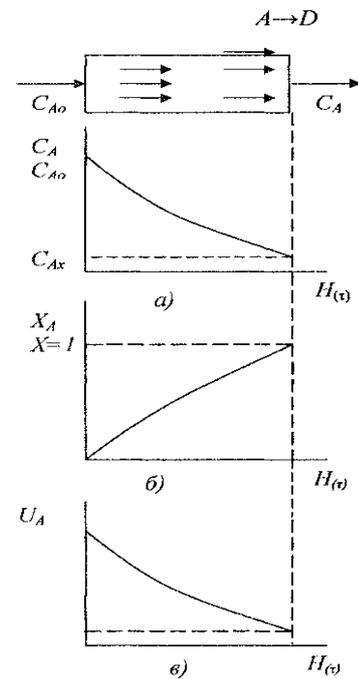
Таким образом, объемная скорость может характеризовать производительность непрерывно действующего аппарата.

Реакторы полупериодического (полунепрерывного) действия характеризуются тем, что сырье поступает в аппарат непрерывно или отдельными частями через равные проме-

жутки времени, а продукты реакции выгружаются периодически. Возможна и непрерывная выгрузка продукта при периодической подаче сырья. Эти реакторы работают в переходном режиме, основные параметры процесса изменяются во времени.

2. Режим движения и перемешивания реагентов.

Имеются два вида перемешивания реагентов в потоке, проходящем че-рез реактор, - продольное (осевое) и радиальное. Продольное перемешивание обуславливает смешение компонентов потока, только что вошедших в реактор, с ранее находящимися в нем, т.е. перемешивание вдоль длины (высоты) реактора. Радиальное перемешивание обуславливает смешение компонентов внутри слоя движущегося потока по его радиусу. Продольное перемешивание выравнивает концентрационные и температурные поля по длине реактора, а радиальное - по его радиусу. Продольное перемешивание определяет тип реактора, так как оно характеризует структуру потока, неоднородности поля скоростей, концентраций и температур, время пребывания компонентов в реакционной



(Рис.3)

зоне, интенсивность смешения продуктов реакции и исходных веществ, т.е. все то, что наиболее существенно влияет на протекание химико-технологических процессов (ХТП). Поэтому по режиму движения и перемешивания реагентов существует два типа реакторов непрерывного действия: идеального вытеснения и полного смешения (идеального перемешивания).

Реактор идеального вытеснения (рис. 3) характеризуется тем, что реагенты последовательно без перемешивания ламинарным потоком проходят весь реакционный путь, который определяется длиной аппарата. Время пребывания τ любого элемента объема равно среднерасходному времени, определяемому по уравнению где v - реакционный объем аппарата; V_p - объемный расход реагентов; H - высота реакционного пространства; ω - фиктивная, рассчитанная на полное сечение скорость потока.

По длине изотермического реактора (см. рис. 3) монотонно уменьшаются концентрация реагентов и скорость реакции, так как исходные реагенты расходуются, а выход продукта увеличивается.

Кинетическая модель реактора идеального вытеснения для необратимой реакции $aA + \dots \rightarrow dD$ представлена на рис. 4.

Характеристическое уравнение реактора идеального вытеснения имеет вид:

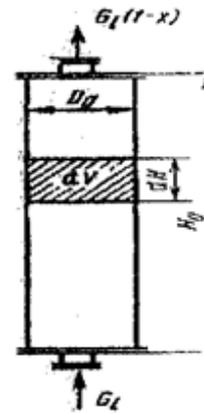
$$\tau = \frac{v}{V_p} = c_A^0 \int_0^x \frac{dx}{k_B c_A^n} = \frac{1}{k_B (c_A^0)^{n-1}} \int_0^x \frac{dx}{(1-x)^n},$$

где $v = \tau V_p$ — реакционный объем реактора; c_A^0 - исходная концентрация A; c_A - текущая концентрация A; x_A - степень превращения A; k_B - константа

скорости реакции, осуществляемой в режиме вытеснения; n — порядок реакции.

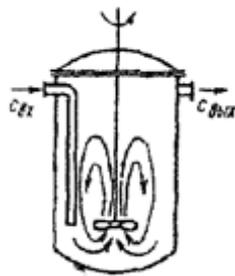
По модели вытеснения возможно рассчитывать многие технологические реакторы, например пленочные

абсорберы, полые реакторы для гомогенных процессов в жидкой и газовой фазах, в частности башни для окисления, а также шахтные печи.



(Рис.4)

Реактор идеального смешения (РИС) характеризуется тем, что частицы реагента, попавшие в данный момент времени в аппарат, при помощи интенсивного перемешивания имеют равную со всеми частицами вероятность первыми покинуть его. В реакторах полного смешения любой элемент объема мгновенно смешивается со всем содержимым реактора, так как скорость циркуляционных движений по высоте и сечению аппарата во много раз больше, чем скорость линейного перемешивания по оси реактора. Физической моделью реактора полного смешения может служить смеситель с пропеллерной мешалкой (рис. 5).



(Рис.5)

Математическое описание реактора идеального смешения при начальной концентрации целевого продукта равной 0 может быть записано в виде:

$$\tau_{cp} = \frac{v}{V_p} = \frac{c_u^0 x_u}{k_c c_u^n} = \frac{c_u^0 x_u}{k_c [c_u^0 (1-x_u)]^n} = \frac{1}{k_c (c_u^0)^{n-1}} = \frac{x_u}{(1-x_u)^n}$$

Скорость процесса, осуществляемого при полном перемешивании веществ, можно записать в виде:

$$r = G/\tau = k_c \cdot v \cdot \Delta c_k$$

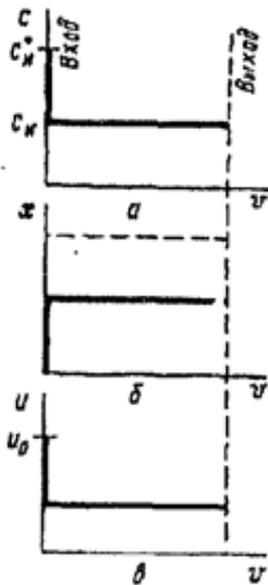
где v - реакционный объем; Δc_k — конечная движущая сила.

На рис. 6 показаны характеристические зависимости реактора полного перемешивания.

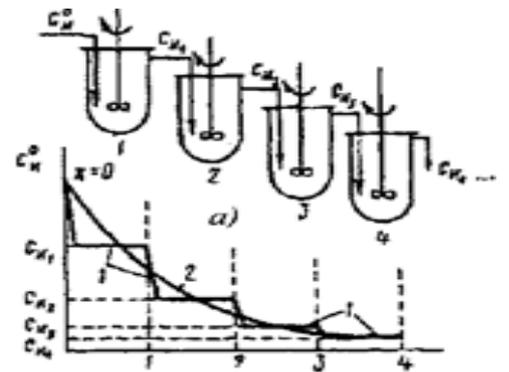
По типу реакторов полного смешения работают смесители с механическими, пневматическими и струйными сме-

сительными устройствами, реакторы с разбрызгиванием жидкости за счет кинетической энергии потока газа (абсорберы).

Каскад реакторов полного перемешивания применяется для обеспечения достаточно высокого значения выхода продукта, так как в единичном реакторе смешения при больших степенях преобразования



(Рис.6)



(Рис.7)

движущая сила процесса стремится к нулю и его скорость оказывается очень низкой. В каскаде реакторов полного перемешивания со сравнительно небольшой степенью превращения в каждой ступени (рис. 7) состав реакционной смеси изменяется при переходе из одного аппарата в другой, а в каждом реакторе концентрационные и температурные поля безградиентны. Расчет каскада ведется путем суммирования всех изменений, проходящих в каждой ступени каскада.

Концентрация основного вещества, выходящего из TV-го реактора каскада, для необратимой реакции будет иметь

вид:

$$c_{1uN} = (c_{1u^0}) / ((1 + k_1 c_{1u} \tau)^N)$$

Число реакторов в каскаде определится по следующему выражению:

$$N = \frac{\lg(c_{1u^0}/c_{1uN})}{\lg(1 + k_1 c_{1u} \tau)} = \frac{\lg x}{\lg(1 + k_1 c_{1u} \tau)}$$

Уравнение скорости процесса для каскада из N реакторов можно записать следующим образом:

$$r = \frac{dG}{d\tau} = k_c \left(\sum_{i=1}^m v_i \right) N \Delta c_{cp}$$

где $\sum_{i=1}^m v_i$ - сумма реакционных объемов; Δc_{cp} - средняя движущая сила по всему каскаду, которая вычисляется как средняя логарифмическая. Схема и общий вид каскада реакторов приведен на рис. 7.

3. Температурный режим в реакционном объеме аппарата

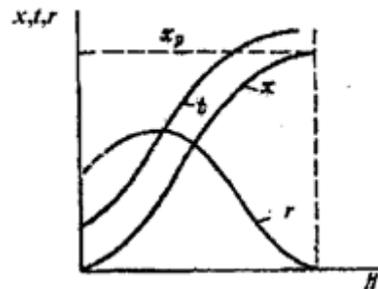
По температурному режиму реакторы делятся на адиабатические, изотермические и политермические. Адиабатические реакторы. Данного вида аппараты при спокойном течении потока реагентов не имеют теплообмена с окружающей средой, т.е. снабжены хорошей изоляцией. Вся теплота реакции аккумулируется потоками реагирующих веществ. Температурный режим процесса в любой точке по высоте реактора описывается уравнением

$$t_k = t_n \pm \frac{\Sigma q_p}{Gc} x = t_n \pm \frac{c_u^0 q_p}{c} x,$$

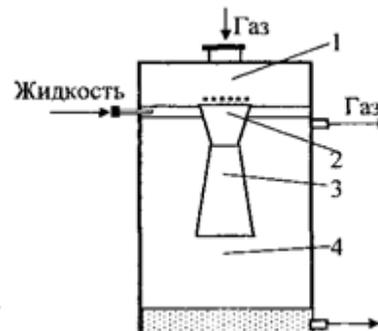
где t_K , t_H - конечная и начальная температуры системы; q_p - тепловой эффект реакции при полном превращении исходного вещества; G - общая масса реакционной смеси; \bar{c} - средняя удельная теплоемкость смеси в интервале температур t_H - t_K ; x - степень превращения;

- начальная концентрация исходного вещества. Знак "+" соответствует экзотермическому процессу, а знак "-" - эндотермическому.

Степень превращения, скорость реакции и температура по высоте адиабатического реактора вытеснения, в котором протекает экзотермическая реакция, изменяется по кривой, представленной на рис. 8.



(Рис.9)



(Рис.10)

Скорость реакции на входе в реактор невысокая из-за низкой температуры системы, а на участках, близких к выходу, она тоже мала, так как степень превращения стремится к равновесной степени превращения x_p (или к единице).

По типу, близкому к адиабатическому реактору вытеснения, работают контактные аппараты с фильтрующим слоем катализатора, камерные реакторы для осуществления гомогенных реакций, прямоточные абсорберы с изолирующей футеровкой (рис. 14) и др.

Адиабатические реакторы имеют постоянную температуру во всех точках реакционного объема, т.е. $t_K = t_{cp}$ во времени и пространстве. Способы достижения изотермичности различны. Возможно приблизиться к изотермическим условиям процесса при помощи теплообменников, помещенных в реакционный объем (для теплоты в экзотермических и подвода в эндотермических реакциях). При этом в каждом элементарном объеме аппарата отвод или подвод теплоты Q_p должен быть равен теплоте реакции Q_r , т.е.

$$Q_p = q_p c_u^0 x G = k_T F \Delta t_{cp} \tau = Q_r$$

Где k_T - коэффициент теплопередачи через теплообменную поверхность F при средней движущей силе Δt_{cp} за время τ .

В изотермических реакторах постоянство температуры обеспечивается перемешивающими устройствами и применением кипящего слоя.

Политермическими называются реакторы, в которых теплота реакции лишь частично компенсируется за счет отвода (подвода) теплоты или процессов с тепловым эффектом, противоположным по знаку основному.

К политермическим аппаратам относят реакторы с малой степенью смешения реагирующих веществ и теплообменниками, помещенными внутри реакционного объема, например трубчатые контактные аппараты.

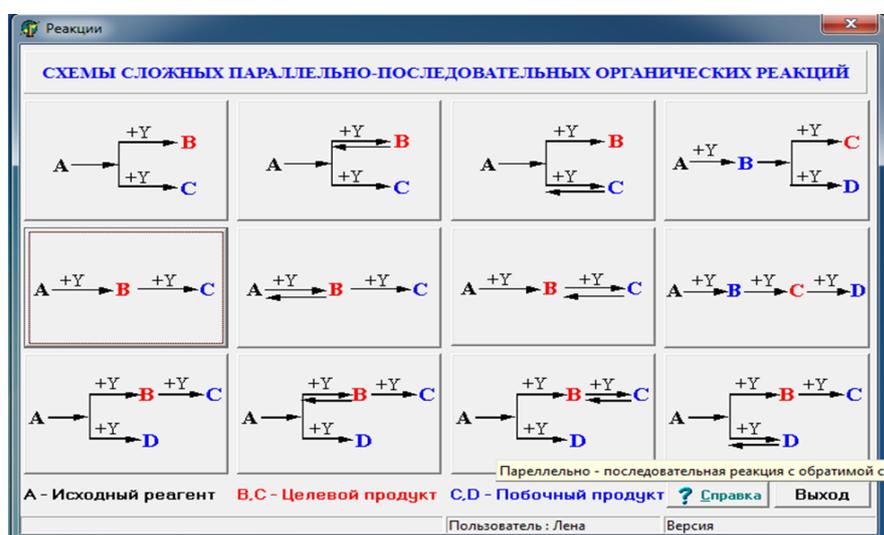
Цель работы: смоделировать процесс последовательной необратимой реакции с применением реактора идеального смешения, идеального вытеснения, и каскада реактора идеального смешения.

Задание

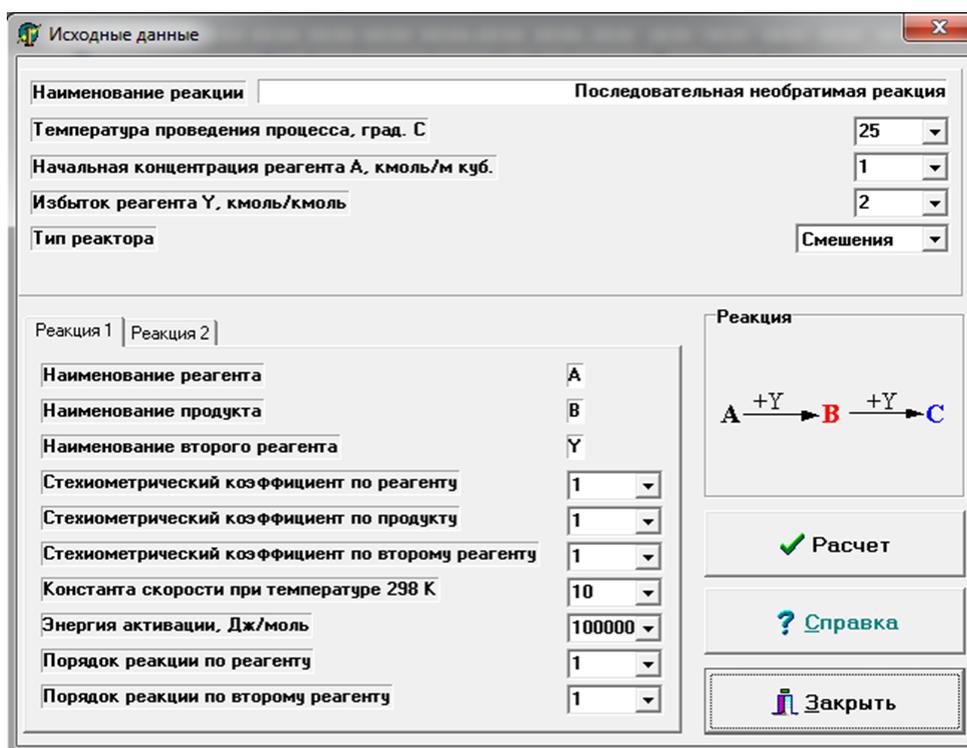
- 1) Изучить теоретические основы данной работы, ознакомиться с методикой проведения эксперимента.
- 2) Получить у преподавателя допуск и задание к лабораторной работе.
- 3) С помощью программы «Реактор» смоделировать процесс проведения последовательной необратимой реакции с применением реактора идеального смешения, идеального вытеснения и каскада реактора идеального смешения.
- 4) Сделать необходимые расчеты.
- 5) Составить отчет о работе и защитить его.

Методика проведения эксперимента

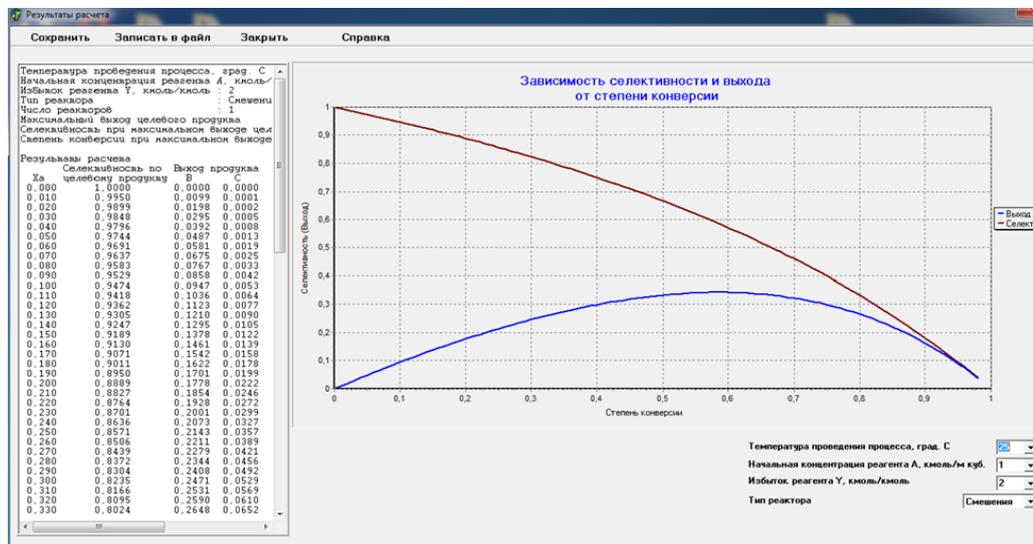
- 1) В программе «Реактор» выбрать нужный процесс проведения реакции.



- 2) Выбрать тип реактора и ввести исходные данные в соответствующие ячейки.



- 3) После ввода исходных данных, нажать клавишу «расчет».
- 4) По полученному графику зависимости сравнить данные, и сделать вывод о влиянии этих условий на процесс.



- 5) Повторить пункты 2-4 для каждого вида реактора при заданных температурах.
- 6) Сделать общий вывод о проведенной работе, оформить все графики в отчет.

Контрольные вопросы

- 1) Определение и назначение химического реактора.
- 2) Классификация химических реакторов.
- 3) Понятие и характеристика реактора идеального смешения.
- 4) Понятие и характеристика реактора идеального вытеснения.
- 5) Каскад реакторов смешения.
- 6) Расскажите о методике проведения эксперимента.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

" Моделирование процесса проведения последовательной обратимой реакции с применением реактора идеального смешения, идеального вытеснения и каскада реактора идеального смешения"

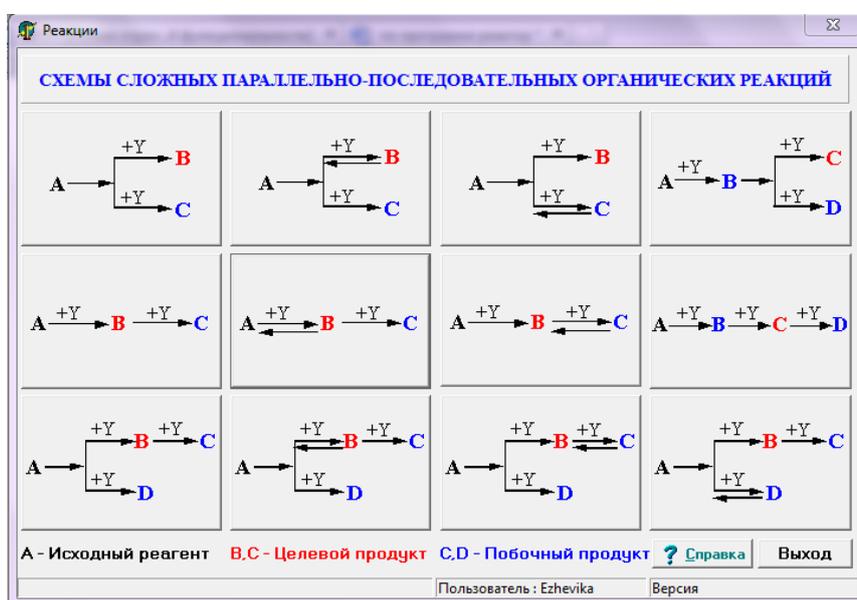
Цель работы: смоделировать процесс последовательной обратимой реакции с применением реактора идеального смешения, идеального вытеснения и каскада реактора идеального смешения.

Задание

- 1) Изучить теоретические основы данной работы, ознакомиться с методикой проведения эксперимента.
- 2) Получить у преподавателя допуск и задание к лабораторной работе.
- 3) С помощью программы «Реактор» смоделировать процесс проведения параллельной необратимой реакции с применением реактора идеального смешения, идеального вытеснения и каскада реактора идеального смешения.
- 4) Сделать необходимые расчеты.
- 5) Составить отчет о работе и защитить его.

Методика проведения эксперимента

- 1) В программе «Реактор» выбрать нужный процесс проведения реакции.



- 2) Выбрать тип реактора и ввести исходные данные в соответствующие ячейки.

Наименование реакции Последовательная реакция с обратимой стадией

Температура проведения процесса, град. С 25

Начальная концентрация реагента А, кмоль/м куб. 1

Избыток реагента Y, кмоль/кмоль 2

Тип реактора Смешения

Реакция 1 | Реакция 2 | Реакция 3

| | |
|---------------------------------------------------|--------|
| Наименование реагента | A |
| Наименование продукта | B |
| Наименование второго реагента | Y |
| Стехиометрический коэффициент по реагенту | 1 |
| Стехиометрический коэффициент по продукту | 1 |
| Стехиометрический коэффициент по второму реагенту | 1 |
| Константа скорости при температуре 298 K | 10 |
| Энергия активации, Дж/моль | 100000 |
| Порядок реакции по реагенту | 1 |
| Порядок реакции по второму реагенту | 1 |

Реакция

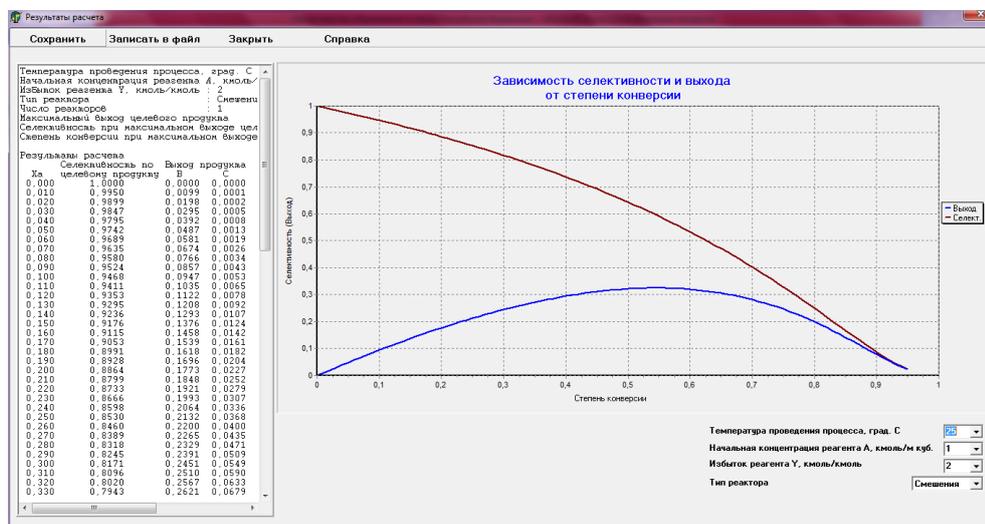
A $\xrightleftharpoons{+Y}$ B $\xrightleftharpoons{+Y}$ C

Расчет

Справка

Закрыть

- После ввода исходных данных, нажать клавишу «расчет».
- По полученному графику зависимости сравнить данные, и сделать вывод о влиянии этих условий на процесс.



- Повторить пункты 2-4 для каждого вида реактора при заданных температурах.
- Сделать общий вывод о проведенной работе, оформить все графики в отчет.

Контрольные вопросы

- Назовите характеристики работы реактора.
- Требования, предъявляемые к химическим реакторам.
- Назовите параметры технологического процесса в реакторе идеального вытеснения.
- Что можно использовать для достижения высоких степеней превращения исходных веществ в реакторе полного смешения.
- Выбор типа реактора, особенности конструкции и режима.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

«Моделирование процесса проведения параллельной необратимой реакции с применением реактора идеального смешения, идеального вытеснения и каскада реактора идеального смешения».

Цель работы: смоделировать процесс проведения параллельной необратимой реакции с применением реактора идеального смешения, идеального вытеснения и каскада реактора идеального смешения.

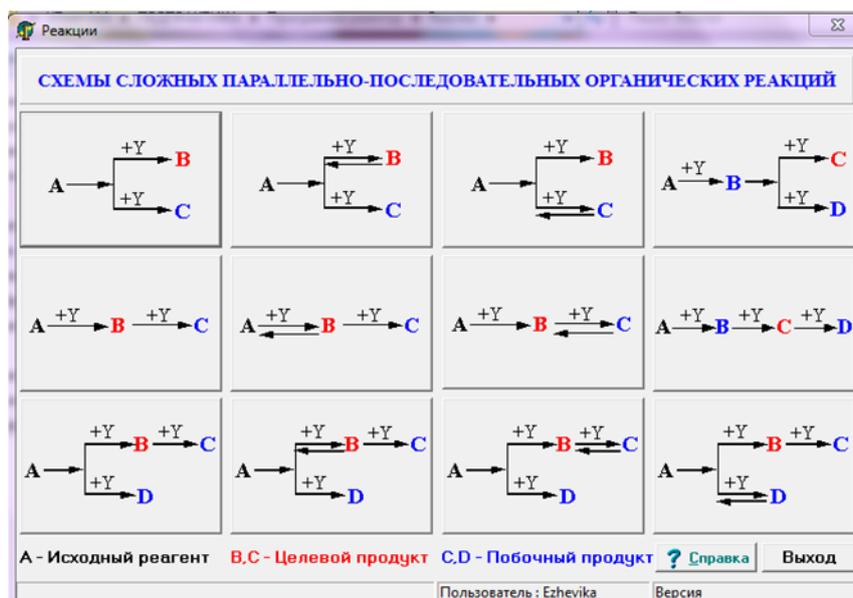
Задание

- Изучить теоретические основы данной работы, ознакомиться с методикой проведения эксперимента.
- Получить у преподавателя допуск и задание к лабораторной работе.

- 3) С помощью программы «Реактор» смоделировать процесс проведения параллельной необратимой реакции с применением реактора идеального смешения, идеального вытеснения и каскада реактора идеального смешения.
- 4) Сделать необходимые расчеты.
- 5) Составить отчет о работе и защитить его.

Методика проведения эксперимента

- 1) В программе «Реактор» выбрать нужный процесс проведения реакции.



- 2) Выбрать тип реактора и ввести исходные данные в соответствующие ячейки.

Исходные данные

Наименование реакции: Параллельная необратимая реакция

Температура проведения процесса, град. С:

Начальная концентрация реагента А, кмоль/м куб.:

Избыток реагента Y, кмоль/кмоль:

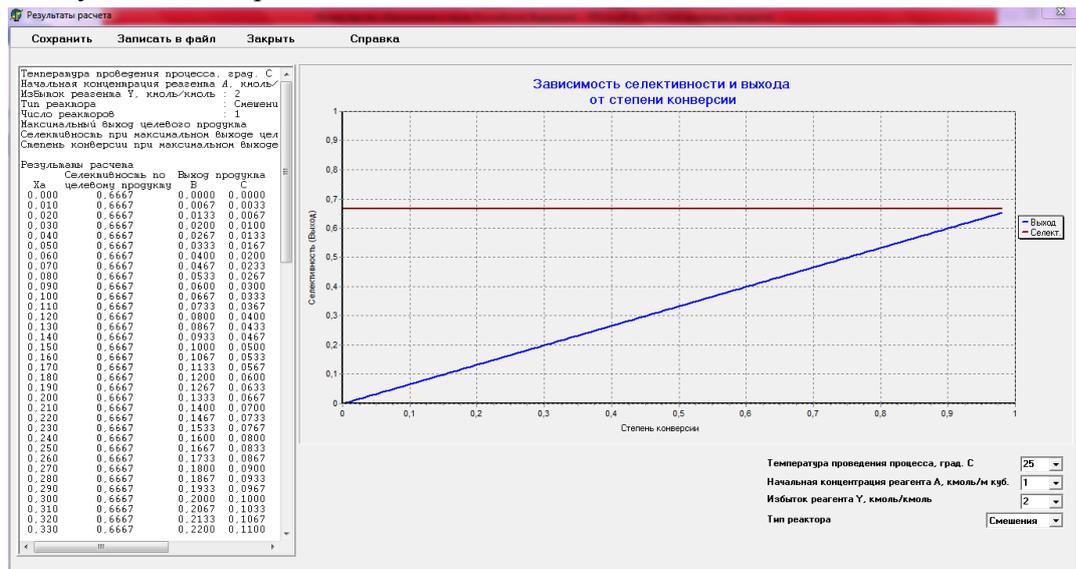
Тип реактора:

| Реакция 1 | Реакция 2 |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Наименование реагента | А |
| Наименование продукта | В |
| Наименование второго реагента | Y |
| Стехиометрический коэффициент по реагенту | <input type="text" value="1"/> |
| Стехиометрический коэффициент по продукту | <input type="text" value="1"/> |
| Стехиометрический коэффициент по второму реагенту | <input type="text" value="1"/> |
| Константа скорости при температуре 298 К | <input type="text" value="10"/> |
| Энергия активации, Дж/моль | <input type="text" value="100000"/> |
| Порядок реакции по реагенту | <input type="text" value="1"/> |
| Порядок реакции по второму реагенту | <input type="text" value="1"/> |

Реакция:

- 3) После ввода исходных данных, нажать клавишу «расчет».

- 4) По полученному графику зависимости сравнить данные, и сделать вывод о влиянии этих условий на процесс.



- 5) Повторить пункты 2-4 для каждого вида реактора при заданных температурах.
6) Сделать общий вывод о проведенной работе, оформить все графики в отчет.

Контрольные вопросы

- 1) Назовите типы реакторов.
- 2) Цель работы химического реактора.
- 3) Применение химических реакторов.
- 4) В чем заключается расчет каскада реакторов.
- 5) Назовите режимы движения и перемешивания реагентов.