

Н.А. Маркичев

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**  
**по дисциплинам: «технология и оборудование отрасли»,**  
**«макрокинетика и расчет реакторов»**

Иваново  
2009

Федеральное агенство по образованию  
ГОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический  
университет»

Н.А. Маркичев

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**  
**по дисциплинам технология и оборудование отрасли,**  
**макрокинетика и расчет реакторов**

Учебное пособие

Иваново 2006

УДК 66.02 (076.5)

Н.А. Маркичев Н.А. Лабораторный практикум по дисциплинам технология и оборудование отрасли, макрокинетика и расчет реакторов: Учеб. пособие/ ГОУВПО; Иван. гос. хим.- технол. ун-т. Иваново, 2006. 68 с. ISBN

Лабораторный практикум содержит 3 лабораторных работы по курсу «Технология и оборудование отрасли» и 4 работы по дисциплине «Макрокинетика и расчет реакторов». Пособие включает в себя основные теоретические положения и расчетные зависимости по каждой работе. Даны варианты заданий для выполнения работ с помощью имитатора, примерный вид таблиц опытных и расчетных величин, изложены требования к содержанию и оформлению отчета и примерные вопросы к коллоквиуму.

Приложение содержит описание имитатора каждой работы.

Предназначено для студентов обучающихся по направлению 655400 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» по специальности «Основные процессы и аппараты химических производств и химическая кибернетика»,

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензент:

доцент кафедры общей химической технологии Кунин Б. Т. (Ивановский государственный химико-технологический университет)

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
Лабораторная работа №1 часть 1 .....	5
Лабораторная работа №1 часть 2 .....	10
Лабораторная работа №2 часть 1 .....	15
Лабораторная работа №2 часть 2 .....	19
Лабораторная работа №3 часть 1 .....	24
Лабораторная работа №3 часть 2 .....	28
Лабораторная работа №3 часть 3 .....	33
Приложения .....	38
Лабораторная работа №1 часть 1 Основные элементы .....	39
«Мановакууметр» .....	39
«Термометр» .....	44
«Концентратомер» .....	47
Кнопка «Ok» .....	50
Кнопка «Сброс» .....	55
Таблица данных .....	56
Лабораторная работа №1 часть 2 .....	57
Лабораторная работа №2 часть 1 .....	60
Лабораторная работа №2 часть 2 .....	63
Лабораторная работа №3 часть 1 .....	65
Лабораторная работа №3 часть 2 .....	67
Лабораторная работа №3 часть 3 .....	71

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из этапов обучения студентов специальности “Основные процессы химических производств и химическая кибернетика” (ОПХП и ХК) является прохождение ими лабораторного практикума с целью закрепления теоретических основ курсов «Технология и оборудование отрасли», «Макрокинетика и расчет реакторов». В связи со сложностью изучаемых процессов, высокими температурами и давлениями, токсичными веществами создание лабораторных стендов не представляется возможным. Для целей практического изучения реальных технологических процессов созданы виртуальные лабораторные работы в основе которых лежат имитаторы рассматриваемых процессов и соответствующие математические модели.

Практикум содержит 7 лабораторных работ, сгруппированных по трем разделам: контактное окисление диоксида серы; конверсия оксида углерода в диоксид; синтез аммиака на железном катализаторе. В каждом разделе изучается термодинамика и кинетика процесса.

Пособие имеет характер практического руководства. Излагается необходимый теоретический материал, после чего приводятся варианты заданий, которые выполняют студенты, пользуясь соответствующим имитатором и пояснениями к нему. Результаты работ представляются в виде таблиц и обрабатываются в виде графических зависимостей, вид которых студенты должны объяснить на основании теории данного процесса и сделать соответствующие выводы. Приводятся основные вопросы на коллоквиум.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### Исследование равновесия и кинетики реакции контактного окисления $\text{SO}_2$ в $\text{SO}_3$ в производстве серной кислоты

#### Часть первая. Исследование равновесия

##### *Теоретическое введение*

По объему промышленного производства серная кислота занимает одно из первых мест среди продуктов, производимых химической промышленностью.

В основе всех технологических схем производства серной кислоты лежит обратимая реакция окисления диоксида серы в триоксид кислородом воздуха:



Зависимость теплового эффекта реакции от температуры (кДж/кмоль) выражается уравнением:

$$Q = 92323,7 + 23,359T - 43,8902 \cdot 10^{-3}T^2 + 26,905 \cdot 10^{-6}T^3 - 6,905 \cdot 10^{-9}T^4 \quad (1.2)$$

В интервале температур  $400 \div 700$  °С можно пользоваться упрощенным уравнением:

$$Q = 101419 - 9,26T \text{ (кДж/кмоль)} \quad (1.3)$$

Согласно принципа Ле-Шателье, равновесие реакции (1) сдвигается в сторону продуктов реакции при понижении температуры и повышении давления. И то и другое в ощутимых пределах трудно осуществимо, так как при температурах ниже  $400$  °С скорость реакции мала даже в присутствии катализаторов, а повышение давления, которое вызвало бы видимый эффект, сопряжено со значительными техническими трудностями.

На практике реакцию окисления  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$  проводят при атмосферном давлении и температурах  $400 \div 650$  °С.

Константа скорости реакции, выраженная через парциальные давления компонентов, определяется из уравнения:

$$K_p = \frac{P_{\text{SO}_3}}{P_{\text{SO}_2} \times \sqrt{P_{\text{O}_2}}} \quad (1.4.)$$

Равновесная степень превращения сернистого газа в серный ангидрид:

$$X_p = \frac{P_{SO_3}}{P_{SO_2} + P_{SO_3}} \quad (1.5)$$

Из уравнения константы равновесия следует, что:

$$P_{SO_2} = \frac{P_{SO_3}}{K_p \times \sqrt{P_{O_2}}} \quad (1.6)$$

Подставляем полученное значение  $P_{SO_2}$  в выражение для равновесной степени превращения:

$$X_p = \frac{P_{SO_3}}{P_{SO_3} + \frac{P_{SO_3}}{K_p \sqrt{P_{O_2}}}} = \frac{P_{SO_3}}{\frac{P_{SO_3} K_p \sqrt{P_{O_2}} + P_{SO_3}}{K_p \sqrt{P_{O_2}}}} = \frac{K_p}{K_p + \sqrt{\frac{1}{P_{O_2}}}} \quad (1.7)$$

При общем давлении смеси  $P$ , начальном содержании  $SO_2$  «а» об. % и начальном содержании  $O_2$  «b» об. %, парциальное давление кислорода в равновесной газовой смеси составит:

$$P_{O_2} = \frac{b - 0,5aX_p}{100 - 0,5aX_p} \quad (1.8)$$

Отсюда равновесная степень превращения:

$$X_p = \frac{K_p}{K_p + \sqrt{\frac{100 - 0,5aX_p}{P(b - 0,5aX_p)}}} \quad (1.9)$$

Размерность и численное значение константы равновесия зависит от размерности парциальных давлений компонентов в выражении (1.6).

Зависимость константы равновесия от температуры определяется уравнением:

$$\frac{2,3d \lg K_p}{dT} = -\frac{Q}{RT^2}, \quad (1.10)$$

где  $Q$  – тепловой эффект реакции (1.1) при постоянном давлении, отнесенный к 1 кмоль окисляемого  $SO_2$ , кДж;  $R = 8,31$  кДж/моль – универсальная газовая постоянная.

После подстановки выражения (1.2) для  $Q$  и интегрирования получаем следующую зависимость константы равновесия от температуры:

$$\lg K_p = -\frac{4812,3}{T} - 2,8254 \lg T + 2,284 \cdot 10^{-3} T - 7,012 \cdot 10^{-7} T^2 + 1,197 \cdot 10^{-10} T^3 + 2,23 \quad (1.11)$$

С достаточной точностью для интервала температур 400÷700 °С можно пользоваться упрощенным уравнением:

$$\lg K_p = \frac{4905}{T} - 4,6455 \quad (1.12)$$

Размерность  $K_p$  в уравнениях (1.11) и (1.12) в атм<sup>0,5</sup>. Если давление в формуле (1.4.) выражать в Па, то значения  $K_p$ , полученные по уравнениям (1.11) и (1.12) следует умножить на коэффициент пересчета, равный:

$$\frac{1}{\sqrt{1,0133 \cdot 10^5}} = 3,14 \cdot 10^{-3}$$

Уравнение (1.9) определяет  $X_p$  в неявном виде и решается либо методом последовательных приближений (обычно достаточно 2 – 3 приближения), либо с применением вычислительной техники.

Зная равновесную степень превращения, легко определить равновесный объемный состав газовой смеси:

$$\begin{aligned} \%SO_3 &= aX_p; \quad \%SO_2 = a(1-X_p); \quad \%O_2 = b(1-0,5X_p); \\ \%N_2 &= 100 - \%SO_3 - \%SO_2 - \%O_2 \end{aligned}$$

### *Цель работы:*

Изучить влияние температуры, давления и состава исходной смеси на константу равновесия, равновесную степень превращения  $SO_2$  в  $SO_3$  и содержание  $SO_3$  в равновесной газовой смеси.

### *Порядок выполнения работы*

Запустить имитатор лабораторной работы.

Пользуясь описанием имитатора к лабораторным работам, (см. приложение) установить, согласно заданию, значение давления, объемные концентрации диоксида серы, кислорода и азота на расходомерах, интервал и шаг изменения температуры на термометре. После того как все параметры будут установлены кнопка «Ок» загорится зеленым цветом, что говорит о готовности программы к выполнению расчетов. При наведении на нее курсора мыши появляется соответствующее всплывающее сообщение:





Рис. 1. Панель приборов, готовая к запуску имитатора, к лабораторной работе 1

При нажатии на кнопку «Ок», выполняется расчет заданного процесса по установленным значениям параметров. Кнопка блокируется.

Варианты заданий приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

Варианты заданий к лабораторной работе №1

№	Состав исходного газа, об. %			Температура, °C			Давление, МПа		
	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	начальная	конечная	шаг			
1	9	7	84	200	600	50	0,1	0,2	0,3
	9	10	81						
	9	13	78						
2	10	7	83	400	800	50	0,08	0,16	0,32
	10	12	78						
	10	15	75						
3	6	9	85	250	730	60	0,1	0,2	0,3
	9	9	82						
	12	9	79						
4	7	11	81	300	700	50	0,09	0,11	0,14
	10	11	79						
	13	11	76						
5	2	18	80	400	800	50	0,1	0,12	0,14
	3,5	18	78,5						
	5	18	77						
6	7	14	79	100	660	70	0,1	0,15	0,2
	8	13	79						
	9	12	79						
7	7,5	14	78,5	200	600	50	0,1	0,12	0,14
	9	14	77						
	11,5	14	74,5						

Полученные расчетные значения степени превращения  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$  и равновесные объёмные концентрации компонентов газовой смеси заносим в таблицу расчетных величин (таб. 1.2.)

Таблица 1.2.

Таблица расчетных величин

t, °C	Давление 0,1 МПа					Давление 0,125 МПа					Давление 0,15 МПа				
	$\text{SO}_3^*$	$\text{SO}_2^*$	$\text{O}_2^*$	$\text{N}_2^*$	$X_p$	$\text{SO}_3^*$	$\text{SO}_2^*$	$\text{O}_2^*$	$\text{N}_2^*$	$X_p$	$\text{SO}_3^*$	$\text{SO}_2^*$	$\text{O}_2^*$	$\text{N}_2^*$	$X_p$
Состав исходной смеси (об/%) $\text{SO}_2 = 7,5$ ; $\text{O}_2 = 14$ ; $\text{N}_2 = 78,5$															
200															
250															
300															
350															
400															
450															
500															
550															
600															
Состав исходной смеси (об/%) $\text{SO}_2 = 9$ ; $\text{O}_2 = 14$ ; $\text{N}_2 = 77$															
200															
250															
300															
350															
400															
450															
500															
550															
600															
Состав исходной смеси (об/%) $\text{SO}_2 = 11,5$ ; $\text{O}_2 = 14$ ; $\text{N}_2 = 74,5$															
200															
250															
300															
350															
400															
450															
500															
550															
600															

Примечание:  $\text{SO}_3^*$ ,  $\text{SO}_2^*$ ,  $\text{O}_2^*$  и  $\text{N}_2^*$  - равновесные концентрации компонентов газовой смеси.  $X_p$  –равновесная степень превращения  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$ .

На основании данных, представленных в таблице 1.2. строятся графические зависимости: