

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С.А. Федорова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
Лабораторный практикум по дисциплине**

Учебное пособие

В двух частях

Часть 2

Севастополь
СевГУ
2022

УДК 66.011(075.8)
ББК 35.11-642я73
Ф33

Р е ц е н з е н т :
Н.И. Черкашина - канд. техн. наук, доцент

Федорова С.А.

Ф33 Моделирование химико-технологических процессов. Лабораторный практикум по дисциплине: учебное пособие. - в 2-х частях. Ч. 2 / С.А. Федорова; Севастопольский государственный университет, Институт ядерной энергии и промышленности. – Севастополь: СевГУ, 2022. – 46 с.: ил. – Текст : электронный.

Рассмотрены вопросы построения математических моделей для процессов статики и динамики объектов с сосредоточенными и распределенными параметрами, приведены примеры расчетов.

Предназначено для студентов 4-го курса по направлению подготовки 18.03.01 – Химическая технология.

УДК 66.011(075.8)
ББК 35.11-642я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании ученого совета Института ядерной энергии и промышленности, протокол № 8 от 26 апреля 2022 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1	4
СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТАТИКИ ОБЪЕКТА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ КООРДИНАТАМИ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	14
СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТАТИКИ ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КООРДИНАТАМИ	14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3	25
СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ КООРДИНАТАМИ	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4	34
СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КООРДИНАТАМИ	34
Варианты индивидуальных заданий для работ №1-3	44
Варианты индивидуальных заданий для работы № 4	45
Литература.....	46

Лабораторная работа № 1

СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТАТИКИ ОБЪЕКТА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ КООРДИНАТАМИ

Цель: приобретение навыков моделирования статики объектов с сосредоточенными координатами.

Задание: построить математическую модель в виде системы уравнений, связывающих выходную координату с входными: C_{ex} , m_{ex} , T_n . Сделать анализ возможности регулирования процесса выпаривания.

Общие положения

Высокая степень однородности системы характерна для достаточно широкого класса объектов химической технологии. Это аппараты с мешалкой, барботажные аппараты и т.п.

В качестве примера рассмотрим моделирование статики выпарного аппарата.

В выпарном аппарате (рис. 1) происходят следующие основные физические процессы: конденсация пара в греющей камере, передача тепла от пара через стенку поверхности нагрева к кипящей жидкости, в результате чего выделяются пары растворителя и увеличивается концентрация раствора.

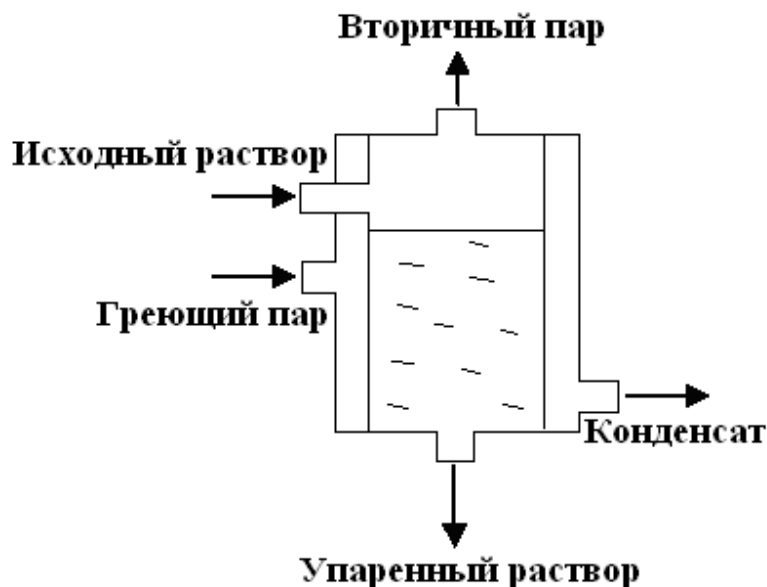


Рис. 1. Выпарной аппарат

Выпарной аппарат состоит из емкости с выпариваемым раствором, и рубашки, через которую движется жидкость или перегретый пар. Теплопередача от греющего пара к выпариваемому раствору обеспечивается

перепад температуры - давление греющего пара выше, чем давление над кипящим раствором.

При кипении раствора образуется вторичный пар, который отсасывается из верхней части аппарата вакуум-насосом; упаренный раствор отводится из нижней части аппарата.

Рассмотрим этот же выпарной аппарат как объект регулирования (рис. 2.). В качестве входных характеристик системы мы можем измерить расход, концентрацию и температуру раствора на входе. Соответствующими входными координатами будут массовый расход m_{ex} , концентрация C_{ex} раствора на входе в аппарат, расход тепла q , поступающего со свежим греющим паром (расход тепла для насыщенного пара однозначно определяется его температурой T_n).

Выходные координаты - расход вторичного пара m_{em} (определяем по $T_{вт}$), массовый расход на выходе $m_{вых}$ (определяем по $T_{вых}$) и концентрация $C_{вых}$ раствора на выходе.

Представляет интерес регулирование процесса (концентрация выхода) по входным характеристикам.

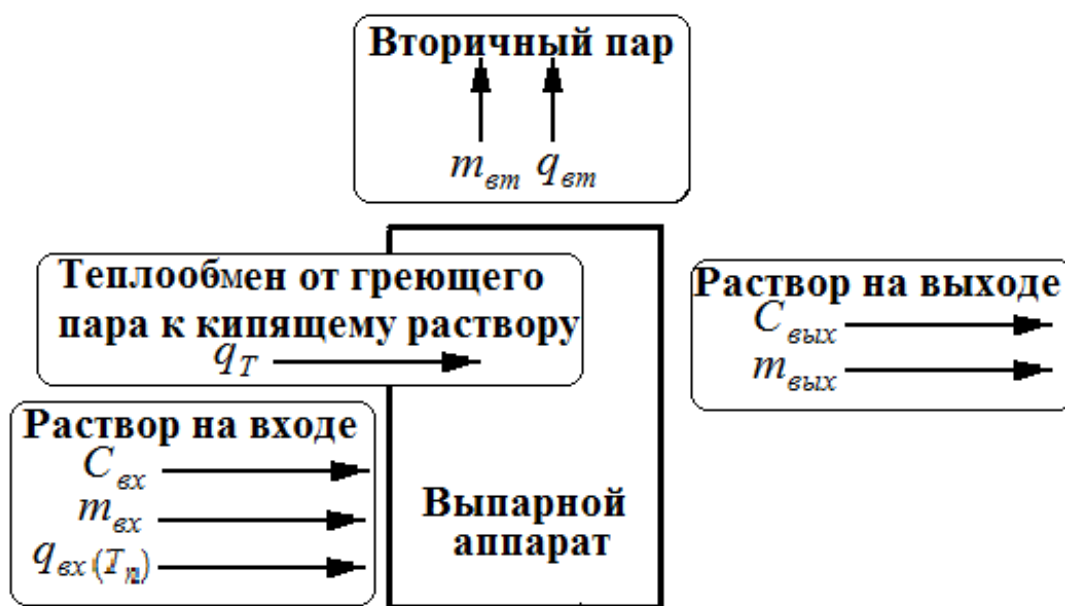


Рис. 2. Выпарной аппарата как объект регулирования

Для вывода модели принимаем следующие **допущения**:

1. Гидродинамический режим - идеальное смешение.
2. Тепловые потери в окружающую среду отсутствуют.
3. В выпарной аппарат подается раствор, нагретый до температуры кипения.
4. Выпарной аппарат является стационарным объектом.
5. Теплоемкость раствора и теплота парообразования не зависят от температуры и концентрации раствора.

Математическое описание начинаем с уравнений сохранения массы и энергии. Это - материальный и тепловой баланс.

Материальный баланс:

$$m_{ex} = m_{bix} + m_{em} \quad (1)$$

Материальный баланс по сухому веществу:

$$m_{ex} C_{ex} = m_{bix} C_{bix} \quad (2)$$

Тепловой баланс с учетом допущения 2:

$$q_{ex} + q_T - q_{bix} - q_{em} = 0 \quad (3)$$

где q_T - поток тепла через поверхность теплообмена от греющего пара к кипящему раствору, Дж/с;

q_{ex} - поток тепла, вносимого в аппарат с раствором, Дж/с;

q_{bix} - поток тепла, уходящего из аппарата с раствором, Дж/с;

q_{em} - поток тепла, уходящего из аппарата со вторичным паром, Дж/с.

Потоки тепла выражаются следующими зависимостями:

$$q_T = k_T F (T_n - T_p), \quad (4)$$

где k_m - коэффициент теплопередачи, Вт/м²град;

T_p - температура кипения раствора, °С;

T_n - температура греющего пара, °С;

F - площадь теплообмена, м².

$$q_{ex} = m_{ex} c_t T_{ex}, \quad (5)$$

где c_t - теплоемкость раствора, Дж/кг град;

T_{ex} - температура раствора на входе, °С.

$$q_{bix} = m_{bix} c_t T_p, \quad (6)$$

$$q_{em} = m_{em} r, \quad (7)$$

где r - теплота парообразования вторичного пара, Дж/кг.

Учитывая допущение 3, уравнение (5) может быть записано в следующем виде:

$$q_{ex} = m_{ex} c_t T_p, \quad (8)$$

Подставив в уравнение (3) выражения (4), (6)-(8), получим:

$$k_T F(T_n - T_p) + c_t T_p (m_{ex} - m_{bix}) - m_{em} r = 0. \quad (9)$$

Из уравнений (1), (2), (9) получаем искомую зависимость

$$C_{bix} = f(C_{ex}, m_{ex}, T_n). \quad (11)$$

Задание

1. Получить статические характеристики по каналам:

а) $C_{ex} \rightarrow C_{bix}$.

Концентрация C_{bx} изменяется с шагом ΔC .

При этом $m_{ex} = \text{const}$, $T_n = \text{const}$;

б) $m_{ex} \rightarrow C_{bix}$.

Расход на входе изменяется с шагом Δm .

При этом $C_{bx} = \text{const}$, $T_{bx} = \text{const}$;

в) $T_p \rightarrow C_{bix}$.

Температура греющего пара изменяется с шагом ΔT .

При этом $C_{bx} = \text{const}$, $m_{bx} = \text{const}$.

Для всех расчетов принять $T_p = 90^\circ \text{C}$.

Значения констант:

$$r = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг};$$

$$k_T = 5000 \text{ Вт/м}^2 \text{ град};$$

$$F = 10 \text{ м}^2;$$

$$c_t = 4187 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}.$$

Исходные данные, необходимые для расчета, приведены в индивидуальных заданиях.

Содержание отчета

1. Расчет.
2. Графики зависимостей $C_{вых} = f(C_{bx})$, $C_{вых} = f(m_{bx})$, $C_{вых} = f(T_p)$.

Порядок выполнения

1. Занести исходные данные на лист Excel.
2. Занести расчетную формулу, приближения, условия поиска.
3. Составить алгоритм расчета.
4. Построить график.
5. П.п. 2-3 выполняется для задания а), б), в).
6. Выводы.

Пример 1.

Петров А.В.

Вариант 1

Составление математической модели статики объекта с сосредоточенными координатами и получение статических характеристик

1. Значения постоянных величин

Константы	ϕ	кт	F	c_t	Тр	время
Ед.измерения	Дж/кг	Вт/м ² град	м ²	Дж/кг*град	град	сек
Значение	226000	5000	10	4187	90	600

2. Переменные величины

Величины	Тп	С _{вх}	m _{вх}	ΔC	Δm	ΔT
	град	%	кг/с	%	кг/с	°C
Значение	130	8	5	5	0,2	0,5

3. Искомая величина

Величина	С _{вых}
Ед.измерения	%
Значение	3,88

В п.п.3 «значение» вычисляется по формуле

$$= \$C\$12 / (((\$C\$7 * \$D\$7 * (\$B\$12 - \$F\$7)) / ((\$E\$7 * \$F\$7 - \$B\$7) * \$D\$12)) + 1)$$

$$C_{\text{вых}} = \frac{C_{\text{вх}}}{\frac{k_T \cdot F \cdot (T_n - T_p)}{(c_t \cdot T_p - r) \cdot m_{\text{вх}}} + 1}$$

4. Расчет влияния $C_{\text{вх}}$ на $C_{\text{вых}}$

Начальное значение $C_{\text{вх}}$ выбирается согласно задания. в нашем случае $C_{\text{вх}} = 8$. Уменьшение исходной концентрации указано в задании. В нашем случае - 5%, что составляет 0,4 г/л.

Свх	Свых
8,00	3,88
7,60	3,69
7,20	3,49
6,80	3,30
6,40	3,10
6,00	2,91
....	
2,80	1,36
2,40	1,16
2,00	0,97
1,60	0,78
1,20	0,58

0,80	0,39
0,40	0,19
0,00	0,00

В п.п.4 «С_{вых}» вычисляется по формуле

$$=B22/(((\$C\$7*\$D\$7*(\$B\$12-\$F\$7))/((\$E\$7*\$F\$7-\$B\$7)*\$D\$12))+1)$$

Получаем графические зависимости:



Рис. 3. Зависимость Свых от Свх объекта с сосредоточенными параметрами в статическом режиме

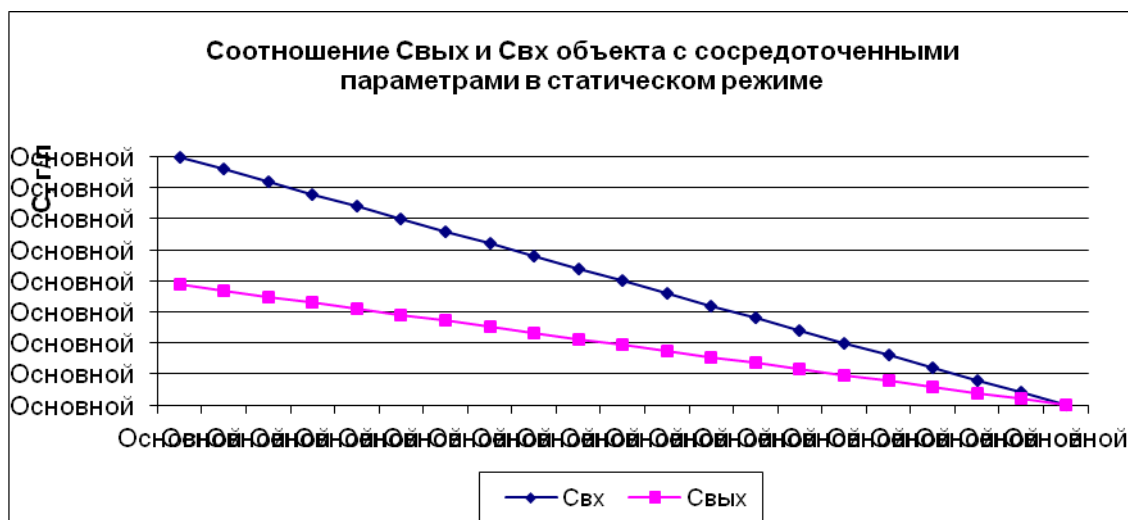


Рис. 4. Соотношение Свых от Свх объекта с сосредоточенными параметрами в статическом режиме

Вывод: С уменьшением исходной концентрации С_{вх} уменьшается прямо пропорционально. Зависимость линейная. На интервале от 8 до 5 г/л концентрация выхода изменяется медленнее, чем у исходного сырья. На интервале от 5 до 4 г/л скорости изменения концентрации входа и выхода примерно равны. На интервале от 4 до 0 скорость изменения концентрации выхода выше, чем С_{вх}.

5. Расчет влияния $m_{вх}$ на $C_{вых}$

Начальное значение $m_{вх}$ выбирается согласно задания. В нашем случае $m_{вх} = 5$. Уменьшение $m_{вх}$ указано в задании. В нашем случае - 0,2 кг/с.

$m_{вх}$	$C_{вых}$
5,00	3,88
4,80	3,80
4,60	3,71
4,40	3,63
4,20	3,53
...	...
1,20	1,48
1,00	1,27
0,80	1,05
0,60	0,81
0,40	0,56
0,20	0,29
0,00	#ДЕЛ/0!

В п.п.5 « $C_{вых}$ » вычисляется по формуле

$$= \$C\$12 / (((\$C\$7 * \$D\$7 * (\$B\$12 - \$F\$7)) / ((\$E\$7 * \$F\$7 - \$B\$7) * B45)) + 1)$$

Получаем графические зависимости:

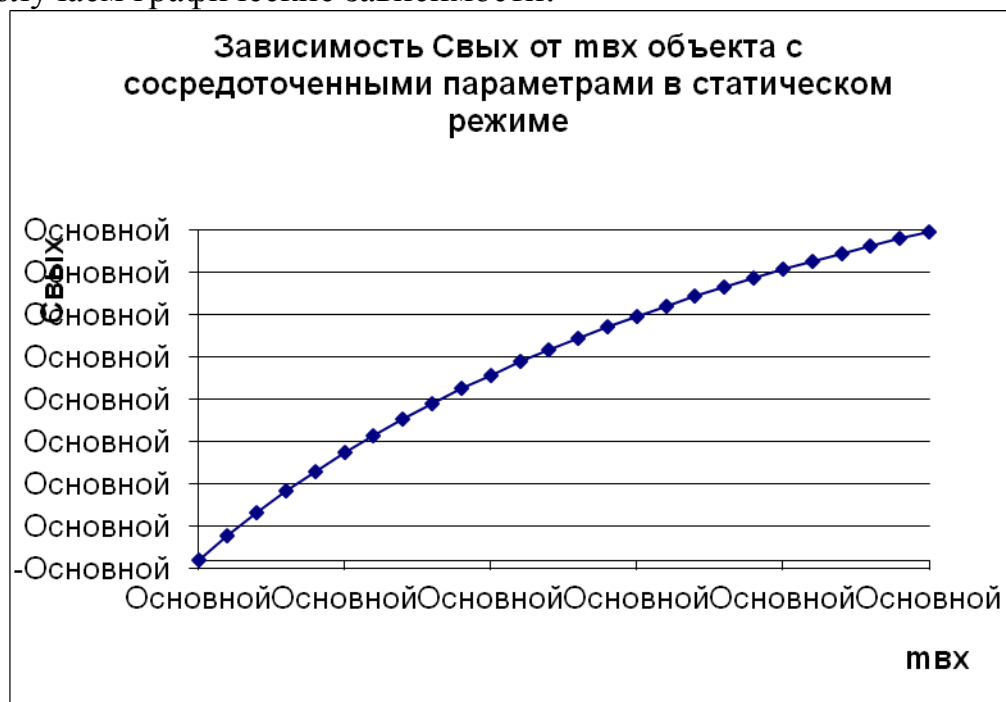


Рис. 5. Зависимость $C_{вых}$ от $m_{вх}$ объекта с сосредоточенными параметрами в статическом режиме

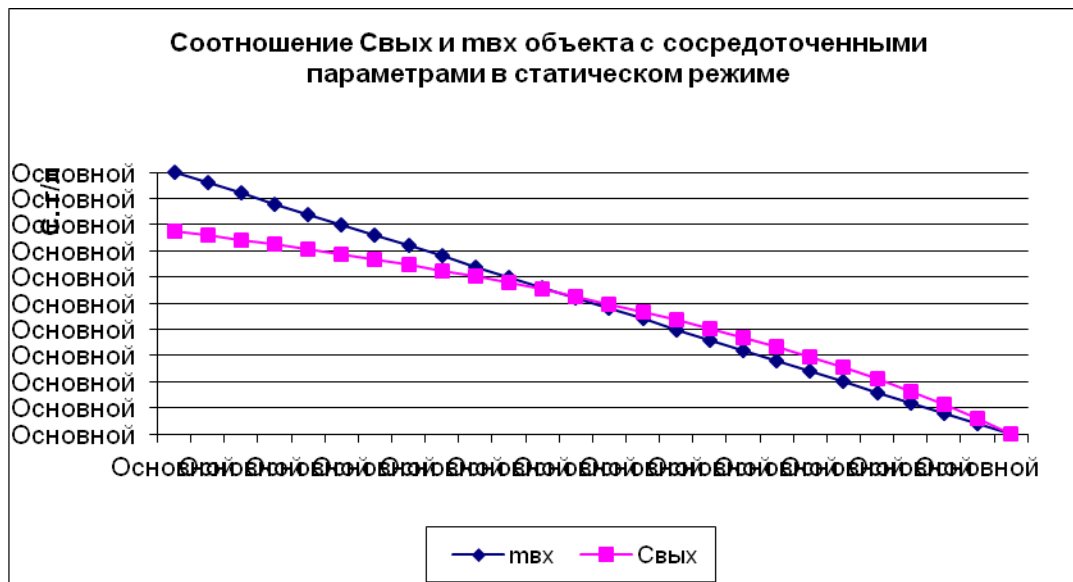


Рис. 6. Соотношение Свых от твх объекта с сосредоточенными параметрами в статическом режиме

Вывод: С уменьшением $m_{вх}$ $C_{вых}$ уменьшается. Зависимость нелинейная. На интервале от 5 до 4 кг/с концентрация выхода изменяется медленнее, чем $m_{вх}$. На интервале от 5 до 0 г/л скорости изменения концентрации выхода преобладает $m_{вх}$

6. Расчет влияния температуры греющего пара на $C_{вых}$

Начальное значение $T_{п}$ выбирается согласно задания. В нашем случае $T_{п} = 130^{\circ}\text{C}$. Уменьшение $T_{п}$ указано в задании. В нашем случае - $0,5^{\circ}\text{C}$.

$T_{п}$	$C_{вых}$
130,00	3,88
129,50	3,91
129,00	3,93
128,50	3,96
128,00	3,98
...	...
93,00	7,41
92,50	7,50
92,00	7,60
91,50	7,69
91,00	7,79
90,50	7,90
90,00	8,00

В п.п.6 « $C_{вых}$ » вычисляется по формуле

$$= \$C\$12 / (((\$C\$7 * \$D\$7 * (B49 - \$F\$7)) / ((\$E\$7 * \$F\$7 - \$B\$7) * \$D\$12)) + 1)$$

Получаем графические зависимости:

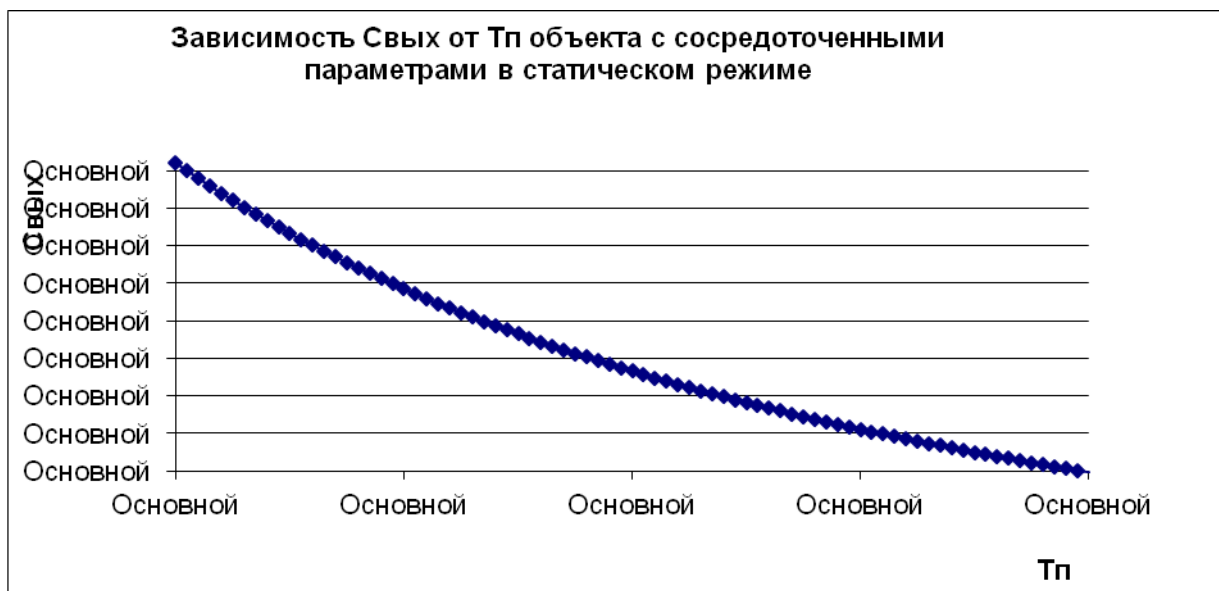


Рис. 7. Зависимость $S_{\text{вых}}$ от $T_{\text{п}}$ объекта с сосредоточенными параметрами в статическом режиме

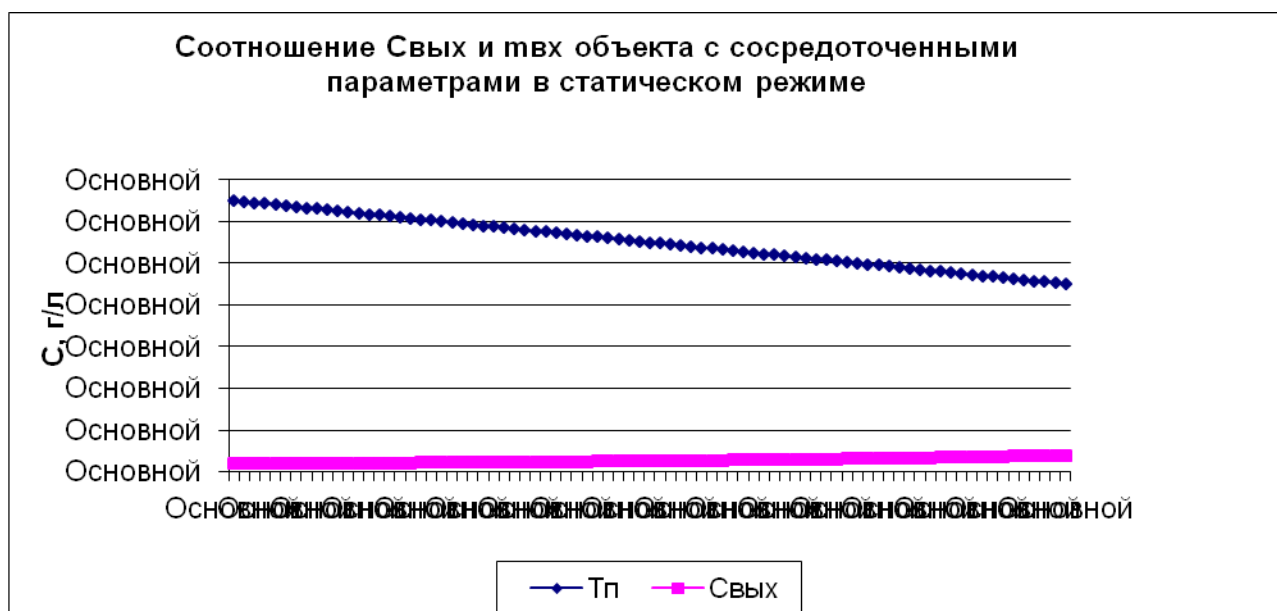


Рис. 8. Соотношение $S_{\text{вых}}$ от $T_{\text{п}}$ объекта с сосредоточенными параметрами в статическом режиме

Вывод: С уменьшением $T_{\text{п}}$ $S_{\text{вых}}$ увеличивается, т.е. выпаривание не происходит, концентрация упаренного раствора при 90°C равна исходной. Зависимость нелинейная. Скорость изменения температуры значительно больше, чем скорость изменения концентрации упаренного раствора на всем интервале исследования.

7. В выводе охарактеризовать как изменяется $S_{\text{вых}}$ в зависимости от $S_{\text{вх}}$, $t_{\text{вх}}$, $T_{\text{п}}$.

Вывод по работе: На $S_{вх}$ влияют $S_{вх}$, $m_{вх}$, $T_{п}$. Регулирование процесса выпаривания можно осуществлять варьируя $m_{вх}$. Процесс выпаривания прекращается при понижении температуры на 40°C . Скорость выпаривания снижается при уменьшении $S_{вх}$ с различным градиентом на различных интервалах (8-5-4-0).

Контрольные вопросы

1. Что понимают под статическим режимом работы объектов.
2. Выходные координаты выпарного аппарат.
3. Структурная схема выпарного аппарата.
4. Система допущений для расчета статических характеристик выпарного аппарата.
5. Какие из принятых при составлении математического описания допущений являются наименее обоснованными? Почему?
6. Основные уравнения математической модели статики выпарного аппарат.
7. Анализ полученных результатов.

Лабораторная работа № 2

СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТАТИКИ ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КООРДИНАТАМИ

Цель: приобретение навыков моделирования статики объектов с распределенными координатами.

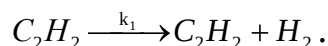
Задание: произвести численное решение системы уравнений статики и получить статические характеристики объекта с распределенными координатами.

Общие положения

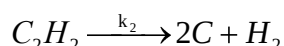
Объекты с распределенными координатами характеризуются изменением параметров не только во времени, но и по сечению и длине. К таким объектам можно отнести трубчатые теплообменники, конденсаторы, трубчатые реакторы, печи и другие аппараты.

В качестве примера рассмотрим моделирование статики процесса разложения этилена в трубчатом реакторе.

Процесс протекает по следующей схеме: этилен разлагается на ацетилен и водород по реакции



В свою очередь, ацетилен разлагается на углерод и водород:



здесь k_1 , k_2 – константы скоростей реакций.

Процесс проводится в трубчатом реакторе в газовой фазе, нагревание реакционного объема осуществляется электронагревателем (рис. 1). Длина реактора, как правило, в 200 – 2000 раз превышает его диаметр.

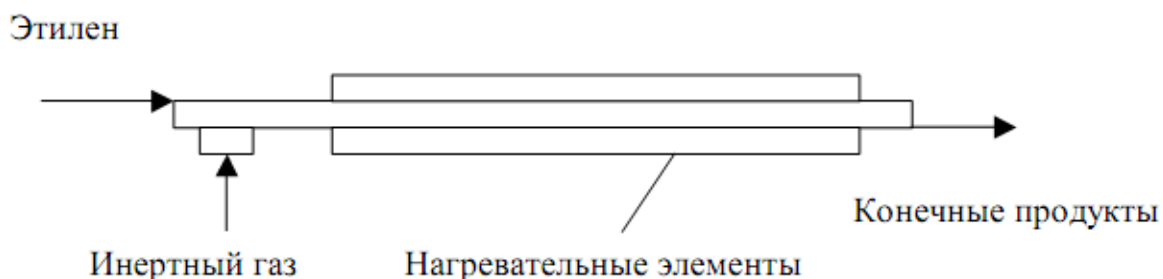


Рис. 1. Схема трубчатого реактора разложения этилена

В реактор подается этилен и инертный газ – разбавитель, присутствие которого предотвращает возможность образования взрывоопасных концентраций.

Входными координатами для рассматриваемого объекта будут являться концентрация $C_{\text{вх}}$ этилена на входе в реактор, массовый расход m смеси на входе в реактор, температура T в реакторе. Выходными координатами являются зависимости концентраций этилена C_1 и ацетилена C_2 от текущей длины реактора l .

Представим реактор разложения этилена в виде одного звена. В этом случае его структурная схема будет иметь вид, представленный на рис. 2.

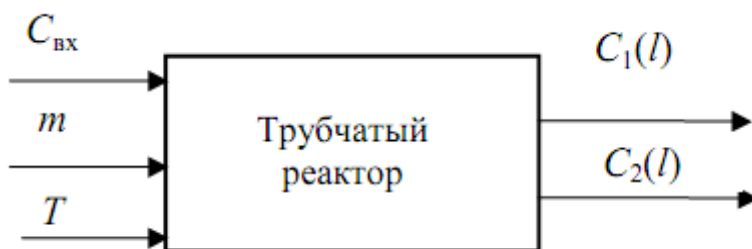


Рис. 2. Структурная схема реактора

Примем следующие допущения:

1. В связи с тем, что длина реактора значительно (более чем в 100 раз) превышает его диаметр, будем использовать гидродинамическую модель «идеальное вытеснение».

2. Температура в реакторе электронагревательными элементами поддерживается постоянной по длине трубы и во времени.

3. Плотность реакционной смеси не меняется по длине трубы.

Целью построения математической модели является получение уравнений, связывающих выходные координаты $C_1(l)$, $C_2(l)$ с входными: $C_{\text{вх}}$, m , T .

Константы скоростей реакций, подчиняющиеся закону Аррениуса, связаны с температурой T в зоне реакции следующими уравнениями:

$$k_1 = A_1 e^{-\frac{E_1}{RT}} \quad k_2 = A_2 e^{-\frac{E_2}{RT}}, \quad (12)$$

Уравнение, описывающее реакцию разложения этилена, движущегося по трубе, имеет вид:

$$\frac{\partial C_1(\tau, l)}{\partial \tau} = -u \frac{\partial C_1(\tau, l)}{\partial l} - k_1 C_1(\tau, l), \quad (13)$$

где C_1 – концентрация этилена;

u – скорость движения реакционной смеси по трубе;

τ – текущее время;

l – расстояние от начала трубы до текущей точки.

Аналогичное уравнение для ацетилена имеет вид:

$$\frac{\partial C_2(\tau, l)}{\partial \tau} = -u \frac{\partial C_2(\tau, l)}{\partial l} + k_1 C_1(\tau, l) - k_2 C_2(\tau, l). \quad (14)$$

В связи с тем, что мы будем рассматривать статический режим работы реактора, приравняем нулю производную по времени. Система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} u \frac{\partial C_1(l)}{\partial l} = -k_1 C_1(l) \\ u \frac{\partial C_2(l)}{\partial l} = k_1 C_1(l) - k_2 C_2(l) \end{cases} \quad (15)$$

Скорость u может быть выражена через массовый расход m реакционной среды через аппарат:

$$u = \frac{m}{\rho S} = \frac{m}{\left(\frac{\rho \pi D^2}{4} \right)} \quad (16)$$

где ρ – плотность реакционной среды;

S – площадь сечения трубы;

D – диаметр трубы.

Подставив выражение (16) в систему уравнений(15), получаем систему уравнений, удобную для расчета:

$$\begin{cases} m \frac{dC_1(l)}{dl} = \frac{k_1 C_1(l) \pi D^2}{4} \rho \\ m \frac{dC_2(l)}{dl} = \frac{(k_1 C_1(l) - k_2 C_2(l)) \pi D^2}{4} \rho \\ k_1 = A_1 e^{-\frac{E_1}{RT}} \\ k_2 = A_2 e^{-\frac{E_2}{RT}} \end{cases} \quad (17)$$

Граничные условия: $C_1(0) = C_{\text{вх}}$, $C_2(0) = 0$, где $C_{\text{вх}}$ – концентрация этилена на входе в реактор.

В уравнениях (6), $C_{\text{вх}}$ – молярная концентрация, [моль/м³]. Если задана процентная концентрация, то следует перевести из процентов в моль/м³ по формуле:

$$C_{\mu} = \frac{C_{\text{вх}} \rho}{100 \mu_{\text{Эт}}} \quad (18)$$

где $\mu_{\text{эт}}$ – молекулярная масса этилена, моль/кг.

Порядок выполнения работы

1. Составить блок-схему алгоритма решения системы уравнений (17) математической модели статики реактора разложения этилена.

2. Подготовить программу для ПК, реализующую алгоритм из п. 1.

3. Получить статические характеристики по следующим каналам:

а) $T \rightarrow C_1(l), C_2(l)$.

Температура T изменяется от T_0 до T_1 с шагом $\Delta T = 25^\circ$. При этом $m = \text{const}$, $C_{\text{вх}} = \text{const}$.

б) $C_{\text{вх}} \rightarrow C_1(l), C_2(l)$.

Концентрация $C_{\text{вх}}$ изменяется от $C_{\text{вх}0}$ до $C_{\text{вх}1}$ с шагом $\Delta C = 5\%$. При этом $T = \text{const}$, $m = \text{const}$.

в) $m \rightarrow C_1(l), C_2(l)$.

Массовый расход изменяется от m_0 до m_1 с шагом $\Delta m = 0,15$ кг/с. При этом $T = \text{const}$, $C_{\text{вх}} = \text{const}$.

В зависимости от варианта статические характеристики следует получать только по одному каналу, для которого указаны значения границ изменения входной координаты в задании.

Константы

$R = 8,31$ Дж/моль·град;

$E_1 = 251\,000$ Дж/моль;

$E_2 = 297\,000$ Дж/моль;

$A_1 = 2 \cdot 10^{11}$;

$A_2 = 8 \cdot 10^{12}$;

$c = 1,4$ кг/м³;

$D = 0,1$ м.

Шаг интегрирования $\Delta l = 0,5$ м.

Содержание отчета

По результатам расчетов построить в координатах C_1, l семейство графиков $C_1(l)$ и в координатах C_2, l семейство графиков $C_2(l)$ статической характеристики при различных значениях температуры в реакторе, или массового расхода на входе в реактор, или концентрации этилена на входе в реактор (в зависимости от варианта). Для построения графиков концентрации C_1, C_2 перевести их размерности моль/м³ в проценты.

Пример 2.

Алгоритм вычислений:

1. В ячейку A1 ввести ФИО.

2. В ячейку A3 ввести номер и тему практического занятия.

3. В ячейку A2 ввести номер варианта.

4. Согласно варианту заполнить таблицу с исходными данными

m	C	T	L	T0	T1	C0	C1	m0	m1

5. Произвести перевод единиц измерения согласно уравнению.

6. Внести необходимые константы в таблицу, произвести соответствующий перевод единиц измерения

R	E1	E2	A1	A2	c	D	Δl	ΔT	ΔC	Δm

7. В соответствии с вариантом задания определить:

а) величину варьирования температуры T от T_0 до T_1 с шагом $\Delta T = 25^\circ$.

б) величину варьирования концентрации $C_{\text{вх}}$ от $C_{\text{вх}0}$ до $C_{\text{вх}1}$ с шагом $\Delta C = 5\%$.

в) величину варьирования массового расхода m от m_0 до m_1 с шагом $\Delta m = 0,15 \text{ кг/с}$.

8. Согласно уравнению [12] вычислить константы скоростей химических реакций k_1, k_2 .

9. В соответствии с вариантом задания определить значения текущих точек интегрирования при шаге интегрирования $\Delta l = 0,5 \text{ м}$. Длина реактора L , определяется согласно исходных данных варианта.

10. Согласно уравнению [17] вычислить изменение концентраций этилена C_1, C_2 по длине реактора, учитывая граничные условия: $C_1(0) = C_{\text{вх}}$, $C_2(0) = 0$, для расчета начальных величин концентраций этилена, для дальнейших расчетов концентраций использовать метод Эйлера.

Вычисления

1. В ячейку A1 ввести ФИО.

2. В ячейку A2 ввести номер и тему практического занятия.

3. В ячейку A3 ввести номер варианта.

4. Заполнить таблицу с постоянными величинами, необходимыми для расчетов как приведено ниже (ячейка A6:A8 - H6:H8)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	ФИО												
2	ПЗ	Составление ММ статистики объекта с распределенными координатами и получение статистических характеристик на ЭВМ											
3	вариант 1												
4													
5	константы												
6	R	E1	E2	A1	A2	p	D	Δl					
7	Дж/моль*град	Дж/моль	Дж/моль			кг/м3	м	м					
8	8,31	251000	297000	2E+11	8E+12	1,4	0,1	0,5					
9													

5. Согласно варианту заполнить таблицу с исходными данными и произвести перевод единиц измерения согласно уравнению

Для этого в ячейку A13 ввести значение массы в кг, в ячейку B13 значение исходных данных концентраций этилена в %, в ячейку C13 ввести значение длины реактора в м, в ячейки D13, E13 и F13 ввести значения изменения температур и шаг варьирования в К, в ячейку G13 ввести молярную массу этилена. Для перевода величин в единицы измерения, необходимые для расчетов в ячейку C17 ввести формулу

$C_m = (B13 \cdot F8) / (100 \cdot G13)$. Для перевода температуры из К в С в ячейки D17, E17 ввести формулы $D17 = D13 - 273$ и $E17 = E13 - 273$

	A	B	C	D	E	F	G	H
9								
10	исходные данные							
11	m	C	L	T0	T1	ΔT	μ _{эт}	
12	кг	%	м	К	К	град		
13	0,5	30	160	1250	1300	25	28	
14	перевод единиц измерения							
15	m	C _м	L	T0	T1			
16	кг	моль	м	К	К			
17	0,5	0,015	160	977	1027			
18								

6. Определяем систему уравнений для расчетов

	A	B	C	D
20				
21	{	$m \frac{dC_1(l)}{dl} = k_1 C_1(l) \frac{\pi D^2}{4} \rho$		
22				
23		$m \frac{dC_2(l)}{dl} = (k_1 C_1(l) - k_2 C_2(l)) \frac{\pi D^2}{4} \rho$		
24				
25		$k_1 = A_1 e^{-\frac{E_1}{RT}}$		
26		$k_2 = A_2 e^{-\frac{E_2}{RT}}$		
27				
28				

7. Решение системы дифференциальных уравнений определенных в пункте 6 будем производить, используя изученный ранее метод Эйлера. Для чего все полученные результаты будем заносить в таблицы. Общий вид таблицы расчетных данных имеет вид:

7.1 $T \rightarrow C_1(l), C_2(l)$ в случае $m = \text{const}, C_{\text{вх}} = \text{const}$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
28		$k_1 = A_1 e^{-\frac{E_1}{RT}}$	$k_2 = A_2 e^{-\frac{E_2}{RT}}$	$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho$				$\frac{dC_1(l)}{dl}$			$\frac{dC_2(l)}{dl}$	
29												
30	T	k1	k2	$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho$	L	Δl	C1(l)	F1	C2(l)	F2		

7.2 $C_{\text{вх}} \rightarrow C_1(l), C_2(l)$ в случае $T = \text{const}, m = \text{const}$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
28		$k_1 = A_1 e^{-\frac{E_1}{RT}}$	$k_2 = A_2 e^{-\frac{E_2}{RT}}$	$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho$				$\frac{dC_1(l)}{dl}$			$\frac{dC_2(l)}{dl}$	
29												
30	C _{вх}	k1	k2	$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho$	L	Δl	C1(l)	F1	C2(l)	F2		

7.3 $m \rightarrow C_1(l), C_2(l)$ в случае $T = \text{const}, C_{\text{вх}} = \text{const}$.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
28		$k_1 = A_1 e^{-\frac{E_1}{RT}}$	$k_2 = A_2 e^{-\frac{E_2}{RT}}$	$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho$				$\frac{dC_1(l)}{dl}$			$\frac{dC_2(l)}{dl}$	
29												
30	m	k1	k2	$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho$	L	Δl	C1(l)	F1	C2(l)	F2		

Количество расчетных таблиц определяется количеством варьируемых факторов (температуры, концентрации, массового расхода – по варианту). Расчетные таблицы размещаем слева направо, начиная с ячейки A30.

8. В соответствии с вариантом задания определить:

- величину варьирования температуры T от T_0 до T_1 с шагом $\Delta T = 25^\circ$.
- величину варьирования концентрации $C_{\text{вх}}$ от $C_{\text{вх}0}$ до $C_{\text{вх}1}$ с шагом $\Delta C = 5\%$.
- величину варьирования массового расхода m от m_0 до m_1 с шагом $\Delta m = 0,15 \text{ кг/с}$.

В первой ячейке расчетной таблицы в зависимости от варианта указывается нулевое значение варьируемой величины. Например, для случая: $T \rightarrow C_1(l), C_2(l)$ в случае $m = \text{const}, C_{\text{вх}} = \text{const}$ указываем значение T_0 . В каждой последующей расчетной таблице в аналогичной ячейке указываем варьируемую величину увеличенную на шаг варьирования. Для нашего случая следующее значение варьируемой величины будет иметь вид: $T_0 + \Delta T$.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
28												
29				$\pi \cdot D^2$				$dC_1(l)$			$dC_2(l)$	
30	T	k1	k2	$m \cdot 4 \cdot \rho$	L	Δl	C1(l)	$\frac{dC_1(l)}{dl}$	F1	C2(l)	$\frac{dC_2(l)}{dl}$	F2
31	977	0,007491	0,001037	0,02198	160	0	0,015	2,46979E-06	0	0	2,46979E-06	0
32					159,5	0,5	0,015	2,46979E-06	1,2349E-06	0	2,46979E-06	1,23E-06
33					159	1	0,015001	2,47E-06	2,47E-06	1,23E-06	2,46997E-06	2,47E-06

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
28													
29									$dC_1(l)$			$dC_2(l)$	
30	T	k1	k2	cons	L	Δl	C1(l)	$\frac{dC_1(l)}{dl}$	F1	C2(l)	$\frac{dC_2(l)}{dl}$	F2	
31	1002	0,016200697	0,002584	0,02198	160	0	0,015	5,34137E-06	0	0	5,34137E-06	0	
32					159,5	0,5	0,015	5,34137E-06	2,67E-06	0	5,34137E-06	2,67E-06	
33					159	1	0,015003	5,34232E-06	5,34E-06	2,67E-06	5,34217E-06	5,34E-06	

9. Согласно уравнению [12], [17] вычислить константы скоростей химических реакций k_1, k_2 . Учитывая для каждой расчетной таблицы определенное в пункте 8 значение варьируемой величины. И занести их значения в соответствующие колонки расчетной таблицы.

Например для рассматриваемого случая $T \rightarrow C_1(l), C_2(l)$ в случае $m = \text{const}, C_{\text{вх}} = \text{const}$:

$$B31 = \$D\$8 * \text{EXP}(-(\$B\$8)/(\$A\$8 * A31))$$

$$C31 = \$E\$18 * \text{EXP}(-(\$C\$18)/(\$A\$18 * A31))$$

$$O31 = \$D\$8 * \text{EXP}(-(\$B\$8)/(\$A\$8 * N31))$$

$$P31 = \$E\$18 * \text{EXP}(-(\$C\$18)/(\$A\$18 * N31))$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
28												
29				$\pi \cdot D^2$				$dC_1(l)$			$dC_2(l)$	
30	T	k1	k2	$m \cdot 4 \rho$	L	Δl	C1(l)	dl	F1	C2(l)	dl	F2
31		977	0,007491	0,001037	0,02198	160	0	0,015	2,46979E-06	0	0	2,46979E-06
32						159,5	0,5	0,015	2,46979E-06	1,2349E-06	0	2,46979E-06
33						159	1	0,015001	2,47E-06	2,47E-06	1,23E-06	2,46997E-06

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
28													
29													
30		T	k1	k2	cons	L	Δl	C1(l)	$\frac{dC_1(l)}{dl}$	F1	C2(l)	$\frac{dC_2(l)}{dl}$	F2
31		1002	0.016200697	0.002584	0.02198	160	0	0.015	5.34137E-06	0	0	5.34137E-06	0
32						159.5	0.5	0.015	5.34137E-06	2.67E-06	0	5.34137E-06	2.67E-06
33						159	1	0.015003	5.34232E-06	5.34E-06	2.67E-06	5.34217E-06	5.34E-06

10. Следующая ячейка расчетной таблицы предлагается для удобства ведения расчетов и представляет собой величину равную:

$$\frac{\pi \cdot D^2}{m \cdot 4} \rho$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
28												
29				$\pi \cdot D^2$				$dC_1(l)$			$dC_2(l)$	
30	T	k1	k2	$m \cdot 4 \rho$	L	Δl	C1(l)	dl	F1	C2(l)	dl	F2
31		977	0,007491	0,001037	0,02198	160	0	0,015	2,46979E-06	0	0	2,46979E-06
32						159,5	0,5	0,015	2,46979E-06	1,2349E-06	0	2,46979E-06
33						159	1	0,015001	2,47E-06	2,47E-06	1,23E-06	2,46997E-06

Для рассматриваемого примера

$$D31=(3,14*\text{СТЕПЕНЬ}(\$G\$8;2)*\$F\$8)/(4*\$A\$13)$$

11. В соответствии с вариантом задания определить значения текущих точек интегрирования при шаге интегрирования $\Delta l=0,5$ м. Длина реактора L, определяется согласно исходных данных варианта. Указанные величины внести в соответствующие ячейки расчетных таблиц.

12.

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
28													
29									$dC_1(l)$			$dC_2(l)$	
30		T	k1	k2	cons	L	Δl	C1(l)	$\frac{dC_1(l)}{dl}$	F1	C2(l)	$\frac{dC_2(l)}{dl}$	F2
31		1002	0.016200697	0.002584	0.02198	160	0	0.015	5.34137E-06	0	0	5.34137E-06	0
32						159.5	0.5	0.015	5.34137E-06	2.67E-06	0	5.34137E-06	2.67E-06
33						159	1	0.015003	5.34232E-06	5.34E-06	2.67E-06	5.34217E-06	5.34E-06

Для рассматриваемого варианта начальное значение длины реактора L берем из исходных данных. Изменение длины реактора L происходит по следующей закономерности: $L_n = L_{n-1} - 0,5$ м, до достижения нулевого значения. Изменение величины Δl происходит начиная от нулевого значения до достижения максимального значения, равного длине ректора L по зависимости : $\Delta l_n = \Delta l_{n-1} + 0,5$ м.

13. Согласно заданию, учитывая граничные условия $C_1(0) = C_{\text{вх}}$, $C_2(0) = 0$, приступаем к вычислению изменения концентрации этилена по длине реактора. Для рассматриваемого случая $C_1(0) = 0,015$, $C_2(0) = 0$. Дальнейшее изменение указанных величин производится согласно зависимостям:

$$C_{1(n)}(l) = C_{1(n-1)} + F_{1(n-1)}$$

$$C_{2(n)}(l) = C_{2(n-1)} + F_{2(n-1)}$$

Расчет величины F_1 и F_2 приведен в пункте 14. Расчет начальных концентраций производится по всей длине реактора.

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
28													
29									$\frac{dC_1(l)}{dl}$			$\frac{dC_2(l)}{dl}$	
30	T	k1	k2	cons	L	Δl	C1(l)	$\frac{dC_1(l)}{dl}$	F1	C2(l)	$\frac{dC_2(l)}{dl}$	F2	
31		1002	0,016200697	0,002584	0,02198	160	0	0,015	5,34137E-06	0	5,34137E-06	0	
32						159,5	0,5	0,015	5,34137E-06	2,67E-06	5,34137E-06	2,67E-06	
33						159	1	0,015003	5,34232E-06	5,34E-06	2,67E-06	5,34217E-06	5,34E-06

14. Вычислить изменение концентраций этилена C_1 , C_2 по длине реактора.

Для рассматриваемого варианта $H31 = \$B\$31 * \$D\$31 * G31$ и $J31 = \$D\$31 * (\$B\$31 * G31 - \$C\$31 * J31)$. Расчет указанных величин производится по всей длине реактора.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
28												
29				$\pi \cdot D^2$				$\frac{dC_1(l)}{dl}$			$\frac{dC_2(l)}{dl}$	
30	T	k1	k2	$m \cdot 4 \cdot \rho$	L	Δl	C1(l)	$\frac{dC_1(l)}{dl}$	F1	C2(l)	$\frac{dC_2(l)}{dl}$	F2
31		977	0,007491	0,001037	0,02198	160	0	0,015	2,46979E-06	0	2,46979E-06	0
32						159,5	0,5	0,015	2,46979E-06	1,2349E-06	2,46979E-06	1,23E-06
33						159	1	0,015001	2,47E-06	2,47E-06	1,23E-06	2,46997E-06

15. Для выполнения приближенного интегрирования по методу Эйлера необходимо произвести расчеты величин F_1 и F_2 , которые представляют собой произведение величины изменения концентрации в определенной точке на величину шага интегрирования в указанной точке. Для рассматриваемого примера:

$$I31 = F31 * H31$$

$$L31 = K31 * F31$$

Расчет указанных величин производится по всей длине реактора.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
28												
29				$\pi \cdot D^2$				$\frac{dC_1(l)}{dl}$			$\frac{dC_2(l)}{dl}$	
30	T	k1	k2	$m \cdot 4 \cdot \rho$	L	Δl	C1(l)	$\frac{dC_1(l)}{dl}$	F1	C2(l)	$\frac{dC_2(l)}{dl}$	F2
31		977	0,007491	0,001037	0,02198	160	0	0,015	2,46979E-06	0	2,46979E-06	0
32						159,5	0,5	0,015	2,46979E-06	1,2349E-06	2,46979E-06	1,23E-06
33						159	1	0,015001	2,47E-06	2,47E-06	1,23E-06	2,46997E-06

16. Построить график зависимости $T \rightarrow C_1(l)$, $C_2(l)$ или $C_{\text{вх}} \rightarrow C_1(l)$, $C_2(l)$ или $m \rightarrow C_1(l)$, $C_2(l)$, согласно данным, указанным в задании. Для рассматриваемого примера график зависимости будет иметь вид $T \rightarrow C_1(l)$, $C_2(l)$

Щелчком левой клавиши мыши открываем на панели «Мастер диаграмм», на вкладке «Стандартные» выбираем вид диаграммы – точечную с гладкими кривыми и маркерами. Нажимаем кнопку «далее».

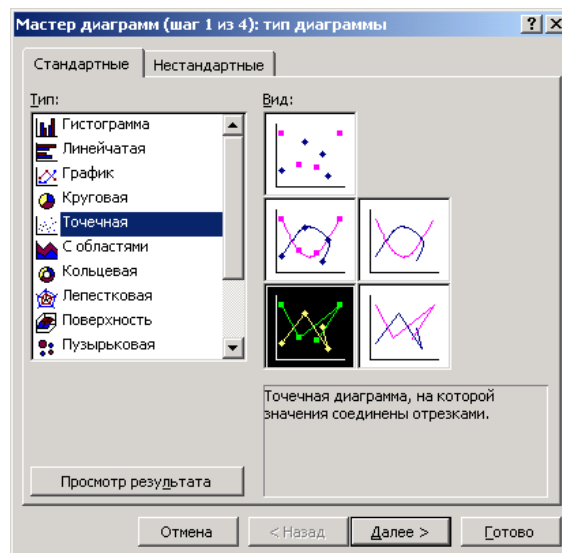


Рис. 3. Построение графиков, выбор диаграммы

На открывшейся вкладке «Диапазон данных» в поле «диапазон» вводим все значения интервалов $\frac{dC_1(l)}{dl}$ и $\frac{dC_2(l)}{dl}$.

Для рассматриваемого примера подводим курсор к ячейке Н31, нажимаем правую клавишу мыши и, не отпуская ее захватываем весь интервал значений $\frac{dC_1(l)}{dl}$. Далее нажимаем клавишу Ctrl и, не отпуская ее подводим курсор к ячейке К31 и производим аналогичную процедуру для значений $\frac{dC_2(l)}{dl}$. Далее открываем вкладку «Ряд» и в поле «имя» вводим C_1 , в поле «значения x» вводим весь диапазон значений dl .

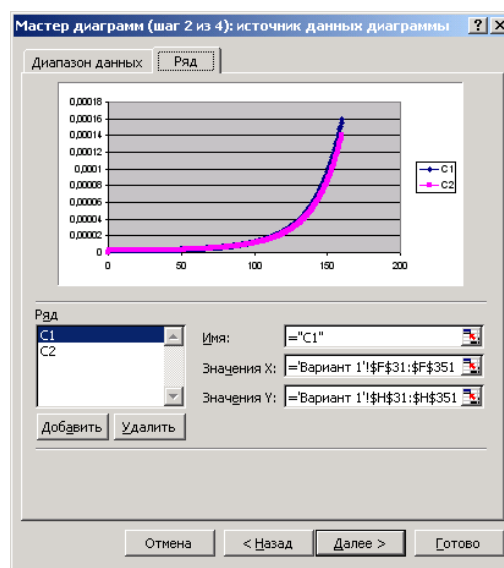


Рис. 4. Построение графиков, ввод переменных

Для этого подводим курсор к ячейке F31, нажимаем правую клавишу мыши и, не отпуская ее протягиваем до конца диапазона, далее в поле

«значения y » вводим весь диапазон значений изменения концентраций, для чего подводим курсор к ячейке F31, нажимаем правую клавишу мыши и, не отпуская ее, протягиваем до конца диапазона. После чего нажимаем кнопку «Добавить ряд» и производим аналогичные действия для C_2 . В поле «имя» вводим C_2 , в поле «значения x » вводим весь диапазон значений Δt , для чего подводим курсор к ячейке F31, нажимаем правую клавишу мыши и, не отпуская ее, протягиваем до конца диапазона. Далее в поле «значения y » вводим весь диапазон значений изменения концентраций, для чего подводим курсор к ячейке K31, нажимаем правую клавишу мыши и, не отпуская ее, протягиваем до конца диапазона. Нажимаем кнопку «далее».

В открывшемся окне в поле «название диаграммы» вводим для рассматриваемого примера: «Изменение концентрации этилена при $m = \text{const}$, $C_{\text{вх}} = \text{const}$ ». В поле «ось X» вводим Δt , в поле «ось Y» вводим C . Нажимаем кнопку «далее» и кнопку «готово».

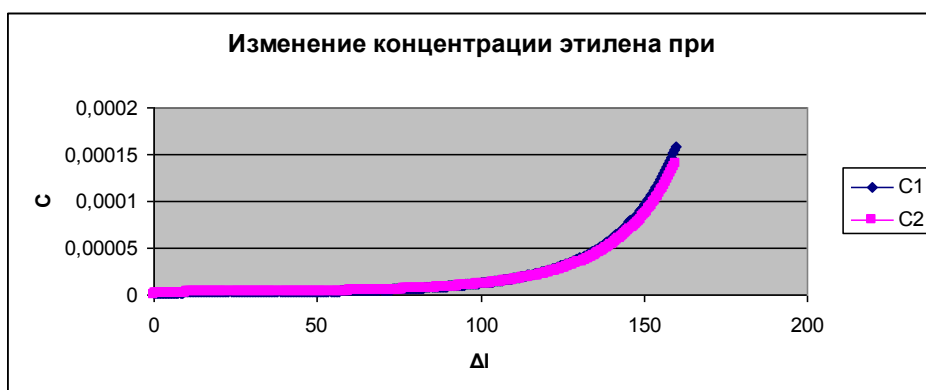


Рис. 5. Построение итогового графика

17. Составить отчет о проделанной работе используя стандартное приложение Microsoft Word.

Контрольные вопросы

1. Как в пространственно-временном континууме характеризуются объекты с распределенными параметрами?
2. Какие аппараты химической технологии можно отнести к объектам с распределенными параметрами в статическом режиме?
3. Какие допущения используются при выводе модели объекта с распределенными параметрами в статическом режиме (на примере)?
4. Особенности вывода модели объекта химической технологии с распределенными параметрами для статического режима.
5. Как можно выразить скорость u через массовый расход m реакционной среды через аппарат?
6. Какой системой уравнений можно описать разложение этилена на ацетилен и водород с учетом гидродинамики процесса?

Лабораторная работа № 3

СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ КООРДИНАТАМИ

Цель: приобретение навыков моделирования динамики объектов с сосредоточенными координатами.

Задание: построить математическую модель в виде системы уравнений, связывающих выходную координату $C_{\text{вых}}$ в входными $C_{\text{вх}}$, $m_{\text{вх}}$ и $T_{\text{п}}$. Сделать анализ возможности регулирования объекта.

Общие положения

Динамические режимы объектов с сосредоточенными координатами описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений, в которых учитывается изменение входных и выходных координат во времени. Например, РИС в неустановившемся режиме.

Рассмотрим тот же объект, что и лабораторной работе 1 (выпарной аппарат), но в динамических условиях.

Построение модели начинаем с уравнений материального и теплового баланса. Но, в отличие от уравнений материального баланса для этого же аппарата в статических условиях, уравнения будут иметь не алгебраический вид, а записаны в дифференциальной форме.

Уравнение материального баланса:

$$\frac{d(M(\tau))}{d\tau} = m_{\text{вх}}(\tau) - m_{\text{вых}}(\tau) - m_{\text{ен}}(\tau) \quad (19)$$

где M - масса раствора, находящегося в аппарате;

τ - время.

Уравнение расхода через выходной вентиль:

$$m_{\text{вых}} = \sqrt{P_0 + H\rho - P_1} \quad (20)$$

где μ - коэффициент пропускной способности выходного вентиля;

P_0 - давление в аппарате;

P_1 - давление после выходного вентиля;

H - уровень раствора в аппарате;

ρ - плотность раствора;

Уравнение материального баланса по сухому веществу:

$$\frac{d(M(\tau)C_{\text{вых}}(\tau))}{d\tau} = m_{\text{вх}}(\tau)C_{\text{вх}}(\tau) - m_{\text{вых}}(\tau)C_{\text{вых}}(\tau) \quad (21)$$

Уравнение теплового баланса состоит из тех же слагаемых, что и для описания теплового баланса выпарного аппарата в статических условиях, но записывается в дифференциальном виде:

$$c_t \frac{d(M(\tau)T_p(\tau))}{d\tau} = k_t F(T_n - T_p(\tau)) + (m_{ex}(\tau) - m_{ex}(\tau))c_t T_p(\tau) - m_{em}r \quad (22)$$

Поскольку все тепло, передаваемое от греющего пара к кипящему раствору расходуется только на выпаривание растворителя, температура раствора не изменяется, поэтому T_p считаем независимой от времени, и уравнение теплового баланса упрощается:

$$c_t T_p \frac{d(M(\tau))}{d\tau} = k_t F(T_n - T_p) + (m_{ex}(\tau) - m_{ex}(\tau))c_t T_p - m_{em}r \quad (23)$$

Масса M раствора в аппарате может быть определена как

$$M = Vc, \text{ а } V = HS, \text{ то } M = HSc,$$

где S - площадь основания аппарата;

H - высота аппарата,

тогда мы можем записать уравнение (2) в виде

$$m_{ex} = \sigma \sqrt{P_0 + \frac{M}{S} - P_1}, \quad (24)$$

тогда уравнение (1), соответственно:

$$\frac{d(M(\tau))}{d\tau} = m_{ex}(\tau) - \sigma \sqrt{P_0 + M(\tau)/S - P_1} - m_{em}(\tau) \quad (25)$$

Математическую модель работы выпарного аппарата в динамических условиях представим в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d(M(\tau))}{d\tau} = m_{ex}(\tau) - \sigma \sqrt{P_0 + M(\tau)/S - P_1} - m_{em}(\tau) \\ \frac{d(M(\tau)C_{ex}(\tau))}{d\tau} = m_{ex}(\tau)C_{ex}(\tau) - m_{ex}(\tau)C_{ex}(\tau) \\ c_t T_p \frac{d(M(\tau))}{d\tau} = k_t F(T_n - T_p) + (m_{ex}(\tau) - m_{ex}(\tau))c_t T_p - m_{em}(\tau) \end{cases} \quad (26)$$

Для решения системы уравнений (8) математической модели динамики необходимо задать начальные условия. В качестве начальных условий принимаем значения $C_{вх}$, $m_{вх}$, T_n , T_p соответствующие $C_{вых}$, полученные в

п.3 лабораторной работы № 1. Начальное условие по m_{BT} , определяем из уравнений (1)-(2) лабораторной работы № 1:

$$m_{em} = m_{ex} \left(1 - \frac{C_{ex}}{C_{exx}} \right). \quad (27)$$

Начальное значение M определим из (6) и уравнения (1) лабораторной работы № 1:

$$M = S \left(\left(\frac{m_{ex} - m_{em}}{\sigma} \right)^2 + P_1 - P_0 \right), \quad (28)$$

где m_{BX} , m_{BT} - значения массовых расходов используемой точки статической характеристики.

Исследование динамики выпарного аппарата будем осуществлять, подавая на вход ступенчатое возмущение отдельно по каналам C_{BX} , m_{BX} и T_{II} .

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (21 - 24) проводим по методу Эйлера. Шаг интегрирования $\Delta\tau = 10$ с; интервал интегрирования от 0 до 500 с.

Порядок выполнения работы

1. Составить блок-схему алгоритма решения системы уравнений (21 - 23) с начальным условием (24) математической модели динамики выпарного аппарата.

Например:

Φ	$M(\Phi)$	Δm_{BX}	$m_{\text{BX}}(\Phi)$	$\sigma \sqrt{P_0 + M(\tau) / S - P_1}$	$m_{\text{BX}}(\tau) - \sigma \sqrt{P_0 + M(\tau) / S - P_1} - m_{\text{BT}}(\tau) \, .$				
$\mathbf{h}$	$h \cdot f(x_{n-1}, y_{n-1})$	Φ	$\mathbf{C}_{\text{ВЫХ}}(\Phi)$	$\mathbf{C}_{\text{BX}}(\Phi)$	$\Delta \mathbf{C}_{\text{BX}}$	$\mathbf{T}_{\Pi}$	$\Delta \mathbf{T}_{\Pi}$	$\frac{k_t \cdot F \cdot (T_n - T_p)}{c_t \cdot T_p}$	
$\frac{k_t \cdot F \cdot (T_n - T_p)}{c_t \cdot T_p} + m_{\text{BX}}(\tau) - m_{\text{ВЫХ}}(\tau) - \frac{m_{\text{BT}}(\tau)}{c_t \cdot T_p}$				$\frac{m_{\alpha\alpha}(\tau) \cdot C_{\alpha\alpha}(\tau) - m_{\text{об}\alpha\alpha}(\tau) \cdot C_{\text{об}\alpha\alpha}(\tau) - C_{\alpha\alpha}(\tau) \cdot \frac{dM(\tau)}{d\tau}}{M(\tau)}$				$\mathbf{h}$	$h \cdot f(x_{n-1}, y_{n-1})$

2. Получить динамические характеристики по следующим каналам:

- $C_{ex} \rightarrow C_{exx}$; при этом $m_{BX} = \text{const}$, $T_{II} = \text{const}$;
- $m_{ex} \rightarrow C_{exx}$; при этом $C_{BX} = \text{const}$, $T_{II} = \text{const}$;
- $T_p \rightarrow C_{exx}$; при этом $C_{BX} = \text{const}$, $m_{BX} = \text{const}$.

Ступенчатые возмущения ΔC_{BX} , Δm_{BX} , ΔT_{II} задаются относительно точки начального условия.

Параметры уравнений: $\sigma = 0,12 \text{ кг}^{0,5} \text{ м/с}$; $S = 0,75 \text{ м}^2$; $P_0 = 7900 \text{ кг/м}^2$; $P_1 = 7600 \text{ кг/м}^2$.

Содержание отчета

1. Привести значения $m_{\text{вх}}$, $m_{\text{вт}}$, $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{вых}}$, $T_{\text{п}}$ в точке начального условия, взятой со статической характеристики, а также рассчитанное в этой точке значение массы M раствора в аппарате.

2. По результатам расчетов построить три пары графиков: $C_{\text{вх}}(\tau)$, $C_{\text{вых}}(\tau)$; $m_{\text{вх}}(\tau)$, $C_{\text{вых}}(\tau)$; $T_{\text{п}}(\tau)$, $C_{\text{вых}}(\tau)$. Диапазон изменения времени $[0, \tau_{\text{тах}}]$.

3. Вывод.

Выполнение работы

Задание: построить математическую модель в виде системы уравнений, связывающих выходную координату $C_{\text{вых}}$ с входными $C_{\text{вх}}$, $m_{\text{вх}}$ и $T_{\text{п}}$. Сделать анализ возможности регулирования объекта.

1. Начальные условия для использования в расчетных формулах:

$C_{\text{вх}}$	$T_{\text{п}}$	$m_{\text{вт}}$	$m_{\text{вх}}$	$\Delta C_{\text{вх}}$	$\Delta m_{\text{вх}}$	$\Delta T_{\text{п}}$	$\Delta \tau$	h	$m_{\text{вых}}$	$C_{\text{вых}}$
г/л	град	кг	кг	%	кг/с	град	с		кг	г/л
200	130	1,062	8,5	2	3,2	8,5	10	10	7,438	228,56

$\Delta \tau$ и h выбирают произвольно, придерживаясь целесообразности расчетов.

2. Значения постоянных величин:

σ	S	P_0	P_1	r	k_t	F	c_t	T_p
$\text{кг}^{0,5} \text{ м/с}$	м^2	кг/м^2	кг/м^2	Дж/кг	$\text{Вт/м}^2 \text{ град}$	м^2	Дж/кг град	град
0,12	0,75	7900	7600	2260000	5000	10	4187	90

3. Определим начальное условие $m_{\text{вт}}$:

$$m_{\text{вт}} = m_{\text{вх}} \left(1 - \frac{C_{\text{вх}}}{C_{\text{вых}}} \right)$$

$m_{\text{вт}}$	1,062
-----------------	-------

4. Определим начальное значение M :

$$M = S \left(\left(\frac{m_{\text{вх}} - m_{\text{вт}}}{\sigma} \right)^2 + P_1 - P_0 \right)$$

M	2656,420
-----	----------

5. Формулы, которые используем в расчетных таблицах:

$$m_{\text{вх}} = \sigma \sqrt{P_0 + \frac{M}{S} - P_1}$$

$$1. \sigma \sqrt{P_0 + \frac{M(\tau)}{S} - P_1};$$

$$2. m_{\text{вх}}(\tau) - \sigma \sqrt{P_0 + \frac{M(\tau)}{S} - P_1} - m_{\text{вт}}(\tau);$$

$$3. \frac{m_{\text{вх}}(\tau) \cdot C_{\text{вх}}(\tau) - m_{\text{ввх}}(\tau) \cdot C_{\text{ввх}}(\tau) - C_{\text{вх}}(\tau) \cdot \frac{dM(\tau)}{d\tau}}{M(\tau)};$$

$$4. h \cdot f(x_{n-1}, y_{n-1});$$

$$5. \frac{k_t \cdot F \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{р}})}{c_t \cdot T_{\text{р}}} + m_{\text{вх}}(\tau) - m_{\text{вых}}(\tau) - \frac{m_{\text{вт}}(\tau) \cdot \tau}{c_t \cdot T_{\text{р}}};$$

$$6. \frac{k_t \cdot F \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{р}})}{c_t \cdot T_{\text{р}}}.$$

6. Расчет влияния $C_{\text{вх}}$ на $C_{\text{вых}}$:

По приведенным выше формулам, выполняем расчеты. Нумерацию формул делали для уменьшения размера ячеек и сокращения текста. Эту операцию можно не выполнять, а вносить полный текст расчетной формулы.

Т	М(Т)	Δтвх	твх(Т)	форм №1	форм №2	h	форм №4	Т	Свых(Т)	Свх(Т)	Δ Свх	Тп	Δ Тп	*(Тп-Тр)/С	форм №5	форм №3	h	форм №6
0	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	0	228,56	200	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0
10	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	10	223,99	196	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0
20	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	20	219,41	192	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0
30	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	30	214,84	188	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0
40	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	40	210,27	184	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
460	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	460	18,28	16	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0
470	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	470	13,71	12	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0
480	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	480	9,14	8	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0
490	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	490	4,57	4	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0
500	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	500	0,00	0	4	130	0	5,31	6,35	0	10	0

По полученным результатам строим графические зависимости:

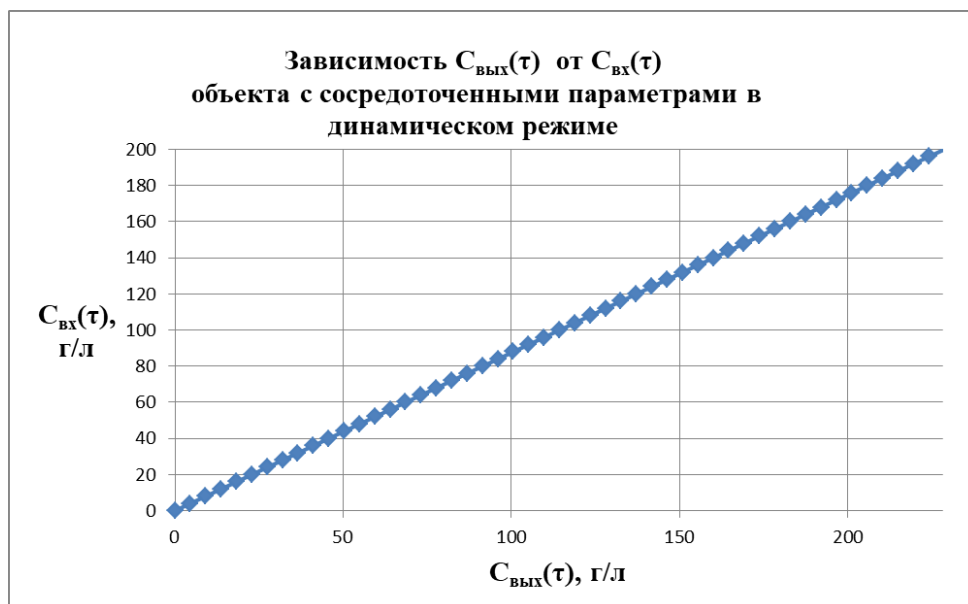


Рис. 1. Зависимость $C_{\text{вых}}$ от $C_{\text{вх}}$ объекта с сосредоточенными параметрами в динамическом режиме

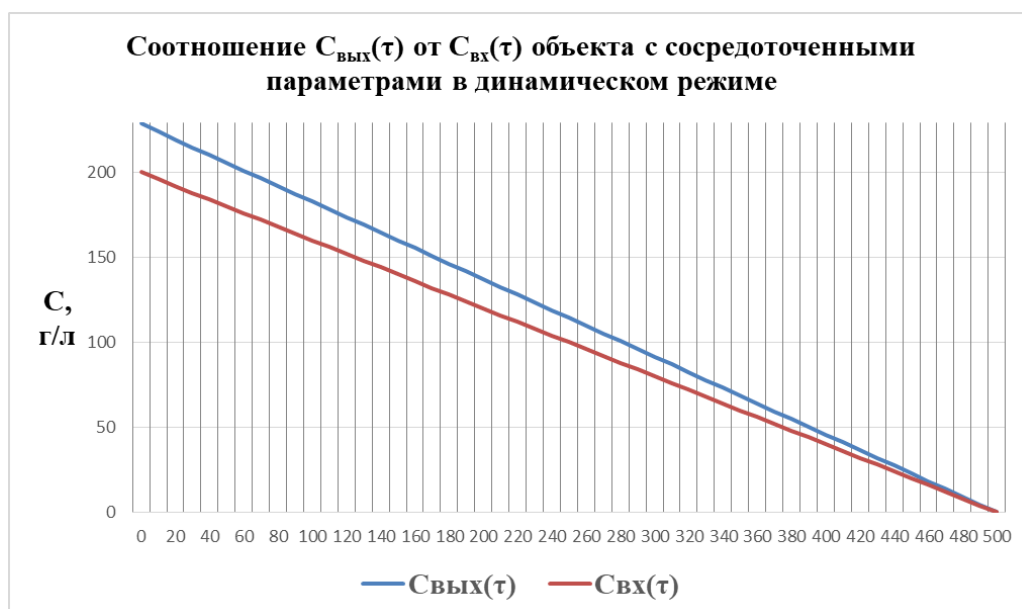


Рис. 2. Соотношение $C_{\text{вых}}$ от $C_{\text{вх}}$ объекта с сосредоточенными параметрами в динамическом режиме

Вывод: с уменьшением $C_{\text{вх}}$ входной концентрации уменьшается и $C_{\text{вых}}$ выходная концентрация. Зависимость линейная. На интервале от 1 до 450 г/л скорость изменения концентрации выхода больше, чем скорость входа. От 450 до 500 г/л скорости измерения концентрации входа и выхода примерно равны.

7. Расчет влияния $m_{\text{вых}}$ на $C_{\text{вых}}$:

T	M(T)	$\Delta m_{вх}$	$m_{вх}(T)$	$m_{вых}(T)$	$H(M(T))/d$	h	форм №4	T	Свых(T)	Свх(T)	$\Delta C_{вх}$	Tn	ΔTn	$r(Tn-Tr)/C$	форм №5	h	форм №3	форм №6
0	2656,42	3,2	8,5	7,44	0,00	10	0,00	0	0,00	200	0	130	0	5,31	0,00	10	1700,00	17000,00
10	2656,42	3,2	11,7	7,44	3,20	10	32,00	10	8,57	200	0	130	0	5,31	3,20	10	2276,02	22760,24
20	2688,42	3,2	14,9	7,48	6,36	10	63,59	20	21,00	200	0	130	0	5,31	6,36	10	2822,46	28224,60
30	2752,01	3,2	18,1	7,56	9,48	10	94,78	30	36,46	200	0	130	0	5,31	9,48	10	3343,68	33436,81
40	2846,78	3,2	21,3	7,68	12,56	10	125,58	40	54,03	200	0	130	0	5,31	12,56	10	3844,20	38442,04
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
460	32506,58	3,2	155,7	25,07	129,57	10	1295,69	460	325,27	200	0	130	0	5,31	129,57	10	22985,02	229850,18
470	33802,27	3,2	158,9	25,56	132,28	10	1322,78	470	326,02	200	0	130	0	5,31	132,28	10	23446,19	234461,88
480	35125,05	3,2	162,1	26,05	134,99	10	1349,86	480	326,72	200	0	130	0	5,31	134,99	10	23907,50	239074,98
490	36474,91	3,2	165,3	26,55	137,69	10	1376,93	490	327,38	200	0	130	0	5,31	137,69	10	24368,94	243689,39
500	37851,84	3,2	168,5	27,04	140,40	10	1404,00	500	328,01	200	0	130	0	5,31	140,40	10	24830,50	248305,04

Графические зависимости:

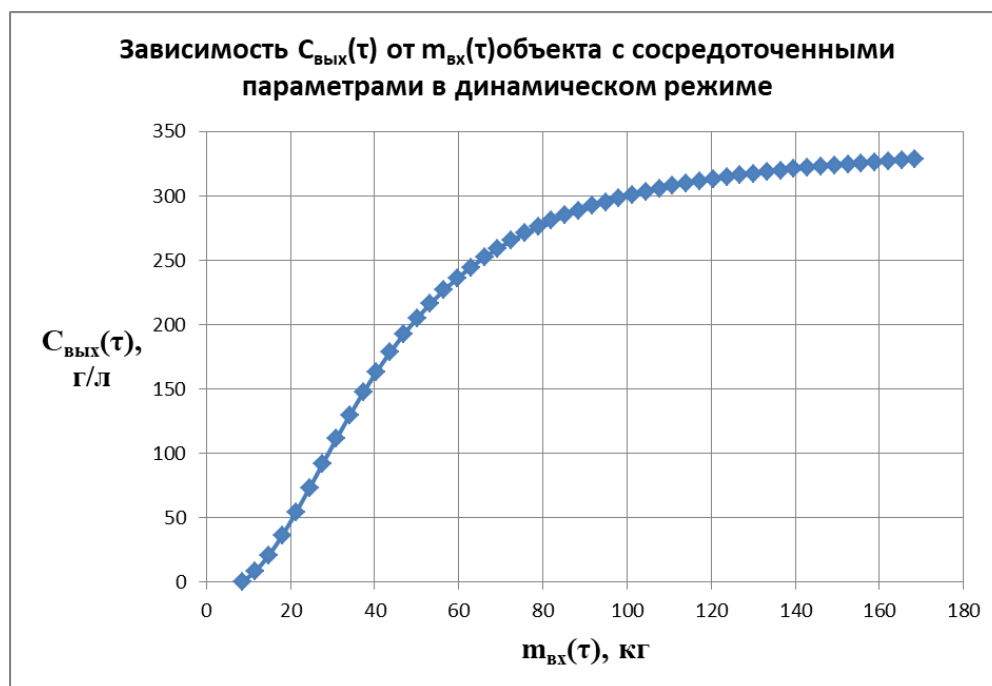


Рис. 3. Зависимость Свых от mвх объекта с сосредоточенными параметрами в динамическом режиме

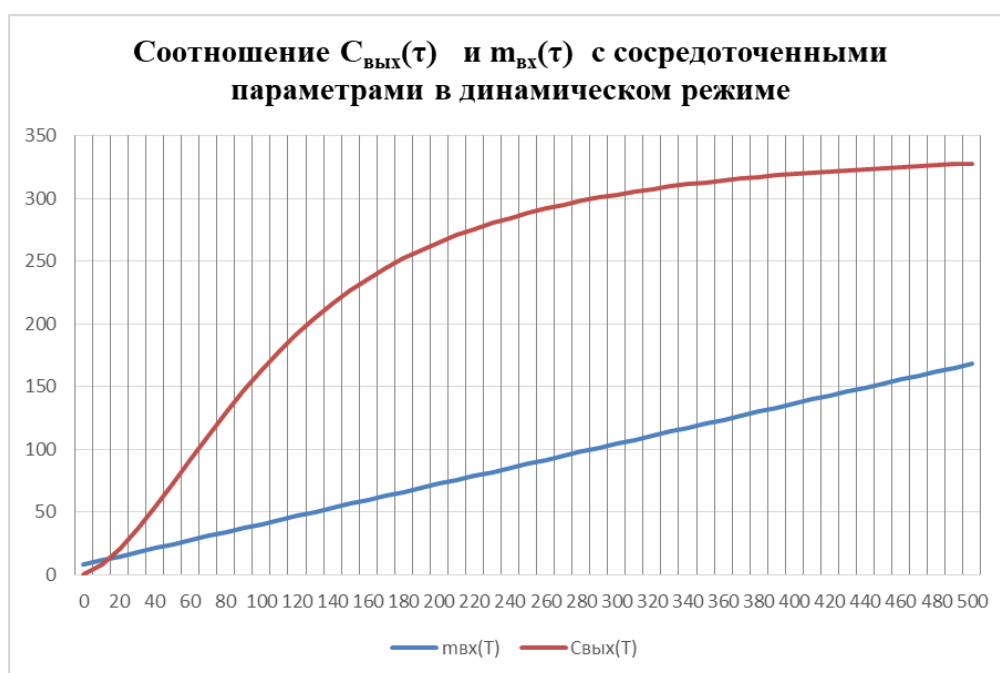


Рис. 4. Соотношение Свых от mвх объекта с сосредоточенными параметрами в динамическом режиме

Вывод: При увеличении $m_{\text{вх}}$ выходная концентрация $C_{\text{вых}}$ достигает максимального значения, т.к. при заданных значениях $T_{\text{п}}$ и $C_{\text{вх}}$ дальнейшее увеличение происходить не может. Зависимость нелинейная. От 0 до 20 скорость увеличения концентрации $C_{\text{вых}}$ обгоняет скорость увеличения массы $m_{\text{вх}}$, от 20 до 320 скорость изменения концентрации больше, чем скорость изменения массы. От 320 до 500 скорости примерно одинаковы.

8. Расчет влияния $T_{\text{п}}$ на $C_{\text{вых}}$:

T	M(T)	$\Delta m_{\text{вх}}$	$m_{\text{вх}}(T)$	$m_{\text{вых}}(T)$	$\frac{d(M(T))}{dt}$	h	форм №4	T	$C_{\text{вых}}(T)$	$C_{\text{вх}}(T)$	$\Delta C_{\text{вх}}$	$T_{\text{п}}$	$\Delta T_{\text{п}}$	$\frac{*(T_{\text{п}}-T_{\text{р}})}{d}$	форм №5	h	форм №3	форм №6
0	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	0	0,00	200	0	130,00	8,5	5,31	0,00	10	1700,00	17000,00
10	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	10	6,23	200	0	121,50	8,5	4,18	-1,13	10	1653,70	16536,97
20	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	20	12,12	200	0	113,00	8,5	3,05	-2,26	10	1609,85	16098,49
30	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	30	17,71	200	0	104,50	8,5	1,92	-3,38	10	1568,27	15682,66
40	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	40	23,02	200	0	96,00	8,5	0,80	-4,51	10	1528,78	15287,77
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
460	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	460	128,66	200	0	-261,00	8,5	-46,57	-51,88	10	743,01	7430,08
470	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	470	129,87	200	0	-269,50	8,5	-47,70	-53,01	10	734,03	7340,25
480	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	480	131,05	200	0	-278,00	8,5	-48,83	-54,14	10	725,26	7252,57
490	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	490	132,20	200	0	-286,50	8,5	-49,96	-55,26	10	716,70	7166,96
500	2656,42	0	8,5	7,44	0	10	0	500	133,32	200	0	-295,00	8,5	-51,08	-56,39	10	708,33	7083,34

Графические зависимости:

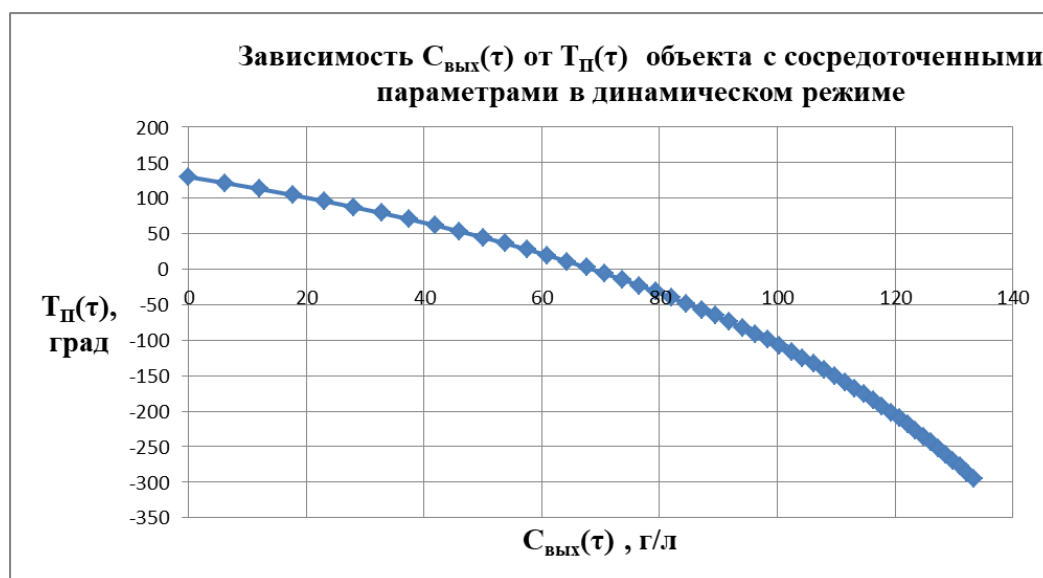


Рис. 5. Зависимость $C_{\text{вых}}$ от $T_{\text{вх}}$ объекта с сосредоточенными параметрами в динамическом режиме

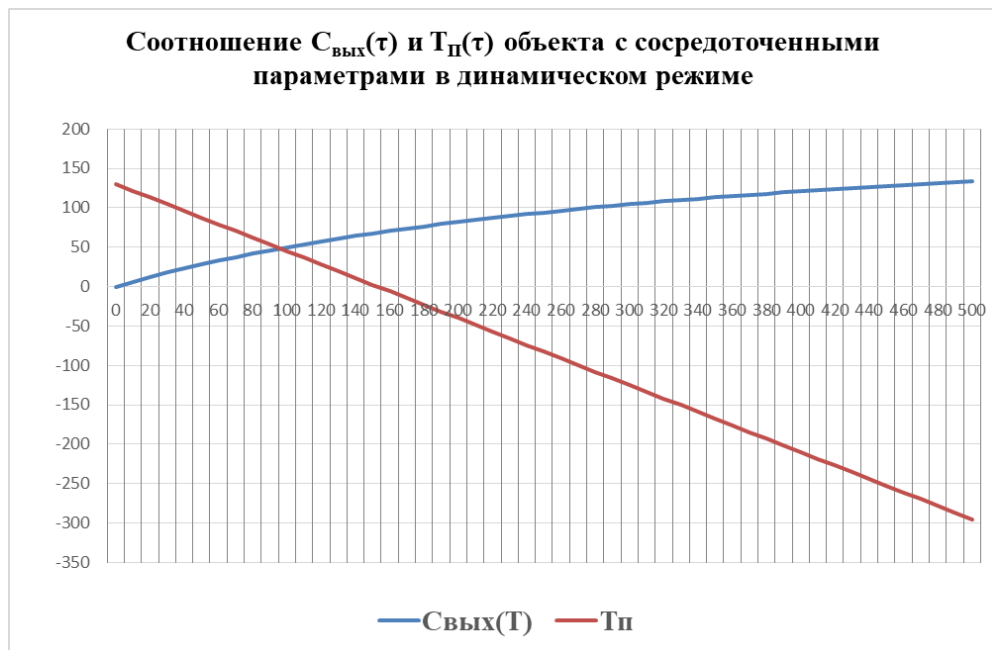


Рис. 6. Соотношение $C_{\text{вых}}$ от $T_{\text{вх}}$ объекта с сосредоточенными параметрами в динамическом режиме

Вывод: При уменьшении температуры греющего пара $T_{\text{п}}$ выходная концентрация $C_{\text{вых}}$ изначально растет, далее стабилизируется, изменений не наблюдается.

9. Вывод по работе:

На $C_{\text{вых}}$ влияют $C_{\text{вх}}$, $m_{\text{вых}}$, $T_{\text{п}}$. Регулирование процесса выпаривания можно осуществлять варьируя $m_{\text{вых}}$. Скорость упаривания снижается при уменьшении $C_{\text{вх}}$ с различным градиентом на различных интервалах (1-450-500).

Контрольные вопросы

1. Какими уравнениями описываются динамические режимы объектов с сосредоточенными координатами?
2. Какие базовые уравнения используются при составлении модели динамики объекта с сосредоточенными параметрами?
3. В чем отличие уравнений материального баланса для такого же аппарата в статических условиях?
4. Основные уравнения математической модели динамики выпарного аппарата.
5. Основные допущения вывода математической модели динамики выпарного аппарата.
6. Начальные условия для решения математической модели динамики выпарного аппарата.

Лабораторная работа № 4

СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КООРДИНАТАМИ

Цель: приобрести навыки моделирования динамики объектов с распределенными координатами, произвести численное решение уравнений динамики и получить динамические характеристики объекта с распределенными параметрами на ЭВМ.

Общие положения

Динамический режим работы объекта характеризуется изменением выходных координат при изменении входных или возмущающих параметров.

Объекты с распределенными координатами характеризуются изменением технологических параметров (температуры, концентрации, плотности и т.д.) по длине, радиусу, и для их описания используются гидродинамические модели «идеального вытеснения», диффузионные, ячеечные и др.

При описании процессов, протекающих в объектах с распределенными координатами в динамическом режиме, учитывают изменение концентрации, температуры и других координат во времени, по длине, радиусу. Поэтому математическая модель динамики объекта с распределенными координатами представляет собой систему уравнений в частных производных.

Одним из основных элементов оборудования на АЭС с ВВЭР является парогенератор, который, по сути, является теплообменником. Поэтому в качестве объекта исследования рассмотрим динамику процесса нагревания жидкости в трубчатом теплообменнике.

Трубчатый теплообменник (рис. 1) представляет собой пучок труб, помещенных в кожух, по которым движется нагреваемая жидкость. В межтрубном пространстве движется теплоноситель. При движении по трубам жидкость нагревается за счет тепла, поступающего от теплоносителя. Движущей силой процесса является разность температур нагреваемой жидкости и теплоносителя.

Входными параметрами для трубчатого теплообменника являются:

- температура $T_{вх}$ нагреваемой жидкости на входе в теплообменник;
- температура T_{ϕ} теплоносителя;
- скорость u движения жидкости по трубам.

Выходная координата – температура $T(\phi, l)$ в любой момент времени ϕ в любом сечении, находящемся на расстоянии l от начала трубы.

Для вывода модели динамики объекта с распределенными параметрами примем следующие допущения:

1. Движение нагреваемой жидкости в трубе описывается гидродинамической моделью «идеального вытеснения».
2. Температура теплоносителя T_T постоянна по длине трубы и во времени.

3. Коэффициент теплопередачи k_ϕ не меняется по длине трубы.
4. Плотность ρ и теплоемкость c_T нагреваемой жидкости постоянны.

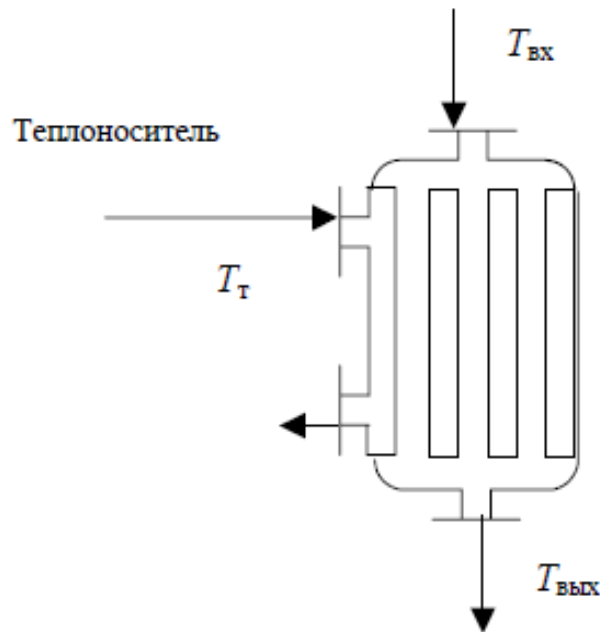


Рис. 1. Конструкция трубчатого теплообменника

С учетом принятых допущений математическую модель динамики трубчатого теплообменника можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = -u \frac{\partial q}{\partial l} + Q_T \quad (29)$$

где ∂q – изменение количества тепла нагреваемой жидкости;

Q_T – количество тепла, поступающее к жидкости от теплоносителя.

Выразим ∂q через изменение температуры ∂T нагреваемой жидкости:

$$\partial q = c_t \Delta V \rho \partial T, \quad (30)$$

где c_t – теплоемкость нагреваемой жидкости;

ρ – плотность нагреваемой жидкости;

ΔV – объем нагреваемой жидкости.

Аналогично выразим через T тепло Q_T .

$$Q_T = k_T \Delta F (T_T - T), \quad (31)$$

где k_T – коэффициент теплопередачи;

ΔF – площадь поверхности теплообмена;

T_T – температура теплоносителя.

Подставим зависимости (1) и (2) в уравнение (1):

$$c_t \Delta V \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = -u c_t \Delta V \rho \frac{\partial T}{\partial l} + k_T \Delta F (T_T - T) \quad (32)$$

Выразим ΔV и ΔF через длину трубы Δl и диаметр D трубы:

$$\Delta F = \pi D \Delta l \Delta V = \frac{\Delta l \pi D^2}{4} \quad (33)$$

Окончательно получаем:

$$\frac{\partial T(\tau, l)}{\partial \tau} + u \frac{\partial T(\tau, l)}{\partial l} = \frac{4k_T}{c_T \rho D} (T_T - T(\tau, l)) \quad (34)$$

Краевые условия $T(0, l) = T_0(l)$; $T(\tau, 0) = T_{\text{вх}}(\tau)$.

Область определения независимых переменных: $0 \leq l \leq L$, где L – длина трубы реактора.

Для решения дифференциального уравнения (34) будем использовать метод сведения к обыкновенным дифференциальным уравнениям с параметром, называемый также методом характеристик.

Заменим τ и l через α и β :

$$\tau = \alpha + \beta, \quad l = u(\alpha - \beta), \quad T(\tau, l) = T(\tau(\alpha, \beta), l(\alpha, \beta)) \quad (35)$$

В результате получаем обыкновенное дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{dT}{d\alpha} = \frac{4k_T}{c_T \rho D} (T_T - T(\alpha, \beta)). \quad (36)$$

Уравнение (36) полностью эквивалентно уравнению (34). Преобразуем области построения независимых переменных:

$$l = 0 \Rightarrow u(\alpha - \beta) = 0 \Rightarrow \alpha = \beta;$$

$$\tau = 0 \Rightarrow \alpha + \beta = 0 \Rightarrow \alpha = -\beta;$$

$$l = L \Rightarrow u(\alpha - \beta) = L \Rightarrow \alpha = \beta + \frac{L}{u};$$

$$\tau = \tau_{\text{max}} \Rightarrow \alpha + \beta = \tau_{\text{max}} \Rightarrow \alpha = -\beta + \tau_{\text{max}}.$$

Начальное условие $T_0(l)$, будет при $\alpha = \beta$:

$$l = u(-\beta - \beta) = -2u\beta; T_0(l)|_{\alpha = -\beta} = T_0(-2u\beta). \quad (37)$$

Граничное условие $T_{\text{вх}}(\tau)$ при $\alpha = \beta$:

$$\tau = \beta + \beta = 2\beta; T_{\alpha}(l)|_{\alpha=\beta} = T_{\alpha}(2\beta). \quad (38)$$

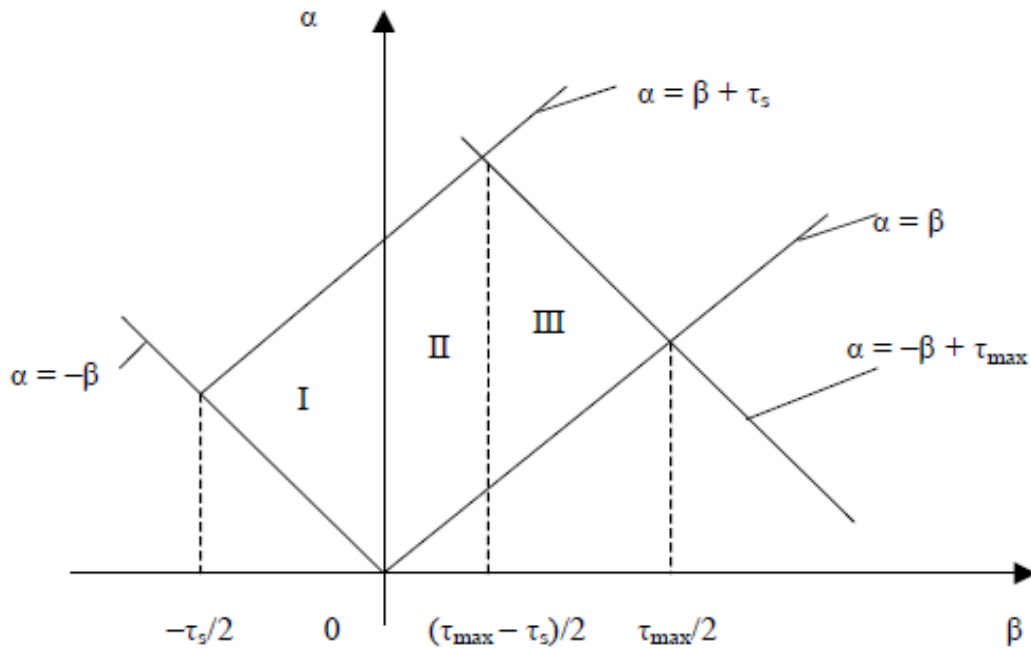


Рис. 2. Области построения независимых переменных и краевые условия:
 $\tau_s = L/u$ - среднее время пребывания

В результате получили три области, отличающиеся краевыми условиями (рис. 2).

- I. Область определения $\beta \in \left[-\frac{\tau_s}{2}, 2\right]$:
 1. Начинать интегрирование в уравнения (36) со значениями $\alpha = -\beta$;
 2. За начальное условие для уравнения (36) взять $T_0(-2u\beta)$;
 3. Заканчивать интегрирование при условии $\alpha = -\beta + \tau_s$.
- II. Область определения $\beta \in \left[0, -\frac{(\tau_{\max} - \tau_s)}{2}\right]$:
 1. Начинать интегрирование в уравнения (36) со значениями $\alpha = \beta$;
 2. За начальное условие для уравнения (36) взять $T_{\alpha}(2\beta)$;
 3. Заканчивать интегрирование при условии $\alpha = \beta + \tau_s$.
- III. Область определения $\beta \in \left[\frac{(\tau_{\max} - \tau_s)}{2}, \frac{\tau_{\max}}{2}\right]$:
 1. Начинать интегрирование в уравнения (36) со значениями $\alpha = \beta$;
 2. За начальное условие для уравнения (36) взять $T_{\alpha}(2\beta)$;
 3. Заканчивать интегрирование при условии $\alpha = -\beta + \tau_s$.

Порядок выполнения работы

1. Составить блок-схему алгоритма решения уравнения (36) для трех областей определения независимых переменных α и β .

2. Выполнить необходимые расчеты используя ExcelMicrosoft.

3. Получить динамическую характеристику трубчатого теплообменника и построить ее в виде графика в координатах T , $\tau\phi$, l .

Постоянные величины, необходимые для расчета:

$$k_T = 6500 \text{ Вт/м}_2\cdot\text{град};$$

$$c_T = 4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град};$$

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$T_T = 80 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$L = 1 \text{ м};$$

$$D = 0,05 \text{ м};$$

$$u = 0,2 \text{ м/с};$$

$$\tau\phi_{\max} = 10 \text{ с}.$$

Краевые условия для исходного уравнения (35) приведены в индивидуальном задании. Краевые условия необходимо преобразовать согласно методике, приведенной выше.

При интегрировании использовать следующие значения шага переменных: $\Delta\alpha = 0,3$; $\Delta\beta = 0,2$.

Содержание отчета

1. Выполненные расчеты

ФИО

вариант 1

константы									
kt	ct	c	Tt	L	D	u	фmax	Дб	Дв
Вт/кв.м*град	Дж/кг/град	кг/кубм	град	м	м	м/с	с		
6500	4190	1000	80	1	0,05	0,2	10	0,3	0,2

исходные данные	
T0(l)	Tвх(φ)
10+10l	20+5sinφ

математическая модель динамики трубчатого аппарата

$$\frac{dT}{d\alpha} = (T_T - T(\alpha, \beta)) \frac{4k_T}{c_T \rho D}$$

краевые условия

$$T(0, l) = T_0(l)$$

$$T(\phi, 0) = T_{вх}(\phi)$$

№п/п	$\frac{4k_T}{c_T \rho D}$	Дб	Дв	Дл	T0(l)	T(0,l)	F(0,l)	Дф	Твх(φ)	T(φ,0)	F(φ,0)
------	---------------------------	----	----	----	-------	--------	--------	----	--------	--------	--------

2. Графики полученных зависимостей $T(\phi, l)$,

Пример 4

Задание: получить динамическую характеристику трубчатого теплообменника и построить ее в виде графика в координатах $T, \tau\phi, l$.

1. Значения постоянных величин:

k_t	c_t	ρ	T_T	L	D	u	τ_{max}	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$
Вт/м ² ·град	Дж/кг·град	кг/м ³	град	м	м	м/с	с		
6500	4190	1000	80	1	0,05	0,2	10	0,3	0,2

2. Исходные данные:

T0(l)	Tвх(τ)
25-5l	15 + 1/(0,1τ+0,1)

3. Краевые условия:

$T(0,l) = T_0(l)$
$T(\tau,0) = T_{вх}(\tau)$

4. Область определения: $\beta \in \left[-\frac{\tau_s}{2}, 2\right], \alpha = -\beta$.

№ п/п	$4k_T/c_T\rho D$	α	β	l	$T_0(l)$	$T(0,l)$	$F(0,l)$	τ	$T_{вх}(\tau)$	$T(\tau,0)$	$F(\tau,0)$
1	0,12	2,50	-2,50	1,00	80,00	724,62	0,16	0,00	25,00	281,44	0,00
2	0,12	2,80	-2,30	0,92	73,60	673,05	0,14	0,50	21,67	254,58	0,08
3	0,12	3,10	-2,10	0,84	67,20	621,48	0,13	1,00	20,00	241,15	0,16
4	0,12	3,40	-1,90	0,76	60,80	569,91	0,12	1,50	19,00	233,10	0,24
5	0,12	3,70	-1,70	0,68	54,40	518,34	0,11	2,00	18,33	227,72	0,31
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	0,12	5,20	-0,70	0,28	22,40	260,49	0,04	4,50	16,82	215,52	0,71
11	0,12	5,50	-0,50	0,20	16,00	208,92	0,03	5,00	16,67	214,29	0,79
12	0,12	5,80	-0,30	0,12	9,60	157,35	0,02	5,50	16,54	213,26	0,86
13	0,12	6,10	-0,10	0,04	3,20	105,78	0,01	6,00	16,43	212,38	0,94
14	0,12	6,40	0,10	-0,04	-3,20	54,22	-0,01	6,50	16,33	211,61	1,02

Графические зависимости:

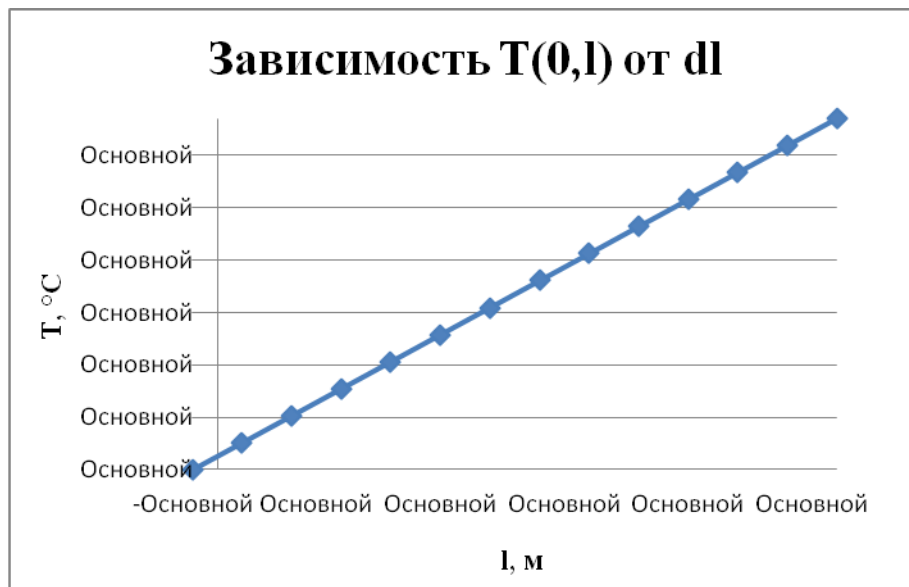


Рис. 3. Зависимость $T(0,l)$ от dl объекта с распределенными параметрами

в динамическом режиме на интервале $\beta \in \left[-\frac{\tau_s}{2}, 2 \right]$, $\alpha = -\beta$.

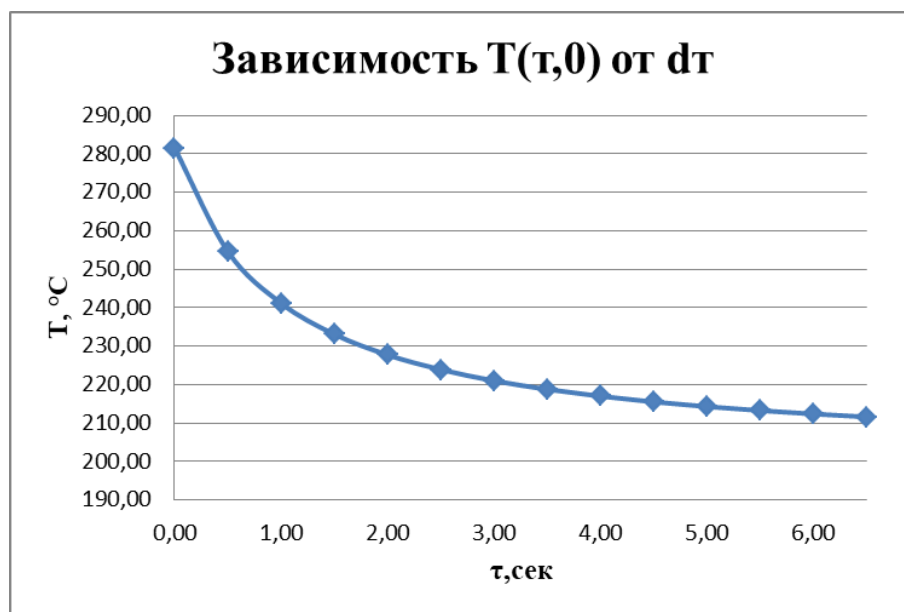


Рис. 4. Зависимость $T(t,0)$ от dt объекта с распределенными параметрами

в динамическом режиме на интервале $\beta \in \left[-\frac{\tau_s}{2}, 2 \right]$, $\alpha = -\beta$.

Вывод: В данной области определения зависимость $T(0, l)$ от Δl наблюдаем возрастание температуры с увеличением длины реактора. Графическая зависимость $T_{вх}(t)$ от ΔT изменяется нелинейно температура убывает с уменьшением интервала времени.

5. Область определения: $\beta \in \left[0, -\frac{(\tau_{\max} - \tau_s)}{2} \right]$; $\alpha = \beta$.

№ п/п	4Кт/СтрD	α	β	l	$T(0,l)$	$T(0,l)$	$F(0,l)$	τ	$T_{вх}(\tau)$	$T(\tau,0)$	$F(\tau,0)$
1	0,12	0,00	0,00	0,00	25,00	281,44	0,00	5,00	0,00	80,00	0,79
2	0,12	0,30	0,20	0,02	24,90	280,64	0,00	4,75	3,20	105,78	0,75
3	0,12	0,60	0,40	0,04	24,80	279,83	0,01	4,50	6,40	131,57	0,71
4	0,12	0,90	0,60	0,06	24,70	279,03	0,01	4,25	9,60	157,35	0,67
5	0,12	1,20	0,80	0,08	24,60	278,22	0,01	4,00	12,80	183,14	0,63
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	0,12	2,70	1,80	0,18	24,10	274,19	0,03	2,75	28,80	312,06	0,43
11	0,12	3,00	2,00	0,20	24,00	273,38	0,03	2,50	32,00	337,85	0,39
12	0,12	3,30	2,20	0,22	23,90	272,58	0,03	2,25	35,20	363,63	0,35
13	0,12	3,60	2,40	0,24	23,80	271,77	0,04	2,00	38,40	389,42	0,31
14	0,12	3,90	2,60	0,26	23,70	270,97	0,04	1,75	41,60	415,20	0,27

Графические зависимости:

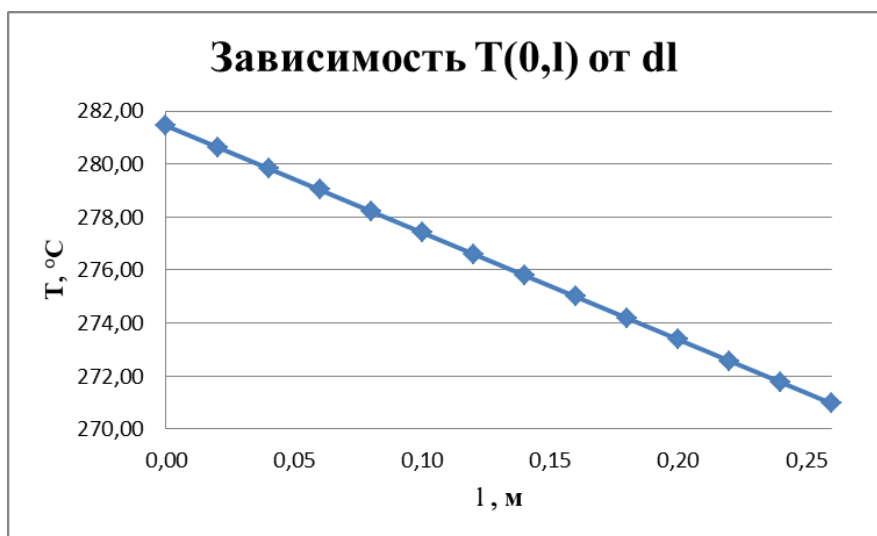


Рис. 5. Зависимость $T(0,l)$ от dl объекта с распределенными параметрами

в динамическом режиме на интервале $\beta \in \left[0, -\frac{(\tau_{\max} - \tau_s)}{2} \right]$; $\alpha = \beta$

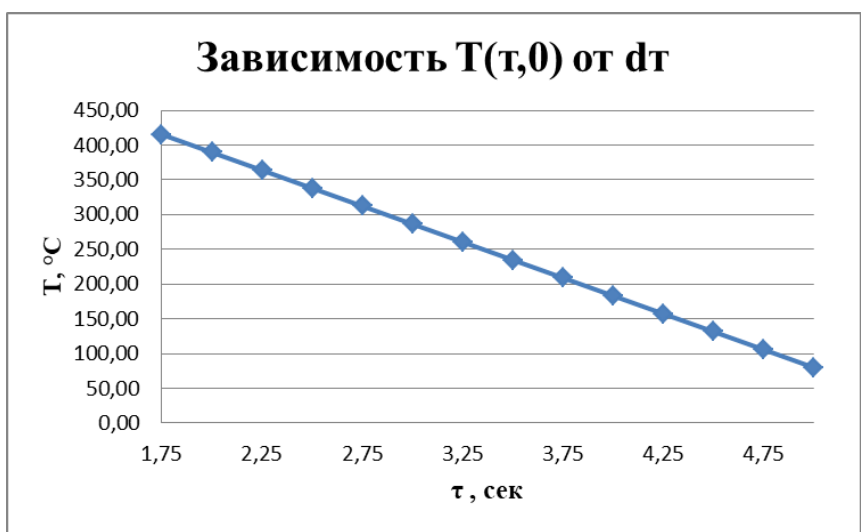


Рис. 6. Зависимость $T(t,0)$ от dt объекта с распределенными параметрами

в динамическом режиме на интервале $\beta \in \left[0, -\frac{(\tau_{\max} - \tau_s)}{2} \right]$; $\alpha = \beta$

Вывод: Графическая зависимостей $T(0,l)$ от Δl имеет линейную зависимость убывания температуры с увеличением длины реактора. Графическая зависимость $T_{вх}(\tau)$ от ΔT изменяется линейно температура убывает с уменьшением интервала времени.

6. Область определения: $\beta \in \left[\frac{(\tau_{\max} - \tau_s)}{2}, \frac{\tau_{\max s}}{2} \right], \alpha = -\beta + \tau s.$

№ п/п	4Кт/СтрD	α	β	l	$T(0,l)$	$T(0,l)$	$F(0,l)$	τ	$T_{вх}(\tau)$	$T(\tau,0)$	$F(\tau,0)$
1	0,12	2,50	2,50	0,00	80,00	724,62	0,00	5,00	400,00	3303,08	0,79
2	0,12	2,80	2,70	0,02	86,40	776,18	0,00	5,50	432,00	3480,92	0,86
3	0,12	3,10	2,90	0,04	92,80	827,75	0,01	6,00	464,00	3738,77	0,94
4	0,12	3,40	3,10	0,06	99,20	879,32	0,01	6,50	496,00	3996,62	1,02
5	0,12	3,70	3,30	0,08	105,60	930,89	0,01	7,00	528,00	4254,46	1,10
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	0,12	5,20	4,30	0,18	137,60	1188,74	0,03	9,50	688,00	5543,69	1,49
11	0,12	5,50	4,50	0,20	144,00	1240,31	0,03	10,00	720,00	5801,54	1,57
12	0,12	5,80	4,70	0,22	150,40	1291,88	0,03	10,50	752,00	6059,38	1,65
13	0,12	6,10	4,90	0,24	156,80	1343,45	0,04	11,00	784,00	6317,23	1,73
14	0,12	6,40	5,10	0,26	163,20	1395,02	0,04	11,50	816,00	6575,08	1,81

Графические зависимости:

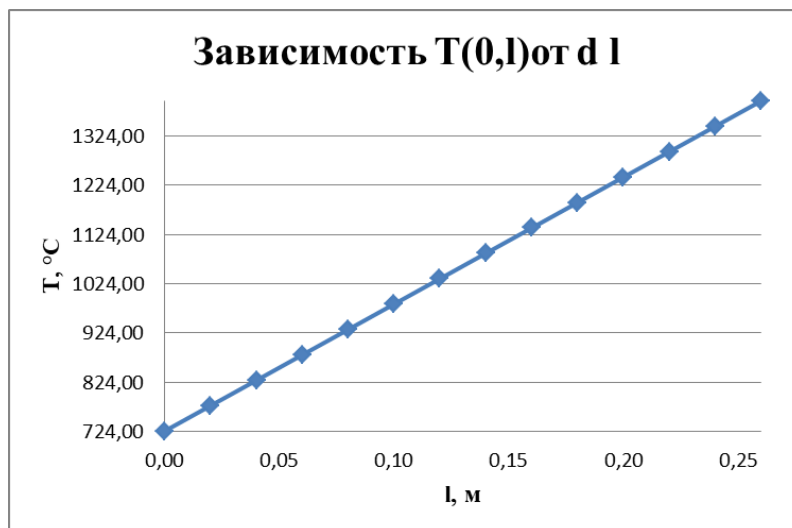


Рис. 7. Зависимость $T(0,l)$ от Δl объекта с распределенными параметрами

в динамическом режиме на интервале $\beta \in \left[\frac{(\tau_{\max} - \tau_s)}{2}, \frac{\tau_{\max s}}{2} \right], \alpha = -\beta + \tau s$

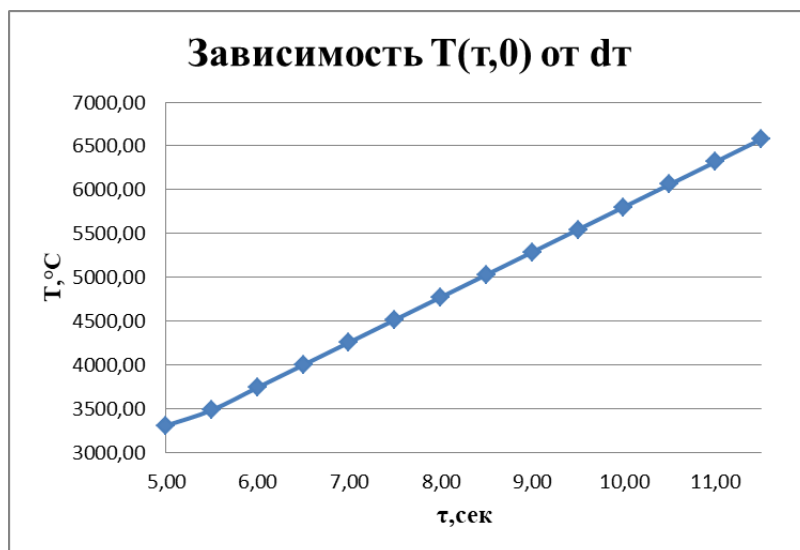


Рис. 8. Зависимость $T(t,0)$ от dt объекта с распределенными параметрами

$$\beta \in \left[\frac{(\tau_{\max} - \tau_s)}{2}, \frac{\tau_{\max s}}{2} \right], \alpha = -\beta + \tau s$$

в динамическом режиме на интервале

Вывод: Зависимость $T(0,1)$ от Δl температура линейно возрастает с увеличением длины реактора. Графическая зависимость $T_{вх}(\tau)$ от ΔT изменяется линейно температура возрастает с увеличением времени.

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется режим работы объекта химической технологии с точки зрения выходных, входных и возмущающих параметров?
2. Изменения каких параметров учитывают при описании процессов, протекающих в объектах с распределенными координатами в динамическом режиме?
3. Какой аналог теплообменники используется в качестве основного элемента оборудования на атомных станциях с ВВЭР?
4. Основные процессы, протекающие в трубчатом теплообменнике.
5. Назовите входные параметры для трубчатого теплообменника.
6. Назовите характеристики выходной координаты и ее характеристики для трубчатого теплообменника.
7. Основные допущения для вывода модели динамики объекта с распределенными параметрами.
8. Краевые условия для решения математической модели динамики трубчатого теплообменника.

Варианты индивидуальных заданий для работ №1-3

№ Варианта	L	m, кг/с	m ₀ , кг/с	m ₁ , кг/с	Δ m, кг/с	C, %	C ₀ , %	C ₁ , %	Δ C ₀ , %	T	T ₀	T ₁	Δ T, °C
1	180	9	7,0	12	0,6	14	12	18	0,07	120	110	124	2
2	185	9	7,1	13	0,6	15	11	16	0,05	122	108	128	1,5
3	190	9,5	7,2	14	0,6	16	13	21	0,08	125	106	130	0,5
4	195	9,2	7,4	15	0,6	17	14	20	0,05	123	104	130	1,4
5	185	9,2	7,3	16	0,7	18	12	23	0,09	130	102	140	1,5
6	180	8,9	7,0	15	0,7	19	11	25	0,05	125	112	132	1,6
7	175	8,5	6,8	15	0,7	20	13	26	0,01	130	114	138	1,8
8	170	8,8	7,3	15	0,7	14	11	19	0,05	132	116	138	1,9
9	165	6	4,3	12	0,8	15	12	21	0,05	120	112	130	2
10	160	7	5,3	12	0,8	16	11	20	0,07	124	110	132	2,5
11	155	8,8	7,0	11	0,8	17	13	23	0,07	120	108	124	2,3
12	150	9,4	7,1	13	0,8	18	14	25	0,08	132	106	138	2,1
13	180	6	4,2	16	0,7	19	12	26	0,08	128	104	130	1,4
14	185	7	4,4	15	0,7	20	11	24	0,09	140	102	145	1,5
15	190	8	7,3	15	0,7	14	13	19	0,09	135	112	140	1,6
16	195	9	7,0	15	0,7	15	11	18	0,01	130	114	139	1,8
17	185	7,8	4,8	12	0,7	16	13	19	0,01	125	116	128	1,9
18	180	6,3	5,3	12	0,8	17	14	25	0,01	140	112	148	2
19	175	7	4,3	11	0,8	18	12	26	0,07	122	110	128	2,5
20	170	9,9	7,3	13	0,8	19	11	24	0,05	133	108	138	2,3
21	165	9,6	7,0	16	0,8	20	13	19	0,08	135	106	138	2,1
22	160	9,8	7,1	15	0,5	14	14	18	0,05	120	104	126	2
23	155	9,8	7,2	15	0,5	15	12	19	0,09	130	102	138	1,5
24	150	9,1	7,4	15	0,5	16	11	21	0,05	128	112	136	0,5
25	180	8,2	7,3	12	0,5	17	13	20	0,01	141	114	145	1,4
26	185	7	5,0	12	0,6	18	14	23	0,05	132	116	140	1,5
27	190	7	5,8	11	0,7	19	12	19	0,11	134	112	139	1,6
28	195	8	5,3	13	0,9	20	11	18	0,07	140	110	148	1,5
29	185	8	4,3	16	0,8	16	14	19	0,05	125	108	128	0,5
30	180	9	5,3	15	0,6	15	12	20	0,8	135	106	138	1,4
31	175	7,1	4,0	15	0,7	16	11	23	0,85	127	104	138	1,5
32	170	8	5,1	15	0,9	17	13	19	0,09	120	102	128	1,6
33	165	7	5,2	12	0,8	18	14	18	0,05	122	112	126	1,8
34	160	8	5,4	12	0,6	19	12	19	0,01	125	114	138	1,9
35	155	9	7,3	11	0,5	20	18	27	0,01	120	116	130	2
36	150	7	5,0	13	0,7	14	12	23	0,01	137	112	140	2,5
37	170	10	6,8	14	0,9	15	11	19	0,07	125	110	130	2,3
38	175	8,5	7,3	12	0,5	16	13	18	0,07	121	108	127	2,1
39	180	9,9	6,3	11	0,7	17	14	19	0,08	130	106	137	1,4
40	187	9	5,3	12	0,9	18	12	21	0,02	119	104	128	1,5

Варианты индивидуальных заданий для работы № 4

Вариант	$T_0(l)$	$T_{\text{вх}}(\tau)$	Вариант	$T_0(l)$	$T_{\text{вх}}(\tau)$
1	$10+3l$	$11+5 \sin \tau$	21	$10-3,5l$	$11-3 \sin \tau$
2	$10+4l$	$11+5 \cos \tau$	22	$20-1l$	$11-3 \cos \tau$
3	$10+5l$	$11+4 \sin \tau$	23	$20-2l$	$11-2 \sin \tau$
4	$20+3l$	$11+4 \cos \tau$	24	$20-3,5l$	$11-2 \cos \tau$
5	$20+4l$	$11+3 \sin \tau$	25	l^2-l+4	$15-5 \sin \tau$
6	$20+5l$	$11+3 \cos \tau$	26	l^2-2l+4	$15-5 \cos \tau$
7	$10-3l$	$11+2 \sin \tau$	27	l^2-3l+4	$15-4 \sin \tau$
8	$10-4l$	$11+2 \cos \tau$	28	l^2+l+4	$15-4 \cos \tau$
9	$10-5l$	$15+5 \sin \tau$	29	l^2+2l+4	$15-3 \sin \tau$
10	$20-3l$	$15+5 \cos \tau$	30	l^2+3l+4	$15-3 \cos \tau$
11	$20-4l$	$15+4 \sin \tau$	31	l^2-l+2	$15-2 \sin \tau$
12	$20-5l$	$15+4 \cos \tau$	32	l^2-2l+2	$15-2 \cos \tau$
13	$10+l$	$15+3 \sin \tau$	33	l^2-3l+2	$5+5 \sin \tau$
14	$10+2l$	$15+3 \cos \tau$	34	l^2+l+2	$5+5 \cos \tau$
15	$10+3,5l$	$15+2 \sin \tau$	35	l^2+2l+2	$5+4 \sin \tau$
16	$20+l$	$15+2 \cos \tau$	36	l^2+3l+2	$5+4 \cos \tau$
17	$20+2l$	$11-5 \sin \tau$	37	$2l^2-l+2$	$5+3 \sin \tau$
18	$20+3,5l$	$11-5 \cos \tau$	38	$4l^2-2l+2$	$5+3 \cos \tau$
19	$10-l$	$11-4 \sin \tau$	39	$5l^2-3l+2$	$5+2 \sin \tau$
20	$10-2l$	$11-4 \cos \tau$	40	$7l^2+l+2$	$5+2 \cos \tau$

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бояринов А.И.* Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. – М. : Химия, 1975. – 500 с.
2. *Дворецкий Д.С.* Компьютерное моделирование биотехнологических процессов и систем / Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий, Е.И. Муратова, А.А. Ермаков. - Тамбов: ТГТУ, 2005. – 80 с.
3. *Дворецкий С.И.* Компьютерное моделирование технологических процессов: метод. указ./ С.И. Дворецкий, А.В. Майстренко. - Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2001. – 36 с.
4. *Кафаров В.В.* Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высшая школа. – 1991. – 389 с.
5. *Литовка Ю.В.* Получение оптимальных проектных решений и их анализ с использованием математических моделей: учебное пособие / Ю.В. Литовка. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. –160 с.
6. *Литовка Ю.В.* Получение оптимальных проектных решений и их анализ с использованием математических моделей / Ю.В. Литовка. - Тамбов: ТГТУ, 2006. – 160 с.
7. *Федорова С.А.* Математическое моделирование и применение ЭВМ в химической технологии: учеб. пособие – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. – 184 с.

Учебное издание

Федорова Светлана Александровна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
Лабораторный практикум по дисциплине**

Учебное пособие

В двух частях

Часть 2

В авторской редакции

Изд. № 91/2022. Объем 3 п.л. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,94.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»