

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Методические указания к изучению дисциплины и выполнению
контрольной работы для студентов заочной формы обучения
по направлению подготовки бакалавриата
20.03.01 – Техносферная безопасность

Составитель
Н. Ю. Бусыгин

Санкт-Петербург
2018

Утверждено
на заседании кафедры
09.10.2018 г., протокол № 2

Рецензент Н. В. Дроботун

Методические указания составлены в помощь студентам в изучении дисциплины «Моделирование процессов защиты окружающей среды» и выполнении контрольной работы.

Предназначены для студентов бакалавриата очно-заочной и заочной форм обучения по направлению подготовки 20.03.01 – Техносферная безопасность. Могут быть использованы на практических занятиях по моделированию для обучающихся по направлению 18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

Учебное электронное издание сетевого распространения
Издано в авторской редакции

Системные требования:

электронное устройство с программным обеспечением для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=2018____, по паролю. – Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию __.__.2018 г. Рег. № _____

ФГБОУВО «СПбГУПТД»

Юридический и почтовый адрес: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18.

<http://sutd.ru>

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Содержание дисциплины	5
1. Математическое моделирование и расчет сложных ХТС	5
2. Примерные вопросы к экзамену по дисциплине	7
3. Методические рекомендации выполнению контрольной работы ..	9
3.1. Постановка задачи и методы расчета ХТС	10
3.2. Матричный (безытерационный) метод расчета ХТС	12
3.3. Декомпозиционный метод расчета сложных ХТС	17
4 Требования к выполнению контрольной работы	26
Список литературы	28
<i>Приложение А. Варианты индивидуальных учебных заданий для расчета материальных потоков в сложных ХТС.</i>	29

Введение

Дисциплина «Моделирование процессов защиты окружающей среды» рассчитана на два семестра изучения и направлена на освоение студентами бакалавриата подходов к построению математических описаний физико-химических явлений, процессов и аппаратов и использованию математического, информационного и программного обеспечения компьютерных технологических расчетов по моделям. Таким образом, дисциплина, являясь составной частью компьютерной и математической подготовки будущих специалистов, готовит студентов к применению методов математического моделирования и автоматизированных средств расчетов при выполнении выпускной квалификационной работы.

Студенты заочной формы обучения в первом семестре изучения дисциплины выполняют контрольную работу, посвященную освоению подходов к моделированию и расчету ХТС сложной структуры. Завершающей формой контроля освоения дисциплины является экзамен. Во втором семестре выполняется курсовая работа, содержание которой должно составлять самостоятельное составление математических моделей различного типа, проведение вычислительного эксперимента по разработанным уравнениям и анализ результатов моделирования.

В качестве инструмента решения систем уравнений предлагается использовать либо электронные таблицы Microsoft Excel, либо математическую среду *Mathcad*, которая может быть установлена с сайта разработчика. Выбор *Mathcad* в качестве средства решения математических задач определяется его широкими возможностями (наличие элементов программирования, развитый аппарат работы с матрицами, выполнение операций в символьной форме и др.) и наглядностью записи выражений, приближенной к обычному математическому виду. Численные методы решения уравнений и систем уравнений разного типа рассматриваются в предшествующей дисциплине «Методы и средства автоматизированных расчетов в экологии», необходимые теоретические сведения, практические рекомендации и многочисленные примеры решения уравнений и систем приведены в интерактивном учебнике, размещенном в открытом доступе по адресу <http://eco.sutd.ru/mathcad>.

1. Содержание дисциплины

В рабочей программе определены следующие задачи дисциплины «Моделирование процессов защиты окружающей среды»:

– изучение основных понятий математического моделирования процессов и аппаратов систем очистки и обезвреживания отходов производства и химико-технологических систем (ХТС) в целом;

– рассмотрение методов построения моделей и их качественного исследования;

– изучение методов оптимизации параметров технологических процессов на основе построенных математических моделей;

– закрепление у студентов практических навыков по использованию численных методов оптимизации и компьютерного решения систем уравнений математического описания.

В рамках освоения дисциплины изучаются темы:

Учебный модуль 1. Общие принципы построения математических моделей.

Тема 1. Понятие математической модели. Классификация моделей.

Математическая модель как функциональная зависимость выходных параметров процесса от параметров входных потоков, конструктивных характеристик оборудования и возмущений. Классификация моделей по способам получения, виду уравнений и другим признакам. Проектный и поверочный расчеты по математическим моделям – общая постановка задачи.

Тема 2. Примеры построения феноменологических (физико-химических) математических моделей.

Построение моделей с учетом физико-химических явлений в рассматриваемых объектах на примерах моделирования гидравлических систем (перемещение потоков по трубопроводам, процессы истечения жидкостей) и моделирования кинетики химического взаимодействия.

Учебный модуль 2. Математическое моделирование аппаратов с учетом гидродинамической структуры потоков.

Тема 3. Типовые модели гидродинамической структуры потоков.

Неоднородность времени пребывания частиц вещества в аппаратах вследствие их конструктивных особенностей. Упрощенные типовые модели: однопараметрические модели диффузионная и ячеечная и их частные случаи – модели идеального вытеснения и идеального смешения. Базовые предпосылки и математические описания.

Тема 4. Моделирование химических реакторов с учетом гидродинамической структуры потоков.

Построение математических моделей реакторов идеального вытеснения, идеального смешения, каскада реакторов идеального смешения на базе ячеечной модели. Исследование по моделям эффективности реакторов разного типа.

Тема 5. Моделирование теплообменных процессов с учетом гидродинамической структуры потоков в аппаратах.

Построение математических моделей теплообменных аппаратов на основании гидродинамических моделей разного типа с учетом схемы движения теплоносителей (прямоток, противоток).

Тема 6. Моделирование процессов массопереноса.

Подходы к расчету массообменной аппаратуры. Моделирование процессов переноса вещества в атмосфере и водотоках для оценки распределения загрязнений.

Учебный модуль 3. Построение эмпирических математических моделей статистическими методами.

Тема 7. Общая постановка задачи аппроксимации таблично заданных функций и методы ее решения.

Исследуемый объект как «черный ящик». Активный и пассивный эксперимент. Таблица наблюдений за объектом – исходные данные для построения эмпирических моделей. Выбор вида модели. Оценка коэффициентов модели методом наименьших квадратов. Оценка качества аппроксимации.

Тема 8. Программные средства аппроксимации.

Построение эмпирических моделей в офисной программе MS Excel. Линейная регрессия общего вида в Mathcad. Реализация метода наименьших квадратов общего вида, построение и использование соответствующей функции.

Учебный модуль 4. Оптимизация химико-технологических систем.

Тема 9. Оптимизация химико-технологических и биохимических систем очистки промышленных выбросов и стоков.

Общая постановка задачи оптимизации. Конструктивно-технологические и экономические критерии оптимизации. Однопараметрическая и многопараметрическая оптимизация. Особенности постановки оптимизационных задач для систем очистки промышленных выбросов.

Список рекомендованной учебно-методической литературы приведен в конце настоящих методических указаний, однако имеется и другая учебная литература по тематике дисциплины в электронной библиотеке СПбГУПТД, размещенной по адресу <http://publish.sutd.ru>¹.

2. Примерные вопросы к экзамену по дисциплине

1. Понятие математической модели. Место и роль методов математического моделирования для исследования и разработки технических средств защиты окружающей среды. Входные и выходные параметры, управляющие воздействия. Классификация математических моделей химико-технологических процессов.
2. Зависимость математического описания аппарата от структуры потоков вещества в аппарате. Экспериментальное исследование структуры потоков вещества. С-кривая, F-кривая и их свойства. Обработка экспериментальных функций отклика и оценка параметров моделей
3. Диффузионная модель структуры потоков вещества. Вывод уравнения модели. Области применения модели.
4. Модели идеального вытеснения и смешения. Основные допущения и области применения. Вывод уравнений.
5. Ячеечная модель структуры потоков вещества, ее математическое описание. Области применения модели.

¹ Напоминаем, что полные тексты изданий доступны после аутентификации пользователя по ссылке *Регистрация*. Для студентов СПбГУПТД логин – номер зачетки, пароль – шифр направления подготовки (по данным зачетной книжки).

6. Формальное описание кинетики химического взаимодействия. Материальный баланс. Закон действующих масс. Составление и решение кинетических уравнений для простой и сложной химической реакции.
7. Математическое описание химических реакторов на базе модели идеального вытеснения. Привести примеры составления уравнений. Подход к решению систем уравнений.
8. Математическое описание химических реакторов на базе модели идеального смешения. Привести примеры составления уравнений. Особенности решения систем уравнений.
9. Особенности проектного расчета теплообменной аппаратуры с использованием ЭВМ. Выбор уравнений математического описания и их решение.
10. Постановка задачи расчета теплообменных аппаратов в составе ХТС. Зависимость математического описания аппарата от принятой модели структуры потоков.
11. Моделирование теплообменной аппаратуры на основе модели идеального вытеснения (прямоточная и противоточная схемы).
12. Оценка выходных температур теплоносителей в теплообменной аппаратуре на основе модели смешения и ячеечной. Особенности решения систем уравнений.
13. Математическое моделирование массообменных процессов (на примере процессов перегонки, ректификации, абсорбции).
14. Математическое моделирование и расчет процессов рассеивания загрязнений в воздухе от источников разного типа.
15. Построение и использование эмпирических статистических моделей. Метод наименьших квадратов: постановка задачи и ее реализация на ПЭВМ.
16. Реализация линейной регрессии общего вида в Mathcad.
17. Общая постановка задачи оптимизации систем и элементов защиты окружающей среды. Критерий оптимальности. Методы однопараметрической оптимизации.
18. Постановка многопараметрической задачи оптимизации. Критерий оптимальности. Методы многопараметрической оптимизации. Учет ограничений различного типа. Штрафные функции.

3. Методические рекомендации выполнению контрольной работы

Дисциплина «Моделирование процессов защиты окружающей среды» базируется на знаниях, полученных как в общеинженерных («Гидрогазодинамика», «Теплофизика», «Теоретические основы защиты окружающей среды»), технологических дисциплинах, так и в дисциплинах математической и компьютерной подготовки («Высшая математика», «Информатика», «Методы и средства автоматизированных расчетов в экологии»). Первая группа дисциплин помогает в освоении подходов к составлению математических описаний процессов, последняя – к решению полученных уравнений и систем.

Содержанию дисциплины в наибольшей степени соответствует учебное пособие [1] и его более поздняя редакция [2], доступная в электронной библиотеке университета. Пособие является источником теоретического материала, содержит контрольные вопросы и описания практических и лабораторных работ. Так, материал, посвященный принципам построения моделей и их классификации, приведен в главе 1 пособия [2], в главе 3 рассматриваются типовые математические модели гидродинамической структуры потоков и т. д. Практически все вопросы к экзамену, приведенные во втором разделе настоящих методических указаний, рассматриваются в упомянутом пособии.

Практическое же решение математических задач рекомендуется выполнять на основе учебного пособия по реализации численных методов в математической среде Mathcad [5].

Отметим, что математическая модель – это уравнение или система уравнений, связывающих основные величины, характеризующие процесс, и построенных на основании представлений о его механизме или функциональной связи величин. Главная цель моделирования – заменить исследование реального объекта изучением его по адекватному математическому описанию. Математические модели используются для прогнозирования результатов протекания процессов в системах автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП), а также в автоматизированных системах научных исследований (АСНИ). По современным

требованиям исследование каждого процесса должно завершаться разработкой его математической модели.

Объектами математического моделирования могут быть как отдельные явления, процессы или аппараты, так и химико-технологические системы (ХТС) в целом. При этом рассматриваются статические модели, описывающие установившиеся режимы, и динамические, пригодные для изучения переходных процессов.

Возможны две различных постановки задачи расчета ХТС.

В первом случае полагаются известными параметры входных потоков (сырье и вспомогательные вещества), заданными параметры выходных потоков (продукты производства), а определяемыми являются конструктивные характеристики оборудования, обеспечивающего заданный конечный результат. Таким образом, речь идет о **проектном расчете**, реализация которого рассматривается, например, в дисциплинах «Процессы и аппараты химических технологий», «Процессы и аппараты защиты окружающей среды», «Техника и технология защиты окружающей среды» и других. В более общей постановке задачи проектируемой является и структура технологической схемы, тогда говорят о задаче *синтеза ХТС*.

Во втором случае полагаются известными параметры входных потоков, структура схемы и конструктивные параметры всех элементов схемы, а определяемыми являются параметры выходных и промежуточных потоков. В этом случае речь идет о **пове­рочном расчете**, когда исследуется вопрос, обеспечит ли конкретная технологическая схема требуемые характеристики конечных продуктов. Подобные задачи можно отнести к задачам *анализа ХТС*. Постановка задачи расчета одного элемента схемы формулируется следующим образом: определить параметры всех выходных потоков при известных параметрах входных потоков и заданной конструкции данного элемента.

В этой главе будем рассматривать именно задачи анализа технологических схем.

3.1 Постановка задачи и методы расчета ХТС

Основная задача расчета ХТС – нахождение параметров состояния выходных и промежуточных потоков технологической схемы: общих и покомпонентных расходов, составов потоков,

температур и энтальпий [3]. При этом полагаются известными или заданными параметры входных потоков, а также конструктивные характеристики аппаратов и узлов.

Методы решения этой задачи можно разделить на две группы – *интегральные* и *декомпозиционные* [4].

Суть *интегральных методов* расчета ХТС заключается в объединении систем уравнений, описывающих работу отдельных аппаратов, в одну большую систему уравнений и решении этой системы. Очевидно, что в этом случае следует стремиться использовать математические зависимости одного типа, например, только алгебраические (например, балансовые соотношения) или только дифференциальные уравнения (моделирование переходных процессов).

К недостаткам этой группы методов следует отнести большую размерность единой системы уравнений и уникальность каждой системы уравнений, соответствующей специфике рассчитываемой ХТС.

Первый недостаток обусловлен тем, что в реальную ХТС входит много аппаратов, каждый из которых описывается сравнительно небольшой системой уравнений. Однако суммарная размерность единой системы уравнений получается настолько большой, что получившуюся систему не всегда удастся решить на ЭВМ. Кроме того, размерность системы пропорциональна *параметричности* потоков – числу параметров, характеризующих поток.

Второй недостаток – неповторимость системы уравнений – вызывает необходимость при решении задачи на ЭВМ или составлять каждый раз заново программу вычислений, или проводить вручную большую подготовительную работу. При этом достаточно сложно автоматизировать решение задачи на ЭВМ.

Суть *декомпозиционных методов* расчета заключается в том, что каждый аппарат или группу аппаратов рассчитывают отдельно, а расчет всей ХТС состоит из последовательности расчетов отдельных аппаратов. В этом случае размерность каждой системы уравнений небольшая, так как рассчитывается только один элемент схемы. Кроме того, типов аппаратов сравнительно немного, и можно заранее составить программы расчета типовых аппаратов и из этих программных модулей скомпоновать программу расчета ХТС в целом, т. е. автоматизировать процесс расчета.

Автоматизированные системы технологических расчетов и моделирующие программы для расчета сложных ХТС базируются в основном на декомпозиционных.

3.2 Матричный (безытерационный) метод расчета ХТС

В некоторых практических случаях математическое описание отдельного аппарата может быть линейно по форме или сведено к линейному (линеаризовано) в ограниченном диапазоне изменения входных и выходных параметров. Тогда математическая модель аппарата в матричной форме имеет вид

$$[Y] = [A] \times [X], \quad (1)$$

где $[A]$ – матрица преобразования, или операционная матрица, элементы которой соответствуют коэффициентам функциональной связи между элементами векторов входных (x_1, x_2, \dots, x_m) и выходных (y_1, y_2, \dots, y_n) переменных данного аппарата. Элементами матрицы преобразования $[A]$ могут быть коэффициенты разделения, степень превращения, выход целевого продукта, к. п. д., степень абсорбции и другие, а также коэффициенты линейной регрессии [1]–[2]. Совокупность систем линейных уравнений вида (1) для всех элементов ХТС дает общее математическое описание схемы и представляет собой тоже систему линейных алгебраических уравнений, которая может быть решена соответствующим численным методом.

Изучая подходы к расчету ХТС [4], примем, что параметричность потоков равна единице, и единственным определяемым параметром является массовый расход вещества G .

Рассмотрим в качестве примера расчет расходов материальных потоков в замкнутой ХТС (рис. 1) при следующих условиях: расход сырья на входе $G_{01} = 10000$ кг/ч, некоторые связи между потоками выражаются линейными соотношениями

$$\begin{aligned} G_{13} &= 0,4G_{01}; \quad G_{23} = 0,5(G_{42} + G_{12}); \\ G_{35} &= 0,1(G_{23} + G_{13}); \quad G_{45} = 0,6(G_{24} + G_{34} + G_{64}); \\ G_{65} &= 0,3G_{56}; \quad G_{67} = 0,5G_{56}; \quad G_{57} = 0,7(G_{45} + G_{65} + G_{35}). \end{aligned}$$

Здесь и далее расход потока G маркируется двумя индексами – первый соответствует номеру аппарата, из которого поток вышел, а второй – номеру аппарата, в который поток поступил. Цифрой «0» обозначена внешняя среда.

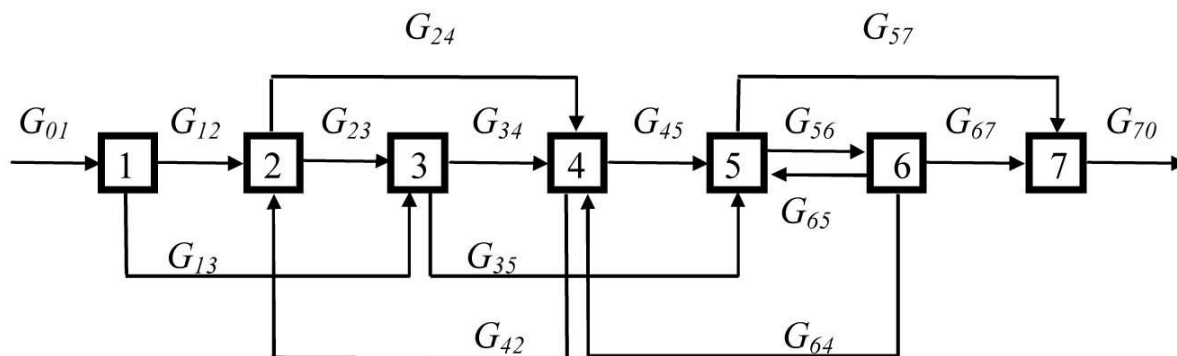


Рис. 1

Исходя из постановки задачи расчета ХТС, требуется рассчитать расходы выходного (G_{70}) и всех промежуточных потоков (G_{12} , G_{13} , G_{23} , G_{24} , G_{34} , G_{35} , G_{42} , G_{45} , G_{56} , G_{57} , G_{65} , G_{64} , G_{67}), т. е. 14 неизвестных величин.

Заданные уравнения связи между параметрами входных и выходных потоков аппаратов имеют линейную форму. Если записать уравнения материального баланса для каждого аппарата и дополнить их приведенными выше уравнениями связи, то получим замкнутую (число неизвестных расходов будет равно числу уравнений) систему линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 G_{01} &= G_{12} + G_{13}; \\
 G_{12} + G_{42} &= G_{23} + G_{24}; \\
 G_{23} + G_{13} &= G_{34} + G_{35}; \\
 G_{24} + G_{34} + G_{64} &= G_{42} + G_{45}; \\
 G_{45} + G_{35} + G_{65} &= G_{56} + G_{57}; \\
 G_{56} &= G_{67} + G_{64} + G_{65}; \\
 G_{70} &= G_{67} + G_{57}; \\
 G_{13} &= 0,4G_{01}; \\
 G_{23} &= 0,5(G_{42} + G_{12}); \\
 G_{35} &= 0,1(G_{23} + G_{13}); \\
 G_{45} &= 0,6(G_{24} + G_{34} + G_{64}); \\
 G_{65} &= 0,3G_{56}; \\
 G_{67} &= 0,5G_{56}; \\
 G_{57} &= 0,7(G_{45} + G_{65} + G_{35}).
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для решения системы типовыми численными методами ее следует привести к стандартному для систем линейных алгебраических уравнений виду

Таблица 1. Коэффициенты системы линейных алгебраических уравнений и свободные члены

Номер уравнения в системе (2)	Аргументы уравнения														b_j	
	G_{70}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	G_{24}	G_{34}	G_{35}	G_{42}	G_{45}	G_{56}	G_{57}	G_{63}	G_{64}	G_{67}		
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	G_{01}	
2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	1	0	-1	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	-10	-1	-1	0	0
7	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$0,4G_{01}$
9	0	-0,5	0	1	0	0	0	-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	-0,1	-0,1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	-0,6	-0,6	0	0	1	0	0	0	-0,6	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,3	0	1	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	0	0	0	1	0	0
14	0	0	0	0	0	0	-0,7	0	-0,7	0	1	-0,7	0	0	0	0

Листинг 1

Расчет материальных потоков в ХТС интегральным матричным методом

ORIGIN:= 1

$$A := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1 & -0.1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.6 & -0.6 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -0.6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.3 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.7 & 0 & -0.7 & 0 & 1 & -0.7 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B := \begin{pmatrix} 10000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 4000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Решение системы: $X := A^{-1} \cdot B$

Результаты решения системы:

$\begin{pmatrix} g70 \\ g12 \\ g13 \\ g23 \\ g24 \\ g34 \\ g35 \\ g42 \\ g45 \\ g56 \\ g57 \\ g65 \\ g64 \\ g67 \end{pmatrix} := X$	$g70 = 10000$	$g35 = 1022.77$	$g57 = 8235.294$
	$g12 = 6000$	$g42 = 6455.408$	$g65 = 1058.824$
	$g13 = 4000$	$g45 = 9683.112$	$g64 = 705.882$
	$g23 = 6227.704$	$g56 = 3529.412$	$g34 = 9204.934$
	$g24 = 6227.704$	$g67 = 1764.706$	

В приведенном примере рассмотрен простейший случай расчета небольшой ХТС, причем каждый поток характеризовался единственным параметром – расходом вещества. Но даже в этом случае размерность системы уравнений в 2 раза превысила число аппаратов. Учет многопараметричности технологических потоков (расход и покомпонентный состав, температура, давление и пр.),

увеличение числа аппаратов в схемах резко повышают размерность системы уравнений математического описания ХТС и ограничивают применимость безытерационного метода расчета.

3.3 Декомпозиционный метод расчета сложных ХТС

При декомпозиционном методе расчета основной задачей является определение последовательности расчета аппаратов.

Если для разомкнутых ХТС задача решается достаточно просто, то для определения последовательности расчета элементов замкнутой ХТС следует провести структурный анализ схемы. Во всех случаях формальные подходы к определению последовательности расчета базируются на **представлении структуры ХТС в виде графов и таблиц.**

Графически ХТС изображают в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют аппаратам, а дуги – потокам. Последовательность сцепленных дуг, позволяющая пройти от одной вершины к другой, называется путем. Путь можно обозначить последовательностью вершин: 1–2–4–3 или 1, 2, 4, 3.

На *рис. 2* представлена структура разомкнутой ХТС (*а*) и ее граф (*б*):

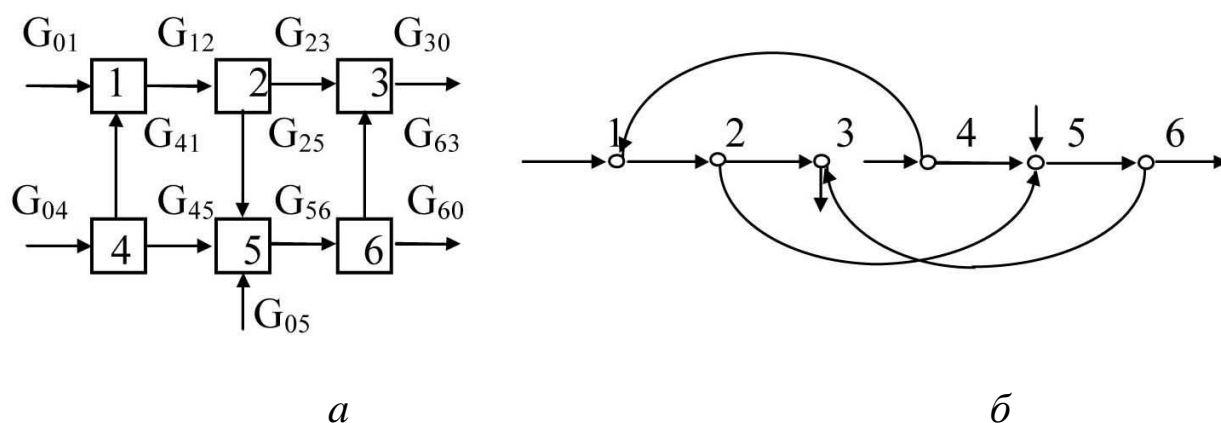


Рис. 2

Информация, содержащаяся в графе, может быть представлена в виде различных матриц, что позволяет перевести графическую информацию (структурные особенности ХТС) в числовую и разработать формальные математические методы анализа структуры сложных ХТС.

Матрица смежности $[A]$ – это квадратная матрица, число строк и столбцов которой равно числу вершин графа. Если в исходном графе есть дуга из i -й вершины в j -ю, то элемент матрицы смежности a_{ij} равен единице, в противном случае – нулю. Иначе говоря, в первой строке единицей в соответствующем столбце отмечаем наличие потоков от первого аппарата к другим элементам схемы, во второй строке – от второго аппарата и т. д.

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Список смежности $[S]$ – это матрица размерностью $m \times 2$, где m – число дуг в графе между вершинами. В первом столбце указывается номер вершины (аппарата), из которой дуга выходит, во втором – номер вершины, в которую дуга входит. Таким образом, список смежности также содержит информацию о технологических связях между аппаратами, но представляет более компактную по форме запись, чем матрица смежности.

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \\ 2 & 5 \\ 4 & 1 \\ 4 & 5 \\ 5 & 6 \\ 6 & 3 \end{bmatrix}$$

Рассмотрим формальные методы определения вычислительной последовательности расчета схемы (ВПРС) на базе матрицы и списка смежности разомкнутой ХТС, изображенной на *рис. 2*.

Определение ВПРС по матрице смежности базируется на анализе строк и столбцов: исходя из принципа заполнения матрицы смежности, нулевая строка указывает на выходную вершину или выходной элемент ХТС (от этого аппарата нет потоков к другим аппаратам, следовательно, он рассчитывается последним); нулевой столбец указывает на входную вершину или аппарат (к этому элементу ХТС нет потоков от других аппаратов, только потоки сырья, поэтому он является входным и может быть сразу рассчитан). В примере третья строка – нулевая, поэтому третий аппарат – выходной, а четвертый – входной, на что указывает четвертый нулевой столбец. Действительно, на входе четвертого аппарата единственным потоком является поток сырья, параметры которого должны быть известны по условию задачи.

Так как расчет входного аппарата приведет к определению параметров его выходных потоков, связи этого аппарата с другими

элементами схемы будут известны, т. е. после включения в ВПРС входной вершины можно исключить (вычеркнуть) из дальнейшего рассмотрения соответствующую строку и столбец матрицы смежности и анализировать далее оставшуюся часть матрицы, находя новую входную вершину и включая ее в упорядоченную последовательность (УП). Приведем последовательность преобразования исходной матрицы смежности для определения ВПРС рассматриваемой разомкнутой технологической схемы:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

УП: 4

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

УП: 4,1

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

УП: 4,1,2

Окончательно получим ВПРС: 4, 1, 2, 5, 6, 3.

Определение ВПРС по списку смежности. Исходя из принципа заполнения списка смежности, выходной будет вершина, номер которой находится только в правом столбце (вершина 3), входной – номер которой будет встречаться только в левом столбце выходов (вершина 4). По аналогии с предыдущим методом включение вершины в ВПРС позволяет исключить ее связи из списка смежности:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \\ 2 & 5 \\ 4 & 1 \\ 4 & 5 \\ 5 & 6 \\ 6 & 3 \end{bmatrix}$$

УП: 4

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \\ 2 & 5 \\ 4 & 1 \\ 4 & 5 \\ 5 & 6 \\ 6 & 3 \end{bmatrix}$$

УП: 4, 1

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \\ 2 & 5 \\ 4 & 1 \\ 4 & 5 \\ 5 & 6 \\ 6 & 3 \end{bmatrix}$$

УП: 4, 1, 2

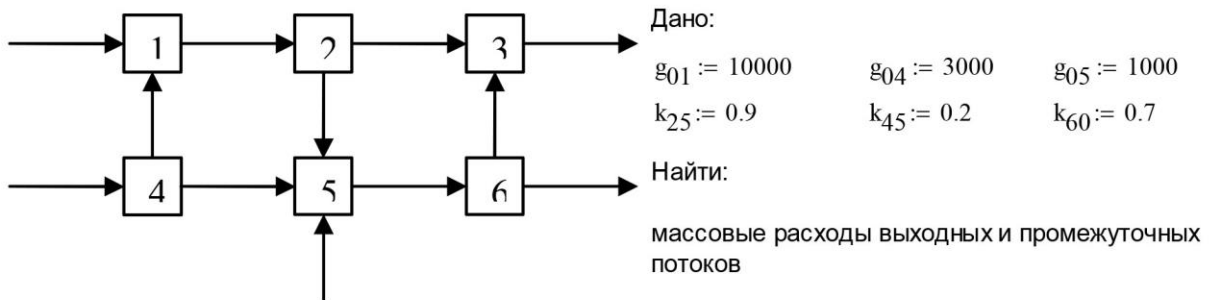
и т. д.

Окончательно получим ВПРС: 4, 1, 2, 5, 6, 3.

Пример расчета материальных потоков разомкнутой ХТС приведен в листинге 2.

Листинг 2

Лабораторная работа "Расчет разомкнутой ХТС"



1. Определение последовательности расчета аппаратов:

Матрица смежности

M :=

	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	0	1
6	0	0	1	0	0	0

Последовательность расчета: 4, 1, 2, 5, 6, 3

ORIGIN:= 1

Список смежности

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \\ 2 & 5 \\ 4 & 1 \\ 4 & 5 \\ 5 & 6 \\ 6 & 3 \end{pmatrix}$$

4, 1, 2, 5, 6, 3

2. Расчет материальных потоков

Расчет 4 аппарата $g_{45} := 0.2g_{04} \quad g_{45} = 600$

$g_{41} := 0.8g_{04} \quad g_{41} = 2.4 \times 10^3$ или $g_{41} := g_{04} - g_{45} \quad g_{41} = 2.4 \times 10^3$

Расчет 1 аппарата $g_{12} := g_{01} + g_{41} \quad g_{12} = 1.24 \times 10^4$

Расчет 2 аппарата $g_{25} := 0.9g_{12} \quad g_{25} = 1.116 \times 10^4$

$g_{23} := 0.1g_{12} \quad g_{23} = 1.24 \times 10^3$ или $g_{23} := g_{12} - g_{25} \quad g_{23} = 1.24 \times 10^3$

Расчет 5 аппарата $g_{56} := g_{05} + g_{45} + g_{25} \quad g_{12} = 1.24 \times 10^4$

Расчет 6 аппарата $g_{60} := 0.7g_{56} \quad g_{60} = 8.932 \times 10^3$

$g_{63} := 0.3g_{56} \quad g_{63} = 3.828 \times 10^3$ или $g_{63} := g_{56} - g_{60} \quad g_{63} = 3.828 \times 10^3$

Расчет 3 аппарата $g_{30} := g_{23} + g_{63} \quad g_{30} = 5.068 \times 10^3$

Проверка расчета по материальному балансу:

Сумма массовых расходов на входе $g_{01} + g_{04} + g_{05} = 1.4 \times 10^4$

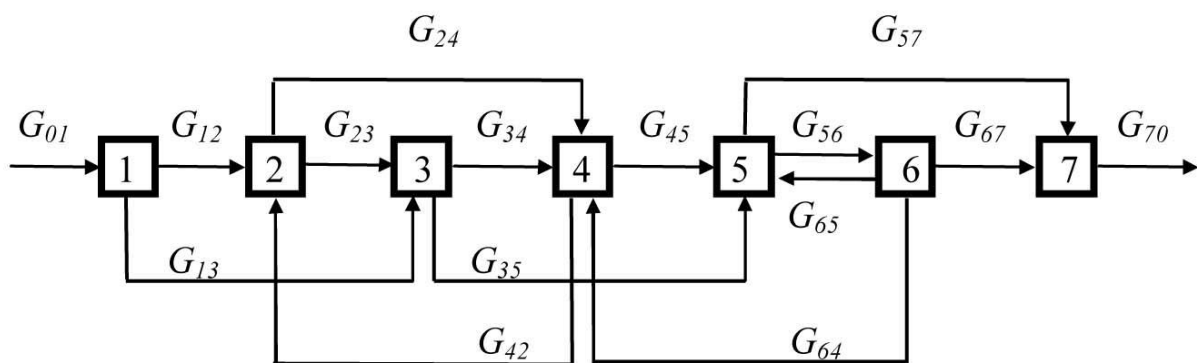
Сумма массовых расходов на выходе $g_{30} + g_{60} = 1.4 \times 10^4$

Замкнутые ХТС имеют обратные потоки, поэтому непосредственно определить последовательность расчета аппаратов приведенным выше методом невозможно.

Для замкнутых ХТС характерно наличие контуров, т. е. замкнутых путей, начальные вершины которых совпадают с конечными. Контур, имеющий хотя бы одну общую вершину, называется связанным. Множество связанных контуров образует комплекс – совокупность вершин, входящих в контуры и рассчитываемых совместно. Вершины комплекса обладают следующими свойствами: каждая из вершин и дуг комплекса входит в один из контуров графа; если вершина входит в комплекс, то в комплекс входят все контуры, содержащие эту вершину.

При декомпозиционном методе расчета замкнутая ХТС разрывом некоторых потоков превращается в условно разомкнутую, и для нее определяется порядок расчета элементов. Для решения этой задачи выполняется структурный анализ ХТС, состоящий из следующих основных этапов: выделение комплексов и определение последовательности их расчета (предварительной последовательности расчета ХТС), выделение контуров, входящих в комплекс, определение оптимально-разрывающего множества дуг, разрыв которых превращает ХТС в разомкнутую, и, наконец, определение окончательной последовательности расчета ХТС.

В качестве примера выполним структурный анализ замкнутой ХТС, приведенной на *рис. 1*, а затем рассчитаем ее потоки методом простой итерации. Для удобства повторим рисунок и задание:



Исходные данные:

$$\begin{aligned}
 G_{01} &= 10000 \text{ кг/ч}; & G_{13} &= 0,4G_{01}; & G_{23} &= 0,5(G_{42}+G_{12}); \\
 G_{35} &= 0,1(G_{23}+G_{13}); & G_{45} &= 0,6(G_{24}+G_{34}+G_{64}); \\
 G_{65} &= 0,3G_{56}; & G_{67} &= 0,5G_{56}; & G_{57} &= 0,7(G_{45}+G_{65}+G_{35}).
 \end{aligned}$$

Выделение комплексов можно выполнить, например, на основе анализа матрицы или списка смежности ХТС: если удастся определить выходные или входные вершины (аппараты), то они не входят ни в один из комплексов. В первом случае от выходных аппаратов нет потоков к другим элементам схемы, поэтому они не могут входить в контуры, а во втором – ко входным элементам схемы нет потоков от других аппаратов, следовательно, они также не входят в контуры.

Проанализируем список смежности для рассматриваемой ХТС. Согласно принципу заполнения списка смежности [S], первый элемент является входным, так как его номер встречается только в левом столбце списка смежности, а седьмой – выходным. Вычеркнем из списка связи первого аппарата (список смежности [S']). Из списка [S'] следует, что элементы 2, 3, 4, 5, 6, номера которых встречаются в обоих столбцах [S'], входят в комплекс и должны рассчитываться совместно. Таким образом, для рассматриваемой ХТС предварительная последовательность расчета элементов 1, {2, 3, 4, 5, 6}, 7, где в фигурные скобки заключена совокупность аппаратов, входящих в комплекс.

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 3 \\ 2 & 3 \\ 2 & 4 \\ 3 & 4 \\ 3 & 5 \\ 4 & 2 \\ 4 & 5 \\ 5 & 6 \\ 5 & 7 \\ 6 & 4 \\ 6 & 5 \\ 6 & 7 \end{bmatrix}; [S'] = \begin{bmatrix} \overline{1} & \overline{2} \\ \overline{1} & \overline{3} \\ 2 & 3 \\ 2 & 4 \\ 3 & 4 \\ 3 & 5 \\ 4 & 2 \\ 4 & 5 \\ 5 & 6 \\ 5 & 7 \\ 6 & 4 \\ 6 & 5 \\ 6 & 7 \end{bmatrix};$$

Выделение контуров. Один из способов выделения всех контуров заключается в построении прадерава комплекса. Прадеревом комплекса называют такое изображение всех путей, существующих в комплексе, когда в каждую вершину, отличную от корневой (начальной), входит только одна дуга. В вершину прадерава ни одна дуга не входит. Построение каждого пути продолжают до тех пор, пока на нем не встретятся повторяющиеся вершины. В этом случае построение соответствующего пути заканчивают, последнюю вершину называют висячей вершиной прадерава. Каждая висячая вершина принадлежит контуру.

Из анализа прадерава комплекса {2, 3, 4, 5, 6} (рис. 3) следует, что число висячих вершин – 9, число контуров – 9:

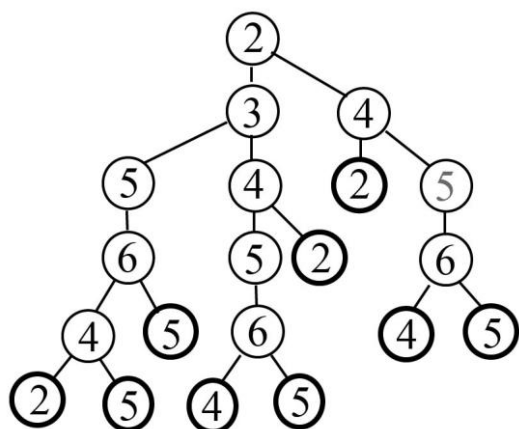


Рис. 3

- $K_1 = \{5-6-5\};$
- $K_2 = \{2-3-5-6-4-2\};$
- $K_3 = \{5-6-4-5\};$
- $K_4 = \{4-5-6-4\}; K_5 = \{5-6-5\};$
- $K_6 = \{2-3-4-2\};$
- $K_7 = \{2-4-2\}; K_8 = \{4-5-6-4\};$
- $K_9 = \{5-6-5\}.$

Разные висячие вершины праде-
рева могут принадлежать одному
и тому же контуру, поэтому общее
число висячих вершин прадерева
больше числа контуров. Все оди-

наковые контуры, например (K_1, K_5, K_9) и (K_3, K_4, K_8) , кроме од-
ного, вычеркиваем из списка.

Окончательно список контуров будет выглядеть следующим
образом:

- $K_1 = \{5-6-5\}; K_2 = \{2-3-5-6-4-2\}; K_3 = \{5-6-4-5\};$
- $K_4 = \{2-3-4-2\}; K_5 = \{2-4-2\}.$

Определение оптимально-разрывающего множества дуг

заключается в выборе минимального числа разрываемых дуг для
превращения ХТС в условно разомкнутую. Требование минималь-
ности вытекает из необходимости обеспечения быстрой сходимос-
ти алгоритма и сокращения времени счета будущей программы.

Для решения этой задачи строим матрицу контуров (табл. 2),
элементы которой определяются по правилу: $k_{ij} = 1$, если дуга j
входит в контур i , $k_{ij} = 0$, если дуга j не входит в контур i .

Таблица 2. Матрица контуров замкнутой ХТС

Кон- туры	P_1 5-6	P_2 6-5	P_3 2-3	P_4 3-5	P_5 6-4	P_6 4-2	P_7 4-5	P_8 3-4	P_9 2-4
K_1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
K_2	1	0	1	1	1	1	0	0	0
K_3	1	0	0	0	1	0	1	0	0
K_4	0	0	1	0	0	1	0	1	0
K_5	0	0	0	0	0	1	0	0	1
f	3	1	2	1	2	3	1	1	1

Определим контурную степень дуги f_j . Она равна числу
контуров, в которые входит дуга.

Наибольшую контурную степень имеют дуги 5-6 и 4-2. Разорвем, например, дугу 5-6, тогда будут разорваны контуры K_1 , K_2 , K_3 , в которые эта дуга входит. Оставшиеся два контура – K_4 и K_5 – могут быть разорваны общей дугой 4-2. Следовательно, разрыв только двух дуг 5-6 и 4-2 превращает ХТС в условно разомкнутую.

Определение окончательной последовательности расчета
ХТС можно выполнить по списку смежности разомкнутой схемы (разорванные дуги в него не включаются).

В соответствии со списком смежности, расчет комплекса должен производиться в последовательности: 2, 3, 6, 4, 5. Окончательная последовательность расчета рассматриваемой замкнутой ХТС имеет вид

$$1, \{ \overbrace{\text{ИБ}, 2, 3, 6, 4, 5}^{\text{}} \}, 7,$$

где ИБ – итерационный блок.

В результате итерационного алгоритма должны совпадать заданные $g_{\text{зад}}$ и расчетные $g_{\text{расч}}$ параметры разорванных потоков. Если разрывался один поток, то задачу подбора его параметров можно представить как решение алгебраического уравнения

$$g_{\text{зад}} - g_{\text{расч}} = 0$$

и использовать, например, функцию *root*.

Если разрываемых потоков несколько, то можно составить функционал по принципу наименьших квадратов и искать его минимум:

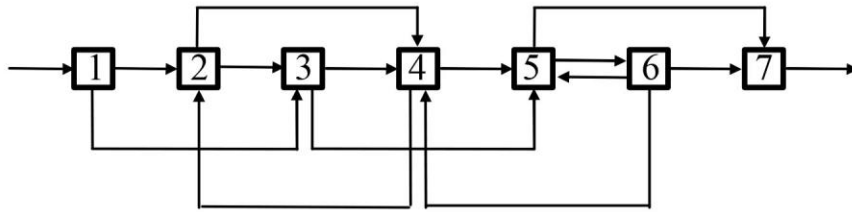
$$\Phi = \sum_{i=1}^n (g_{i,\text{зад}} - g_{i,\text{расч}})^2 \rightarrow \min$$

В Mathcad для этой цели применима функция *Minimize*, перед вызовом которой (см. листинг 3) следует задать начальные приближения для параметров всех разорванных потоков.

Вычисление функционала Φ оформлено в виде функции *Mathcad*, в которой для вычисления расходов используется операция внутреннего присваивания, поэтому после вычисления координат минимума (параметров разорванных потоков) придется повторить расчет всех расходов.

Листинг 3

Расчет замкнутой ХТС декомпозиционным (итерационным) методом



Исходные данные:

$$G_{01} = 10000 \text{ кг/ч}; \quad G_{13} = 0,4G_{01}; \quad G_{23} = 0,5(G_{42} + G_{12});$$

$$G_{35} = 0,1(G_{23} + G_{13}); \quad G_{45} = 0,6(G_{24} + G_{34} + G_{64});$$

$$G_{65} = 0,3G_{56}; \quad G_{67} = 0,5G_{56}; \quad G_{57} = 0,7(G_{45} + G_{65} + G_{35}).$$

Входной поток: $g_{01} := 10000$

Расчет 1-го аппарата, не входящего в комплекс

$$g_{13} := 0,4g_{01}$$

$$g_{12} := 0,6g_{01}$$

Расчет аппаратов, входящих в комплекс

$$f(g_{42}, g_{56}) := \begin{cases} g_{23} \leftarrow 0,5(g_{42} + g_{12}) \\ g_{24} \leftarrow 0,5(g_{42} + g_{12}) \\ g_{35} \leftarrow 0,1(g_{23} + g_{13}) \\ g_{34} \leftarrow 0,9(g_{23} + g_{13}) \\ g_{65} \leftarrow 0,3g_{56} \\ g_{67} \leftarrow 0,5g_{56} \\ g_{64} \leftarrow g_{56} - g_{65} - g_{67} \\ g_{45} \leftarrow 0,6(g_{24} + g_{34} + g_{64}) \\ g_{42r} \leftarrow 0,4(g_{24} + g_{34} + g_{64}) \\ g_{57} \leftarrow 0,7(g_{45} + g_{65} + g_{35}) \\ g_{56r} \leftarrow 0,3(g_{45} + g_{65} + g_{35}) \\ (g_{42} - g_{42r})^2 + (g_{56} - g_{56r})^2 \end{cases}$$

$$g_{42} := 2000 \quad g_{56} := 2000$$

$$\begin{pmatrix} g_{42} \\ g_{56} \end{pmatrix} := \text{Minimize}(f, g_{42}, g_{56}) \quad f(g_{42}, g_{56}) = 1,47 \times 10^{-11}$$

Результат минимизации $g_{42} = 6,455 \times 10^3$ $g_{56} = 3,529 \times 10^3$

Вычисление массовых расходов потоков при рассчитанных параметрах разорванных потоков:

$$g_{13} := 0.4g_{01} \quad g_{13} = 4 \times 10^3$$

$$g_{12} := 0.6g_{01} \quad g_{12} = 6 \times 10^3$$

$$g_{23} := 0.5(g_{42} + g_{12}) \quad g_{23} = 6.228 \times 10^3$$

$$g_{24} := 0.5(g_{42} + g_{12}) \quad g_{24} = 6.228 \times 10^3$$

$$g_{35} := 0.1(g_{23} + g_{13}) \quad g_{35} = 1.023 \times 10^3$$

$$g_{34} := 0.9(g_{23} + g_{13}) \quad g_{34} = 9.205 \times 10^3$$

$$g_{65} := 0.3g_{56} \quad g_{65} = 1.059 \times 10^3$$

$$g_{67} := 0.5g_{56} \quad g_{67} = 1.765 \times 10^3$$

$$g_{64} := g_{56} - g_{65} - g_{67} \quad g_{64} = 705.882$$

$$g_{45} := 0.6(g_{24} + g_{34} + g_{64}) \quad g_{45} = 9.683 \times 10^3$$

$$g_{42r} := 0.4(g_{24} + g_{34} + g_{64}) \quad g_{42r} = 6.455 \times 10^3$$

$$g_{57} := 0.7(g_{45} + g_{65} + g_{35}) \quad g_{57} = 8.235 \times 10^3$$

$$g_{56r} := 0.3(g_{45} + g_{65} + g_{35}) \quad g_{56r} = 3.529 \times 10^3$$

Расчет 7-го аппарата, не входящего в комплекс

$$g_{70} := g_{67} + g_{57} \quad g_{70} = 10 \times 10^3$$

4 Требования к выполнению контрольной работы

В приложении А приведены 25 вариантов индивидуальных заданий на выполнение контрольной работы в виде условной структурной схемы анализируемой ХТС и исходных данных – параметров входных потоков и уравнений связи. Номер варианта выбирается по номеру зачетной книжки (студенческого билета) как остаток от деления последних двух цифр номера на 25. Если остаток равен нулю, то выполняется 25 вариант. Например, если последние две цифры номера зачетной книжки составляют число 48, то $48:25=1$ и 23 в остатке – выполняется вариант 23.

В контрольной работе реализуются интегральный (матричный) и декомпозиционный методы расчета, описанные в настоящих методических указаниях.

1. Интегральный метод предполагает составление уравнений материального баланса всех аппаратов ХТС, что в совокупности с заданными уравнениями связи приводят к системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных массовых расходов потоков. Систему необходимо решить, например, матричным методом в среде Mathcad или в MS Excel.

Напоминаем, что методы решения уравнений и систем рассмотрены и освоены в предшествующей дисциплине «Методы и средства автоматизированных расчетов в экологии», а также применены Вами в соответствующей курсовой работе.

Если математическая среда Mathcad недоступна на Вашем компьютере, то можно воспользоваться механизмом матричных операций, предлагаемым в электронных таблицах MS Excel. Порядок использования операций с матрицами описан, например, в [6, с. 17–18].

2. Реализация декомпозиционного метода расчета предполагает проведение структурного анализа схемы для определения последовательности расчета аппаратов, составления уравнений для расчета выходных потоков каждого аппарата и выбора метода расчета параметров разорванных потоков.

Практическое выполнение расчета целесообразнее выполнить в Mathcad, поэтому в случае недоступности последнего минимальный объем выполнения этой части контрольной работы – проведение структурного анализа ХТС и запись моделей расчета

аппаратов (их выходных потоков). Сам расчет предполагается реализовать в компьютерном классе на практических занятиях.

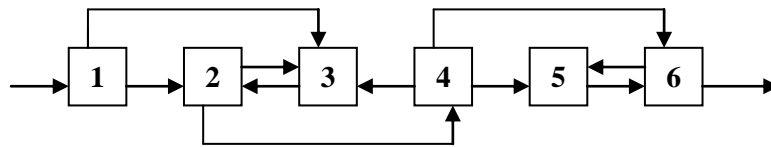
Требования к оформлению контрольной работы типовые – компьютерный текст, подготовленный в текстовом процессоре MS Word или аналогах и выполненный в соответствии с нормами ГОСТ 7.32–2001.

Список литературы

1. Багров, И. В. Модели технологических процессов и их реализация на ПЭВМ: учеб. пособие / И. В. Багров.– СПб.: СПГУТД, 2002. – 240 с.
2. Бусыгин Н. Ю. Моделирование энерго- и ресурсосберегающих процессов в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии. Лабораторный практикум [Электронный ресурс]: учебное пособие / Бусыгин Н. Ю., Багров И. В. – СПб.: СПбГУПТД, 2017.– 173 с.– Режим доступа: <http://publish.sutd.ru>, по паролю.
3. Кафаров, В. В. Анализ и синтез химико-технологических систем / В. В. Кафаров, В. Л. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 312 с.
4. Автоматизированные расчеты химико-технологических систем. Интегральные и декомпозиционные методы [Электронный ресурс]: методические указания / Сост. Бусыгин Н. Ю., Багров И. В. – СПб.: СПГУТД, 2015.– 47 с.– Режим доступа: <http://publish.sutd.ru>, по паролю.
5. Бусыгин Н. Ю. Методы и средства автоматизированных расчетов в экологии. Решение задач в среде Mathcad [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Бусыгин Н. Ю. – СПб.: СПГУТД, 2014.– 258 с.– Режим доступа: <http://publish.sutd.ru>, по паролю.
6. Методы и средства автоматизированных расчетов в экологии. Курсовая работа [Электронный ресурс]: методические указания / Сост. Бусыгин Н. Ю. – СПб.: СПГУТД, 2015.– 36 с.– Режим доступа: <http://publish.sutd.ru>, по паролю.

Варианты индивидуальных учебных заданий
для расчета материальных потоков в сложных ХТС

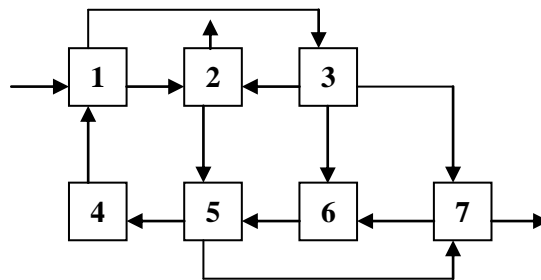
Вариант 1



$$G_{01}=15000 \text{ кг/ч}; G_{24}=0,5(G_{12}+G_{32}); G_{12}=0,6G_{01}; G_{60}=0,8(G_{46}+G_{56});$$

$$G_{45}=0,5G_{24}; G_{43}=0,1G_{24}$$

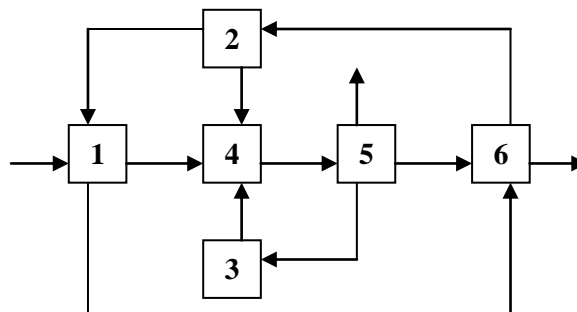
Вариант 2



$$G_{01}=12000 \text{ кг/ч}; G_{70}=0.6(G_{57}+G_{37}); G_{32}=0.2G_{13}; G_{12}=0.4(G_{41}+G_{01});$$

$$G_{36}=0.3G_{13}; G_{25}=0,3(G_{12}+G_{32}); G_{54}=0.3(G_{25}+G_{65})$$

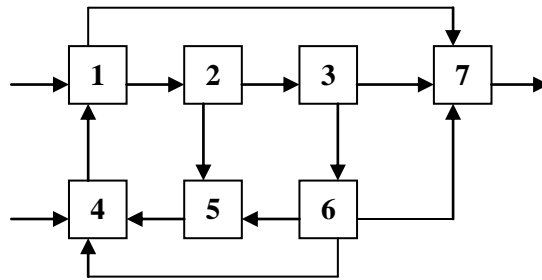
Вариант 3



$$G_{01}=15000 \text{ кг/ч}; G_{14}=0.7(G_{01}+G_{21}); G_{21}=0.5G_{62}; G_{50}=0.35G_{45};$$

$$G_{53}=0.25G_{45}; G_{60}=0.8(G_{56}+G_{16})$$

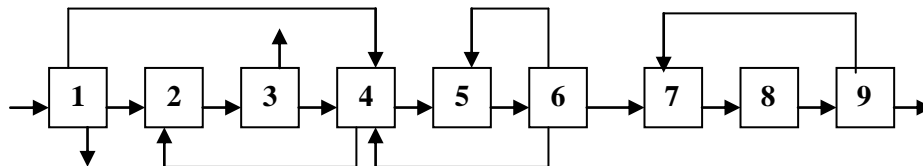
Вариант 4



$$G_{01}=70000 \text{ кг/ч}; G_{04}=30000 \text{ кг/ч}; G_{17}=0.2(G_{41}+G_{01}); G_{23}=0.65G_{12};$$

$$G_{36}=0.25G_{23}; G_{64}=0.1G_{36}; G_{67}=0.7G_{36}$$

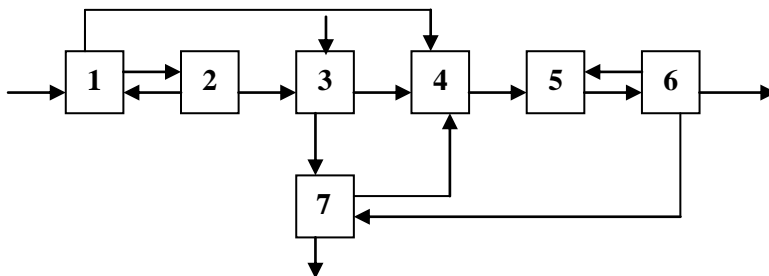
Вариант 5



$$G_{01}=4000 \text{ кг/ч}; G_{12}=0.3G_{01}; G_{14}=0.4G_{01}; G_{34}=0.4G_{23}$$

$$G_{45}=0.5(G_{14}+G_{64}+G_{34}); G_{64}=0.15G_{56}; G_{65}=0.5G_{56}; G_{97}=0.4G_{89}$$

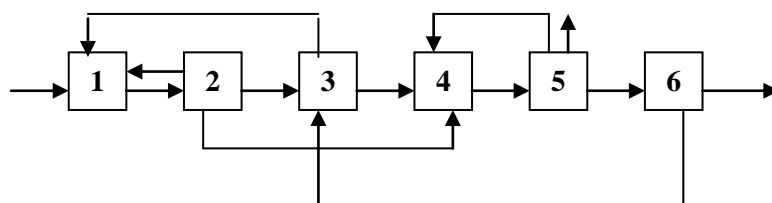
Вариант 6



$$G_{01}=7000 \text{ кг/ч}; G_{03}=3000 \text{ кг/ч}; G_{14}=0.15(G_{01}+G_{21}); G_{21}=0.05G_{12}$$

$$G_{37}=0.01(G_{03}+G_{23}); G_{70}=0.7G_{67}; G_{60}=0.95G_{56}; G_{67}=0.02G_{56}$$

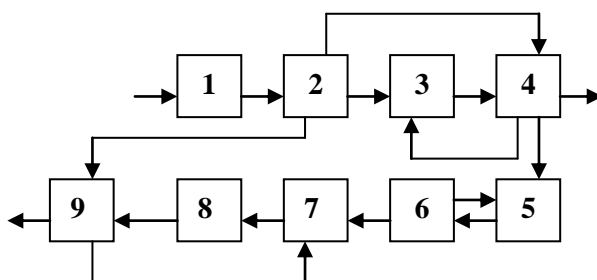
Вариант 7



$$G_{01}=2000 \text{ кг/ч}; G_{23}=0.3G_{12}; G_{34}=0.25(G_{23}+G_{63})$$

$$G_{50}=0.3G_{45}; G_{63}=0.2G_{56}; G_{54}=0.2G_{45}; G_{21}=0.1G_{12}$$

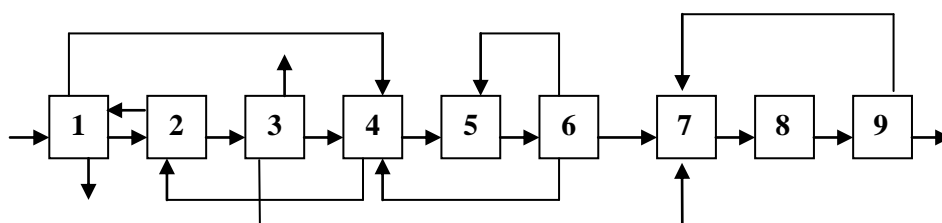
Вариант 8



$$G_{01}=12000 \text{ кг/ч}; G_{24}=0.05G_{12}; G_{29}=0.1G_{12}; G_{43}=0.2(G_{34}+G_{24});$$

$$G_{40}=0.75(G_{24}+G_{34}); G_{67}=0.85G_{56}; G_{90}=0.99(G_{29}+G_{89})$$

Вариант 9*

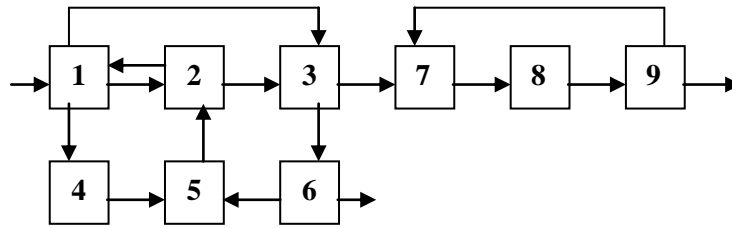


$$G_{01}=4000 \text{ кг/ч}; G_{12}=0.3G_{01}; G_{14}=0.4G_{01}; G_{34}=0.4G_{23};$$

$$G_{45}=0.5(G_{14}+G_{64}+G_{34}); G_{64}=0.15G_{56}; G_{65}=0.5G_{56}; G_{97}=0.4G_{78}$$

$$G_{21}=0.1(G_{12}+G_{42}); G_{37}=0.05G_{23}$$

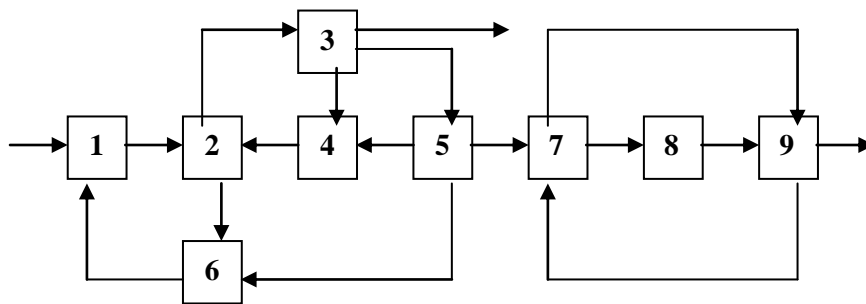
Вариант 10



$$G_{01}=7000 \text{ кг/ч}; G_{13}=0.45(G_{01}+G_{21}); G_{12}=0.1(G_{01}+G_{21});$$

$$G_{21}=0.5(G_{52}+G_{12}); G_{65}=0.3G_{36}; G_{36}=0.2(G_{13}+G_{23}); G_{97}=0.1G_{89}$$

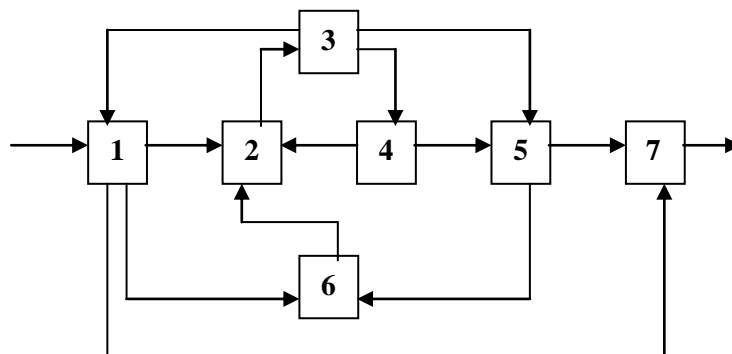
Вариант 11*



$$G_{01}=5000 \text{ кг/ч}; G_{23}=0.25(G_{12}+G_{42}); G_{30}=0.5G_{23}; G_{35}=0.3G_{23};$$

$$G_{54}=0.45G_{35}; G_{56}=0.3G_{35}; G_{97}=0.6G_{89}; G_{79}=0.1G_{57}$$

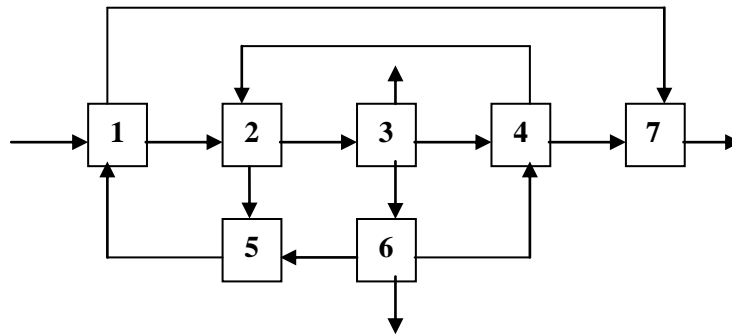
Вариант 12*



$$G_{01}=4000 \text{ кг/ч}; G_{12}=0.6G_{01}; G_{17}=0.1G_{01}; G_{34}=0.3G_{23}; G_{35}=0.2G_{23};$$

$$G_{56}=0.3(G_{35}+G_{45}); G_{45}=0.25G_{34}$$

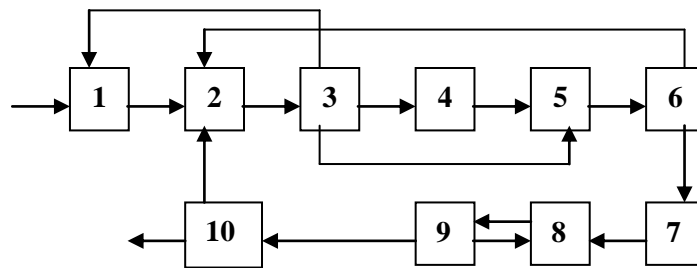
Вариант 13



$$G_{01}=20000 \text{ кг/ч}; G_{17}=0.1(G_{51}+G_{01}); G_{65}=0.5G_{36}; G_{23}=0.3(G_{42}+G_{12});$$

$$G_{42}=0.2(G_{34}+G_{64}); G_{30}=0.3G_{23}; G_{34}=0.4G_{23}; G_{64}=0.2G_{36}$$

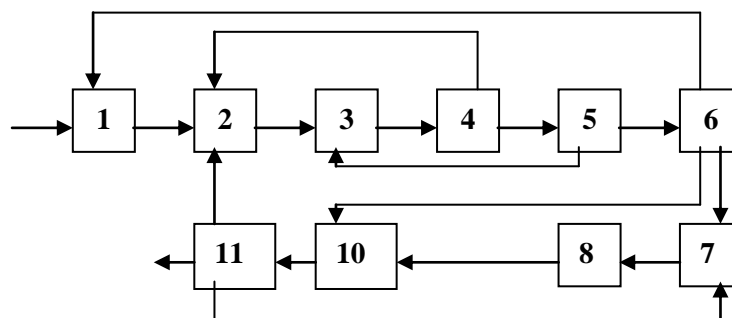
Вариант 14



$$G_{01}=12000 \text{ кг/ч}; G_{31}=0.3G_{23}; G_{35}=0.1G_{23};$$

$$G_{62}=0.2G_{56}; G_{100}=0.8G_{910}; G_{98}=0.05G_{89}$$

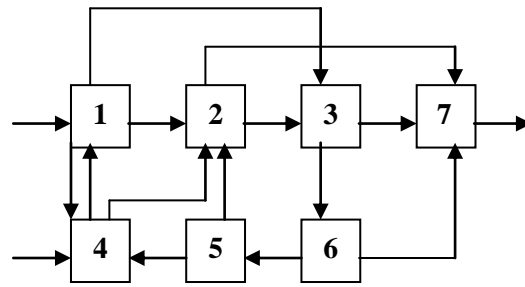
Вариант 15



$$G_{01}=18000 \text{ кг/ч}; G_{42}=0.2G_{34}; G_{53}=0.1G_{45};$$

$$G_{61}=0.3G_{56}; G_{610}=0.4G_{56}; G_{117}=0.3G_{1011}; G_{112}=0.2G_{1011}$$

Вариант 16

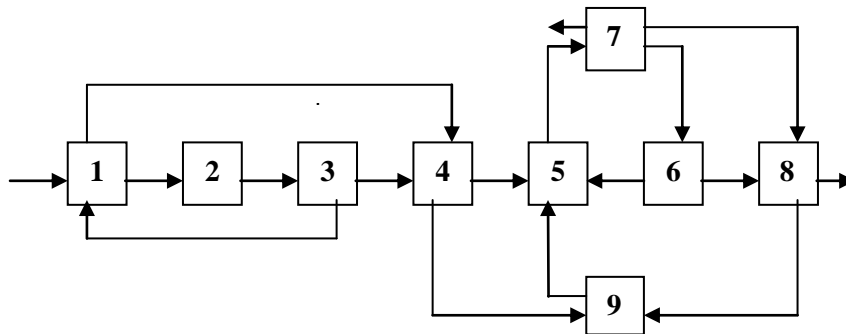


$$G_{01}=5000 \text{ кг/ч}; G_{04}=8000 \text{ кг/ч}; G_{12}=0.3(G_{01}+G_{41}); G_{13}=0.1(G_{01}+G_{41});$$

$$G_{41}=0.3(G_{14}+G_{04}+G_{54}); G_{36}=0.6(G_{23}+G_{13}); G_{54}=0.2G_{65}$$

$$G_{67}=0.7G_{36}; G_{27}=0.4(G_{12}+G_{42}+G_{52})$$

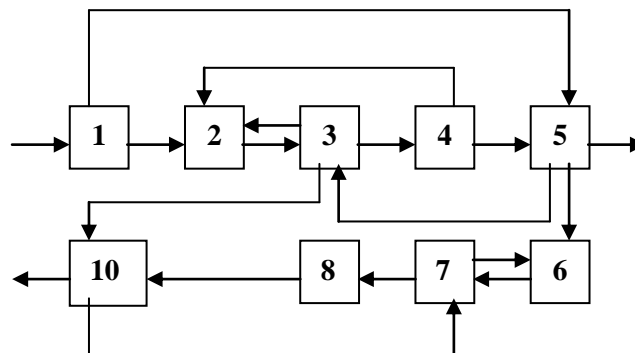
Вариант 17



$$G_{01}=20000 \text{ кг/ч}; G_{14}=0.5(G_{01}+G_{31}); G_{34}=0.8G_{23}; G_{45}=0.6(G_{14}+G_{34});$$

$$G_{70}=0.35G_{57}; G_{76}=0.3G_{57}; G_{89}=0.15(G_{68}+G_{78}); G_{68}=0.7G_{76}$$

Вариант 18

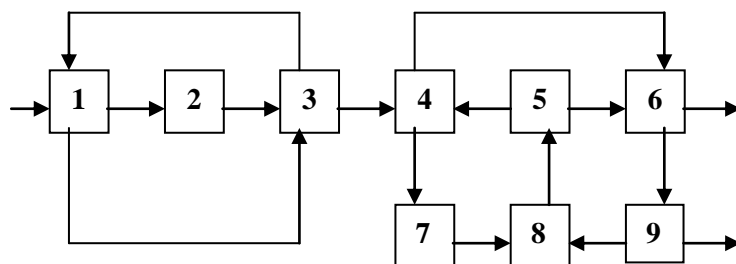


$$G_{01}=15000 \text{ кг/ч}; G_{32}=0.15(G_{53}+G_{23}); G_{310}=0.2(G_{53}+G_{23});$$

$$G_{50}=0.8(G_{45}+G_{15}); G_{56}=0.1(G_{45}+G_{15}); G_{78}=0.4(G_{107}+G_{67});$$

$$G_{107}=0.5(G_{310}+G_{810}); G_{15}=0.05G_{01}; G_{42}=0.1G_{34}$$

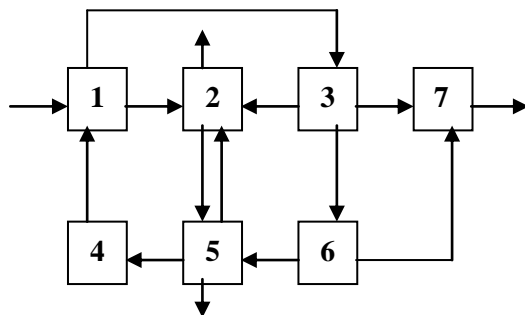
Вариант 19*



$$G_{01}=5000 \text{ кг/ч}; G_{31}=0.4G_{13}; G_{13}=0.1(G_{01}+G_{31}); G_{46}=0.4(G_{34}+G_{54});$$

$$G_{54}=0.3G_{85}; G_{98}=0.1G_{69}; G_{60}=0.25(G_{46}+G_{56})$$

Вариант 20

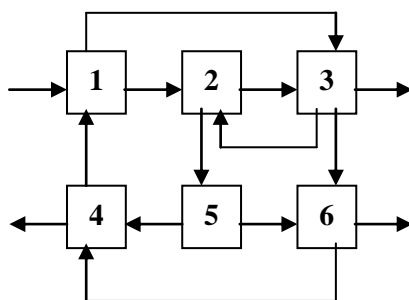


$$G_{01}=8000 \text{ кг/ч}; G_{12}=0.4(G_{41}+G_{01}); G_{25}=0.3(G_{12}+G_{32}+G_{52});$$

$$G_{32}=0.2G_{13}; G_{37}=0.3G_{13}; G_{67}=0.8G_{36}; G_{54}=0.5(G_{65}+G_{25});$$

$$G_{50}=0.1(G_{65}+G_{25})$$

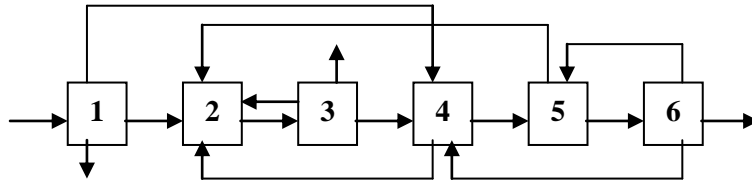
Вариант 21*



$$G_{01}=10000 \text{ кг/ч}; G_{13}=0.2(G_{01}+G_{41}); G_{23}=0.3(G_{32}+G_{12}); G_{41}=0.3G_{54};$$

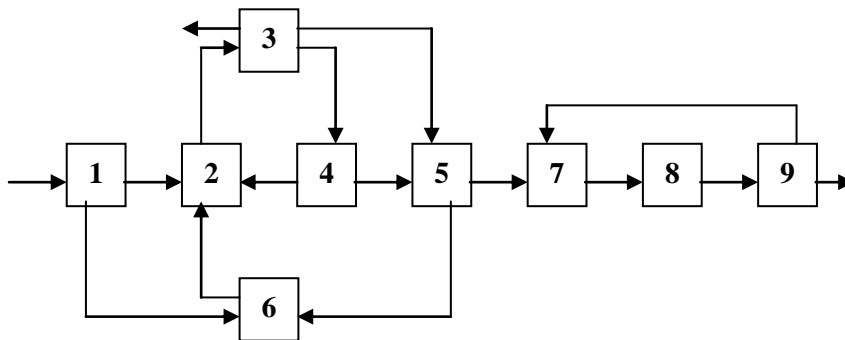
$$G_{30}=0.5(G_{13}+G_{23}); G_{32}=0.2(G_{13}+G_{23}); G_{56}=0.2G_{25}; G_{64}=0.1(G_{36}+G_{56})$$

Вариант 22



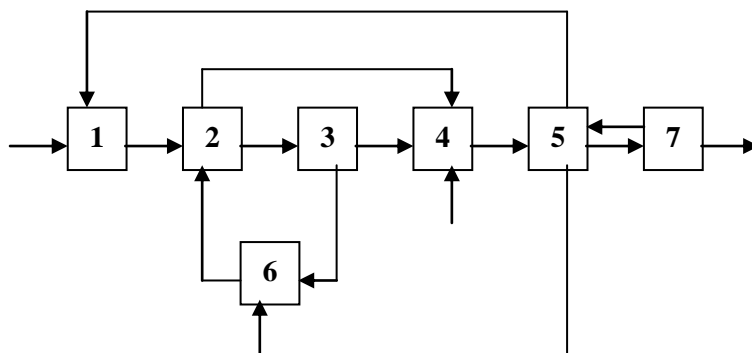
$$G_{01}=20000 \text{ кг/ч}; G_{12}=0.3G_{01}; G_{14}=0.5G_{01}; G_{34}=0.3G_{23}; G_{32}=0.1G_{23}; \\ G_{64}=0.2G_{56}; G_{45}=0.5(G_{14}+G_{64}+G_{34}); G_{65}=0.5G_{56}; G_{52}=0.4(G_{45}+G_{65})$$

Вариант 23



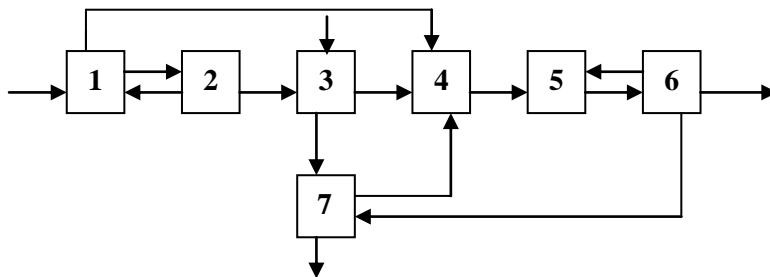
$$G_{01}=2000 \text{ кг/ч}; G_{12}=0.5G_{01}; G_{34}=0.3G_{23}; G_{35}=0.25G_{23}; \\ G_{56}=0.3(G_{35}+G_{45}); G_{45}=0.2G_{34}; G_{97}=0.55G_{89}$$

Вариант 24*



$$G_{01}=G_{04}=3000 \text{ кг/ч}; G_{23}=0.2G_{12}; G_{36}=0.5G_{23} \\ G_{51}=0.1G_{45}; G_{56}=0.15(G_{45}+G_{75}); G_{70}=0.85G_{57}$$

Вариант 25



$$G_{01}=7000 \text{ кг/ч}; G_{03}=3000 \text{ кг/ч}; G_{14}=0.15(G_{01}+G_{21}); G_{21}=0.05G_{12}$$
$$G_{37}=0.01(G_{03}+G_{23}); G_{70}=0.7(G_{67}+G_{37}); G_{60}=0.95G_{56}; G_{67}=0.02G_{56}$$

* Варианты повышенной сложности.