

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ
И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления подготовки 15.04.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2022**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления подготовки 15.04.04*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2022

УДК 004.942; 66.021.2.3.048

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ. Методические указания к практическим занятиям / Сост.: *П.А. Петров, И.И. Белоглазов* СПб, 2021. 40 с.

Представлено описание и порядок выполнения практических занятий по дисциплине «Математическое моделирование объектов и систем управления». Рассмотрено применение программного комплекса SimSci PRO/II для моделирования процессов ректификации.

Предназначены для студентов направления 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», магистерская программа «Системы автоматизированного управления в нефтегазопереработке».

Научный редактор: проф. *В.Ю. Бажин*, зав. кафедрой АТПП Горного университета

Рецензент: канд. техн. наук *С.А. Мирвалиев* (Ведущий специалист департамента АСУ ТП ООО "ГЦЭ-энерго")

©Санкт-Петербургский
горный университет, 2021

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к практическим занятиям составлены в соответствии с программой дисциплины «Математическое моделирование объектов и систем управления» и предназначены для выполнения студентами направления подготовки 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», магистерская программа «Системы автоматизированного управления в нефтегазопереработке».

Целью практических занятий является формирование у студентов базовых знаний о программных пакетах, применяемых для моделирования, о необходимой структуре и составе таких пакетов, о методах построения технологических схем в программных пакетах, библиотеке математических моделей технологических аппаратов, о библиотеке компонентов и их свойств; знаний об общих принципах построения технологических схем; о проведении вычислительного эксперимента.

Занятия предполагают выполнение студентами заданий с использованием современного программного обеспечения для моделирования технологических схем SIMSCI Pro/II компании Schneider Electric. Представленные в данных методических указаниях расчеты дадут студентам возможность:

- описать, как работают ректификационные колонны;
- перевести реальные тарелки в теоретические;
- выбрать наиболее подходящий алгоритм, генератор начальных приближений, при расчете той или иной колонны;
- увидеть основные источники неточностей при моделировании колонны;
- ввести спецификации и переменные, которые дадут возможность получить решение;
- оценить влияние выбора метода обработки кривых разгонок и способа нарезки на узкие фракции на результаты моделирования;
- рассчитать тепловую нагрузку на печь подогрева сырья атмосферной и вакуумной колонн без создания рециклов в расчетной схеме;

- моделировать атмосферную колонну с постепенным повышением сложности задачи;
- моделировать вакуумную колонну с учетом крекинга сырья в печи и подсоса воздуха;
- находить решение в ситуациях, когда возникают проблемы со сходимостью.

Требования к содержанию отчета по практическому занятию:

- 1) формулировка цели и задачи занятия;
- 2) краткое описание схемы установки или моделируемой технологической схемы;
- 3) описание последовательности действий при моделировании процесса в программном комплексе;
- 4) расчетные данные, результаты вычислительного эксперимента в виде таблиц, графиков;
- 5) выводы.

При создании методических указаний к практическим занятиям использованы материалы из литературных источников, указанных в конце методических указаний.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ SIM-SCI PRO/II

Программа моделирования PRO/II выполняет точные детальные расчеты материального и энергетического балансов для широкого спектра химических процессов – от процесса сепарации газа до реакционной дистилляции.

Графический интерфейс пользователя – PROVISION, позволяет строить и модифицировать как простые, так и сложные модели процессов в PRO/II.

Сферы промышленного применения: газопереработка, нефтеподготовка, нефтепереработка, нефтехимия, химия, полимеры, проектирование и консалтинг.

Применение в проектах: проектирование новых процессов, оценка различных вариантов построения установок, реконструкция и модернизация существующих установок, проверка и документальное подтверждение выполнения требований по охране окружающей среды, поиск неисправностей и узких мест в работе установок, контроль, оптимизация и повышение производительности установок и повышения эффективности их работы.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ В МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ PRO/II

1. Построение технологической схемы. Выбрать необходимые блоки установки из набора иконок программы PRO/II, для чего навести курсор на изображение, кликнуть мышкой и перетащить изображение на рабочий стол, снова кликнув мышкой. Также задаются потоки, при этом указываются входные потоки и продуктовые потоки установки.

2. Задание компонентов. Нажать на клавишу COMPONENTS, чтобы ввести список всех компонентов процесса. Выбрать из встроенной библиотеки требуемые компоненты, печатая название компонента или выбирая его из заранее определенного списка.

3. Выбор термодинамического метода расчетов. Нажать на кнопку «Фазовые диаграммы», чтобы выбрать метод термодинами-

ческих расчетов из списка наиболее часто используемых методов или специальных пакетов данных.

4. Определение сырьевых потоков. Двойное нажатие на каждый внешний поток открывает окно ввода данных о потоке (расходы, составы, температура и давление).

5. Задание условий протекания процесса. Дважды кликнуть на каждое изображение технологического устройства на технологической схеме и ввести требуемые данные о процессе (поля ввода выделены красным). Как только все необходимые данные будут введены можно начинать моделирование.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PRO/II

К настоящему времени разработан целый ряд массообменных процессов для разделения химических смесей за счет использования физических или химических различий между индивидуальными компонентами. Например, в экстракции используется различие в растворимости, а в ректификации – различие в летучести индивидуальных веществ. В моделирующей системе SIMSCI PRO/II возможен строгий расчет ректификации (а также экстракции и абсорбции) с помощью технологического элемента – колонна.

Упрощенно ректификацию можно представить как процесс кипения жидкости, за которым следует конденсация образующихся паров. Это технология была известна с древнейших времен. Еще Аристотель описал ее использование для преобразования морской воды в питьевую. В наше время эта технология несколько не устарела. Ректификация – наиболее широко используемый процесс разделения в нефтехимии. В США ее доля в общем энергопотреблении составляет около 3% [1].

В 1893 г. Сорель сделал первую попытку математического описания процесса ректификации, опубликовав ныне стандартные уравнения материального и энергетического баланса для стационарного непрерывного многоступенчатого процесса ректификации. Из-за сложности процесса ректификации аналитическое решение этих уравнений невозможно. Графические способы решения уравнений ректификации, такие как методы МакКэйба-Тила и Понсона-

Саварита, были разработаны в 1920-е годы и дают лишь приближенное решение. Эти методы хорошо работают для некоторых бинарных задач ректификации и используются для иллюстрации фундаментальных основ процесса. Однако полное описание процесса ректификации может быть получено только строгим решением уравнений материального и энергетического баланса. Эта задача может быть быстро и точно выполнена при помощи PRO/II.

Используя PRO/II, возможно моделировать целые технологические схемы, содержащие несколько ректификационных колонн.

Задачи, решаемые при помощи компьютерного моделирования ректификационных колонн:

1. Проектирование. Моделирование дает ответ – как достичь нужного разделения при минимальных затратах. Очевидное преимущество моделирования работы оборудования на компьютере – предсказание возможностей и ограничений той или иной схемы работы нового оборудования. Дешевле и безопаснее сделать ошибку на компьютере, чем на производстве.

2. Модернизация и эксплуатация. Для существующей колонны можно исследовать влияние различных составов сырья, изменения положения тарелки питания, тепловых нагрузок, в общем, промоделировать влияние изменения любых параметров процесса на работу колонны. Также программа позволяет определить необходимую степень модификации оборудования для учета экологических требований.

3. Оптимизация. С помощью моделирующей среды PRO/II можно рассчитать снижение эксплуатационных расходов и/или повышения стоимости продуктов (например, получением продуктов более высокой чистоты). Оптимизатор PRO/II автоматически определяет условия работы, максимизирующие прибыль.

PRO/II позволяет использовать три алгоритма расчета ректификации. Алгоритм – это математическая процедура или стратегия решения уравнений, описывающих работу колонны. Хотя все алгоритмы дают одинаковые результаты, каждый из них предназначен для решения определенных задач.

Алгоритм Inside/Out (I/O) хорошо подходит для решения задач углеводородной ректификации, обычных в нефтепереработке.

Алгоритм Chemdist способен решать задачи с конструктивно простыми колоннами, служащими для разделения смесей с большими отклонениями от идеальности

Алгоритм Sure является наиболее общим и способен решать задачи, не решаемые алгоритмами I/O и Chemdist. Однако он может требовать больших затрат времени и усилий пользователя для получения решения, чем другие алгоритмы.

СТРУКТУРА ГЛАВНОГО ОКНА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

Главное окно ректификационной колонны, показанное на рис.1, появляется на экране при двойном щелчке мыши по символу колонны в технологической схеме. Ввод данных производится в соответствующие области главного окна.

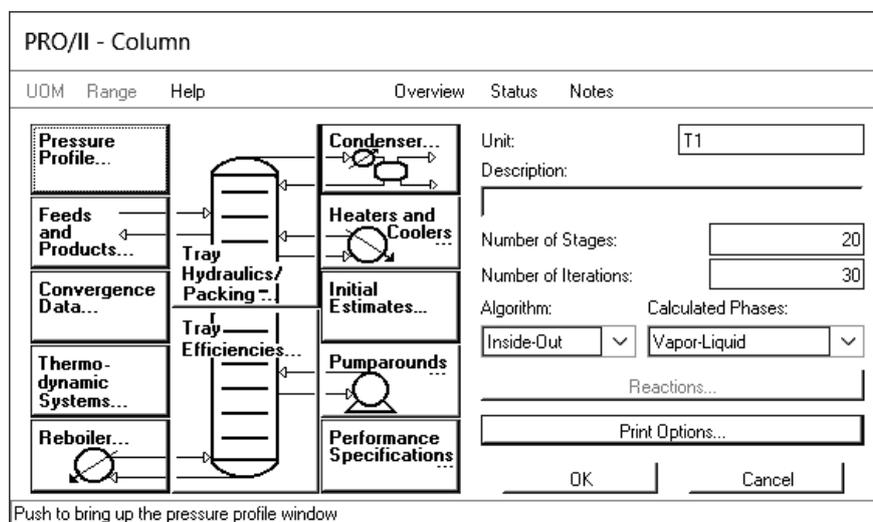


Рис. 1. Главное окно Ректификационной колонны в PRO/II

Кнопка вызова окна «Профиль давлений» показывает, что необходимо ввести данные по давлению. Для большинства задач PRO/II производит все вычисления при заданных давлениях на тарелках. После щелчка мышью по кнопке «Профиль давлений» на

экране появится окно, показанное на рис.2. Режим «Overall» – простейший способ определения профиля давлений по колонне. Нужно задать давление на верхней тарелке и перепад давления либо на одну тарелку, либо по всей колонне. Давление в конденсаторе вводится в соответствующем окне. При необходимости ввести величины давлений на нескольких или на всех тарелках, выбирается режим «By Individual Trays» (индивидуально по тарелкам).

С помощью окна Tray Hydraulics (Гидравлика тарелок) можно ввести данные для поверочного или проектного гидравлического расчета, который определит профиль давлений, исходя из типа и конструкции реальных контактных устройств и парожидкостных нагрузок в колонне. В этом случае PRO/II использует заданные давления в качестве начальных приближений, а не как фиксированные величины.

Потоки питания и продуктов. В этом окне вводится информация о расходах, фазовом равновесии и номера тарелок питания и отборов. Для многофазного питания указывается подача паровой части потока на тарелку, лежащую выше тарелки питания. В этом окне также определяются псевдопотоки. Псевдопотоки являются копиями внутренних потоков жидкости и не влияют на вычисления по колонне. Они являются средством, которое дает доступ к внутренним потокам колонны.

Cut	Tray	Pressure psig
Copy		
Paste	1	1
Insert	2	20
Reset	3	
	4	
	5	

Рис. 2. Окно «Профиль давлений»

В окне данных по сходимости изменяются параметры сходимости и запрашивается диагностическая информация (в случае проблем со сходимостью).

В этом «Термодинамические данные» изменяют заданную по умолчанию термодинамическую систему, выбирают разные системы для различных секций колонны. Эта опция используется, когда один термодинамический метод не может точно охарактеризовать поведение разделяемых компонентов во всех секциях колонны.

PRO/II предоставляет встроенную модель рибойлера с паровым пространством и две модели – для термосифонных рибойлеров.

Конденсатор в PRO/II возможен трех типов: парциального, полного и конденсатора переохлаждения. Здесь необходимо задать рабочие условия для конденсаторов.

Боковые подогреватели и холодильники размещаются на любой тарелке в колонне. Имеется возможность учесть в расчете теплототери в окружающую среду.

В окне начальных приближений выбирается тип генератора начальных приближений и задаются приближения таких параметров, как температура, составы и расходы потоков на тарелках. Генератор – это инструмент, который оценивает значения всех переменных колонны, исходя из заданных начальных приближений.

В окне циркуляционные орошения (ЦО) вводится информация о циркуляционных орошениях в колонне. Возможность расчета ЦО поддерживается только алгоритмами I/O и Sure.

В окне «Спецификации» задаются спецификации и переменные для расчета колонны. Здесь в качестве спецификаций можно задать, например, определенную чистоту верхнего продукта колонны, температуру в рибойлере или расход бокового потока.

Гидравлические расчеты колонны делятся на два типа: поверочный и проектный. Оба типа вычислений могут применяться к отдельным секциям колонны.

Поверочный режим расчета (tray rating) использует разработанные корреляции для вычисления таких значений, как факторы захлебывания, степень заполнения сливного стакана, профиль давления. При этом необходимо задать такие конструктивные параметры, как расстояние между тарелками, диаметр и тип тарелки.

В проектном режиме расчета (tray sizing) вычисляется диаметр тарелок. Как и в поверочном режиме расчета, здесь есть возможность вычисления профиля давлений по колонне.

В PRO/II возможно использование любого из трех встроенных методов определения КПД тарелок: метод Мэрфри, метод равновесия, метод испарения. Можно задать разные значения КПД для индивидуальных тарелок и даже разные величины для каждого компонента.

При моделировании ректификационных колонн желательно наглядно представлять модель колонны, в которой тарелки фракционирования изображены как связанные равновесные ступени. PRO/II допускает, что все тарелки, за исключением конденсаторов с переохлаждением, являются равновесными ступенями, то есть пар и жидкость, покидающие тарелки, находятся в равновесии. Нумерация тарелок ведется сверху вниз.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1 МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ КОЛОННЫ

Цель занятия – построить и исследовать модель технологической схемы для процесса первичной переработки нефти в среде моделирования PRO/II.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Атмосферная колонна – первый этап в переработке нефтяного сырья. Саму колонну также обычно называют колонна первичной переработки нефти, трубчатый перегонный куб и куб для перегонки нефти. Всем атмосферным колоннам предшествует электрообессоливание, при котором в сырье добавляется вода, эта водно-нефтяная смесь подвергается электролизу, а получающийся солевой раствор отводится для удаления хлоридов из сырой нефти.

Из-за большой нагрузки печей для подогрева исходной нефти перед ректификацией, установка должна иметь тщательно продуманный блок подогрева сырья, в котором сырая нефть подогревается горячими потоками. Оптимизация системы подогрева для атмосферной колонны может дать большую экономию средств за счет утилизации тепла.

Обычно контролируют температуру в зоне ввода сырья и поддерживают ее ниже 370 °С. Нагрузка по жидкости в атмосферной колонне снижается сверху вниз по колонне вплоть до потока жидкости, возвращающегося в зону ввода сырья («оверфлэш»), и поддерживаемого в диапазоне 3-5 % об. от загрузки сырья. Конец кипения бензина для риформинга надо держать ниже 205°С, т.к. в процессе риформинга происходит повышение температуры конца кипения на 14-17°С, а температура конца кипения товарного бензина по D86 обычно составляет 219-221°С

Рисунок 3 показывает общую структуру атмосферной колонны.

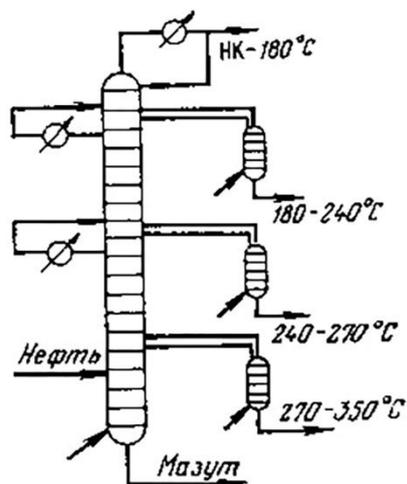


Рис. 3. Схема промышленной ректификационной колонны с боковыми отпарными секциями для разделения сырой нефти на фракции

Керосин и дизтопливо – единственные готовые продукты атмосферной колонны, иногда их необходимо подвергать гидроочистке для уменьшения содержания серы. С целью получения продуктов заданного качества контролируются температуры конца выкипания. Температура начала кипения боковых продуктов обычно контролируется отпаркой в стриппингах.

Технологическая схема для расчета показывает атмосферную колонну с номерами теоретических тарелок (рисунок 4). Таблицы 1-5 содержат данные заводских измерений.

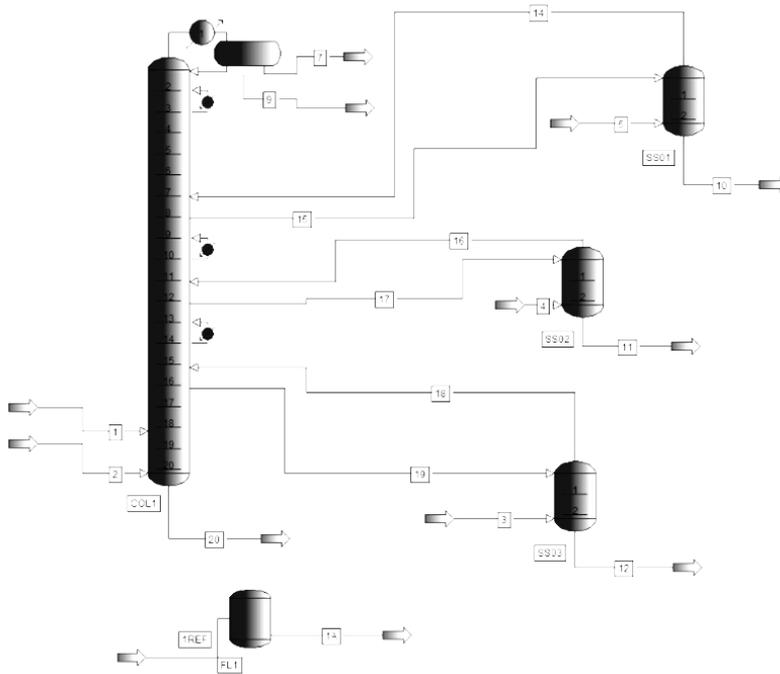


Рис. 4. Схема атмосферной колонны

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

В данном задании необходимо вычислить тепловые нагрузки (включая нагрузку печи) и отборы продуктов, обеспечивающие выполнение спецификаций, заданных в таблице 5. Для всех расчетов установлена погрешность вычисления температур кипения, теплового баланса и фазового равновесия равная 0,0001.

Необходимо выполнить моделирование процесса в несколько этапов, постепенно усложняя задачу. Эта стратегия более приемлема для исправления ошибок и неточностей в данных заводских измерений. На упрощенных моделях легче выявить и устранить причину возникновения расчетных проблем. Для полностью сконфигурированной колонны возможные проблемы имеют более сложный характер и могут быть связаны, например, с циркуляционными орошениями и стриппингами.

Ввод исходных данных по потокам

Основная колонна имеет 19 теоретических тарелок, а каждый стриппинг – 2 теоретические тарелки. Исходная нефть нагревается в печи и подается в колонну между 17 и 18 тарелками. Характеристика сырой нефти представлена в таблице 1.

Водяной пар вводится в куб основной колонны и в каждый стриппинг. В таблице 2 представлены измеренные потоки и свойства водяного пара, измеренные отборы продуктов. На рисунках 5 - 8 представлены окна программы с вводом исходных данных по сырой нефти.

Таблица 1

Исходные данные по сырой нефти

Кривая ИТК (760 мм рт.ст.)		Легкие компоненты	
% об.ж.	°С	Комп.	% об.ж.
3	36,1	C2	0,1
5	65,0	C3	0,2
10	97,8	IC4	0,3
20	165,5	NC4	0,7
30	237,2	IC5	0,5
40	310,0	NC5	1,2
50	365,6		
60	410,0	Всего = 3% об.	
70	462,8	от потока	
80	526,7		
100	871,1		
Средняя плотность	0,88052		
Расход	795 ст.ж.м ³ /ч		
Температура	232 °С		
Давление	1,9785 бар		

Stream Data - Assay Definition

UOM Range Help Tag

Assay data for stream 1

Distillation

True Boiling Point
 ASTM D86
 ASTM D1160
 ASTM D2887

TBP Basis

Liquid Volume
 Weight

Pressure: bar

Correct for Cracking
 (Recommended for API 63 and Edmister-Okamoto Interconversion only)

Gravity Data

API Gravity Average:
 Specific Gravity
 Watson K-Factor

Cut	Percent Distilled	Temperature C
Copy		
Paste		
1	3	36.1111
2	5	65
Insert		
3	10	97.7778
Reset		
4	20	165.556
5	30	237.222
6	40	310
7	50	365.556
8	60	410
9	70	462.778

< >

Additional Data

Enter the average gravity

Рис. 5. Ввод данных разгонки

Stream Data - Assay Lightends Data

UOM Range Help Tag

Assay lightends information for stream 1

Specification of Total Lightends Flowrate

Match to TBP Curve
 Fraction of Assay:
 Percent of Assay:
 Basis:

Use Compositions as Actual Rates
 Lightends Rate: lb-mol/hr

Normalize Component Flowrates
 Based on Specified Total Flowrate

Copy	Component	Composition
Paste		Liq. Vol.
Reset		
	H2O	
	C2	0.1
	C3	0.2
	IC4	0.3
	NC4	0.7
	IC5	0.5
	NC5	1.2

Total: 3.0000

Exit the window after saving all data

Рис. 6. Задание легких компонентов

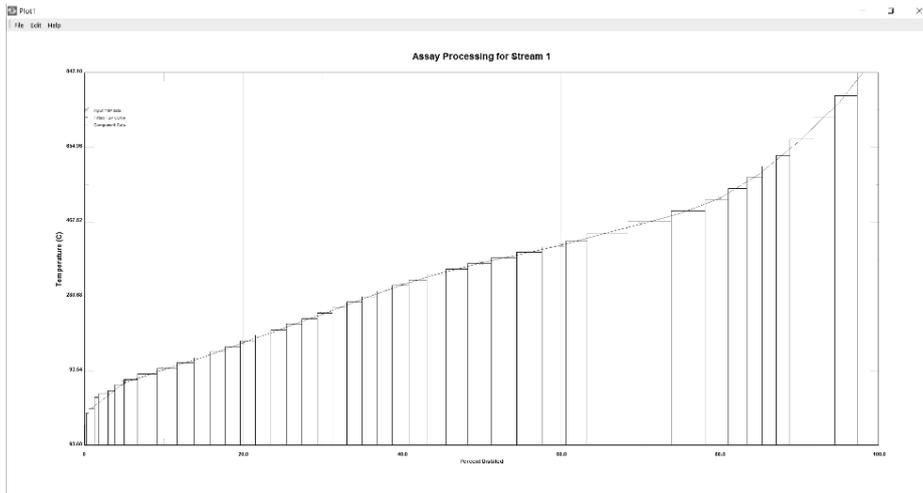


Рис. 7. Кривая ИТК

Assay Data - Primary TBP Cutpoints Definition

UOM Help

Minimum Temperature for First Interval:
 C

Cut	Maximum Temperature for Interval C	Number of Pseudo-components in Interval
1	426.667	70
2	648.889	20
3	871.111	8

Restore Defaults

OK Cancel

OK to PFD Cancel to PFD

Enter number of pseudocomponents in interval

Рис.8. Задание псевдокомпонентов на интервалах температур

Таблица 2

Измеренные потоки и свойства пара

Данные по водяному пару	
В основную колонну	4536 кг/ч
В стриппинг керосина	1814 кг/ч
В стриппинг дизтоплива	2041 кг/ч
В стриппинг газойля	681 кг/ч
Всего пара	9072 кг/ч
Температура	315.56°C
Давление	5,15 бар
Измеренные расходы продуктов	
Водная фаза	8750 кг/ч
Бензин	170 ст. м ³ /ч
Керосин	115 ст. м ³ /ч
Дизтопливо	95 ст. м ³ /ч
Атмосферный газойль	150 ст. м ³ /ч
Мазут	неизвестен

Задание параметров ректификационной колонны

В таблице 3 приведены измеренные давления в рассчитываемой колонне.

Таблица 3

Давление в колонне

Конденсатор	1,379 бар
Верхняя тарелка (тарелка 2)	1,600 бар
Зона ввода сырья (тарелка 18)	1,875 бар
Кубовая тарелка	1,910 бар
Стриппинг керосина	1,826 бар
Стриппинг дизтоплива	1,827 бар
Стриппинг газойля	1,930 бар

В таблице 4 приведены данные измерений по температурам и расходам для 3-х циркуляционных орошений. В последних трех столбцах приведены удельная теплоемкость, плотность и тепловая нагрузка. Удельная теплоемкость и плотность являются приближенными значениями, это стандартные величины, используемые конкретным нефтеперерабатывающим заводом. Значение для удельной теплоемкости обычно находится в интервале 0,5-0,7 ккал/кг°C, а

плотности – 700 - 1000 кг/м³. Другим путем значения удельной теплоемкости и плотности могут быть получены выполнением предварительных расчетов колонны в PRO/II. Поскольку измерения расходов циркуляционных орошений обычно содержат ошибки, а удельная теплоемкость и плотность приближительны, значения тепловых нагрузок являются грубыми оценками.

Таблица 4

Измеренные данные для циркуляционных орошений

Имя	№ тарелки Отбора/возврата	Температура отбора, °С	Температура возврата, °С	Расход, ст. м ³ /час	Уд. теплоемкость, ккал/кг °С	Плотность, кг/м ³	Тепловая нагрузка, * 10 ⁶ ккал/час
Верхний продукт	3/2	157	82	317	0,55	764	-10
Дизельное топливо	12/11	281	191	205	0,65	831	-10
Газойль	16/15	344	259	672	0,7	900	-36

Колонна предназначена для работы с 3% избыточным внутренним орошением (объемный внутренний поток жидкости, поступающий на тарелку питания, деленный на объемный поток сырой нефти = 0.03). Водяное охлаждение фиксирует температуру конденсатора на 43.3°C. Кроме того, должны быть выполнены спецификации на температуры конца кипения, см. таблицу 5.

Таблица 5

Производственные требования

Параметр	Значение
Орошение зоны питания (объемное)	0,03
Температура конденсатора	43,3°C
95% точка выкипания по ASTM D86 для бензина	171 °C
95% точка выкипания по ASTM D86 для керосина	271°C
95% точка выкипания по ASTM D86 для дизтоплива	352°C
95% точка выкипания по ASTM D86 для газойля	475°C

На первом этапе необходимо рассчитать упрощенный вариант атмосферной колонны. Цель этого расчета – пройти через воз-

возможные ошибки, которые можно выявить в упрощенном варианте расчета и спрогнозировать возможные проблемы при дальнейшем усложнении задачи. Для этого не учитывают все циркуляционные орошения и стриппинги, но вводят потоки водяного пара вместо стриппингов в основную колонну. Отсутствие циркуляционных орошений будет означать, что вся работа по конденсации теперь ляжет на конденсатор колонны. При этом печь моделируется как подогреватель на тарелке питания.

В качестве переменных должны быть выбраны тепловые нагрузки на зону ввода сырья и на конденсатор. Спецификациями должны быть температура 95% выкипания бензина по D86 и «оверфлэш». Отборы продуктов задаются в соответствии с таблицей 2.

Термодинамические методы – уравнение Grayson Streed для атмосферных колонн.

Алгоритм – Inside/Out (I/O) всегда должен быть первым выбором для ректификации углеводородных смесей, если нет каких-либо причин, по которым его выбрать нельзя. Если ничто не мешает его применению, выбирается метод I/O из-за его скорости, неприхотливости к начальным оценкам и способности решать стриппинги одновременно с основной колонной.

Генератор начальных приближений – нефтеперерабатывающая модель (Refinery) – лучший генератор начальных приближений в данном случае, так как она разработана специально для сложных, многопогонных колонн и особенно хорошо работает для колонн со стриппингами.

Моделирование печи – как тарелка колонны, снабженная подогревателем. Такая колонна содержит 20 теоретических тарелок с питанием, вводимым на 18 тарелку и подачей водяного пара на 20 тарелку (рисунок 9). Объединение этих двух элементов (печи и колонны) позволяет рассчитывать тепловую нагрузку на печь в процессе расчета колонны без создания рециклового контура.

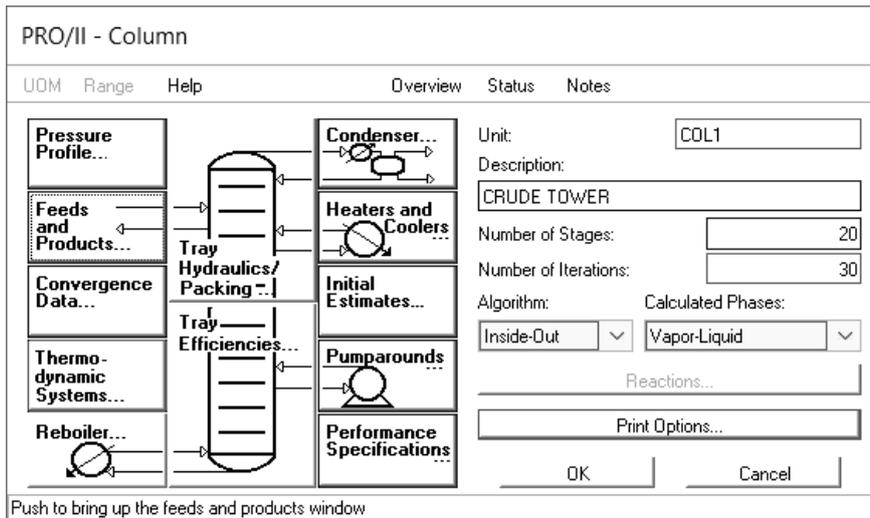


Рис. 9. Окно колонны с указанием числа тарелок

Спецификации и переменные (рисунок 10) – в окончательном расчете будет пять спецификаций и пять переменных. Спецификациями должны быть расход «оверфлэша» и четыре температуры выкипания для продуктовых потоков (например, 95% точки по D86 или ТВР). Переменными должны быть тепловые нагрузки зоны ввода сырья (печи) и конденсатора, а также боковые отборы фракций: керосина, дизельного топлива и газойля – из основной колонны. Фиксированная температура конденсации вводится в конденсаторе, и, формально, не является спецификацией. Спецификация точек выкипания продуктов дает возможность PRO/II рассчитывать их расходы. Эти расходы не будут согласовываться с измеренными значениями продуктовых потоков, что неизбежно, потому что заводские данные, особенно для расходов, никогда не бывают идеально точными. Для текущей схемы допускается несоответствие в расходах, но не в их температурах выкипания.

Column - Specifications and Variables			
UOM	Range	Help	Overview
<input checked="" type="checkbox"/> Add Specifications and Variables			
Specifications:			Active:
1	COL1SPEC1 - Column COL1 Tray 17 Liquid Flowrate of All Components on a Wet basis at Standard Conditions in bbl/hr / Stream1 Flowrate of All Components on a Wet basis at Standard Conditions in bbl/hr = 0.03 within the default tolerance		<input checked="" type="checkbox"/>
2	COL1SPEC2 - Stream 9 D86 95% Point (volume %) in C = 171 within the default tolerance		<input checked="" type="checkbox"/>
3	SCOL1SPEC1 - Stream 10 D86 95% Point (volume %) in C = 271 within the default tolerance		<input checked="" type="checkbox"/>
4	SCOL2SPEC1 - Stream 11 D86 95% Point (volume %) in C = 352 within the default tolerance		<input checked="" type="checkbox"/>
5	SCOL3SPEC1 - Stream 12 TBP 95% Point (volume %) in C = 475 within the default tolerance		<input checked="" type="checkbox"/>
Variables:			
1	Column COL1 Duty of Heater CONDENSER		
2	Column COL1 Duty of Heater 2		
3	Vary Stream 15 Flowrate		
4	Vary Stream 17 Flowrate		
5	Vary Stream 19 Flowrate		
The number of active specifications, 5 equals the number of Variables, 5			
<input checked="" type="checkbox"/> Data changes in this window will reinitialize column estimates			
Insert Specification/Variable		Insert Inactive Specification	OK
Cut Specifications/Variables		Reset Specifications/Variables	Cancel
		OK to PFD	Cancel to PFD
Check to Specify active or inactive specification			

Рис. 10. Спецификации атмосферной колонны

3. Добавление стриппингов и циркуляционных орошений

В этом расчете PRO/II определяет отборы продуктов в соответствии со спецификациями на температуры конца кипения. Отборы, которые были заданы для погонов основной колонны и продуктов стриппингов, не должны быть очень точными, поскольку они являются только оценками (рисунок 11).

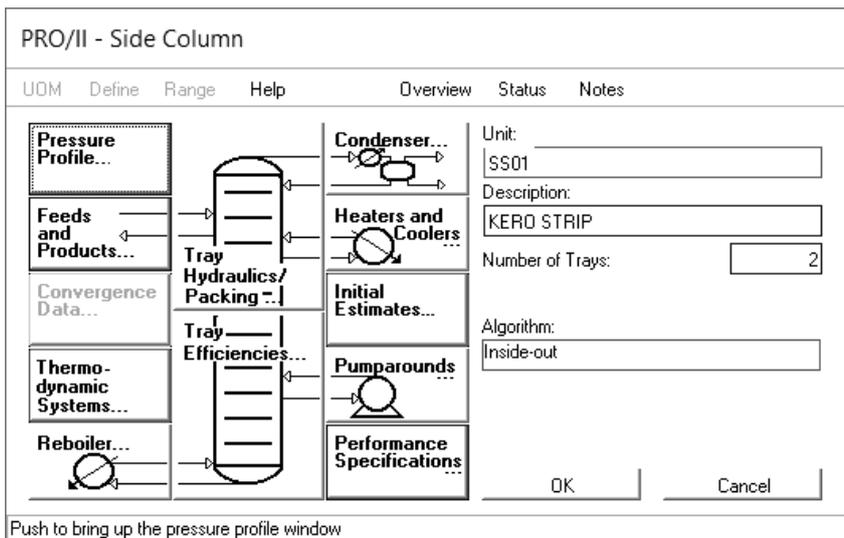


Рис. 11. Задание стриппингов

Если более точные измерения недоступны, можно проверить точность данных по циркуляционным орошениям (рисунок 12), изучив измерения в блоке подогрева сырья. Так как циркуляционное орошение греет сырье, каждая тепловая нагрузка должна соответствовать увеличению энтальпии сырья. Колонны с циркуляционными орошениями лучше сходятся, если их нагрузки рассчитываются, а не специфицируются. Значения нагрузок в этом расчете не точнее, чем измерения расходов, поэтому нет причин для выбора спецификации тепловой нагрузки вместо спецификации расхода. Следовательно, будет специфицироваться расход, который является точным, и перепад температур.

Column - Pumparounds

UOM Range Help Overview

Add Pumparounds

Cut		
Insert	1	Liquid pumparound 1, from tray 14 , to tray 13. Return pressure to be the return tray pressure in psig, with Specification: Pumparound Duty to be $-10.08 \text{ in } \times 10^6 \text{ Kcal/hr}$ for Heater 3 and Return Temperature to be 232.22 in C.
Reset	2	Liquid pumparound 2, from tray 10 , to tray 9. Return pressure to be the return tray pressure in psig, with Specification: Pumparound Duty to be $-12.60 \text{ in } \times 10^6 \text{ Kcal/hr}$ for Heater 4 and Return Temperature to be 154.44 in C.
	3	Liquid pumparound 3, from tray 3 , to tray 2. Return pressure to be the return tray pressure in psig, with Specification: Pumparound Duty to be $-12.60 \text{ in } \times 10^6 \text{ Kcal/hr}$ for Heater 5 and Return Temperature to be 79.44 in C.

OK to PFD Cancel Cancel to PFD

Exit the window after saving all data

Рис.12. Добавление циркуляционных орошений

4. Анализ результатов моделирования

После того, как введена вся необходимая информация, необходимо запустить моделируемую схему на расчет, после чего сгенерировать файл отчета, проанализировать полученные результаты, ответить на следующие вопросы:

1. Может ли функционировать данная атмосферная колонна для получения требуемого количества продуктов?
2. Какой термодинамический метод был выбран для расчета колонны?
3. Какие спецификации следует использовать при моделировании атмосферной колонны?
4. На сколько отличаются расходы продуктов при моделировании колонны, содержащей только стриппинги, и детальной модели колонны?
5. Сделать выводы по выполнению практического занятия и по результатам моделирования.
6. Подготовить отчет по выполнению практического занятия.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Таблица 6

Варианты заданий к практическому занятию №1

№ вар.	Параметры сырой нефти			Водяной пар в куб колонны		
	Температура, °С	Давление, бар	Расход, м3/ч	Температура, °С	Давление, бар	Расход, кг/ч
0 (пр)	232	1,98	795	316	5,15	9072
1.	233	1,99	780	317	5,10	9080
2.	234	2,0	785	318	5,05	9090
3.	235	2,01	790	319	5,0	9100
4.	234	1,97	800	320	5,10	9070
5.	233	1,96	805	319	5,15	9060
6.	232	1,98	795	318	5,20	9072
7.	231	1,99	780	317	5,15	9080
8.	230	2,0	785	316	5,10	9090
9.	233	2,01	790	315	5,05	9100
10.	234	1,97	800	316	5,0	9070
11.	235	1,96	805	317	5,10	9060
12.	234	1,98	795	318	5,15	9072
13.	233	1,99	780	319	5,20	9080
14.	232	2,0	785	320	5,15	9090
15.	231	2,01	790	319	5,10	9100
16.	230	1,97	800	318	5,05	9070
17.	233	1,96	805	317	5,0	9060
18.	234	1,98	795	316	5,10	9072
19.	235	1,99	780	315	5,15	9080
20.	234	2,0	785	316	5,20	9090

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ КОЛОННЫ

Цель занятия – построить и исследовать модель вакуумной колонны установки ЭЛОУ-АВТ в среде моделирования PRO/II.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основная цель вакуумной колонны – извлечь газойль, остающийся в кубовом продукте атмосферных колонн. Вакуумные колонны обычно дают легкий и тяжелый вакуумные газойли, а также очень высококипящий кубовый продукт (гудрон). Газойль подвергается дальнейшей переработке, обычно крекингу. Низкое режимное давление вакуумной колонны позволяет проводить дальнейшее фракционирование кубовых остатков при температурах, минимизирующих термокрекинг. Попытки провести это разделение при повышенной температуре в нижней части атмосферной колонны приведут к неприемлемому количеству продуктов крекинга и получению газойля с более высоким содержанием углеродных образований и металлов.

На рисунке 13 показан общий вид вакуумной колонны. Так как работать под вакуумом дорого, эти колонны спроектированы для работы с минимальным перепадом давления. Используется небольшое количество ступеней разделения, вместо тарелок обычно используют секции с насадкой, и нагрузка по жидкости поддерживается небольшой.

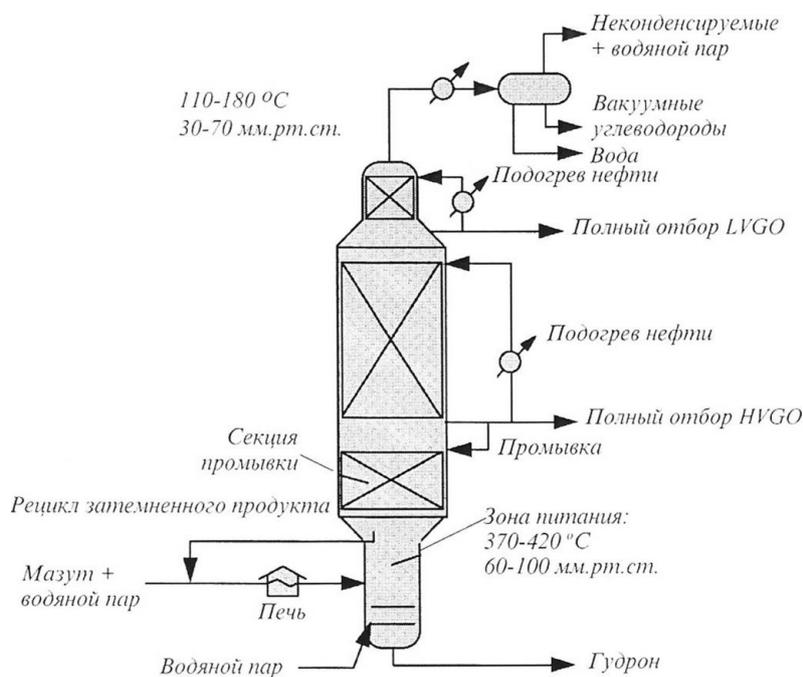


Рис.13. Вакуумная колонна

Продукты обычно выводятся с глухих тарелок как полные отборы, что делит колонну на секции или зоны, которые связаны только потоками пара. Важное исключение – зона промывки, куда возвращается небольшой поток тяжелого вакуумного газойля. Типичный расход промывки – 0,008 н.м³/мин на квадратный метр поверхности тарелки. Зона промывки – единственная секция, где фракционирование имеет значение. Она служит для удаления углеродных образований и металлосодержащих соединений из потоков газойля.

Эти компоненты вызывают серьезные проблемы в последующих процессах крекинга. Если расход промывки слишком низок, есть риск коксования в насадке зоны промывки.

Температура и давление в зоне ввода сырья – основные точки контроля вакуумной колонны. Температуру можно регулировать изменением нагрузки печи, а давление определяется температурой

охлаждающей воды на верху колонны и перепадом давления по колонне.

Так как конденсатор вакуумной колонны не возвращает орошение в колонну, не надо включать его в расчет колонны. Вместо этого следует моделировать создающую вакуум систему как сепаратор или ряд сепараторов. Верхняя секция легкого вакуумного газойля работает как конденсатор, и пар, покидающий колонну, состоит в основном из водяного пара, неконденсируемых компонентов и малого количества вакуумных углеводородов. Неконденсируемые компоненты включают легкие углеводороды, растворенные в сырье, низкомолекулярные углеводороды, получаемые в результате крекинга в печи, и воздух, подсасываемый в колонну или входящий вместе с водяным паром.

В вакуумсоздающей системе используют барометрический конденсатор, в котором конденсируется водяной пар, содержащийся в верхнем продукте. Паровые эжекторы, которые следуют за ним (но могут предшествовать конденсатору), обеспечивают дополнительный вакуум. С целью снижения парциального давления углеводородов и улучшения разделения в сырье и в колонну часто подается водяной пар. Некоторая комбинация расходов пара в колонну и рабочего пара на эжекторы является наиболее экономически выгодной для данного проекта и процесса.

В некоторых случаях вакуумные колонны работают в «сухом» режиме, т.е. без водяного пара. Сухие колонны имеют значительно меньшую паровую нагрузку и могут быть сконструированы с меньшими диаметрами. Сокращенный поток пара уменьшает энергопотребление по охлаждающей воде и эжекторному пару, что повышает экономичность установки.

Работа вакуумной колонны

Вакуумные колонны используются во многих отраслях промышленности и имеют много различных конфигураций оборудования. Нефтеперерабатывающие заводы используют вакуумные колонны для получения: сырья для крекинга, масляных погонов, битумов.

Самое обычное применение вакуумной колонны – подготовка сырья для каталитического крекинга. Для этого режима разделе-

ние легкого и тяжелого вакуумных газойлей не так важно, т.к. они потом смешиваются перед поступлением на каталитический крекинг. Обычно тяжелого вакуумного газойля производится больше, чем легкого. Вакуумный остаток обычно посылается на крекинг и коксование.

Вакуумные колонны, в которых получают масляные погоны, имеют один или более боковых отборов выше зоны ввода сырья и могут использовать стриппинги для извлечения более четких продуктовых фракций. Извлекаемые масляные погоны должны удовлетворять определенным требованиям по вязкости и часто называются «парафиновыми дистиллятами». Следующий шаг в производстве смазочных масел – удаление парафиновых соединений из масляных погонов на установках депарафинизации. Далее парафины направляют на каталитический крекинг.

При производстве битума температура зоны испарения выше, чем при получении масляных погонов и сырья для каталитического крекинга. Для минимизации коксования в кубе колонны в них обычно применяют контур охлаждения куба, где циркуляционное орошение охлаждает часть гудрона (битумного сырья) и возвращает его в куб колонны. Следовательно, кубовый продукт представляет собой переохлажденную жидкость. Подобно верхней части колонны, можно моделировать кубовый холодильник отдельно от колонны, как сепаратор.

Характеризация сырья

Наибольшие трудности в моделировании вакуумных колонн связаны с моделированием сырья. Если сырье рассчитано в результате моделирования атмосферной колонны, любые ошибки в моделировании высококипящей части нефти умножаются в вакуумной колонне. Если для атмосферной колонны мазут составляет 25-40% от поступающего сырья, то для вакуумной колонны это будет 100% питания. Кроме того, любые ошибки в моделировании разделения между газойлем и мазутом в атмосферной колонне существенным образом влияют на состав питания вакуумной колонны.

Температура верха вакуумной колонны – это точка конденсации верхних паров. В действительности эта температура очень чувствительна к количествам неконденсируемых компонентов и ва-

куумных углеводородов. Как и в атмосферных колоннах, большая часть неконденсируемых компонентов отсутствует в питании. Они образуются в печи в результате крекинга и попадают в систему при нарушении герметичности, так как вакуумные колонны работают при давлениях ниже давления окружающей среды. Моделирование будет точнее, если учесть неконденсируемые компоненты в питании колонны. Чтобы сделать это, нужно добавить небольшой поток неконденсируемых компонентов в питание колонны.

Особенности преобразования вакуумных колонн в модель с теоретическими тарелками:

- Моделируют систему конденсации верхнего продукта и контур охлаждения куба как сепараторы.

- Отпарную секцию обычно моделируют одной равновесной тарелкой.

- Секция с циркуляционным орошением, используемая для отвода продукта, может быть смоделирована двумя тарелками. Нижняя ступень секции – тарелка отбора продукта, а верхняя – тарелка возврата циркуляционного орошения.

- Печь для сырья моделируют как тарелку с источником тепла.

Профиль давления и спецификации

Профили давления вакуумной колонны часто более нелинейные, чем в других колоннах. По этой причине ввод давления для верхней тарелки и перепада давления на тарелку (или колонну) может быть неудовлетворительной аппроксимацией профиля давления. Для повышения точности введите величины давления на нескольких тарелках.

Тип спецификаций сильно зависит от назначения колонны. Для колонны, производящей сырье каталитического крекинга, обычно специфицируют отборы кубового потока и тяжелого вакуумного газойля на уровне их измеренных значений. Для секции легкого вакуумного газойля следует специфицировать температуру верха, равную измеренной температуре, и рассчитать отбор легкого вакуумного газойля. Это лучше, чем задание отбора легкого вакуумного газойля, т.к. температура верхнего погона (точка конденсации)

сильно чувствительна к наличию следов компонентов легкого вакуумного газойля.

Для колонн, производящих масляные погоны, вязкости продуктов являются контрольными точками. Вязкости очень трудно моделировать для тяжелого сырья и результаты могут быть неточны, если не задать вязкости для нефтяных фракций. Задание кривой вязкости по проценту выкипания вместе с данными лабораторных анализов для сырья – это метод повышения точности моделирования колонны получения масляных погонов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Моделируемая технологическая схема на рисунке 14 показывает простую вакуумную колонну. Погоны легкого вакуумного газойля и тяжелого вакуумного газойля являются полными отборами, а часть горячего тяжелого вакуумного газойля возвращается в колонну для промывки. Затем промывка отводится как затемненный продукт и возвращается (рециркулирует) в печь подогрева сырья.

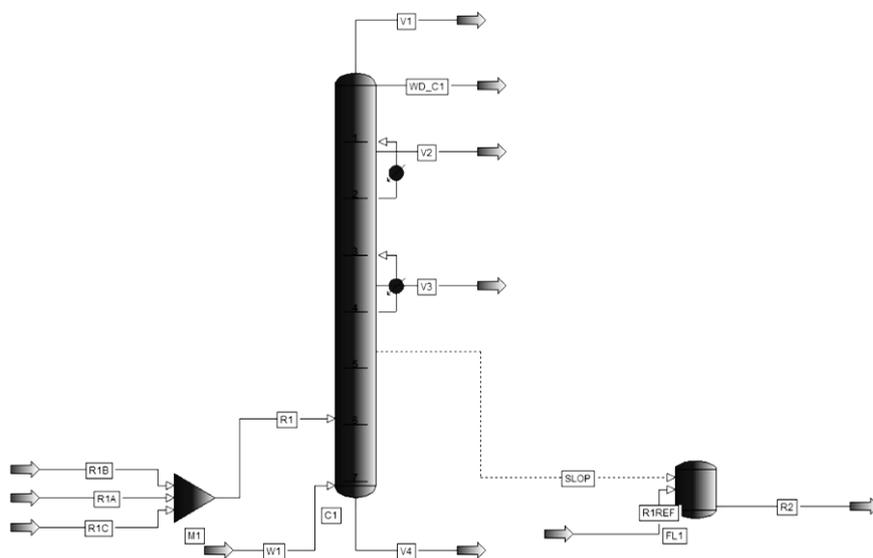


Рис. 14. Технологическая схема вакуумной колонны

В ходе выполнения данного задания, необходимо рассчитать следующие величины:

1. Тепловые нагрузки для двух циркуляционных орошений.
2. Тепловую нагрузку на печь и выходную температуру печи.

1. Ввод исходных данных

В лаборатории была выполнена разгонка мазута по ASTM D1160 при 2 мм рт. ст. Разгонка, скорректированная на 760 мм рт. ст., приведена в таблице 7. Окно ввода данных по разгонке представлено на рисунке 15.

Таблица 7

Состав мазута	
Разгонка D1160 (760 мм рт. ст.)	
Процент выкипания, %	Температура, °C
0	93
5	145
10	190
20	206
30	236
40	252
50	295
60	326
70	375
75	409
Плотность 0,9833	
Температура перед печью 330°C	
Давление 8000 мм рт.ст.	

Пар вводится в сырьевой поток колонны и в куб колонны. Измеренные расходы потоков приведены в таблице 8.

Рассчитываемая вакуумная колонна эквивалентна 7 теоретическим тарелкам. Измеренные давления и температуры приведены в таблице 9. На рисунке 17 приведено специализированное окно ввода профиля давлений колонны.

Stream Data - Assay Definition

UOM Range Help Tag

Assay data for stream R1A

Distillation

True Boiling Point

ASTM D86

ASTM D1160

ASTM D2887

D1160 Basis

Liquid Volume

Weight

Pressure: mm Hg

Correct for Cracking
(Recommended for API 63 and Edmister-Okamoto Interconversion only)

Gravity Data

API Gravity

Specific Gravity

Watson K-Factor

Average:

Additional Data

Enter the average gravity

Cut	Percent Distilled	Temperature C
Copy		
Paste	1	0 93
Insert	2	5 145
Reset	3	10 190
	4	20 206
	5	30 236
	6	40 252
	7	50 295
	8	60 326
	9	70 375
	10	75 409

Рис. 15. Ввод данных по разгонке мазута

Таблица 8

Объемный и массовый расходы потоков

Поток	Объемный расход, м3/ч	Массовый расход, кг/ч
Сырьевой поток колонны	-	318
Куб колонны	-	908
Отбензиненная нефть	99,37	97,509
Верхний отбор	-	1246
Легкий вакуумный газойль	7,10	6430
Тяжелый вакуумный газойль	41,34	38997
Кубовый продукт	50,82	520

Таблица 9

Значения давления и температур в колонне

Зона колонны	Давление, мм рт. ст.	Температура, °C
Верхняя тарелка	74	66
Зона ввода сырья (тарелка 6)	98	371
Кубовая тарелка	115	366
Отбор легкого вакуумного газойля	-	136
Отбор тяжелого вакуумного газойля	-	282

В качестве единиц измерения давления необходимо выбрать миллиметры ртутного столба (рисунок 16).

SIMSCI - Default Units of Measure for Problem Data Input

UOM Range Help

Basis: Metric Initialize from UOM Library...

Default Units of Measure for Problem Data Input

Temperature:	Celsius	Energy:	Kilocalorie
Pressure:	Millimeters of mercury	Duty:	Energy/Time
Time:	Pound/inch ² (abs)	Work:	Kilowatt
Weight (wt.):	Pound/inch ² (gauge)	Length:	Meter
Liquid Volume:	Atmosphere	Fine Length:	Millimeter
Vapor Volume:	Kilopascal	Heat Trans. Coefficient:	Kilocalorie/hour-m ² -K
Specific Liquid Volume:	Kilopascal (gauge)	Fouling Coefficient:	Hour-meter ² -C/kcal
Specific Vapor Volume:	Kilogram/centimeter ²	Viscosity:	Centipoise
Liquid Density:	Kilogram/centimeter ² (gauge)	Kinematic Viscosity:	Centistoke
Vapor Density:	Millimeters of mercury	Thermal Conductivity:	Kilocalorie/hour-m-C
Petroleum Density:	Dyne/centimeter ²	Surface Tension:	Dyne/centimeter
Pressure Gauge Basis:	Technical atm (abs)		
	Bar (abs)		
	Bar (gauge)		
	Millibar (abs)		
	Millibar (gauge)		
	Megapascal		
	Megapascal (gauge)		
	Standard Conditions		
	Newton/meter ²		
	Pascal		
	Pound/foot ²		
	Torr		
	Inches of mercury		
	Millimeters of water		
	Inches of water		

Select default pressure unit

Cancel

TVP and RVP Conditions...

Рис.16. Установка единиц измерения давления

Column - Pressure Profile

UOM Define Range Help Overview

Pressure Specification Mode

Overall

By Individual Trays

Overall Specification

Top Tray Pressure: _____ mm Hg

Pressure Drop

Per Tray: _____ 0 mm Hg

Column: _____ 0 mm Hg

Individual Tray Specification

Cut	Tray	Pressure
Copy		mm Hg
Paste	1	73.9994
Insert	2	97.9995
Reset	3	114.999
	4	
	5	

OK to PFD OK Cancel Cancel to PFD

Exit the window after saving all data

Рис.17. Задание профиля давлений в колонне

2. Задание параметров вакуумной колонны

Колонна должна работать таким образом, чтобы соблюдались спецификации, приведенные в таблице 10. Задание спецификаций осуществляется в окне на рисунке 18.

Таблица 10

Желаемые режимные показатели колонны

Показатель	Значение
Температура верхней тарелки	105°C
Расход тяжелого вакуумного газойля	41,3 ст. м ³ /час
Расход гудрона	50,9 ст. м ³ /час
Расход рецикла затемненного продукта	3,5 ст. м ³ /час

Рис. 18. Спецификации вакуумной колонны

При задании термодинамике желательно выбрать уравнение Grayson-Streed. Также следует поменять метод расчета энтальпии с Curl-Pitzer (CP) на Lee-Kesler (LK). Алгоритм расчета колонны I/O наилучшим образом подходит для данного типа колонны.

Для моделирования полного вывода легкого вакуумного газойля задается в виде спецификаций очень малый (но не нулевой) рас-

ход жидкости с тарелки 2 на тарелку 3. Для этого указывается расход 1,0 кг-моль/час и расход легкого вакуумного газойля объявляется как переменная.

Для оценки расхода легкого вакуумного газойля принято, что все сырье, не выходящее в потоках тяжелого вакуумного газойля и гудрона, выходит с потоком легкого вакуумного газойля.

Для предотвращения создания рециркулов контура следует моделировать печь как тарелку колонны с боковым подогревателем. Это увеличивает общее число тарелок в колонне на одну. Тепловая нагрузка печи будет рассчитываться наряду с остальными переменными колонны.

Для вычисления выходной температуры печи используется сепаратор, как показано на рис. 14. Используя псевдопоток колонны, можно получить доступ к расходу рецикла затемненного продукта. Поток (пунктирная линия) – копия потока жидкости с тарелки 5. Используется функция define (определить) для передачи значений давления на тарелке питания и тепловой нагрузки в сепаратор.

Таблица 11 содержит часть сводки по колонне из выходного отчета.

Таблица 11

Некоторые результаты моделирования

Параметр	Значение
Тепловая нагрузка на циркуляционное орошение легкого вакуумного газойля	-2,93 10 ³ кДж/час
Тепловая нагрузка на циркуляционное орошение тяжелого вакуумного газойля	-22,3 10 ³ кДж/час
Тепловая нагрузка зоны ввода сырья (печи)	41,7 10 ³ кДж/час
Температура выхода из печи	382°C
Расход легкого вакуумного газойля	6,72 станд. жидк. м ³ /час
Расход верхнего продукта	1459 кг/час
Расход воды	0

3. Анализ результатов моделирования

После того, как введена вся необходимая информация, необходимо запустить моделируемую схему на расчет, после чего сгенерировать файл отчета, проанализировать полученные результаты, ответить на следующие вопросы:

1. Какой термодинамический метод и алгоритм расчета колонны выбрать для этой задачи?
2. Если выбран алгоритм расчета колонны I/O, то как моделировать ситуацию с полным выводом с тарелки легкого вакуумного газойля без нарушения требований алгоритма I/O, что все внутренние потоки должны быть ненулевыми?
3. PRO/II требует указать расходы всех боковых потоков. Какова оценка для отбора легкого вакуумного газойля?
4. Как следует моделировать печь, чтобы PRO/II не создавал рецикловых контуров?
5. Как рассчитать выходную температуру печи?
6. Сделать выводы по выполнению практического занятия и по результатам моделирования.
7. Подготовить отчет по выполнению практического занятия.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Таблица 12

Варианты заданий к практическому занятию №2

№ вар.	Параметры мазута		Верхняя тарелка		Зона ввода сырья	
	Температура, °С	Давление, мм рт.ст.	Температура, °С	Давление, мм рт.ст.	Температура, °С	Давление, мм рт.ст.
0(пр)	330	3,0	66	74	371	98
21.	335	2,5	68	76	372	99
22.	340	2,6	70	78	373	100
23.	338	2,8	72	80	374	99
24.	332	3,0	70	78	375	98
25.	336	2,5	68	76	374	97
26.	340	2,6	66	74	373	96
27.	328	2,8	64	72	372	98
28.	325	3,0	62	70	371	99
29.	330	2,5	66	74	370	100
30.	332	2,6	68	76	371	99
31.	334	2,8	70	78	372	98
32.	335	3,0	72	80	373	97
33.	338	2,5	70	78	374	96
34.	340	2,6	68	76	375	98
35.	338	2,8	66	74	374	99
36.	336	3,0	64	72	373	100
37.	335	2,5	62	70	372	99
38.	332	2,6	66	74	371	98
39.	330	2,8	68	76	370	97
40.	328	3,0	70	78	371	96

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chaudhuri U.R.* Fundamentals of Petroleum and Petrochemical Engineering. CRC Press, 2011. 406 p.
2. *Luyben W.L.* Distillation Design and Control Using Aspen Simulation. 2nd Edition. JohnWiley & Sons, Inc., 2013. 490 p.
3. *Luyben W.L.* Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers 2nd Ed. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1996. 750 p.
4. ПРО/П Ректификация углеводородных смесей: учебное пособие. М.: ИКТ Сервис, 2007. 170 с.
5. *Баннов П.Г.* Процессы переработки нефти. Часть 1. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2000. 224 с.
6. *Гартман Т.Н.* Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб пособие для вузов / Т.Н. Гартман, Д.В. Клушин. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 416 с.
7. *Скобло А.И.*, Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии/ Учебник для вузов. 4-ое изд-е перераб. и доп. / А.И. Скобло, Ю.К. Молоканов, А.И. Владимиров, В.А. Щелкунов В.А. М.: ИЦ РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. 725 с.
8. *Худович И.М.* Современные системы автоматизированного моделирования химико-технологических процессов в нефтепереработке и нефтехимии. Новополюцк: Полоцкий государственный университет, 2008. 110 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Краткие сведения о программном пакете simsci pro/ii.....	5
Последовательность разработки технологических схем в моделирующей системе Pro/II.....	5
Моделирование процесса ректификации с использованием pro/ii	6
Структура главного окна ректификационной колонны.....	8
Практическое занятие №1 Моделирование атмосферной колонны .	12
Общие сведения.....	12
Варианты заданий.....	25
Практическое занятие №2 Моделирование вакуумной колонны	26
Порядок выполнения задания	31
Варианты заданий.....	38
Рекомендуемый библиографический список.....	39

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ
И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления подготовки 15.04.04*

Сост.: *П.А. Петров, И.И. Белоглазов*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
автоматизации технологических процессов и производств

Ответственный за выпуск *П.А. Петров*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 27.05.2022. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,3. Усл.кр.-отт. 2,3. Уч.-изд.л. 2,0. Тираж 50 экз. Заказ 330.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2