

Динамическая математическая модель гравитационного сепаратора с учетом парожидкостного равновесия и технологической обвязки

В. В. Южанин¹, Р. Л. Барашкин²
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
¹yuzhanin.v@gubkin.ru, ²barashkin.r@gubkin.ru

А. С. Нургуатова¹, В. Е. Попадько²
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
¹nurguatov.a@gubkin.ru, ²pve@gubkin.ru

Аннотация. Исследование посвящено разработке динамической математической модели гравитационного сепаратора. Модель позволяет имитировать работу реального промышленного объекта и рассчитывать переходные физико-химические процессы в зависимости от управляющих технологических параметров во времени. В работе выполняется расчет парожидкостного равновесия на основе уравнения Рауля–Дальтона, позволяющий определять основные термодинамические параметры состояния системы в зависимости от изменения граничных условий по давлению и степени открытия клапанов. Модель предназначена для изучения и тестирования алгоритмов непрерывного регулирования в рамках концепции тестирования с моделью в контуре обратной связи. Отличительными особенностями разработанной модели в пакете Matlab является расчет парожидкостного равновесия, уровня границы раздела фаз, реологических свойств флюидов и параметров технологической обвязки сепаратора. Предусмотрена возможность поддержки дистанционного доступа к серверу с моделью через сетевой протокол с целью решения учебных и прикладных задач.

Ключевые слова: математическая модель сепаратора; парожидкостное равновесие; управление непрерывными процессами; тестирование с моделью в контуре обратной связи; Matlab, Model in the loop testing

I. ВВЕДЕНИЕ

Большинство отраслей промышленности, в частности нефтегазовая, применяют математическое моделирование при решении задач проектирования технологических процессов [1]. Использование моделей позволяет исследовать поведение объекта в штатных и нештатных ситуациях, сократить время проектирования и строительства, а также снизить затраты на эксплуатацию производства [2].

В нефтегазовой отрасли разделение продукции является ключевым процессом в цепочке подготовки продукции скважин к транспортировке [3]. Продукция скважин содержит большое количество компонентов, в том числе воды, песка и кислых газов [4]. Такая смесь не соответствует ГОСТам товарной продукции. Транспортировка и дальнейшая переработка неподготовленной продукции на заводах нефтегазовой

промышленности может привести к выходу из строя технологического оборудования. Совместное хранение или транспортировка газа и нефти экономически нецелесообразно по причине существенного повышения технических требований к трубопроводам и емкостям [5]. На объектах добычи и подготовки нефтегазовый поток разделяют на нефтяной и газовый. Разделение потока происходит в сепараторах, где создаются условия для разделения газа, нефти, пластовой воды и иных примесей. Процесс сепарации требует контроля за входным расходом, границей раздела фаз и давлением газа в сепараторе с последующим регулированием [6].

В работе рассматривается гравитационный газосепаратор, как объект математического моделирования, технологическая схема которого приведена на рис. 1. Газосепараторы используются во многих процессах нефтегазовой отрасли, в том числе являются неотъемлемой частью технологической схемы подготовки нефти или газа к транспорту. Газосепараторы эксплуатируются во взрывоопасных условиях, поэтому исследование, проектирование процессов сепарации и тестирование алгоритмов управления с использованием математической модели в контуре обратной связи [7] является актуальной задачей.

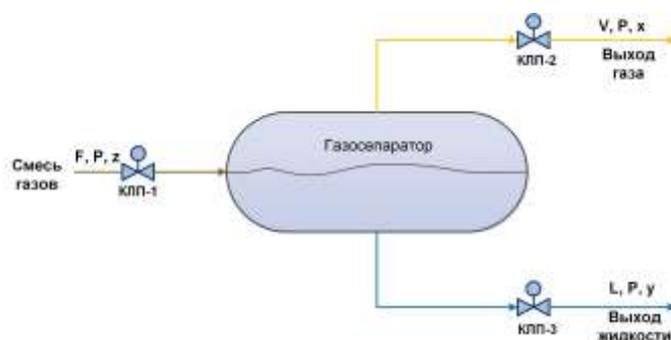


Рис. 1. Технологическая схема газосепаратора

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОСЕПАРАТОРА

Разделение продукции скважин представляет собой процесс с непрерывными фазовыми переходами. Для построения математической модели газосепаратора

адекватной реальному процессу с учетом ограничений и допущений необходимо выполнять расчёт парожидкостного равновесия в условиях фазовых переходов. Для решения задачи парожидкостного равновесия в идеальных многокомпонентных смесях для однофазного жидкого и газового состояния, а также для двухфазного состояния будем использовать закон Рауля–Дальтона.

А. Постановка задачи, исходные данные, ограничения и допущения математической модели газового сепаратора

В газосепаратор объёмом V поступает газовая смесь через клапан КЛП-1 с расходом F и компонентным составом z (рис. 1). Внутри сепаратора устанавливается фазовое равновесие. При рабочих термобарических условиях (T и P) смесь разделяется на газовую и жидкую фазу с соответствующими мольными долями компонентного состава x и y . Через КЛП-2 осуществляется отвод газовой фазы, жидкая фаза отбирается через КЛП-3 с соответствующими молярными расходами V и L .

Ограничения и допущения модели: объект с сосредоточенными параметрами; процесс изотермический; газ идеальный; смесь образует идеальный раствор, подчиняющийся закону Рауля–Дальтона; жидкость несжимаемая; плотность жидкости зависит только от температуры.

Для решения уравнений математической модели сепаратора потребуются следующие исходные данные: расход и компонентный состав входного флюида, температура, объём сепаратора, граничные давления на входе и выходе, свойства компонентов, начальное количество вещества в сепараторе, степень открытия клапанов.

По результатам расчета модель определяет следующие параметры: давление в сепараторе, долю отгона, мольные доли компонентов, расход паровой и жидкой фазы, уровень границы раздела фаз в сепараторе, плотность газовой и жидкой фазы.

Ниже приводится логика разработки динамической математической модели сепаратора с учетом принятых допущений и ограничений.

В. Уравнение для газовой фазы. Закон Дальтона

Для математического описания многокомпонентной смеси рассмотрим сначала газовую фазу и давление системы P выразим через парциальное давление P_i отдельных компонентов. Для идеальных газовых смесей справедлив закон Дальтона:

$$P = \sum P_i, \quad (1)$$

Вне зависимости от состояния смеси, закон Дальтона применим только для газовой фазы.

С. Уравнение для связи газовой фазы с давлением системы. Закон подобия

Свяжем параметры газовой и жидкой фазы, записав уравнение Менделеева–Клапейрона для парциального давления i -го компонента многокомпонентной газовой смеси:

$$P_i V = \nu_i R T, \quad (2)$$

где P_i – парциальное давление, V – объём газа, ν_i – количество вещества i -го компонента, R – постоянная газовая постоянная, T – температура смеси.

Запишем уравнение Менделеева–Клапейрона (2) для смеси:

$$P V = \nu_{см} R T. \quad (3)$$

Используя закон подобия и пренебрегая эффектом сжимаемости в смеси газов, разделим выражение (2) на (3):

$$\frac{P_i V}{P V} = \frac{\nu_i R T}{\nu_{см} R T} \quad (4)$$

В результате сокращений получим:

$$\frac{P_i}{P} = \frac{\nu_i}{\underbrace{\nu_{см}}_{\substack{\text{мольная доля} \\ i\text{-го компонента в газе}}}} \quad (5)$$

Полученное выражение связывает общее давление системы P , парциальное давление P_i i -го компонента и мольную долю y_i i -го компонента в газовой фазе:

$$P_i = P \cdot y_i. \quad (6)$$

Д. Уравнения для связи жидкой фазы с парциальным давлением. Закон Рауля

Для определения долей компонентов в газовой и жидкой фазах свяжем парциальное давление газовой фазы с мольной долей компонентов в жидкой фазе с помощью закона Рауля.

Зададимся многокомпонентной смесью в двухфазном состоянии. Пусть i -й компонент в жидкой фазе имеет некоторую долю x_i . Для данного компонента заранее определена функция давления насыщенных паров $P_i^0(T)$.

Тогда согласно закону Рауля парциальное давление насыщенного пара над своей жидкостью i -го компонента при термодинамическом равновесии будет равно:

$$P_i = P_i^0(T) \cdot x_i. \quad (7)$$

Для расчёта давления насыщенных паров $P_i^0(T)$, как функции температуры, используют эмпирическое уравнение Антуана:

$$\ln(P_i^0) = A - \frac{B}{C + T}, \quad (8)$$

где А, В и С – коэффициенты, зависящие от вещества и определяемые экспериментально, Т – температура [К], давление насыщенных паров [мм.рт.ст].

Е. Связь газовой и жидкой фаз. Объединенный закон Рауля–Дальтона

Запишем объединенный закон Рауля–Дальтона при заданных термобарических условиях, подставив выражение (6) в (7):

$$P \cdot y_i = P_i^0 \cdot x_i. \quad (9)$$

Введём константу равновесия для i -го компонента смеси:

$$k_i(P, T) = \frac{y_i}{x_i} \quad (10)$$

где $k_i(P, T)$ можно определить, подставив выражение (10) в (9):

$$k_i(P, T) = \frac{P_i^0}{P} \quad (11)$$

Е. Расчет парожидкостного равновесия потока на основе объединенного закона Рауля–Дальтона

Запишем уравнение материального баланса по компонентам:

$$Fz_i = Lx_i + Vy_i, \quad (12)$$

Для суммы мольных долей всех компонентов по жидкой и газовой фазам тождественны следующие выражения:

$$\sum x_i = 1 \quad \sum y_i = 1. \quad (13)$$

Уравнение материального баланса по потокам:

$$F = L + V. \quad (14)$$

Перепишем выражение объединенного закона Рауля–Дальтона (11) следующим образом:

$$y_i = k_i(P, T) \cdot x_i. \quad (15)$$

Определить неизвестные параметры можно, решив систему уравнений (12) – (15). Но это вычислительно неэффективно при большом числе компонентов, поэтому подставляют (15) в (12) и выражают x_i :

$$x_i = \frac{z_i}{L/F + k_i(P, T) \cdot V/F} \quad (16)$$

Подставим (14) в (16):

$$x_i \left(\frac{V/F}{\omega} \right) = \frac{z_i}{1 + (k_i(P, T) - 1) \cdot V/F} \quad (17)$$

Обозначим отношение V/F как мольную долю отгона ω :

$$x_i(\omega, P, T) = \frac{z_i}{1 + (k_i(P, T) - 1) \cdot \omega} \quad (18)$$

В результате преобразований задача о парожидкостном равновесии многокомпонентной смеси упрощается до поиска решения выражения (18) относительно мольной доли отгона:

$$\sum x_i = 1 \quad (19)$$

В результате численных экспериментов установлено, что сходимость методов решения уравнений улучшится, если решать следующее уравнение Речфорда–Райса относительно мольной доли отгона ω :

$$\sum_i \frac{z_i(1 - k_i(P, T))}{1 + (k_i(P, T) - 1) \cdot \omega} = 0 \quad (20)$$

После расчета доли отгона ω можно вычислить при заданных термобарических условиях мольные доли компонентов в жидкой (18) и газовой (15) фазах. Тем самым задача парожидкостного равновесия решена.

Г. Проверка на наличие в системе двух фаз

При решении задачи парожидкостного равновесия с помощью уравнения Речфорда–Райса выполняется проверка на наличие в системе двух фаз.

Критерий однофазного жидкого состояния многокомпонентной смеси записывается в следующем виде:

$$\sum_i k_i x_i \leq 1. \quad (21)$$

Критерий однофазного газового состояния многокомпонентной смеси:

$$\sum_i \frac{z_i}{k_i} \leq 1. \quad (22)$$

Критерий двухфазного состояния многокомпонентной смеси:

$$\sum_i k_i x_i > 1 \text{ и } \sum_i \frac{z_i}{k_i} > 1. \quad (23)$$

Н. Расчет реологических свойств флюидов

На следующем шаге определяются плотности компонентов газовой фазы из уравнения Менделеева–Клапейрона, а плотности компонентов жидкой фазы по уравнению Мановьяна. Зная плотности компонентов газовой и жидкой фазы определяется плотность смеси.

И. Расчет уровня границы раздела фаз

Для расчета уровня границы раздела фаз в сепараторе сначала определяется объем жидкости:

$$V^ж = (1 - \omega^в) \cdot V_{сеп}, \quad (24)$$

где $\omega^в$ – объемная доля газа, $V_{сеп}$ – объем сепаратора.

Затем уровень границы раздела фаз рассчитывается из следующего выражения:

$$h = \frac{V^ж}{S_{сеп}} \quad (25)$$

Л. Последовательность расчета сепаратора с учетом технологической обвязки

Для учета влияния граничных давлений, компонентного состава входного потока, степени открытия клапанов на параметры сепаратора выполняется следующая расчетная последовательность. Зная давление на границах и в сепараторе, из уравнения Дарси–Вейсбаха рассчитывается массовый расход через каждый клапан. Затем массовые расходы каждого потока пересчитываются в мольные расходы по каждому компоненту. Делая шаг по времени, определяется разница количества вещества вошедшего в сепаратор и вышедшего из него. Найденная разница количества вещества вместе с количеством на предыдущем шаге определяет текущее количество вещества в сепараторе. Текущее количество вещества используется в качестве начальных условий для алгоритма расчета парожидкостного равновесия.

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА ГАЗОСЕПАРАТОРА

В качестве исходных данных для расчета переходного процесса в сепараторе возьмем компонентный состав входного потока в мольных долях: этан (0.2), пропан (0.7), вода (0.1); исходное количество смеси в сепараторе – 30.325 кмоль; объем сепаратора – 10 м³; диаметр сепаратора – 1.5 м; начальное приближение давление – 1.1 МПа; давление на левой и правых границах соответственно: 1.4 МПа, 1.1 МПа, 1.1 МПа; температура в сепараторе – 295.5 К; начальные степени открытия КЛП-1, КЛП-2, КЛП-3 – 40, 30, 50 процентов соответственно; коэффициенты местного сопротивления в закрытом состоянии для КЛП-1, КЛП-2, КЛП-3 – 0.03, 0.1, 0.3 соответственно. На рис. 2 приведены графики изменения давления в сепараторе при изменении степени открытия КЛП-2 с 30 % до 10, 40 и 50 %.

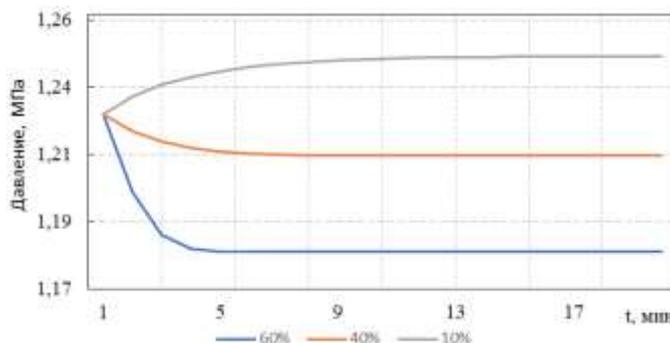


Рис. 2. Графики изменения давления в сепараторе при изменении степени открытия КЛП-2 с 30 % до 10, 40 и 50 %

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были получены следующие результаты: а) разработана динамическая математическая модель газосепаратора, учитывающая парожидкостное равновесие и технологическую обвязку аппарата; б) модель позволяет учитывать расход и компонентный состав входного флюида, температуру, объем сепаратора, граничные давления на входе и выходе, свойства компонентов, начальное количество вещества в сепараторе, степень открытия клапанов; г) в результате решения уравнений модели рассчитывается давление в сепараторе, доля отгона, мольные доли компонентов, расход паровой и жидкой фазы, уровень границы раздела фаз в сепараторе, плотность газовой и жидкой фазы.

Математическая модель газового сепаратора разработана в пакете Matlab и предназначена для проектирования процесса сепарации и отладки алгоритмов непрерывного регулирования в контуре обратной связи с возможностью дистанционного доступа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Skogestad S. Chemical and Energy Process Engineering. CRC Press Taylor&Francis Group. 2008. 440 p. <https://doi.org/10.1201/9781420087567>.
- [2] Барашкин Р.Л., Попадью В.Е., Калашников П.К., Южанин В.В., Абрамкин С.Е. Динамическое имитационное моделирование в решении задач проектирования систем управления объектов нефтегазовой отрасли // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. 2019. Т. 1. С. 134-137.
- [3] Арнольд К., Стюарт М. Справочник по оборудованию для комплексной подготовки нефти. Промысловая подготовка углеводородов / Перевод с английского. М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2011. 776 с.
- [4] Kirk-Othmer. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 5th ed., John Wiley & Sons, New York. 2007.
- [5] Владимиров А.И., Щелкунов В.А., Лукьянов В.А., Круглов С.С. Основные процессы и аппараты нефтегазопереработки: Учеб. пособие для вузов. Москва: Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. 2018. 243 с.
- [6] Luyben, W. L. (2020). Liquid level control: Simplicity and complexity. Journal of Process Control, 86, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.12.008>.
- [7] Барашкин Р.Л. Разработка имитационной модели объекта управления и операторского интерфейса в пакетах UniSim Design и NI LabView: Учебное пособие. Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина. 2014. 42 с.