

Разработка математической модели колонны отдувки метанола

С. Е. Абрамкин¹, С. Е. Душин²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹seabramkin@etu.ru, ²dushins@yandex.ru

Аннотация. Целью исследования является разработка математической модели колонны отдувки метанола как объекта с распределенными параметрами. Актуальность данной темы обусловлена применением этой технологии в процессе низкотемпературной сепарации с целью снижения потерь дорогостоящего ингибитора гидратообразования. В результате исследования определены корректные допущения, граничные и начальные условия, разработана математическая модель объекта в виде дифференциальных уравнений в частных производных, осуществлен переход от непрерывной модели к дискретно-непрерывной.

Ключевые слова: колонна; природный газ; метанол; водометанольный раствор; низкотемпературная сепарация; массообменный процесс; дифференциальное уравнение в частных производных

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование технологических процессов (ТП) с применением физических моделей приводит, как правило, к значительным финансовым, временным и трудовым затратам [1]. Так же многие ТП происходят на опасных производственных объектах (газовая, нефтяная, химическая отрасли). Это делает актуальным направление разработки математических моделей (ММ) ТП. Получение адекватных ММ с учетом управляющих и возмущающих воздействий повышает эффективность проектирования, проведения пусконаладочных работ и эксплуатации ТП.

Отметим, что основное внимание уделяется разработке ММ объектов с сосредоточенными параметрами. Хотя многие переменные ТП изменяются не только во времени, но и в пространстве, что позволяет отнести их к объектам с распределенными параметрами. Пример разработки ММ управляемого ТП абсорбционной осушки природного газа как объекта с распределенными параметрами показан в [2].

Данное исследование посвящено разработке ММ процесса регенерации метанола методом «отдувки». Направление исследования обусловлено широким применением метанола в качестве ингибитора гидратообразования на объектах газовой промышленности. По сути «применение... метанола на сегодняшний день является единственным промышленным методом борьбы с гидратообразованием в скважинах и шлейфах. Высокая стоимость метанола и его значительный общий расход приводят к необходимости уменьшения безвозвратных потерь как регенерацией насыщенных растворов, так и совершенствованием систем сбора» [3].

Наиболее распространен ТП регенерации метанола методом ректификации [3]–[6]. Здесь ректификация является видом перегонки, основанной на противоточном взаимодействии паровой и жидкостной фаз с целью достижения наиболее полного разделения компонентов [3]. Регенерация водометанольных растворов (ВМР) на газовых промыслах осуществляется в одну стадию – разделение бинарной смеси «метанол – вода» [3].

В [6] отмечаются недостатки «классического» метода регенерации ВМР:

- необходимость применения для сбора газа общего коллектора;
- высокие энергозатраты, связанные с переходами на зимний и летний режимы работы;
- образование солеотложений в процессе ректификации.

В [5]–[7] отмечено, что наиболее перспективным в настоящее время для регенерации ВМР является технология «отдувки» метанола.

В [7] приведены результаты исследования и моделирования процесса «отдувки» метанола. Здесь ММ описывает этот процесс как объект с сосредоточенными параметрами. Однако эта ММ не позволяет исследовать динамические режимы работы колонны отдувки метанола. Таким образом, актуальной является задача разработки ММ процесса «отдувки» метанола как объекта с распределенными параметрами с целью исследования различных динамических режимов его работы и определения методов управления им.

В данном исследовании представлены результаты разработки ММ массообменных процессов, происходящих в колонне «отдувки» метанола. Здесь процесс «отдувки» метанола входит в ТП двухступенчатой низкотемпературной сепарации (НТС) природного газа.

II. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СЕПАРАЦИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Типовой ТП НТС на установке комплексной подготовки газа состоит из следующих этапов [8]:

- сбора сырого природного газа;
- НТС природного газа в режиме выработки конденсата газового нестабильного (КГН);

- охлаждения газа в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) и теплообменниках;
- подготовки КГН к транспортировке;
- транспортировки КГН с помощью насосов;
- нагрева КГН с помощью печей подогрева.

Принципиальная потоковая технологическая схема процесса двухступенчатой НТС представлена на рис. 1.

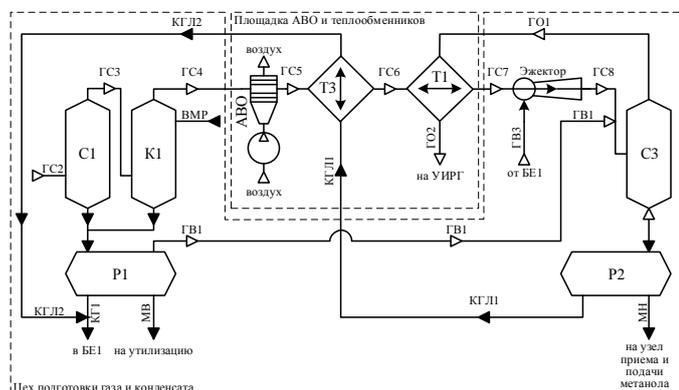


Рис. 1. Принципиальная потоковая схема процесса двухступенчатой низкотемпературной сепарации

На схеме приняты следующие обозначения: ГС2...ГС8 – участки трубопроводов сырого газа; С1 – входной сепаратор; К1 – колонна отдувки метанола; АВО – аппарат воздушного охлаждения газа; Т3, Т1 – теплообменники «газ – конденсат» и «газ – газ»; С3 – сепаратор низкотемпературный; Р1, Р2 – разделители; ГО1, ГО2 – участки трубопроводов газа сепарации (осушенного); ГВ1, ГВ3 – газ выветривания; ВМР – водометанольный раствор; МВ – метанольная вода; МН – метанол насыщенный; КГЛ1, КГЛ2, КГ1 – конденсат газовый нестабильный.

Данное исследование затрагивает только этап НТС природного газа в режиме выработки КГН.

Газожидкостная смесь поступает в С1, где происходит первичное отделение крупных капель жидкости и механических примесей из потока газа. Далее газожидкостная смесь отводится в колонну отдувки метанола К1. Здесь происходит насыщение сырого газа метанолом из ВМР, который выделяется в С3. После этого газ отводится на охлаждение в аппараты, расположенные на площадке АВО и теплообменников. Последовательно проходя через АВО, Т3 и Т1 газ охлаждается. От Т1 охлажденный газ поступает в блок эжекторов Э1 для снижения давления сырого газа и утилизации низконапорных газов дегазации КГН. Блок Э1 состоит из трех подключенных параллельно эжекторов разной производительности. Газ охлажденный поступает в камеры смешения эжектора через сопла (активный поток). При этом за счет перепада давления и сужения сечения в сопле достигаются высокие скорости с критическими параметрами, и обеспечивается локальное снижение давления по эффекту Бернулли.

Пассивный поток (газ низкого давления) подается от БЕ1. В эжекторе пассивный низконапорный газ вовлекается в зону пониженного давления, создаваемого активным газом. В камере смешения происходит смешение активного и пассивного потоков газа, и далее в расширяющемся диффузоре эжектора происходит торможение потока смеси газов, расширение сечения потока и соответствующее повышение давления.

От блока Э1 газ поступает в С3 с разделителем Р2, предназначенный для сепарации сырого газа с последующим разделением отсепарированной жидкости на КГН и МН.

Легкая жидкая фаза (КГН) из Р2 отводится в межтрубное пространство Т3, где нагревается потоком теплого сырого газа, поступающего из ВХ1, и далее направляется в БЕ1. Тяжелая жидкая фаза (МН) отводится из Р2 на узел приема и подачи метанола.

Жидкость от С1 и К1 поступает в разделитель Р1, где происходит разделение жидкой фазы на «тяжелый» КГН и МВ, а также здесь выветривается остаточный газ.

Анализ принципиальной потоковой схемы процесса НТС позволил выделить основные физические процессы, оказывающие доминирующее влияние на течение процесса – это процессы разделения, в частности гидромеханические, тепловые и массообменные. Они происходят в каждом аппарате ТП.

Для обеспечения безаварийного течения процесса НТС, т. е. предотвращения гидратообразования в определенные точки процесса подается метанол. С целью экономии метанола и безопасной утилизации пластовой воды в процессе НТС применена технология «отдувки» метанола. Данная технология осуществляется в колонне отдувки метанола К1 за счет противоточного массообменного процесса между газовой фазой и ВМР.

III. АНАЛИЗ КОЛОННЫ ОТДУВКИ МЕТАНОЛА КАК ОБЪЕКТА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Объект исследования – колонна отдувки метанола К1 (рис. 2). Это вертикальный цилиндрический аппарат диаметром 1,6 м и высотой 9,9 м. Предназначен для насыщения сырого газа метанолом из ВМР, который выделяется в низкотемпературном сепараторе.

А. Принцип работы колонны отдувки метанола

Сырой газ поступает в К1 через штуцер входа газа с установленным узлом входа, где происходит сепарация водометанольной жидкости, поступающей в колонну с газовым потоком. Отсепарированная жидкая фаза (капельная влага) под действием гравитационных сил стекает в сборник жидкости.

Далее газовая фаза снизу-вверх поступает в секцию отдувки, включающую массообменные тарелки для контакта с ВМР. Подача ВМР осуществляется на пятую тарелку секции отдувки. Так же предусмотрена подача на третью массообменную тарелку.

В секции отдувки осуществляется противоточный массообменный процесс между газовой фазой и жидкой фазой (ВМР), где из жидкости в газ переходит метанол, а из газовой в жидкую фазу выделяется капельная влага.

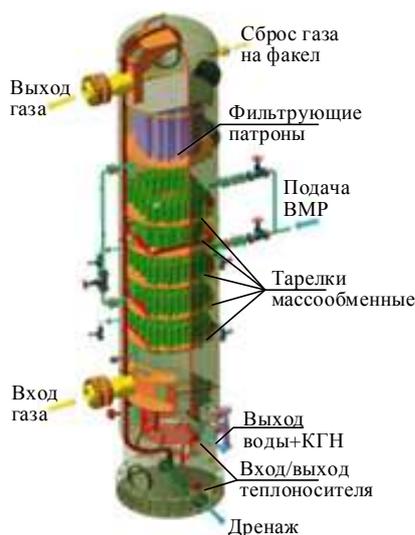


Рис. 2. Колонна отдувки метанола К1

Затем газ с верхней массообменной тарелки поступает в фильтрующую секцию, где происходит его очистка от капельной жидкости, после чего отводится из колонны через верхний штуцер.

Жидкая фаза с нижней массообменной тарелки стекает в сборник жидкости, где смешивается с жидкой фазой, отсепарированной во входной секции колонны. Остаточная массовая концентрация метанола в отводимой воде не превышает заданные значения.

В. Допущения для разработки математической модели колонны отдувки метанола

Анализ физики процесса «отдувки» метанола, учет его конструктивных и технологических особенностей, а также исследуемых режимов работы, позволил определить основные допущения для построения ММ [2]:

- многокомпонентная газовая фаза, поступающая на вход колонны, является бинарной системой «газ – жидкость»;
- перемешивание ВМР на тарелках колонны идеальное;
- режим движения газовой фазы поршневой;
- массопередача на тарелках эквимолярная;
- зависимость равновесной концентрации целевого компонента (метанола) в газе линейная, т. е. выполняется закон Генри;
- эффективность тарелки – 100 %;
- количество ВМР на всех тарелках одинаково;
- тепловым эффектом процесса «отдувки» можно пренебречь.

IV. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЛОННЫ ОТДУВКИ МЕТАНОЛА

Колонна отдувки состоит из отдельных взаимосвязанных элементов – тарелок. Обычно ММ таких многоэлементных объектов формируется из уравнений, описывающих процессы в одном элементе [9]. Однако в данном случае ММ массообменных процессов в колонне отдувки, с учетом принятых допущений, может быть представлена системой уравнений в частных производных [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{ц.г}}{\partial t} &= -f(Q_g) \frac{\partial C_{ц.г}}{\partial z} - R_g [C_{ц.г} - C_{ц.г}^p(C_{ц.вмр})]; \\ \frac{\partial C_{ц.вмр}}{\partial t} &= f(G_{вмр}) \frac{\partial C_{ц.вмр}}{\partial z} + R_{вмр} [C_{ц.г} - C_{ц.г}^p(C_{ц.вмр})]; \quad (1) \\ 0 < z < l_k, \quad t > 0, \end{aligned}$$

где $C_{ц.г}$, $C_{ц.вмр}$ – концентрации метанола в газе и жидкости; $C_{ц.г}^p(C_{ц.вмр})$ – равновесная концентрация метанола в газе; l_k – высота колонны. Коэффициенты R_g и $R_{вмр}$ характеризуются физическими свойствами взаимодействующих потоков и геометрией колонны. Управление процессом отдувки осуществляется изменением подачи газовой и жидкой фазы в колонну, что отражено введением управляющей функции $f(\Delta Q_g)$ и $f(\Delta G_{вмр})$, где ΔQ_g – изменение расхода газа, м³/с; $\Delta G_{вмр}$ – изменение расхода ВМР, кг/с.

Для ММ (1) граничные и начальные условия приняты следующими:

$$\begin{aligned} C_{ц.г}(z, t)|_{z=0} &= C_{ц.г}^{вх}(t); \quad C_{ц.вмр}(z, t)|_{z=l_k} = C_{ц.вмр}^{вх}(t); \\ C_{ц.г}(z, t)|_{t=0} &= C_{ц.г}(z); \quad C_{ц.вмр}(z, t)|_{t=0} = C_{ц.вмр}(z). \end{aligned}$$

При выполнении закона Генри система уравнений (2) записывается в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{ц.г}}{\partial t} &= -f(Q_g) \frac{\partial C_{ц.г}}{\partial z} - R_g (C_{ц.г} - EC_{ц.вмр}); \\ \frac{\partial C_{ц.вмр}}{\partial t} &= f(G_{вмр}) \frac{\partial C_{ц.вмр}}{\partial z} + R_{вмр} (C_{ц.г} - EC_{ц.вмр}), \quad (2) \end{aligned}$$

где E – коэффициент фазового равновесия для массовых концентраций, пропорциональный коэффициенту Генри. В силу присутствия управляющего воздействия в обоих уравнениях ММ (2) сохраняет нелинейный характер, в случае формирования управления как функции переменных состояния.

V. ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛОННЫ ОТДУВКИ МЕТАНОЛА

Для получения дискретно-непрерывной математической модели массообменных процессов в колонне отдувки метанола произведем замену частных

производных в ММ (2) конечными разностями с шагом дискретизации h вдоль пространственной оси z . Тогда запишем систему обыкновенных дифференциальных уравнений, представляющих дискретно-непрерывную модель:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{ц,гi+1}}{dt} &= -\left(\frac{f(Q_{г})}{h} + R_{г}\right)C_{ц,гi+1} + \\ &+ R_{г}EC_{ц,вмрi-i} + \frac{f(Q_{г})C_{ц,гi}}{h}; \\ \frac{dC_{ц,вмрi+1}}{dt} &= -\left(\frac{f(G_{вмр})}{h} + R_{вмр}E\right)C_{ц,вмрi+1} + \\ &+ R_{вмр}C_{ц,гi-i} + \frac{f(G_{вмр})C_{ц,вмрi}}{h}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $i = 0, \dots, n-1$.

Шаг дискретизации h принят исходя из количества тарелок в колонне. При моделировании количество тарелок выбирается $N = 5$ или $N = 3$, так как подача ВМР в соответствии с технологической документацией может осуществляться как на пятую, так и на третью тарелку. Тогда дискретно-непрерывная ММ (3) для $N = 5$ примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{ц,г1}}{dt} &= -\left(\frac{f(Q_{г})}{h} + R_{г}\right)C_{ц,г1} + R_{г}EC_{ц,вмр5} + \frac{f(Q_{г})}{h}C_{ц,г0}; \\ \frac{dC_{ц,г2}}{dt} &= -\left(\frac{f(Q_{г})}{h} + R_{г}\right)C_{ц,г2} + R_{г}EC_{ц,вмр4} + \frac{f(Q_{г})}{h}C_{ц,г1}; \\ \frac{dC_{ц,г3}}{dt} &= -\left(\frac{f(Q_{г})}{h} + R_{г}\right)C_{ц,г3} + R_{г}EC_{ц,вмр3} + \frac{f(Q_{г})}{h}C_{ц,г2}; \\ \frac{dC_{ц,г4}}{dt} &= -\left(\frac{f(Q_{г})}{h} + R_{г}\right)C_{ц,г4} + R_{г}EC_{ц,вмр2} + \frac{f(Q_{г})}{h}C_{ц,г3}; \\ \frac{dC_{ц,г5}}{dt} &= -\left(\frac{f(Q_{г})}{h} + R_{г}\right)C_{ц,г5} + R_{г}EC_{ц,вмр1} + \frac{f(Q_{г})}{h}C_{ц,г4}; \\ \frac{dC_{ц,вмр1}}{dt} &= -\left(\frac{f(G_{вмр})}{h} + R_{вмр}E\right)C_{ц,вмр1} + R_{вмр}C_{ц,г5} + \frac{f(G_{вмр})}{h}C_{ц,вмр0}; \\ \frac{dC_{ц,вмр2}}{dt} &= -\left(\frac{f(G_{вмр})}{h} + R_{вмр}E\right)C_{ц,вмр2} + R_{вмр}C_{ц,г4} + \frac{f(G_{вмр})}{h}C_{ц,вмр1}; \\ \frac{dC_{ц,вмр3}}{dt} &= -\left(\frac{f(G_{вмр})}{h} + R_{вмр}E\right)C_{ц,вмр3} + R_{вмр}C_{ц,г3} + \frac{f(G_{вмр})}{h}C_{ц,вмр2}; \\ \frac{dC_{ц,вмр4}}{dt} &= -\left(\frac{f(G_{вмр})}{h} + R_{вмр}E\right)C_{ц,вмр4} + R_{вмр}C_{ц,г2} + \frac{f(G_{вмр})}{h}C_{ц,вмр3}; \\ \frac{dC_{ц,вмр5}}{dt} &= -\left(\frac{f(G_{вмр})}{h} + R_{вмр}E\right)C_{ц,вмр5} + R_{вмр}C_{ц,г1} + \frac{f(G_{вмр})}{h}C_{ц,вмр4}. \end{aligned}$$

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработаны непрерывная и дискретно-непрерывная математические модели массообменного процесса в колонне отдувки метанола. Определены начальные, граничные условия и шаг дискретизации с учетом конструктивных особенностей колонны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Математическое моделирование и управление процессом короткоциклового безнагревной адсорбции / В.Г. Матвейкин, В.А. Погонин, С.Б. Путин, С.А. Скворцов. М.: Машиностроение-1, 2007. 140 с.
- [2] Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
- [3] Бухгалтер Э.Б. Метанол и его использование в газовой промышленности. М.: Недра, 1986. 238 с.
- [4] Ефимович Д.О., Махмутов Р.А. Совершенствование процесса регенерации метанола // Проблемы науки. 2016. №11 (12) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-protsessa-regeneratsii-metanola> (дата обращения: 04.07.2021).
- [5] Технологии предупреждения гидратообразования в промышленных системах: проблемы и перспективы / Д.Н. Грицишин, В.Г. Квон, В.А. Истомин, Р.М. Минигулов // Газохимия. 2009. №6 (10) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-preduprezhdeniya-gidratobrazovaniya-v-promyslovyh-sistemah-problemy-i-perspektivy> (дата обращения: 04.07.2021).
- [6] Инновационные технологии при обустройстве месторождений мегапроекта «ЯМАЛ» / В.В. Полников, Т.Г. Пономарева, М.А. Александров, М.Ю. Земцова, А.Л. Пимнев // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2 [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=21716> (дата обращения: 04.07.2021).
- [7] Кузьменко Е.А., Покоев Е.Р. Исследование и моделирование колонны отдувки метанола в технологии промышленной подготовки газа // Современные научные исследования и инновации. 2018. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2018/06/86735> (дата обращения: 18.06.2021).
- [8] Специфика промышленной подготовки газов ачимовских залежей / А.В. Прокопов, А.Н. Кубанов, В.А. Истомин, Д.Н. Снежко, А.Н. Чепурнов, А.К. Аюпян // Вести газовой науки. 2018. №1 (33) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-promyslovoy-podgotovki-gazov-achimovskih-zalezhey> (дата обращения: 04.07.2021).
- [9] Протодяконов И.О., Муратов О.В., Евлампиев И.И. Динамика процессов химической технологии. Л.: Химия, 1984. 304 с.