

Исследование взаимосвязанных тепло- и массообменных процессов в ректификационной колонне

С. Е. Абрамкин¹, С. Е. Душин², Ю. Н. Сердитов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

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

Аннотация. Представлены результаты исследования взаимосвязанных процессов тепло- и массообмена в ректификационной колонне при регенерации диэтиленгликоля. Приведены ограничения и допущения, необходимые для разработки математической модели колонны ректификации. На основе компьютерного моделирования выявлены параметры, влияющие на технологический процесс.

Ключевые слова: математическая модель; структурная схема; природный газ; ректификация; массообмен; теплообмен; диэтиленгликоль

I. ВВЕДЕНИЕ

Основным технологическим процессом подготовки природного газа к транспортировке на газовых промыслах является процесс абсорбционной осушки природного газа. Осушка производится при помощи жидкого абсорбента. Обратным процессом является процесс регенерации абсорбента. Технологический процесс подготовки природного газа методом абсорбционной осушки на УКПГ, осуществляемый по замкнутому циклу (по жидкой фазе), является технологическим комплексом взаимосвязанных систем «Абсорбция – Регенерация» [1]. Особенностью данного комплекса является то, что процесс физической абсорбции газа протекает при низкой температуре и высоком давлении, а процесс регенерации, напротив, происходит при высокой температуре и низком давлении. Следует отметить, что система «Абсорбция» определяет в технологическом комплексе основные фазовые потоки. Нестационарные процессы, возникающие в технологическом комплексе систем при изменении отбора природного газа (снижение или увеличение) влекут за собой перенастройку режима его работы. При этом происходит перенастройка локальных систем автоматического регулирования с целью устранения полученного возмущения, так как изменение расхода газа приводит к изменению расхода абсорбента, что в свою очередь ведет к отклонению параметров тепловых и массообменных процессов от установочных значений в системе «Регенерация».

Система «Регенерация» состоит из ряда подсистем, основными из которых являются: подсистема «Ректификация» (ректификационная колонна), подсистема «Выпаривание» (испаритель) и подсистема «Воздушное охлаждение», предназначенная для охлаждения флегмы в аппарате воздушного охлаждения (АВО). Такой выбор объектов для моделирования обусловлен доминирующим влиянием этих подсистем на процесс осушки.

Всестороннее изучение вопроса абсорбционной осушки газа [1] показало, что при построении адекватных математических моделей (ММ) процессов абсорбции и регенерации важная роль отводится нелинейным динамическим моделям, которым свойственны нестационарные (переходные) режимы «в большом». Только нелинейные ММ позволяют выявить и исследовать взаимосвязь массо- и теплообменных процессов.

Здесь представлены результаты исследования тепло- и массообменных процессов, происходящих в ректификационной колонне (РК). Исследование динамики данных процессов производилось при помощи ММ, разработанных в процессе работы.

II. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РЕКТИФИКАЦИИ

При разработке ММ технологического процесса важной задачей является правильный выбор физических принципов и закономерностей, допущений и ограничений, накладываемых на модель. К основным физическим процессам, которые следует учитывать при составлении ММ, относятся тепло- и массообменные. Однако в отличие от процесса абсорбции, в процессе регенерации заметная роль отводится теплообменным процессам. В процессе абсорбции достижение заданной концентрации целевого компонента в газе осуществляется при помощи массообмена между газом и абсорбентом. В процессе регенерации достижение заданной концентрации целевого компонента в абсорбенте осуществляется при помощи теплообмена. Это обусловлено однозначной зависимостью температуры кипения абсорбента от его концентрации при постоянном давлении.

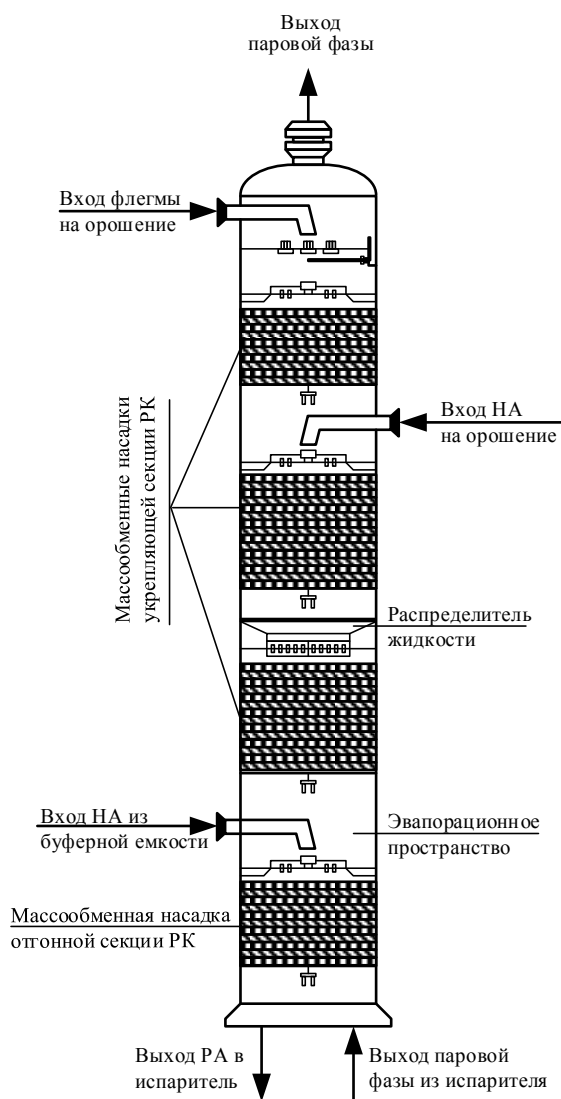


Рис. 1. Ректификационная колонна (разрез)

Ректификационная колонна, представленная на рис. 1, состоит из четырех массообменных секций, заполненных пакетами регулярной насадки и распределительными тарелками, которые позволяют равномерно распределять потоки жидкости и пара по всей поверхности насадок.

Ректификация псевдобинарной смеси «абсорбент – вода» – это процесс разделения исходной смеси на два практически чистых компонента. Разделение осуществляется в РК путем многократного двухстороннего массообменного процесса движущихся в противотоке пара и жидкости, причем жидкая фаза стекает по поверхности насадки в виде пленки (пленочный режим течения), а паровая фаза поднимается вверх в виде сплошного потока через свободный объем насадки.

Взаимодействие фаз в процессе ректификации представляет собой диффузию низкокипящего компонента (воды) из жидкости в пар и высококипящего компонента (абсорбента) из пара в жидкость. Взаимная диффузия

компонентов обусловлена разностью их концентраций в потоках паров и жидкости. Повышение эффективности массообменного процесса при ректификации обеспечивается более интенсивным контактом между взаимодействующими фазами. Также на глубину разделения исходной смеси существенное влияние оказывает способ контактирования фаз внутри колонны. В промышленности применяются колонные аппараты со ступенчатым и непрерывным способами разделения фаз. В отличие от тарельчатой колонны, где концентрация компонента в фазах меняется скачком от одной тарелки к другой, в насадочной РК изменение концентрации целевого компонента во взаимодействующих фазах происходит непрерывно вдоль слоя насадки.

Непрерывный процесс ректификации, происходящий в полной РК, представлен на рис. 2. Сверху полной колонны отводится практически чистый низкокипящий компонент, а снизу – высококипящий. Псевдобинарная смесь «абсорбент-вода», пройдя систему тепловой подготовки, поступает в колонну в двухфазном парожидкостном состоянии. Сечением ввода исходной смеси колонна разделяется на две части. Верхняя часть колонны называется укрепляющей, а нижняя – отгонной (или исчерпывающей) секцией. В состав укрепляющей секции входит АВО. В АВО за счет охлаждения атмосферным воздухом, создается встречный парам поток флегмы. В состав отгонной секции входит испаритель.

В отгонной секции перед насадкой расположена распределительная тарелка, которая выполняет, кроме обычной функции распределения, еще и функцию смесителя потока исходной смеси $G_{на}$ и потока флегмы $G_{ф}$, которая стекает из укрепляющей секции. Паровая фаза $G_{п}$ исходной смеси смешивается с паровым потоком $G'_{п}$, поднимающимся из испарителя в эвапорационном пространстве.

Конечным продуктом укрепляющей секции РК на выходе АВО является дистиллят $G_{д}$, концентрация $C_{д}$ которого близка к единице.

Конечным продуктом отгонной секции РК на выходе из И, полученным в результате процесса однократного испарения, является ПА $G_{ра}$, концентрация которого также близка к единице.

При расчете технологических параметров процесса ректификации важно учитывать флегмовое и паровое числа. Флегмовое число в укрепляющей секции РК – это отношение, которое выражает жидкое орошение верхней части РК в расчете на 1 кмоль дистиллята. Паровое число в отгонной секции РК представляет собой отношение $G_{п}/G_{ра}$, которое выражает паровое орошение нижней части колонны в расчете на 1 кмоль ПА.

Следует отметить, что отгонная и укрепляющая секции РК могут работать и отдельно друг от друга, как самостоятельные технологические аппараты. Такие колонны называются неполными РК, так как в них получают только один из компонентов системы. Отгонная

РК позволяет получить практически в чистом виде высококипящий компонент, а укрепляющая РК – низкокипящий. Получение дистиллята и РА в практически чистом виде в неполных РК является экономически нецелесообразным, так как при этом требуется необоснованно большой расход энергии [2].

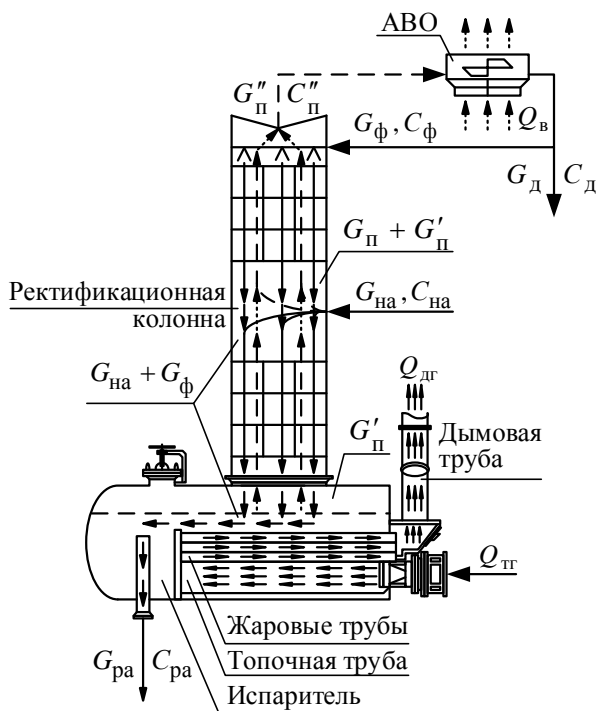


Рис. 2. Принципиальная схема работы ректификационной колонны

Особенностью в работе отгонной и укрепляющей РК является симметрия потоков, которая проявляется в идентичности их характеристик:

- в результате поворота колонны на 180° ;
- в результате замены паровых потоков на жидкие и наоборот;
- в результате замены подвода тепла на отвод и наоборот.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В РК

Материальные и тепловые балансы для потоков в РК обладают сходством, что целесообразно учитывать при разработке ММ.

В результате анализа поведения системы «Регенерация абсорбента» в части массообменных процессов приняты следующие допущения:

- жидкость (абсорбент или флегма) в насадках РК полностью перемешивается (модель идеального перемешивания);

- в основе получения ММ массообменных процессов лежит гидродинамическая модель полного вытеснения (поршневого режима течения фаз);
- режим продольного перемешивания фаз отсутствует;
- скорости пара и жидкости одинаковы по сечению РК;
- концентрации пара и жидкости одинаковы по сечениям аппаратов;
- массопередача на насадках эквимолярная, т. е. через поверхность раздела фаз в противоположных направлениях переносится одинаковое количество целевого компонента;
- абсорбент, проходя через насадку, не задерживается, что исключает образование зон простоя в насадках, а также исключается зависание абсорбента в насадках;
- зависимость равновесной концентрации целевого компонента в паре в общем случае нелинейная.

Так как для подсистемы «Ректификация» в переходных режимах температурные профили пара и абсорбента по высоте колонны не постоянны, то при разработке ММ учитываются тепловые процессы, протекающие в колонне.

Для разработки динамической ММ теплообменного процесса в РК приняты следующие допущения:

- теплоемкость стенок РК будем считать малой по сравнению с теплоемкостью теплоносителей;
- тепловой поток через стенку устанавливается мгновенно при изменении температур движущихся противотоком паровой и жидкой фаз.

Первое допущение для тепловых процессов позволяет пренебречь накоплением теплоты в стенках аппарата и в самой насадке.

С учетом принятых допущений ММ взаимосвязанных тепло- и массообменных процессов подсистемы «Ректификация» имеет вид системы дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_{\Pi\Pi}}{\partial t} &= -v_{\Pi}(\theta_{\Pi}) \frac{\partial C_{\Pi\Pi}}{\partial z} - R_{\Pi}(\theta_{\Pi}) [C_{\Pi\mathcal{K}} - C_{\Pi\mathcal{K}}^p(C_{\Pi\Pi})]; \\
\frac{\partial C_{\Pi\mathcal{K}}}{\partial t} &= v_{\mathcal{K}} \frac{\partial C_{\Pi\mathcal{K}}}{\partial z} + R_{\mathcal{K}} [C_{\Pi\mathcal{K}} - C_{\Pi\mathcal{K}}^p(C_{\Pi\Pi})]; \\
\frac{\partial \theta_{\Pi}}{\partial t} &= -v_{\Pi}(\theta_{\Pi}) \frac{\partial \theta_{\Pi}}{\partial z} - R_{\theta\Pi}(\theta_{\Pi})(\theta_{\Pi} - \theta_{\mathcal{K}}), \\
\frac{\partial \theta_{\mathcal{K}}}{\partial t} &= v_{\mathcal{K}} \frac{\partial \theta_{\mathcal{K}}}{\partial z} + R_{\theta\mathcal{K}}(\theta_{\Pi} - \theta_{\mathcal{K}}).
\end{aligned} \tag{1}$$

где $C_{цп}$, $C_{цж}$ – концентрации целевого компонента (ЦК) в паре и в жидкости (абсорбент, флегма); $C_{цж}^p(C_{цп})$ – равновесная концентрация целевого компонента в жидкости; $v_{п}$, $v_{ж}$ – скорости пара и жидкости; $\theta_{п}$, $\theta_{ж}$ – температура пара и

жидкости; R_{Π} , $R_{ж}$, $R_{\Pi\pi}$, $R_{\theta\pi}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств фаз и геометрии аппарата. В данной модели учитывается влияние температуры пара на его физические характеристики. Скорость пара v_{Π} зависит от температуры θ_{Π} .

Граничные условия ММ:

$$\begin{aligned} C_{\Pi\pi}(z,t)|_{z=0} &= C_{\Pi\pi}^{BX}(t); C_{\Pi\pi}(z,t)|_{z=l_k} = C_{\Pi\pi}^{ВЫХ}(t); \\ C_{\Piж}(z,t)|_{z=l_k} &= C_{\Piж}^{BX}(t); C_{\Piж}(z,t)|_{z=0} = C_{\Piж}^{ВЫХ}(t); \\ \theta_{\Pi}(z,t)|_{z=0} &= \theta_{\Pi}^{BX}(z); \theta_{\Pi}(z,t)|_{z=l} = \theta_{\Pi}^{ВЫХ}(z); \\ \theta_{\Pi}(z,t)|_{z=l} &= \theta_{\Pi}^{ВЫХ}(z); \theta_{\Pi}(z,t)|_{z=0} = \theta_{\Pi}^{ВЫХ}(z); \end{aligned}$$

Начальные условия ММ:

$$\begin{aligned} C_{\Pi\pi}(z,t)|_{t=0} &= C_{\Pi\pi}^0(z); C_{\Piж}(z,t)|_{t=0} = C_{\Piж}^0(z); \\ \theta_{\Pi}(z,t)|_{t=0} &= \theta_{\Pi}^{BX}(z); \theta_{\Pi}(z,t)|_{t=0} = \theta_{\Pi}^{ВЫХ}(z). \end{aligned}$$

Для проведения вычислительных экспериментов и проверки полученной ММ на компьютере осуществлен переход от непрерывной ММ (1) к дискретно-непрерывной модели.

Как отмечалось ранее материальные и тепловые балансы для потоков в укрепляющей и отгонной РК обладают сходством. Поэтому при компьютерном моделировании с целью проверки адекватности ММ можно выбрать любую из неполных РК. Выберем отгонную РК, так как в комплексе технологических систем «Абсорбция – Регенерация» именно она оказывает доминирующее влияние на осушку природного газа.

В общем случае дискретно-непрерывная модель взаимосвязанных тепло- и массообменных процессов принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{\Pi\pi i}}{dt} &= -\left(\frac{v_{\Pi}(\theta_{\Pi})}{h} - R_{\Pi}(\theta_{\Pi})\right)C_{\Pi\pi i} + \frac{v_{\Pi}(\theta_{\Pi})C_{\Pi\pi i-1}}{h} - \\ &- R_{\Pi}(\theta_{\Pi})E(\theta_{\Pi})C_{\Pi\pi i}; \\ \frac{dC_{\Pi\pi i}}{dt} &= -\left(\frac{v_{ж}}{h} - E(\theta_{\Pi})R_{ж}\right)C_{\Pi\pi i} + \frac{v_{ж}C_{\Pi\pi i-1}}{h} - R_{ж}C_{\Pi\pi i}; \\ \frac{d\theta_{\Pi i}}{dt} &= -\left(\frac{v_{\Pi}(\theta_{\Pi})}{h} + R_{\theta_{\Pi}}(\theta_{\Pi})\right)\theta_{\Pi i} + \frac{v_{\Pi}(\theta_{\Pi})\theta_{\Pi i-1}}{h} + \\ &+ R_{\theta_{\Pi}}(\theta_{\Pi})\theta_{\Pi i}; \\ \frac{d\theta_{\Pi i}}{dt} &= -\left(\frac{v_{ж}}{h} + R_{\theta_{ж}}\right)\theta_{\Pi i} + \frac{v_{ж}\theta_{\Pi i-1}}{h} + R_{\theta_{ж}}\theta_{\Pi i}. \end{aligned}$$

где h – шаг дискретизации по оси z , а $i = 1, 2, \dots, n$.

На основе дискретно-непрерывной ММ получена компьютерная модель взаимосвязанных массо- и

теплообменных процессов подсистемы «Ректификация» для исследования её работы при различных возмущениях. Компьютерные модели реализованы при помощи программного средства Matlab/Simulink.

Основные источники возмущения и способы их устранения подробно изложены в [3].

В исследовании возмущение подавалось по изменению концентрации целевого компонента в исходной смеси и по температуре паровой и жидкой фаз. Исследование проводилось явным методом Рунге-Кутты 2-го и 3-го порядков в модификации Bogacki-Shampine (ode3) при фиксированном шаге интегрирования равном 0,01.

Анализируя полученные данные, можно заметить, что возмущения по массовой доле ЦК в абсорбенте не влияют ни на массовую долю ЦК в паре, ни на температуры абсорбента и пара (табл. 1). В то же время изменение температуры как пара, так и абсорбента влечет за собой изменение температурного и концентрационного профилей в РК по абсорбенту и пару.

ТАБЛИЦА 1 СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ ЗНАЧЕНИЙ МАССОВЫХ ДОЛЕЙ И ТЕМПЕРАТУР ПАРА И ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Параметр	Значения возмущений			
	$C_{\Pi\pi 0} = 6,83$ %	$C_{\Pi\pi 0} = 6,18$ %	$\theta_{ж 0} = 100$ °C	$\theta_{\Pi 0} = 164$ °C
	Моделируемые значения			
$C_{\Pi\pi 1}$, %	62,89	62,89	63,17	62,80
$C_{\Pi\pi 2}$, %	78,06	78,06	78,55	77,79
$C_{\Pi\pi 3}$, %	97,06	97,06	97,96	96,56
$C_{\Pi\pi 1}$, %	4,55	3,90	4,21	4,24
$C_{\Pi\pi 2}$, %	2,72	2,07	2,37	2,42
$C_{\Pi\pi 3}$, %	1,25	0,60	0,89	0,95
$\theta_{\Pi 1}$, °C	157,01	157,01	155,47	160,75
$\theta_{\Pi 2}$, °C	153,88	153,88	150,69	157,34
$\theta_{\Pi 3}$, °C	150,59	150,59	145,65	153,75
$\theta_{ж 1}$, °C	124,75	124,75	106,62	125,21
$\theta_{ж 2}$, °C	128,97	128,97	113,01	129,87
$\theta_{ж 3}$, °C	133,04	133,04	119,16	134,35

Проведенное исследование подтверждает 2 положения: теплообменные процессы являются доминирующими для процесса ректификации и массовая доля ЦК в абсорбенте и паре зависит от их температуры при постоянном давлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
- [2] Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. Изд. 3-е, перераб. М.: Химия, 1974. 440 с.
- [3] Анисимов И.В. Автоматическое регулирование процесса ректификации. М.: Гос. научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1961. 180 с.