

Управление технологическими процессами ректификации

Ю. Н. Сердитов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
ura-nikolaevic@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты анализа технологических процессов ректификации в различных отраслях промышленности как объектов управления. Выявлены основные возмущающие воздействия для данных процессов. Проведено компьютерное исследование поведения процессов ректификации без управления с целью выявления параметров, оказывающих значительное влияние на них. Приведена обобщенная структурная схема управляемого процесса ректификации.

Ключевые слова: ректификация; управляемые процессы; математическое моделирование; массообмен; теплообмен

I. ВВЕДЕНИЕ

Ректификация – разделение бинарных и многокомпонентных жидких, а также паровых смесей на практически чистые компоненты или их смеси, обладающие определенными заданными свойствами [1]. Данный процесс осуществляется как правило при противоточном взаимодействии паровой и жидкой фаз в аппаратах колонного типа. Отличительной особенностью процесса ректификации является формирование неравновесных потоков пара и жидкости из исходной смеси за счет различной температуры кипения ее компонентов [1].

Целевой функцией системы управления процессом ректификации является обеспечение максимального извлечения и доведение до заданных требований по качеству всех компонентов исходной смеси [1]-[3]. Оптимизация управления данным процессом заключается в увеличении прибыли за счет сокращения эксплуатационных затрат и увеличении производительности.

В связи с тем, что ректификационные колонные аппараты имеют различную конструкцию и процессы в них осуществляются при различных начальных и конечных условиях разработка системы управления для них представляется достаточно сложной задачей. В связи с этим необходима разработка математической модели управляемого процесса ректификации. Это позволит определить возмущающие воздействия на процесс, а также управляющие – которые позволят компенсировать эти воздействия.

В докладе представлен анализ процесса ректификации в колонне насадочного типа, используемого в

технологическом процессе огневой регенерации диэтиленгликоля (газовая промышленность).

II. ОПИСАНИЕ ФИЗИКИ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ

Принципиальная схема процесса ректификации представлена на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения:

- технологическое оборудование: Н6 – насос водокольцевой вакуумный; Р – разделитель; Н2 – насос подачи рефлюкса в верхнюю часть колонны; АВО – аппарат воздушного охлаждения; И – испаритель; РК – ректификационная колонна;
- потоки: ТГ – топливный газ; ДГ – дымовые газы; НА – насыщенный абсорбент; РА – регенерированный абсорбент.

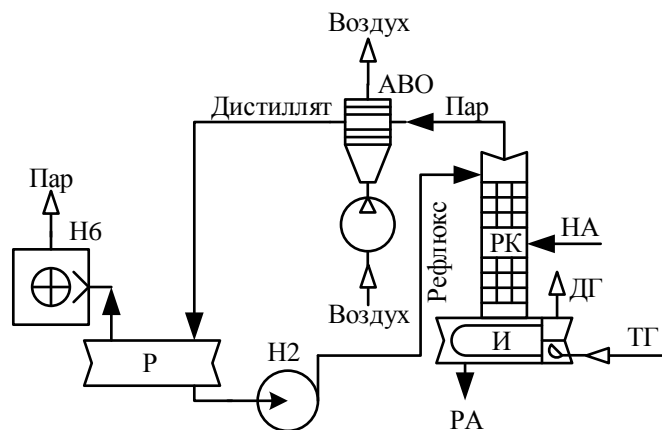


Рис. 1. Принципиальная схема процесса ректификации

Ректификация псевдобинарной смеси «абсорбент–вода» является примером разделения исходной смеси на 2 практически чистых компонента: абсорбент и дистиллят. Разделение происходит в РК при многократном двухстороннем тепломассообменном процессе. Взаимодействующие фазы движутся в противотоке. При этом жидкая фаза стекает вниз по поверхности насадки в виде пленки, а паровая фаза поднимается вверх как сплошной поток через свободный объем насадки РК [4].

Как было отмечено ранее формирование неравновесных потоков пара и жидкости из исходной

смеси в РК происходит за счет различной температуры кипения ее абсорбента и воды. А взаимодействие фаз в процессе ректификации осуществляется за счет диффузии воды из абсорбента в пар и абсорбента из пара в жидкость, что обусловлено разностью их концентраций в потоках паров и абсорбента.

Паровой поток образуется в эвапорационном пространстве РК при подаче исходной смеси (НА) в РК. Здесь в результате однократного испарения происходит разделение исходной смеси на паровую и жидкую фазы. Также в этом пространстве происходит смешение полученного парового потока с паровым потоком, поднимающимся из испарителя И. Затем паровой поток, образовавшийся в РК поднимается в верхнюю ее часть, откуда отводится в АВО. В АВО происходит два тепловых процесса: конденсация и охлаждение. Отдача тепла в атмосферу осуществляется путем обдува теплообменных секций АВО потоком атмосферного воздуха. При этом пары частично конденсируются и образуется поток жидкой фазы (дистиллят), который накапливается в разделителе Р. Часть жидкой фазы – рефлюкс – возвращается в РК для орошения.

В процессе конденсации в теплообменных секциях АВО накапливается воздух и неконденсирующиеся газы. Это приводит к росту их парциального давления и уменьшению вакуума в РК. В связи с этим поддержание давления в РК на заданном уровне неконденсирующиеся газы непрерывно отводятся из АВО с помощью вакуум-насоса Н6. Он также сглаживает колебания давления в системе, которые обусловлены изменением температуры окружающего воздуха [4].

В отгонной части РК на регулярной насадке происходит процесс тепломассообмена между паровой фазой, поднимающейся из испарителя и жидкой фазой, поступающей из эвапорационного пространства. Из насадочной секции жидкая фаза отводится в испаритель И. Здесь за счет теплообмена между внешними стенками жаровых труб и жидкой фазы из нее окончательно выпаривается влага. Поток жидкой фазы (РА) отводится из испарителя с заданной концентрацией.

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ [5]

При разработке математической модели (ММ) процесса ректификации псевдобинарной смеси «абсорбент–вода» приняты следующие допущения:

- для массообменных процессов:
- жидкость (абсорбент или рефлюкс) в насадках РК полностью перемешивается;
- основой ММ массообменных процессов является гидродинамическая модель полного вытеснения;
- режим продольного перемешивания фаз не рассматривается;
- скорости пара и жидкости одинаковы по сечению РК;

- концентрации пара и жидкости одинаковы по сечению РК;
- массопередача на насадках РК эквимолярная;
- зоны простоя в насадках не образуются, зависание абсорбента в насадках не происходит;
- зависимость равновесной концентрации целевого компонента (ЦК) в паре в общем случае нелинейная;

– для теплообменных процессов:

- теплоемкость стенок РК мала по сравнению с теплоемкостью жидкости и пара;
- тепловой поток через стенку устанавливается мгновенно при изменении температур, движущихся противотоком паровой и жидкой фаз.

Запишем ММ взаимосвязанных тепломассообменных процессов при ректификации в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{\text{цп}}}{\partial t} &= -v_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) \frac{\partial C_{\text{цп}}}{\partial z} - R_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) [C_{\text{цж}} - C_{\text{цж}}^{\text{р}}(C_{\text{цп}})]; \\ \frac{\partial C_{\text{цж}}}{\partial t} &= v_{\text{ж}} \frac{\partial C_{\text{цж}}}{\partial z} + R_{\text{ж}} [C_{\text{цж}} - C_{\text{цж}}^{\text{р}}(C_{\text{цп}})]; \\ \frac{\partial \theta_{\text{п}}}{\partial t} &= -v_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) \frac{\partial \theta_{\text{п}}}{\partial z} - R_{\theta_{\text{п}}}(\theta_{\text{п}})(\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{ж}}), \\ \frac{\partial \theta_{\text{ж}}}{\partial t} &= v_{\text{ж}} \frac{\partial \theta_{\text{ж}}}{\partial z} + R_{\theta_{\text{ж}}}(\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{ж}}). \end{aligned} \quad (1)$$

где $C_{\text{цп}}$, $C_{\text{цж}}$ – концентрации ЦК в паре и в жидкости (абсорбент, рефлюкс); $C_{\text{цж}}^{\text{р}}(C_{\text{цп}})$ – равновесная концентрация ЦК в жидкости; $v_{\text{п}}$, $v_{\text{ж}}$ – скорости пара и жидкости; $\theta_{\text{п}}$, $\theta_{\text{ж}}$ – температура пара и жидкости; $R_{\text{п}}$, $R_{\text{ж}}$, $R_{\theta_{\text{п}}}$, $R_{\theta_{\text{ж}}}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств фаз и геометрии РК. В данной модели учитывается влияние температуры пара на его физические характеристики. Скорость пара $v_{\text{п}}$ зависит от температуры $\theta_{\text{п}}$.

Граничные условия ММ:

$$\begin{aligned} C_{\text{цп}}(z, t)|_{z=0} &= C_{\text{цп}}^{\text{вх}}(t); \quad C_{\text{цп}}(z, t)|_{z=l_{\text{к}}} = C_{\text{цп}}^{\text{вых}}(t); \\ C_{\text{цж}}(z, t)|_{z=l_{\text{к}}} &= C_{\text{цж}}^{\text{вх}}(t); \quad C_{\text{цж}}(z, t)|_{z=0} = C_{\text{цж}}^{\text{вых}}(t); \\ \theta_{\text{п}}(z, t)|_{z=0} &= \theta_{\text{п}}^{\text{вх}}(z); \quad \theta_{\text{ж}}(z, t)|_{z=l} = \theta_{\text{ж}}^{\text{вх}}(z); \\ \theta_{\text{п}}(z, t)|_{z=l} &= \theta_{\text{п}}^{\text{вых}}(z); \quad \theta_{\text{ж}}(z, t)|_{z=0} = \theta_{\text{ж}}^{\text{вых}}(z); \end{aligned}$$

Начальные условия ММ:

$$\begin{aligned} C_{\text{цп}}(z, t)|_{t=0} &= C_{\text{цп}}^0(z); \quad C_{\text{цж}}(z, t)|_{t=0} = C_{\text{цж}}^0(z); \\ \theta_{\text{п}}(z, t)|_{t=0} &= \theta_{\text{п}}^{\text{вх}}(z); \quad \theta_{\text{ж}}(z, t)|_{t=0} = \theta_{\text{ж}}^{\text{вх}}(z). \end{aligned}$$

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

IV. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕКТИФИКАЦИИ

Анализ процесса, представленного на рис. 1 позволяет сделать вывод, что непосредственное управление процессами в РК не осуществимо. Управлять данным процессом можно регулируя теплообменные процессы в АВО и испарителе.

Таким образом регулируемые переменными данного процесса являются:

- температуры абсорбента в испарителе, паров в верхней части РК, дистиллята на выходе АВО;
- уровень абсорбента в испарителе;
- давление в системе «АВО – РК – испаритель».

Управляющими параметрами служат:

- расходы РА на выходе из испарителя, рефлюкса на входе в РК и ТГ на входе в горелку испарителя (или соотношения расходов ТГ – воздух);
- температуры рефлюкса и абсорбента на входе в РК;
- состав насыщенного абсорбента на входе в РК.

Для синтеза системы управления процессом ректификации, необходимо исследовать возмущающие воздействия, оказываемые на процесс.

В данном докладе проведено исследование возмущающих воздействий по температуре пара и абсорбента.

V. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

На базе ММ взаимосвязанных тепломассообменных процессов (1) была разработана компьютерная модель отгонной части РК (ОРК) в математическом пакете Matlab / Simulink. Моделирование проводилось при следующих параметрах: $\Delta t = 0,01$ – шаг дискретизации по времени, $z = 3$ – количество пространственных точек на сетке, $t = 100000$ – конечное время моделирования.

Результаты компьютерного моделирования подтвердили адекватность моделей реальным технологическим процессам.

Результаты вычислительного эксперимента представлены в формате анализа системы при различных возмущающих воздействиях по температуре пара (см. рис. 2 – 5). Были выбраны следующие значения температуры пара для возмущения:

- 180 градусов по Цельсию – верхнее предельное значение разложения в парожидкостной смеси «абсорбент–вода»;
- 160 градусов по Цельсию – нормальное значение для протекания технологического процесса;

- 140 градусов по Цельсию – промежуточное нижнее значение;
- 100 градусов по Цельсию – нижнее предельное значение кипения воды в парожидкостной смеси «абсорбент–вода».

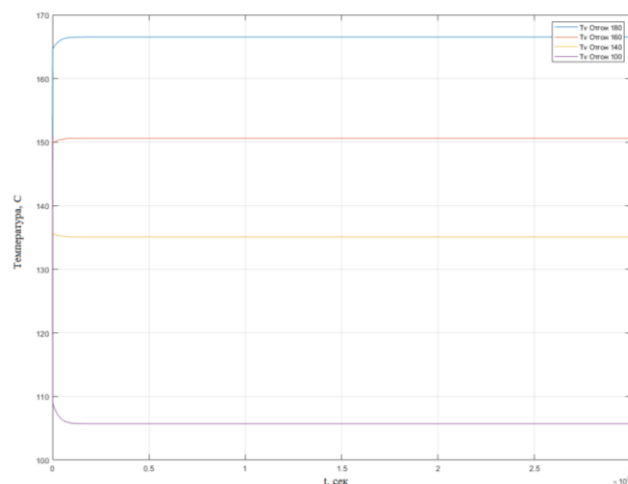


Рис. 2. Переходный процесс температуры пара

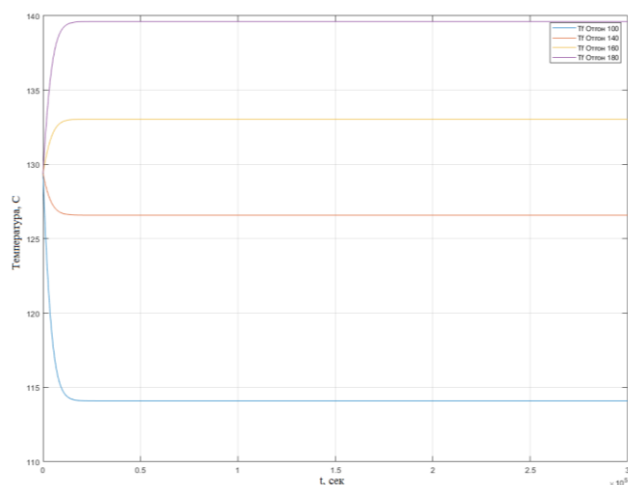


Рис. 3. Переходный процесс температуры жидкости

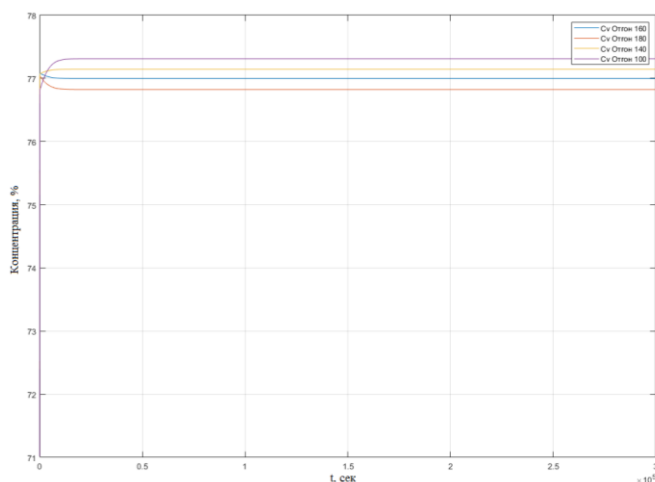


Рис. 4. Переходный процесс концентрации пара

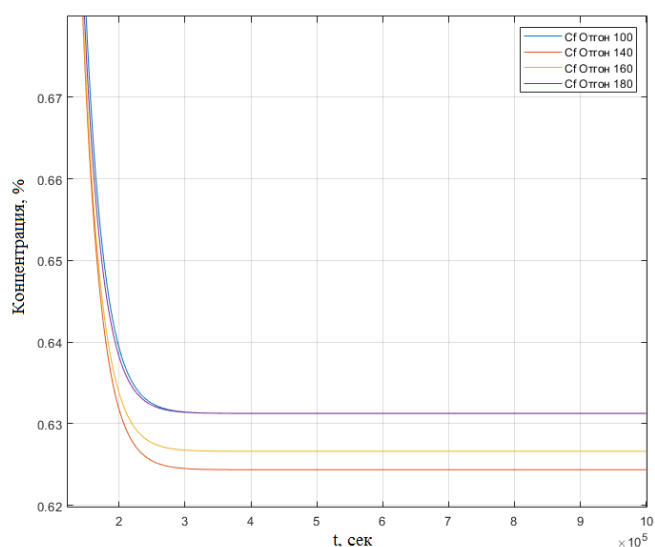


Рис. 5. Переходный процесс концентрации жидкости

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Добыча, подготовка и транспорт природного газа и конденсата: Справ. Т.2 / Под ред. Ю.П. Коротаева, Р.Д. Маргулова, М.: Недра, 1984. 288 с.
- [2] Балыбердина И.Т. Физические методы переработки и использования газа. М.: Недра, 1988. 248 с.
- [3] Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. М.: Химия, 1978. 296 с.
- [4] Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
- [5] Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Сердитов Ю.Н. Исследование взаимосвязанных тепло- и массообменных процессов в ректификационной колонне // XXI Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018). Сб. докл. в 2-х т. Т.1. Санкт-Петербург. 23–25 мая 2018. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 340-343.
- [6] Анисимов И. В. Автоматическое регулирование процесса ректификации. М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефт. и горно-топлив. пром-сти, 1961. 180 с.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование посвящено анализу процесса ректификации, на примере регенерации диэтиленгликоля при абсорбционной осушке природного газа. Процесс ректификации присущ для многих нефте- и газохимических технологий. В результате анализа процесса ректификации выявлены регулируемые переменные, изменение которых значительно влияет на процесс. На основе математической модели проведен вычислительный эксперимент. Возмущения подавались по одной из переменных – температуре пара. Результаты вычислительного эксперимента показывают, что возмущения по данному параметру значительно влияют на теплообменные и массообменные процессы, протекающие в ректификационной колонне.