

Выбор стратегии управления технологическим процессом регенерации диэтиленгликоля

С. Е. Абрамкин¹, С. Е. Душин², Ю. Н. Сердитов³, В. А. Черкасова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

¹seabramkin@etu.ru, ²dushins@yandex.ru, ³ura-nikolaevic@yandex.ru

Аннотация. Приведены динамические математические модели аппаратов, обеспечивающих процесс регенерации ДЭГа. Выявлены параметры, влияющие на технологический процесс. Представлены результаты анализа различных стратегий управления процессом ректификации. Сформирована стратегия автоматического управления процессом регенерации ДЭГа.

Ключевые слова: колонна ректификации; испаритель; аппарат воздушного охлаждения; математическая модель; массообмен; теплообмен; стратегия управления

I. ВВЕДЕНИЕ

Технологический процесс (ТП) регенерации диэтиленгликоля (ДЭГ) по сути является процессом ректификации псевдобинарной смеси «ДЭГ – вода». Основой этого процесса является разделение исходной смеси на два практически чистых компонента. Разделение осуществляется в ректификационной колонне (РК) за счет многократного двухстороннего тепломассообменного процесса движущихся в противотоке водяного пара и ДЭГа. При этом ДЭГ стекает по поверхности насадки в виде пленки (пленочный режим течения), а паровая фаза поднимается вверх в виде сплошного потока через свободный объем насадки.

Особенностью исследования процессов в РК является то, что сечением ввода насыщенного абсорбента она разделяется на две части. Верхняя часть колонны называется укрепляющей, а нижняя – отгонной (или исчерпывающей) секцией. В состав укрепляющей секции входит аппарат воздушного охлаждения, а в состав отгонной – испаритель. Отгонная РК позволяет получить практически в чистом виде высококипящий компонент – регенерированный абсорбент (РДЭГ), а укрепляющая РК – низкокипящий (рефлюкс или флегму).

Технологический процесс ректификации достаточно подробно описан в литературе [1]–[7].

Основные задачи автоматического управления процессом ректификации заключаются в достижении заданной точности разделения исходной смеси, максимальной интенсивности и экономичности процесса [2], [7].

Следует отметить, что интенсивность и экономичность ТП регенерации ДЭГа зависят от величины нагрузки РК, а

также выбранной степени разделения. Как правило, эффективной является работа РК при максимальной нагрузке. В этих условиях массо- и теплообмен в системе «пар – жидкость» будет наилучшим. Однако управление ТП должно быть точным для предотвращения уноса ДЭГа.

Организация автоматического управления ТП регенерации представляет собой сложную инженерную задачу. Это вызвано большим числом взаимосвязанных регулируемых параметров, а также сложной и недостаточно изученной динамикой процесса.

Цель исследования состоит в выборе стратегии управления технологическим процессом регенерации ДЭГа. Для реализации данной цели определены следующие задачи:

- разработка динамических математических моделей (ММ) для изучения поведения объекта;
- определение параметров, влияющих на процесс регенерации ДЭГа;
- анализ стратегий автоматического управления процессом ректификации;
- формирование стратегии автоматического управления процессом регенерации ДЭГа.

II. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «РЕГЕНЕРАЦИЯ ДЭГА»

Для решения задачи изучения динамики процесса в системе «Регенерация ДЭГа» получены ММ «Ректификация» (ректификационная колонна), «Выпаривание» (испаритель) и «Воздушное охлаждение» (аппарат воздушного охлаждения). Такой выбор объектов обусловлен доминирующим влиянием этих подсистем на процесс осушки природного газа [1].

A. Математическая модель тепломассообменных процессов в РК

Динамическая нелинейная ММ взаимосвязанных по температуре пара массо- и теплообменных процессов подсистемы «Ректификация» представлена системой дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) [2], [8]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_{ц.п}}{\partial t} &= v_{п}(\theta_{п}) \frac{\partial C_{ц.п}}{\partial z} + R_{п} \left(C_{ц.п} - C_{ц.п}^p(C_{ц.ф}) \right); \\
\frac{\partial C_{ц.ф}}{\partial t} &= -v_{ф} \frac{\partial C_{ц.ф}}{\partial z} - R_{ф} \left(C_{ц.п} - C_{ц.п}^p(C_{ц.ф}) \right); \\
\frac{\partial \theta_{п}}{\partial t} &= -v_{п}(\theta_{п}) \frac{\partial \theta_{п}}{\partial z} - R_{\theta п}(\theta_{п} - \theta_{ф}); \\
\frac{\partial \theta_{ф}}{\partial t} &= v_{ф} \frac{\partial \theta_{ф}}{\partial z} + R_{\theta ф}(\theta_{п} - \theta_{ф}); \\
\frac{\partial C'_{ц.п}}{\partial t} &= v'_{п}(\theta_{п}) \frac{\partial C'_{ц.п}}{\partial z} + R'_{п} \left[C'_{ц.п} - C_{ц.п}^p(C_{ц.дЭГ}) \right]; \\
\frac{\partial C_{ц.дЭГ}}{\partial t} &= -v_{дЭГ} \frac{\partial C_{ц.дЭГ}}{\partial z} - R_{дЭГ} \left(C'_{ц.п} - C_{ц.п}^p(C_{ц.дЭГ}) \right); \\
\frac{\partial \theta'_{п}}{\partial t} &= -v'_{п}(\theta_{п}) \frac{\partial \theta'_{п}}{\partial z} - R'_{\theta п}(\theta'_{п} - \theta_{дЭГ}); \\
\frac{\partial \theta_{дЭГ}}{\partial t} &= v_{дЭГ} \frac{\partial \theta_{дЭГ}}{\partial z} + R_{\theta дЭГ}(\theta'_{п} - \theta_{дЭГ}),
\end{aligned}$$

где $C_{ц.п}$, $C_{ц.ф}$, $C'_{ц.п}$, $C_{ц.дЭГ}$ – концентрация целевого компонента (ЦК) в паре и флегме укрепляющей секции, в паре и ДЭГе отгонной секции; $v_{п}$, $v_{ф}$, $v'_{п}$, $v_{дЭГ}$ – скорости пара и флегмы в укрепляющей секции, скорости пара и ДЭГа в отгонной секции; $\theta_{п}$, $\theta_{ф}$, $\theta'_{п}$, $\theta_{дЭГ}$ – температура пара и флегмы в укрепляющей секции, температура пара и ДЭГа в отгонной секции; $C_{ц.п}^p(C_{ц.ф})$, $C_{ц.п}^p(C_{ц.дЭГ})$ – равновесная концентрация ЦК в паре в укрепляющей секции и равновесная концентрация ЦК в паре в отгонной секции; $R_{п}$, $R_{ф}$, $R_{\theta п}$, $R_{\theta ф}$, $R'_{п}$, $R_{дЭГ}$, $R'_{\theta п}$, $R_{\theta дЭГ}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств фаз и геометрии аппарата; z – пространственная переменная по высотам укрепляющей и отгонной секциям аппарата. В данной модели учитывается влияние температуры пара на его физические характеристики. Скорость пара $v_{п}$, зависит от температуры $\theta_{п}$.

Граничные условия ММ:

$$\begin{aligned}
C_{ц.п}(z, t)|_{z=0} &= C_{ц.п}^{BX}(t); C_{ц.п}(z, t)|_{z=l_{yc}} = C_{ц.п}^{BXY}(t); \\
C_{ц.ф}(z, t)|_{z=l_{yc}} &= C_{ц.ф}^{BX}(t); C_{ц.ф}(z, t)|_{z=0} = C_{ц.ф}^{BXY}(t); \\
\theta_{п}(z, t)|_{z=0} &= \theta_{п}^{BX}(z); \theta_{ф}(z, t)|_{z=l_{yc}} = \theta_{ф}^{BX}(z); \\
\theta_{п}(z, t)|_{z=l_{yc}} &= \theta_{п}^{BXY}(z); \theta_{ф}(z, t)|_{z=0} = \theta_{ф}^{BXY}(z); \\
C'_{ц.п}(z, t)|_{z=0} &= C_{ц.п}^{BX}(t); C'_{ц.п}(z, t)|_{z=l_{oc}} = C'_{ц.п}^{BXY}(t); \\
C_{ц.дЭГ}(z, t)|_{z=l_{oc}} &= C_{ц.дЭГ}^{BX}(t); C_{ц.дЭГ}(z, t)|_{z=0} = C_{ц.дЭГ}^{BXY}(t); \\
\theta'_{п}(z, t)|_{z=0} &= \theta'_{п}^{BX}(z); \theta_{дЭГ}(z, t)|_{z=l_{oc}} = \theta_{дЭГ}^{BX}(z); \\
\theta'_{п}(z, t)|_{z=l_{oc}} &= \theta'_{п}^{BXY}(z); \theta_{дЭГ}(z, t)|_{z=0} = \theta_{дЭГ}^{BXY}(z),
\end{aligned}$$

где l_{yc} , l_{oc} – высоты укрепляющей и отгонной секций.

Начальные условия ММ:

$$\begin{aligned}
C_{ц.п}(z, t)|_{t=0} &= C_{ц.п}^0(z); C_{ц.ф}(z, t)|_{t=0} = C_{ц.ф}^0(z); \\
\theta_{п}(z, t)|_{t=0} &= \theta_{п}^{BX}(z); \theta_{ф}(z, t)|_{t=0} = \theta_{ф}^{BX}(z); \\
C'_{ц.п}(z, t)|_{t=0} &= C_{ц.п}^0(z); C_{ц.дЭГ}(z, t)|_{t=0} = C_{ц.дЭГ}^0(z); \\
\theta'_{п}(z, t)|_{t=0} &= \theta'_{п}^{BX}(z); \theta_{дЭГ}(z, t)|_{t=0} = \theta_{дЭГ}^{BX}(z).
\end{aligned}$$

В. Математическая модель управляемого теплообменного процесса в АВО

Динамическая нелинейная ММ управляемых теплообменных процессов подсистемы «Воздушное охлаждение» характеризуется системой ДУЧП [2], [9]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \theta_{н.п}}{\partial t} &= v_{н.п}(\bar{G}_{н.п}, \theta_{н.п}) \frac{\partial \theta_{н.п}}{\partial x} - R_{н.п}[\theta_{н.п} - \theta_{ст}]; \\
\frac{d\theta_{ст}}{dt} &= R_{c1}f(u) + R_{c2}\theta_{н.п} - R_{c}\theta_{ст},
\end{aligned}$$

где $\theta_{н.п}$, $\theta_{ст}$ – рабочая температура насыщенного пара и стенки трубного пучка АВО; $v_{н.п}$ – скорость насыщенного пара; $\bar{G}_{н.п}$ – расход насыщенного пара; $R_{н.п}$, $R_{c} = R_{c1} + R_{c2}$ – физико-технологические коэффициенты; x – пространственная переменная по длине АВО; $f(u)$ – функция управления температурой среды.

Граничные условия ММ:

$$\theta_{н.п}(x)|_{x=0} = \theta_{н.п}^{BX}(t); \theta_{н.п}(x)|_{x=l_{ABO}} = \theta_{н.п}^{BXY}(t),$$

где l_{ABO} – длина трубы теплообменника.

Начальные распределения температур вдоль трубы АВО задаются выражениями:

$$\theta_{н.п}(x)|_{t=0} = \theta_{н.п}^{BX}(x); \theta_{ст}(x)|_{t=0} = \theta_{ст}^{BX}(x).$$

С. Математическая модель управляемого теплообменного процесса в испарителе

Динамическая нелинейная ММ управляемых теплообменных процессов подсистемы «Выпаривание» представлена системой ДУЧП [2], [10]:

$$\begin{aligned}
\partial \theta_{ДГ} / \partial t &= -f(u)(\partial \theta_{ДГ} / \partial x) - R_{ДГ}(\theta_{ДГ} - \theta_{ст}); \\
\partial \theta_{дЭГ} / \partial t &= v_{дЭГ}(\partial \theta_{дЭГ} / \partial x) + R_{дЭГ}(\theta_{ст} - \theta_{дЭГ}); \\
d\theta_{ст} / dt &= R_{ДГ.ст}(\theta_{ДГ} - \theta_{ст}) - R_{дЭГ.ст}(\theta_{ст} - \theta_{дЭГ}),
\end{aligned}$$

где $\theta_{ДГ}$, $\theta_{дЭГ}$, $\theta_{ст}$ – температуры дымовых газов (ДГ), ДЭГа и стенки; $f(u)$ – функция управления скоростью ДГ; $v_{дЭГ}$ – скорость ДЭГа; $R_{ДГ}$, $R_{дЭГ}$, $R_{ДГ.ст}$, $R_{дЭГ.ст}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств ДГ, ДЭГа и материала стенки жаровой трубы.

Граничные условия ММ:

$$\theta_{\text{ДГ}}(x)|_{x=l} = \theta_{\text{ДГ}}^{\text{вх}}(t); \quad \theta_{\text{ДЭГ}}(x)|_{x=0} = \theta_{\text{ДЭГ}}^{\text{вх}}(t).$$

Начальные распределения температур теплоносителей:

$$\theta_{\text{ДГО}}(x) = \theta_{\text{ДГ}}(x, t)|_{t=0}; \quad \theta_{\text{ДЭГО}}(x) = \theta_{\text{ДЭГ}}(x, t)|_{t=0}.$$

III. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС РЕГЕНЕРАЦИИ ДЭГА

Для определения стратегии автоматического управления ТП регенерации ДЭГа необходимо определить его управляемые и управляющие параметры.

Управляемыми параметрами ТП регенерации ДЭГа являются температуры ДЭГа в испарителе и паров в верхней части укрепляющей секции РК, уровень ДЭГа в испарителе, давление в системе «АВО – РК – испаритель», температура флегмы на выходе АВО.

Управляющими параметрами служат расходы ДЭГа на выходе из испарителя, флегмы на входе в РК и топливного газа (ТГ) на входе в горелку испарителя (или соотношения расходов ТГ – воздух), температуры флегмы и ДЭГа на входе в РК, состав насыщенного ДЭГа (НДЭГа) на входе в РК.

Следует отметить, что давление в системе «АВО – РК – испаритель» должно оставаться неизменным. Как правило его величина определяется физическими свойствами паровой фазы и конструктивными особенностями РК. В данном случае регулирование рабочего давления в системе осуществляется за счет поддержания теплового баланса в АВО. Расход паровой фазы в РК поддерживается изменением тепловой нагрузки испарителя по температуре ДЭГа и пара.

Определим параметры, оказывающие возмущающие воздействия на течение ТП.

Недостаточное или избыточное количество НДЭГа на входе в РК приводят к изменению давления и температуры в ней. Таким образом, чтобы РК работала экономично и обеспечивала качество флегмы и ДЭГа, необходимо поддерживать постоянное количество поступающего НДЭГа.

Колебания состава НДЭГа вызывают снижение экономичности ТП и влияют на качество РДЭГа. При этом изменяются состав и температуры жидкости и паров в РК. Поддержание качественных характеристик ТП осуществляется регулированием подачи ТГ (или соотношения расходов ТГ – воздух) на входе в горелку испарителя и флегмы в верхнюю часть укрепляющей секции РК.

Понижение температуры НДЭГа на входе в РК затрудняет регулирование давления и вызывает ухудшение качества РДЭГа на выходе из испарителя. Для поддержания заданного качества РДЭГа необходимо увеличить подачу ТГ в горелку испарителя. Это в свою очередь снижает экономичность и безопасность ТП.

На экономичность и интенсивность ТП в РК оказывает влияние *скорость паров*. Этот параметр не может быть непосредственно измерен. В насадочной РК чем больше скорость паров, тем медленнее будет стекать ДЭГ по насадке. Соответственно, взаимодействие ДЭГа и пара будет продолжительным, что повышает качество конечных продуктов. Следует отметить, что поддержание постоянной скорости паров в РК целесообразно только при поддержании неизменного состава НДЭГа.

Выше указывалось, что *давление в РК* постоянно. Таким образом, качественные показатели ТП (состав ДЭГа) зависят только от температуры в системе «АВО – РК – испаритель». Значит для обеспечения состава ДЭГа на выходе из испарителя в данном ТП необходимо регулировать давление в системе и температуру кипения ДЭГа в испарителе.

Отметим, что изменения *скорости паров* и *количества флегмы* в укрепляющей секции РК приводит к изменениям гидравлического сопротивления в ней и в АВО. Это негативно влияет на работу регулятора давления. Регулирование давления в РК не вызывает затруднений. Значительные сложности возникают при регулировании температуры, что вызвано инерционностью процессов массо- и теплообмена и небольшим диапазоном изменения температуры. В процессе регулирования этих температур возмущающими факторами являются колебания количества НДЭГа, его температуры и состава, а также давления в РК.

IV. АНАЛИЗ СТРАТЕГИЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕКТИФИКАЦИИ

Как уже отмечалось, сложность выбора стратегии управления ТП регенерации ДЭГа обусловлена большим количеством взаимосвязанных параметров.

Анализ [1]–[3], [7], [11] позволил выявить ряд стратегий автоматического управления процессом ректификации.

A. Стратегия управления по перепаду давления.

Регулирование осуществляется воздействием на подачу ТГ (или соотношения ТГ – воздух) в горелку испарителя. Такая стратегия позволяет стабилизировать тепломассообменные процессы при расчетной скорости паров и повысить производительность РК. Изменение перепада давления влияет на массу удерживаемой в РК жидкой фазы.

B. Стратегия управления по уровню в испарителе.

Регулирование уровня в испарителе приводит к изменению расхода жидкой фазы на выходе ТП. Такая стратегия регулирования позволяет стабилизировать общий массовый баланс в отгонной части РК.

C. Стратегия управления расходом ДЭГа на выходе системы (или ТГ на входе в испаритель)

При такой стратегии применяется двухкаскадная схема регулирования расхода ДЭГа на выходе системы. Она реализуется с коррекцией по температуре и составу ДЭГа в испарителе. В то же время данной схемой предусмотрено

регулирование расхода ТГ на подаче в горелку с коррекцией по уровню в испарителе.

Следует отметить, что такие параметры, как состав и расход НДЭГа, редко выбирают в качестве управляющих. Их обычно рассматривают как возмущающие воздействия.

D. Стратегия управления по температуре в испарителе.

Такая стратегия позволяет стабилизировать температуру в испарителе за счет изменения расхода ТГ (или соотношения ТГ – воздух) на входе в горелку с коррекцией по температуре ДГ.

Также в рамках данной стратегии можно реализовать двухкаскадную схему, где контур регулирования расхода ТГ будет внутренним. Внешний контур реализует функцию регулирования температуры в испарителе и является корректирующим для внутреннего контура.

Этот список далеко не полностью отражает многообразие стратегий автоматического управления процессом ректификации. Кроме того, приведенные выше стратегии реализуются на основе локальных регуляторов, которые применимы по сути только для квазистационарных объектов.

V. ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ ДЭГА.

Технологический процесс регенерации ДЭГа характеризуется изменениями динамических ситуаций. Они обусловлены изменениями как внешних факторов (расход, температура и давление), так и внутренних факторов. Внутренние возмущающие факторы проявляются с течением времени в виде конструктивных изменений в установке (утончение стенок аппаратов, засорение проходного сечения трубопроводов и т. п.). Для поддержания заданных значений в широком интервале изменения воздействий предлагается использовать концепцию многорежимного управления [1].

В соответствии с принципом многорежимного регулирования для каждого технологического режима устанавливается локальная цель регулирования и рассчитывается (выбирается) локальный закон регулирования с учетом ранее набранных рекомендаций и сложившихся типовых решений.

Использование концепции многорежимного регулирования применительно к технологическим

установкам основывается на обеспечении заданных требований к текущему режиму функционирования за счет подключения локальных регуляторов (регуляторов режима, субрегуляторов) из имеющегося набора режимных регуляторов в соответствии со сложившейся на данный момент времени динамической ситуацией. Изменение закона управления многорежимного регулятора происходит при получении определенного набора информативных признаков, которые формируются на основе измеренных значений, характеризующих текущее состояние установки и состояние окружающей среды. Базируясь на полученной информации, многорежимный регулятор в соответствии с текущим технологическим режимом вырабатывает требуемый управляющий сигнал.

Таким образом, концепция многорежимного регулирования может стать основой для разработки стратегии управления ТП регенерации ДЭГа.

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] Анисимов И. В. Автоматическое регулирование процесса ректификации. М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефт. и горно-топлив. пром-сти, 1961. 180 с.
- [3] Александров И. А. Перегонка и ректификация в нефтепереработке. М.: Химия, 1981. 352 с.
- [4] Жаров В. Т., Серафимов Л. А. Физико-химические основы дистилляции и ректификации. Л.: Химия, 1975. 240 с.
- [5] Багатуров С. А. Основы теории и расчёта перегонки и ректификации. М.: Химия, 1974. 440 с.
- [6] Петлюк Ф. Б., Серафимов Л. А. Многокомпонентная ректификация. Теория и расчет. М.: Химия, 1983. 304 с.
- [7] Тараненко Б. Ф., Герман В. Т. Автоматическое управление газопромысловыми объектами. М.: Недра, 1976. 213 с.
- [8] Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Разработка математической модели технологического комплекса «Абсорбция – Десорбция» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 1. С. 29–33.
- [9] Абрамкин С. Е., Грудяева Е. К., Душин С. Е. Система регулирования теплообменного процесса в аппарате воздушного охлаждения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 6. С. 35–40.
- [10] Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Поляшова К. А. Математическая модель управляемого теплообменного процесса в испарителе // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 9. С. 32–36.
- [11] Беспалов А. В., Харитонов Н. И. Системы управления химико-технологическими процессами. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 690 с.