

УДК 681.51.011

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.41

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОСУШКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

С. Е. Душин^а, доктор техн. наук, профессор**С. Е. Абрамкин^а**, канд. техн. наук, ассистент^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, РФ

Цель: разработка динамических математических моделей управляемых технологических процессов осушки природного газа. **Результаты:** разработана концептуальная модель тепло- и массообменных процессов комплекса технологических систем «Абсорбция – Десорбция» как объекта управления, характеризующаяся взаимосвязью разнородных физических процессов, структурой и обоснованным выбором входных, внутренних, измеряемых и управляемых величин. На основе концептуальной модели разработаны и исследованы математические модели управляемых массообменных процессов в абсорбере насадочного типа и теплообменных процессов в испарителе и аппарате воздушного охлаждения, отличающиеся обоснованным принятием допущений, пространственной распределенностью величин и учетом функциональной зависимости скорости газообразной фазы от внешних и внутренних возмущающих факторов, что позволяет адекватно управлять процессами в условиях изменения этих факторов. Предложено многорежимное регулирование моделируемых процессов. **Практическая значимость:** разработанные математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов абсорбционной осушки природного газа позволяют объяснять и прогнозировать поведение комплекса технологических систем типовых установок комплексной подготовки газа при различных режимах функционирования. Применение многорежимного регулирования обеспечивает поддержание заданного качества газа в широких интервалах изменения давления, температуры и расхода.

Ключевые слова – абсорбционная осушка, десорбция, массообмен, теплообмен, математическое моделирование, концептуальная модель, дифференциальное уравнение в частных производных, управляемый технологический процесс, многорежимное регулирование.

Введение

Осушка природного газа имеет наиважнейшее значение для безаварийной работы газотранспортной системы. Природный газ, добываемый из подземных источников, насыщен капельной влагой, тяжелыми углеводородами и механическими примесями, что может вызывать аварийные ситуации при транспортировке газа по магистральным газопроводам. Также возможно образование гидратов, приводящее к снижению пропускной способности трубопроводов и повреждению технологического оборудования. Эти сопутствующие факторы определяют высокие требования к качеству подготовки природного газа для его транспортировки, надежности технологического оборудования в связи с непрерывным характером производства и оптимизацией режимов работы скважин и установок комплексной подготовки газа (УКПГ). Для реализации данных требований необходимо внедрение комплексных систем автоматизации технологических процессов (ТП).

На сегодняшний день при разработке комплексных систем автоматизации ТП для объектов газовой промышленности возможности математического моделирования в полной мере не используются; необходимо проводить глубокое физико-математическое исследование газопромысловых ТП и вычислительные эксперименты.

В настоящее время при исследовании ТП абсорбции и десорбции основное внимание уделяется статическим и динамическим моделям отдельных устройств, а не всего комплекса в целом. Статические модели, по существу, определяют основные потоки субстанций при нормальной эксплуатации промышленных установок. Динамические модели, как правило, формируются на основе линеаризации при малых отклонениях от равновесных режимов и находят применение для разработки локальных контуров регулирования. Фундаментальные исследования абсорбции природного газа представлены в трудах В. М. Рамма [1], Б. Ф. Тараненко [2], В. В. Кафарова [3] и других. Вопросы моделирования и управления объектов с распределенными параметрами широко рассматривались в научных работах многих исследователей, в том числе А. Г. Бутковского [4], Э. Я. Рапопорта [5], И. М. Першина [6], Х. Рея (W. Harmon Ray) [7].

Технологические процессы, происходящие в аппаратах УКПГ, носят квазиустановившийся характер. Однако действие возмущающих факторов (изменения технологического режима, влагосодержания и давления газа и т. п.) приводят к значительным отклонениям ТП от установившихся режимов и вызывают необходимость разработки адекватных динамических математических моделей (ММ) управляемых процессов, учитывающих многофазность взаимодействующих

потоков, пространственную распределенность, граничные условия и нелинейную взаимосвязь физических величин [8–20]. В этом и состоит основная задача, решению которой посвящена статья.

Концептуальная модель

Первый этап моделирования предполагает анализ физики ТП, изучение технологических схем, построение структурно-потоковой и функциональной схем и разработку концептуальной модели взаимосвязанных физических процессов комплекса технологических систем (КТС) «Абсорбция — Десорбция» как объекта управления. Она должна быть положена в основу составления динамических ММ тепло- и массообменных процессов КТС в целом. В данном исследовании термин «концептуальная модель» понимается как абстрактная модель, которая отражает основные физические процессы, определяющие абсорбционную осушку природного газа, и пренебрегает не существенными явлениями, очерчивает границы адекватности модели, устанавливает причинно-следственные связи между процессами моделируемого комплекса, тем самым задавая структуру объекта управления. Структурная схема концептуальной модели представлена на рис. 1.

На схеме приняты следующие обозначения: $C_{ц,г}^{вх}$, $C_{ц,г}^{вых}$ — концентрации целевого компонента (ЦК) в газе на входе и выходе абсорбера; $v_г$ — скорость газа; $f(u) = \Delta v_a(G_a/Q_г)$ — функция управления скоростью абсорбента в зависимости от соотношения расходов абсорбент/газ, где u — сигнал управления, поступающий от регулятора; v_a — скорость абсорбента; G_a — расход абсорбента; $Q_г$ — расход газа; $C_{ц,р,а}^{вх}$, $C_{ц,р,а}^{вых}$ — концентрации ЦК в регенерированном абсорбенте на входе абсорбера и выходе ректификационной колонны

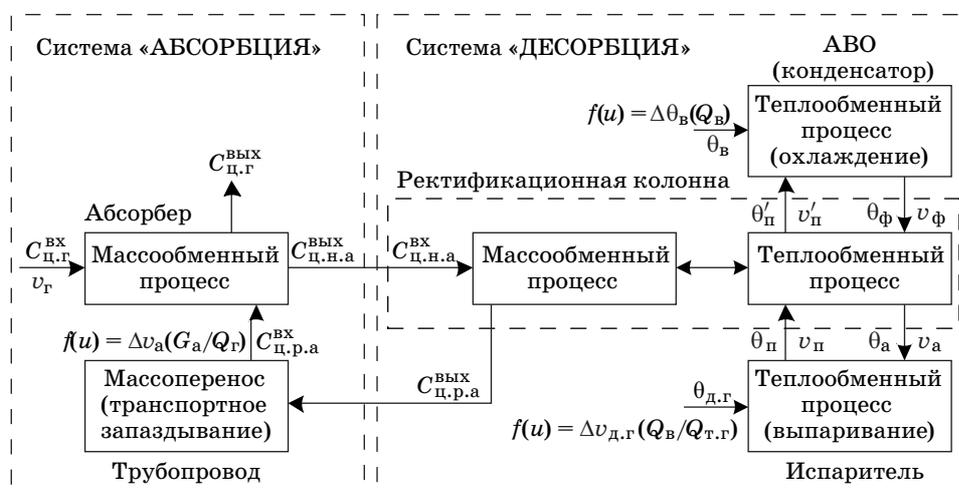
(РК); $C_{ц,н,а}^{вх}$, $C_{ц,н,а}^{вых}$ — концентрации ЦК в насыщенном абсорбенте на входе РК и выходе абсорбера; $\theta_п$, $\theta'_п$ — температура пара на выходе испарителя и РК; $v_п$, $v'_п$ — скорость пара на выходе испарителя и РК; θ_a — температура абсорбента в испарителе; θ_ϕ — температура флегмы из аппарата воздушного охлаждения АВО; v_ϕ — скорость флегмы из АВО; $\theta_в$ — температура окружающей среды (воздуха); $f(u) = \Delta\theta_в(Q_в)$ — функция управления температурой воздуха, подаваемого в АВО, в зависимости от расхода воздуха, где $Q_в$ — расход воздуха; $\theta_{д,г}$ — температура дымовых газов в жаровых трубах испарителя; $f(u) = \Delta v_{д,г}(Q_в/Q_{т,г})$ — функция управления скоростью дымовых газов, в зависимости от соотношения расходов воздух/топливный газ, где $v_{д,г}$ — скорость дымовых газов; $Q_{т,г}$ — расход топливного газа.

Математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов

В соответствии с концептуальной моделью к числу подсистем, оказывающих доминирующее влияние на процесс абсорбционной осушки природного газа, относятся: «Абсорбция газа» (абсорбер), «Ректификация» (РК), «Выпаривание» (испаритель) и «Воздушное охлаждение» (АВО).

Необходимость управления процессами в указанных подсистемах обусловлена влиянием различного рода возмущающих воздействий, связанных с изменением:

- режима работы технологической установки (устанавливается оператором);
- скорости движения фаз через зоны взаимодействия;
- значений внешних параметров (пластового давления и температуры, состава и расхода фаз) на входе в зону взаимодействия фаз;



■ **Рис. 1.** Структурная схема концептуальной модели тепломассообменных процессов КТС «Абсорбция — Десорбция» как объекта управления

— требуемого состояния на выходе из зоны взаимодействия фаз (состава фаз).

При составлении модели ТП в абсорбере принимаются следующие ограничения и допущения:

— жидкость (абсорбент) в насадках колонны полностью перемешивается (модель идеального перемешивания);

— в основе получения ММ массообменных процессов между газом и жидкостью лежит гидродинамическая модель полного вытеснения (поршневой режим течения фаз);

— скорости газа v_g и жидкости $v_{ж}$ одинаковы по сечению насадочной колонны;

— концентрации газа C_g и абсорбента C_a одинаковы по сечению аппарата;

— массопередача насадке эквимольная, т. е. через поверхность раздела фаз в противоположных направлениях переносится одинаковое количество целевого компонента;

— абсорбент, проходя через насадку, не задерживается, что исключает его зависание и образование зон простоя в насадке;

— зависимость равновесной концентрации ЦК в газе $C_{ц,г}^p(C_{ц,а})$ линейная, т. е. выполняется закон Генри;

— температурные профили газа и абсорбента по всей высоте аппарата принимаются постоянными (на практике процесс физической абсорбции газа сопровождается незначительным снижением температуры абсорбента).

При построении модели следует учитывать зависимость скорости газа от расхода, температуры и давления газа:

$$v_g(\bar{Q}_g, \theta_g, p_{г,р}) = \frac{V_m \bar{Q}_g (\theta_0 + \theta_g) p_0}{0,785 \theta_0 p_{г,р} D^2}, \quad (1)$$

где \bar{Q}_g — расход газа; θ_g — рабочая температура газа; $p_{г,р}$ — рабочее давление газа; $V_m = 22,4$ — объем моля идеального газа при нормальных условиях; $\theta_0 = 273$ — нормальная температура; p_0 — нормальное давление; D — диаметр колонны.

С учетом принятых допущений и функциональной зависимости (1) в режиме отсутствия

продольного перемешивания фаз нелинейная динамическая ММ управляемого массообменного процесса в подсистеме «Абсорбция газа» может быть представлена системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial C_{ц,г}}{\partial t} = -v_{zг}(\bar{Q}_g, \theta_g, p_{г,р}) \left(\frac{\partial C_{ц,г}}{\partial z} - R_g(v_{zг}) [C_{ц,г} - C_{ц,г}^p(C_{ц,а})] \right);$$

$$\frac{\partial C_{ц,а}}{\partial t} = f(u) \left(\frac{\partial C_{ц,а}}{\partial z} + R_a [C_{ц,г} - C_{ц,г}^p(C_{ц,а})] \right),$$

$$0 < z < l_a, \quad t > 0, \quad (2)$$

где R — физико-технологический коэффициент; l_a — высота абсорбера. Управление процессом абсорбции осуществляется изменением подачи жидкого компонента в абсорбер, что отражено в модели введением управляющей функции $f(u)$, где u — сигнал управления, поступающий от регулятора.

Для ММ (2) принимались следующие граничные условия:

$$C_{ц,г}(z, t)|_{z=0} = C_{ц,г}^{вх}(t); \quad C_{ц,а}(z, t)|_{z=l_a} = C_{ц,а}^{вх}(t).$$

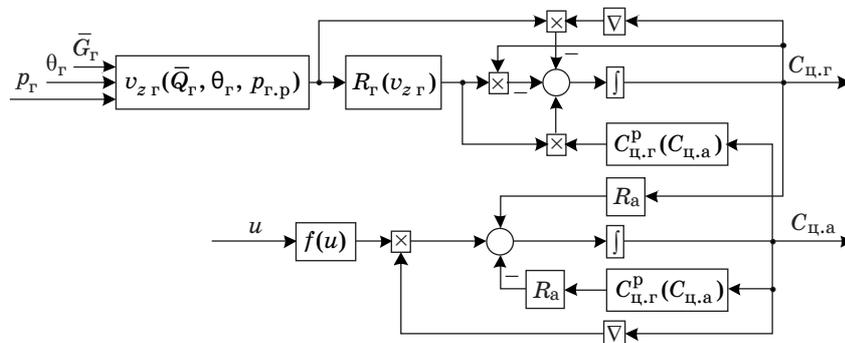
Начальные условия определяются исходными профилями концентраций ЦК по высоте аппарата:

$$C_{ц,г}(z, t)|_{t=0} = C_{ц,г}(z); \quad C_{ц,а}(z, t)|_{t=0} = C_{ц,а}(z).$$

Соответствующая (2) структурная схема приведена на рис. 2.

Математические модели подсистем «Ректификация», «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение» имеют свои особенности. В отличие от абсорбции, при десорбции заметная роль отводится теплообменным процессам. В процессе абсорбции достижение заданной концентрации ЦК в газе осуществляется в результате массообмена между газом и абсорбентом при постоянной температуре. В процессе десорбции обеспечение заданной концентрации ЦК в абсорбенте зависит от температуры кипения абсорбента при постоянном давлении.

Из схемы концептуальной модели (см. рис. 1) видно, что подсистема «Ректификация» не имеет



■ Рис. 2. Структурная схема управляемого массообменного процесса в абсорбере

непосредственного управления. Теплообменные процессы подсистемы «Ректификация» регулируются косвенно через управляемые теплообменные процессы в подсистемах «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение».

Основная задача регулирования теплообменных процессов в испарителе сводится к управлению расходом топливного газа или газозооной смеси, подаваемой в горелку в целях поддержания температуры абсорбента в испарителе. Для составления ММ управляемых теплообменных процессов подсистемы «Выпаривание» учтены следующие допущения:

— продольное перемешивание в каждом из потоков теплоносителей отсутствует, т. е. физические среды в аппарате движутся в режиме идеального вытеснения;

— поперечное перемешивание в потоках теплоносителей считается идеальным. Это предположение позволяет разрабатывать одномерную ММ, в которой учитывается изменение температуры только по длине аппарата;

— термическое сопротивление стенок испарителя сравнительно мало. Выполнение этого условия означает, что температура стенки $\theta_{ст}(x, t)$, разделяющей теплоносители, постоянна по толщине стенки.

При сделанных допущениях ММ управляемого нестационарного теплообмена в испарителе с учетом стенки жаровой трубы, разделяющей теплоносители, принимает вид

$$\begin{aligned} \partial\theta_{д.г}/\partial t &= -f(u)(\partial\theta_{д.г}/\partial x) - R_{д.г}(\theta_{д.г} - \theta_{ст}); \\ \partial\theta_a/\partial t &= v_a(\partial\theta_a/\partial x) + R_a(\theta_{ст} - \theta_a); \\ d\theta_{ст}/dt &= R_{д.г.ст}(\theta_{д.г} - \theta_{ст}) - R_{а.ст}(\theta_{ст} - \theta_a), \end{aligned} \quad (3)$$

где $f(u) = v_{д.г}(Q_{т.г})$ — функция управления скоростью дымовых газов. При этом цель регулирования состоит в стабилизации температуры θ_a на выходе испарителя. Система регулирования теплообменных процессов осуществляет прямое регулирование температурой абсорбента на выходе испарителя за счет изменения подачи расхода топливного газа в горелку испарителя. Также в системе предусмотрена коррекция температуры $\theta_{д.г}$ дымовых газов.

Для ММ (3) учитывались следующие начальные распределения температур теплоносителей:

$$\theta_{д.г0}(x) = \theta_{д.г}(x, t)|_{t=0}; \quad \theta_{a0}(x) = \theta_a(x, t)|_{t=0},$$

и граничные условия

$$\theta_{д.г}(x)|_{x=l} = \theta_{д.г}^{вх}(t), \quad \theta_a(x)|_{x=0} = \theta_a^{вх}(t).$$

Основная задача системы регулирования АВО состоит в поддержании заданной температуры

жидкой фазы на выходе из аппарата. Для управляемых теплообменных процессов подсистемы «Воздушное охлаждение» приняты основные допущения:

— в конденсационных секциях среда движется в режиме идеального вытеснения;

— поперечное перемешивание считается идеальным. Данное допущение приводит к составлению одномерной модели, в которой учитывается динамическое распределение температуры только по длине конденсационных секций АВО;

— теплообменный процесс сопровождается конденсацией насыщенного пара;

— допускается накопление теплоты в трубах конденсационной секции;

— трубы в конденсационных секциях выполнены с оребрением.

Динамическая ММ управляемого теплообменного процесса в конденсационных секциях АВО, учитывающая принятые допущения и зависимость (1):

$$\begin{aligned} \partial\theta_{н.п}/\partial t &= v_{н.п}(\bar{G}_{н.п}, \theta_{н.п})(\partial\theta_{н.п}/\partial x) - \\ &\quad - R_{н.п}[\theta_{н.п} - \theta_{ст}]; \\ d\theta_{ст}/dt &= R_{ст1}f(u) + R_{ст2}\theta_{н.п} - R_{ст}\theta_{ст}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $v_{н.п}(\bar{G}_{н.п}, \theta_{н.п})$ — скорость насыщенного пара, зависящая от расхода и температуры пара при постоянном давлении в аппарате; $f(u) = \theta_{ср}(Q_v)$ — функция управления температурой среды; $\theta_{ср}$ — температура окружающей среды (воздуха); Q_v — расход воздуха.

Второе уравнение в системе (4) — обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка. Для его однозначного решения необходимо знать начальное условие $\theta_{ст}$ в момент времени $t = 0$.

Величину $\theta_{ср}$ можно получить из экспериментальной зависимости

$$\theta_{ср} = (\theta_{ср0} - \theta_{уст}) \exp(-\beta Q_v) + \theta_{уст}, \quad (5)$$

причем коэффициент β определяется по формуле

$$\beta = \ln[(\theta_{ср0} - \theta_{уст}) / (q\theta_{уст} - \theta_{уст})] / Q_{v \max}, \quad (6)$$

где $\theta_{ср0}$ — начальная средняя температура окружающей среды при неработающем вентиляторе; $\theta_{уст}$ — установившееся значение температуры окружающей среды; $Q_{v \max}$ — максимальный расход воздуха, нагнетаемый вентилятором; q — коэффициент, выбираемый из интервала $[1,001; 1,02]$. Этот коэффициент должен отвечать неравенству $q < \theta_{ср0} / \theta_{уст}$.

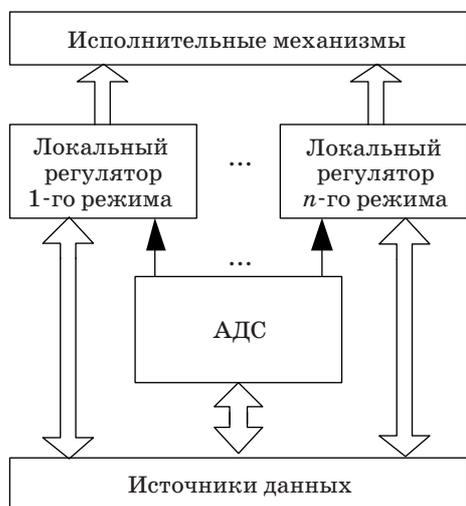
Граничные условия для температурного профиля пара ММ (4) определяются выражениями

$$\theta_{н.п}(x)|_{x=0} = \theta_{н.п}^{вх}(t); \quad \theta_{н.п}(x)|_{x=l_{АВО}} = \theta_{н.п}^{вых}(t),$$

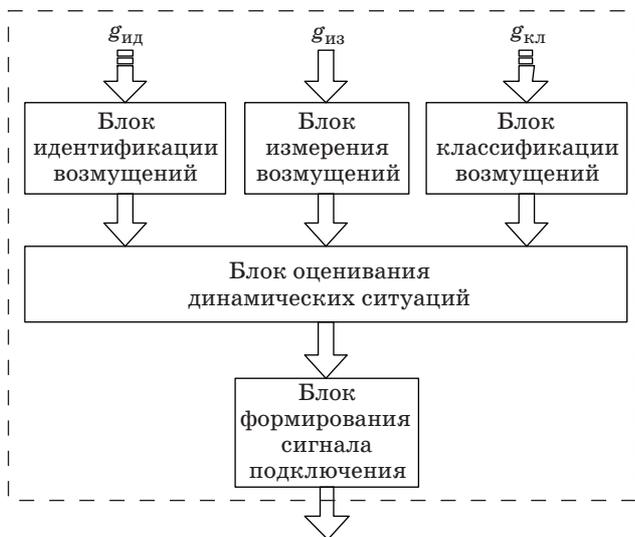
где $l_{АВО}$ — длина трубы теплообменника.

(линейных, нелинейных) и анализатор динамических ситуаций АДС. Локальные регуляторы обслуживают соответствующие технологические режимы; АДС обрабатывает полученный набор информативных признаков текущей динамической ситуации и дает команду на включение соответствующего локального регулятора.

На схеме видно, что АДС и локальные регуляторы обмениваются набором информативных признаков с источниками данных. Источниками данных являются сигналы, поступающие из информационно-измерительной системы, а также информация из баз данных и баз знаний. АДС формирует сигналы на подключение локальных регуляторов, которые в свою очередь формируют управляющие сигналы для исполнительных механизмов.



■ Рис. 4. Функциональная схема многорежимного регулятора



■ Рис. 5. Функциональная схема АДС

Функциональная схема АДС для ТП абсорбционной осушки природного газа представлена на рис. 5. На схеме приняты обозначения:

$g_{ид}$ — непосредственно не измеряемые возмущения, но которые могут быть идентифицированы по результатам наблюдения процесса регулирования или получены по результатам, взятым из баз данных. Например, концентрации целевого компонента в газовой и жидкой фазах непосредственно не измеряются, но могут быть получены на основании данных специальных экспериментов и сохраненных в базах данных;

$g_{из}$ — измеряемые возмущения. В частности, доступны измерениям возмущения по расходу, давлению, температуре газа и жидкости, по температуре точки росы газа, по уровню жидкости и т. п.;

$g_{кл}$ — возмущения, которые не имеют точной количественной оценки. Они выявляются при качественном анализе возмущений. Функция блока классификации возмущений заключается в распознавании образа воздействия $g_{кл}$ на основе всего объема информации, измеренной или полученной из баз данных и баз знаний. Например, данные о состоянии технологического оборудования, условия образования гидратных пробок в трубопроводах.

Информация от блоков возмущений поступает в блок оценивания ситуаций, в котором происходит обработка информации, принимается решение о текущей динамической ситуации и генерируется соответствующая оценка. Полученная оценка поступает в блок формирования сигнала подключения локального регулятора, «настроенного» на динамическую ситуацию.

Блоки, входящие в АДС, реализуются как программные блоки. При реализации программного АДС можно воспользоваться одной из платформ анализа данных, которая предполагает обработку информации, полученной из различных источников, в режиме реального времени. Например, в случае управления процессами газопромышленной технологии информация от системы датчиков должна обрабатываться в целях выявления, классификации или прогнозирования возможных событий, а также формирования на основе этих данных управляющего воздействия на объект.

Отметим, что принцип и метод многорежимного регулирования могут лечь в основу разработки не только системы автоматического управления, но и системы диагностирования состояния объекта (норма, предаварийный режим, аварийный режим).

Многорежимное регулирование на основе ММ (2) производится с помощью управляющей функции $f(u)$. На каждом режиме сигнал u отвечает П-закону управления, обеспечивающему требуемые соотношения расходов «газ–абсорбент». Формируемая нелинейная характеристика регулятора позволяет получать необходимый показатель на любом допустимом режиме и не требует переключений.

Результаты компьютерного моделирования управляемых взаимосвязанных массообменных процессов КТС «Абсорбция — Десорбция» при подаче ступенчатого возмущения по скорости газа на входе абсорбера представлены на рис. 6. Изменение скорости газа от номинальной до минимальной вызывает плавное отклонение выходных величин от первоначальных значений и постепенный переход к заданным значениям по ЦК в газовой фазе на выходе абсорбера.

Как показал вычислительный эксперимент с применением многорежимного регулятора, значения содержания ЦК в жидкой фазе лежат в области допустимых значений, выявленных при наблюдении за ТП на реальном производственном объекте. Для регенерированного диэтиленгликоля эти значения лежат в области $[0,71 \div 4,1]$ %вес, для насыщенного диэтиленгликоля — $[2,45 \div 9,9]$ %вес. В случае ступенчатого снижения скорости газа содержание ЦК в регенерированном диэтиленгликоле установилось в новом значении 3,3 %вес., а в насыщенном — 7,1 %вес. В случае подачи возмущения в виде прямоугольных импульсов содержание ЦК в регенерированном диэтиленгликоле устанавливалось в значении 1,2 %вес., а в насыщенном — 4,9 %вес.

Следует отметить, что базовые месторождения ОАО «Газпром» (Уренгойское, Ямбургское и т. п.) работают в режиме падающей добычи, что ставит новые научные задачи по разработке методов и технологий моделирования управляемых КТС типа «ДКС — УКПГ — ДКС» (ДКС — дожимная компрессорная станция) и газотранспортных систем.

Новым направлением может стать исследование ММ абсорбционных процессов очистки природного газа от кислых компонентов. Также перспективным представляется разработка и ис-

следование моделей управляемых процессов охлаждения природного газа и извлечения из него углеводородных компонентов с применением метода низкотемпературной сепарации.

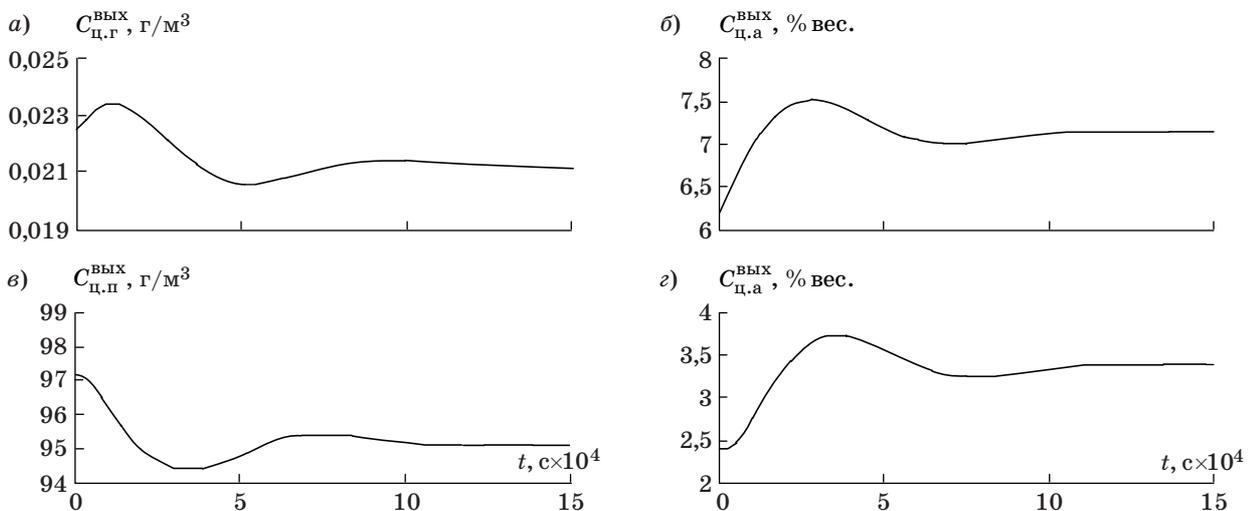
Заключение

Предложенная концептуальная модель КТС «Абсорбция — Десорбция» характеризуется разнородностью физических процессов, взаимосвязанной структурой и обоснованным выбором входных, внутренних, измеряемых и регулируемых величин, что позволяет на ее основе разрабатывать ММ управляемых процессов.

На основе обоснованно принятых допущений разработаны динамические пространственно распределенные ММ управляемых массо- и теплообменных процессов подсистем «Абсорбция газа», «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение» КТС «Абсорбция — Десорбция», которые отличаются учетом функциональной зависимости скорости газообразной фазы от внешних (расхода, давления и температуры газа в пласте) и внутренних (температура пара в аппаратах и др.) возмущающих факторов, что позволяет адекватно управлять процессами в условиях изменения этих факторов.

Практическая ценность полученных результатов заключается в разработанных ММ управляемых массо- и теплообменных процессов абсорбционной осушки природного газа, позволяющих объяснять и прогнозировать поведение комплекса при различных внешних факторах, определяющих режимы функционирования ТП.

Применение в системе управления принципа многорежимного регулирования обеспечивает поддержание заданного качества газа в широком интервале изменения давления, температуры и расхода.



■ Рис. 6. Графики переходных процессов в абсорбере и РК по газовой/паровой (а, в) и жидкой (б, г) фазам при ступенчатом снижении скорости газа

Литература

1. Рамм В. М. Абсорбция газов. — М.: Химия, 1976. — 656 с.
2. Тараненко Б. Ф., Герман В. Т. Автоматическое управление газопромысловыми объектами. — М.: Недра, 1976. — 213 с.
3. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. — М.: Высш. шк., 1991. — 400 с.
4. Бутковский А. Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. — М.: Наука, 1979. — 224 с.
5. Рапопорт Э. Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. — М.: Высш. шк., 2005. — 292 с.
6. Малков А. В., Першин И. М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. — М.: Научный мир, 2012. — 476 с.
7. Ogunnaike В. А., Ray W. H. Process Dynamics, Modeling, and Control. — Oxford University Press, 1994. — 1260 p.
8. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Динамические модели управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа // Приоритетные направления развития Уренгойского комплекса: сб. науч. тр. / ООО «Газпром добыча Уренгой». М.: Недра, 2013. С. 242–253.
9. Абрамкин С. Е. Анализ технологического процесса абсорбционной осушки газа как объекта управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2007. № 3. С. 24–31.
10. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Математическая модель массотеплообменных процессов технологического комплекса абсорбционной осушки газа // Материалы 6-й науч. конф. «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 220–224.
11. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Кузьмин Н. Н. Моделирование управляемых массо- и теплообменных процессов в системе подготовки природного газа к транспортировке // Аналитическая механика, устойчивость и управление: тр. X Междунар. Четаевской конф., Казань, 2012. Т. 1. С. 3–10.
12. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Разработка математической модели технологического комплекса «Абсорбция — Десорбция» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 1. С. 29–33.
13. 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.
14. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Поляшова К. А. Математическая модель управляемого теплообменного процесса в испарителе // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 7. С. 32–36.
15. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Кузьмин Н. Н. Математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов в технологическом комплексе систем «Абсорбция — Десорбция» // Изв. ЮФУ. Технические науки. Системный синтез и прикладная синергетика. 2011. № 6. С. 255–264.
16. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Наседкин А. В. Исследование математической модели массообменного процесса в ректификационной колонне // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 6. С. 30–36.
17. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Динамические модели управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений: науч.-техн. сб. М.: Газпром экспо, 2012. № 2. С. 53–61.
18. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Особенности управления комплексом технологических систем «Абсорбция — Десорбция» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 4. С. 41–47.
19. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Кузьмин Н. Н. Особенности управления технологическим процессом десорбции абсорбента // Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа: материалы Всерос. науч.-практ. интернет-конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. С. 66–69.
20. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Исследование динамической математической модели взаимосвязанных тепломассообменных процессов в ректификационной колонне // Сб. науч. тр. ООО «ТюменНИИ-гипрогаз». 2013. С. 60–68.
21. Филимонов Н. Б. Концепция многорежимного регулирования // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: межвуз. сб. науч. тр. / НЭТИ. Новосибирск, 1988. С. 88–92.

UDC 681.51.011

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.41

Mathematical Modeling of Controlled Processes of Natural Gas Dehydration

Dushin S. E.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, dushins@yandex.ru

Abramkin S. E.^a, PhD, Tech., Assistant Professor, abrsergey@yandex.ru

^aSaint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Working out dynamic mathematical models of controlled processes of natural gas dehydration. **Results:** The conceptual model of heat and mass transfer processes which performs the complex of technological systems «Absorption — Desorption» as an object of control. There are provided and described mathematical models of the controlled mass transfer processes in a packed-type absorber as well as the transfer processes in an evaporator and in a cooling unit. Such features of the models as adoption of assumptions, spatial distribution of the values and taking into account the functional dependence of the gaseous phase on internal and external disturbing factors, — all this helps to control adequately the processes when the conditions of those factors are changed. A multi-mode control for simulated processes is offered. **Practical relevance:** These mathematical models of controllable mass and heat exchange processes of natural gas dehydration by absorption allow to explain and to predict the behavior of complex technological systems for complex gas preparation at various operation modes. The use of multi-mode control provides maintenance of a permanent gas quality in a wide range of pressure, temperature and flow changes.

Keywords — Natural Gas Dehydrating by Absorption, Desorption, Mass Transfer, Heat Transfer, Mathematical Modeling, Conceptual Model, Partial Differential Equation, Controlled Technological Process, Multimodal Control.

References

- Ramm V. M. *Absorbtsiia gazov* [Absorption of Gases]. Moscow, Khimiia Publ., 1976. 656 p. (In Russian).
- Taranenko B. F., German V. T. *Avtomaticheskoe upravlenie gazopromyslovymi ob'ektami* [Automatic Control of Gas Production Works]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 213 p. (In Russian).
- Kafarov V. V., Glebov M. B. *Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv* [Mathematical Modeling of Basic Processes of Chemical Production]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1991. 400 p. (In Russian).
- Butkovskii A. G. *Kharakteristiki sistem s raspredelennymi parametrami* [Features of Distributed Parameter Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 224 p. (In Russian).
- Rapoport E. Ia. *Analiz i sintez sistem avtomaticheskogo upravleniia s raspredelennymi parametrami* [Analysis and Synthesis of Automatic Control Systems with Distributed Parameters]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 2005. 292 p. (In Russian).
- Malkov A. V., Pershin I. M. *Sistemy s raspredelennymi parametrami. Analiz i sintez* [Systems with the Distributed Parameters. Analysis and Synthesis]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2012. 476 p. (In Russian).
- Ogunnaike B. A., Ray W. H. *Process Dynamics, Modeling, and Control*. Oxford University Press, 1994. 1260 p.
- Abramkin S. E., Dushin S. E. Dynamic Models of Controlled Processes of Natural Gas Dewatering. In: *Prioritetnye napravleniia razvitiia Urengoi'skogo kompleksa* [Priority Lines of Development of the Urengoy's Complex]. Moscow, Nedra Publ., 2013, pp. 242–253 (In Russian).
- Abramkin S. E. Analysis of Technological Process of the Absorption Gas Dewatering as a Control Object. *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2007, no. 3, pp. 24–31 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E. Mathematical Model of the Mass and Heat Transfer Processes in the Technological Complex of Absorption Gas Dehydration. *Materialy 6 nauchnoi konferentsii "Upravlenie i informatsionnye tekhnologii" (UIT-2010)* [Proc. 6th Sci. Conf. "Control and Information Technology"]. Saint-Petersburg, 2010, pp. 220–224 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E., Kuz'min N. N. Modelling of Controlled Mass- and Heat Transfer Processes in the System of Preparing Natural Gas for Transportation. *Trudy X Mezhdunarodnoi Chetaevskoi konferentsii "Analiticheskaiia mekhanika, ustoiichivost' i upravlenie"* [Proc. X Int. Chetaevskoi Conf. "Analytical Mechanics, Stability and Control"]. Kazan', 2012, vol. 1, pp. 3–10 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E. Development of Mathematical Model of the Technological Complex "Absorption-Desorption". *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2011, no. 1, pp. 29–33 (In Russian).
- Abramkin S. E., Grudiaeve E. K., Dushin S. E. The Control System of Process of the Heat Exchange Inside Aerial Condenser. *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2011, no. 6, pp. 35–40 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E., Poliashova K. A. Mathematical Model of the Control Heat Exchange Process in Evaporator. *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2011, no. 7, pp. 32–36 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E., Kuz'min N. N. The Mathematical Model of the Controlled Mass and Heat Transfer Processes in the Complex of Technological Systems "Adsorption-Desorption". *Izvestiia IuFU*, 2011, no. 6, pp. 255–264 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E., Nasedkin A. V. Mathematical Model of the Mass Exchange Processes in Rectifying Column. *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2012, no. 6, pp. 30–36 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E. Dynamic Models of the Controlled Processes of Natural Gas Absorption Dewatering. *Geologiya, burenie, razrabotka i ekspluatatsiia gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdenii*. Moscow, Gazprom ekspozitsiya Publ., 2012, no. 2, pp. 53–61 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E. Peculiarities of Control of Complex Technological Systems "Absorption-Desorption". *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2013, no. 4, pp. 41–47 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E., Kuz'min N. N. Special Features of the Control over Process of the Absorbent Desorption. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii "Problemy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov dobychi, transporta i pererabotki nefiti i gaza"* [Proc. All-Russian Sci. and Pract. Internet-Conf. "Problems of Automation of the Technological Processes of Mining, Transportation and Processing of Oil and Gas"]. Ufa, 2013, pp. 66–69 (In Russian).
- Abramkin S. E., Dushin S. E. Study of Dynamic Mathematical Model of Interdependent Heat and Mass Transfer Processes in a Rectifying Column. *Sbornik nauchnykh trudov OOO "TiumenNIIgiprogaz"*, Tiumen', 2013, pp. 60–68 (In Russian).
- Filimonov N. B. A Concept of Multi-mode Control. *Avtomaticheskoe upravlenie ob'ektami s peremennymi kharakteristikami*. Novosibirsk, NETI Publ., 1988, pp. 88–92 (In Russian).