

Раздел V. Автоматика и управление

УДК 681.51.011

С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АБСОРБЦИОННОЙ ОСУШКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Цель работы состоит в создании динамических математических моделей управляемых технологических процессов абсорбционной осушки природного газа. На основе изучения потоков, циркулирующих в аппаратах, получена 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, начальных и граничных условий, 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. Концепция многорежимного регулирования применительно к процессу осушки газа основывается на обеспечении различных режимов их функционирования за счет подключения субрегулятора в соответствии со сложившейся динамической ситуацией. Базируясь на полученной информации, многорежимный регулятор в соответствии с текущим технологическим режимом вырабатывает требуемый управляющий сигнал. Практическая значимость разработанных математических моделей управляемых массо- и теплообменных процессов абсорбционной осушки природного газа заключается в возможности объяснения и прогнозирования поведения 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.

Абсорбция; десорбция; массообмен; теплообмен; математическая модель; управляемые процессы; многорежимное управление; Большие Данные.

S.E. Abramkin, S.E. Dushin

MODELING AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF NATURAL GAS DEWATERING

The purpose is to work out a dynamic mathematical models of controlled processes of absorption dehydration of natural gas. On the basis of researches of the flow circulating in the apparatus, there was produced a conceptual model of heat and mass transfer processes in the complex technological systems "absorption-desorption" performed as a control object, characterized by interconnection of heterogeneous physical processes, structure and reasonable choice of input, internal, measured and controlled variables. On the basis of the conceptual model there were developed and studied mathematical models of controlled mass transfer processes in the packing type absorber and heat transfer processes in the evaporator and air cooler. The models are characterized by reasonable assumptions, initial and boundary conditions, the spatial distribution of values and taking into account the functional dependence of the velocity of the gaseous phase of the external and internal disturbing factors that can adequately manage the processes of change in

the conditions of these factors. The multi-mode control of simulated processes is presented. The concept of multi-mode control for the process of gas dewatering is based on providing different modes of operation by connecting a subregulatory in accordance with the current dynamic situation. Based on the information received, the multi-mode regulator according to the current technological mode generates the desired control signal. The practical importance of the developed mathematical models of controlled mass and heat transfer processes of absorption dehydration of natural gas is the ability to explain and predict the behavior of complex technological systems used for the complex gas preparation at various modes of operation. The use of multi-mode control maintains a specified gas quality in a wide range of pressures, temperatures and flow rates.

Absorption; desorption; mass exchange; heat exchange; mathematical model; controlled process; multi-mode control; Big Data.

Введение. В процессе проектирования и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений недостаточно эффективно прогнозируется работа систем добычи, сбора, подготовки и компримирования газа и углеводородного конденсата. Данная проблема проявляется как в начальный, так и в заключительный период разработки месторождений. Это связано с тем, что на стадии формирования проектов разработки месторождений с применением комплексных автоматизированных систем управления (СУ) технологическими процессами (ТП) и в процессе эксплуатации не в полной мере используются возможности математического моделирования.

Накопленный опыт в области разработки СУ объектами газовой промышленности позволяет сделать вывод, что математические модели (ММ) с сосредоточенными параметрами имеют низкую степень соответствия реальным объектам, поскольку они не в состоянии адекватно отражать физику ТП, не позволяют формализовать все многообразие внешних факторов, существенно влияющих на показатели качества функционирования системы [1–10]. Одним из путей выхода из сложившейся ситуации является рассмотрение объектов и процессов с учетом их пространственной распределенности, что требует построения ММ на основе дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) [12, 13]. Примером объектов с распределенными параметрами являются установки комплексной подготовки газа (УКПГ) с абсорбционной осушкой, широко применяемые на газовых месторождениях Крайнего Севера.

В процессе эксплуатации газового или газоконденсатного месторождения на основе измерений формируются Большие Данные о ТП [13, 14]. Например, на газовом промысле производятся в режиме реального времени измерения порядка 1100 физических величин, что за год составляет более 10^9 данных. Эта информация накапливается в базах данных, и каждый месяц обрабатывается в специализированных лабораториях. На основе обработанных данных устанавливается технологический режим добычи газа для каждой УКПГ.

Однако на сегодняшний день не существует аналитической системы, которая позволяла бы эффективно обрабатывать эти данные с целью управления ТП.

Концептуальная модель абсорбционной осушки. Технологический процесс абсорбционной осушки природного газа, осуществляемый по замкнутому циклу (по жидкой фазе), можно представить как комплекс технологических систем (КТС) «Абсорбция–Десорбция». Комплекс состоит из двух взаимосвязанных систем – «Абсорбция газа» и «Десорбция абсорбента».

Система «Абсорбция газа» включает в себя подсистему «Сепарация», в которой происходят процессы отделения от газа механических примесей и капельной жидкости, и непосредственно подсистему «Абсорбция газа», в которой из газа выделяется влага при помощи поглощающего абсорбента, а также подсистему «Разделение фаз». При этом подсистема абсорбции входит в состав замкнутого (по жидкой фазе) контура абсорбционной осушки и определяет в нем основные фазовые потоки.

Система «Десорбция абсорбента» также состоит из ряда подсистем. Выделяются доминирующие подсистемы: «Ректификация», «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение». Процессы в системе «Десорбция» происходят при высокой температуре и низком давлении (технический вакуум).

В основу процесса ректификации псевдобинарной смеси «абсорбент-вода» положено разделение исходной смеси на два практически чистых компонента. Разделение осуществляется в ректификационной колонне (РК) за счет многократного двухстороннего массообменного процесса. Потоки пара и жидкости, так же как и в абсорбере, движутся противотоком. При этом жидкая фаза стекает по поверхности насадки в виде пленки, 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.

Изучение физических закономерностей процессов КТС «Абсорбция–Десорбция», учет конструктивных и технологических особенностей аппаратов, а также режимов их работы позволили разработать концептуальную модель комплекса как объекта управления (рис. 1).

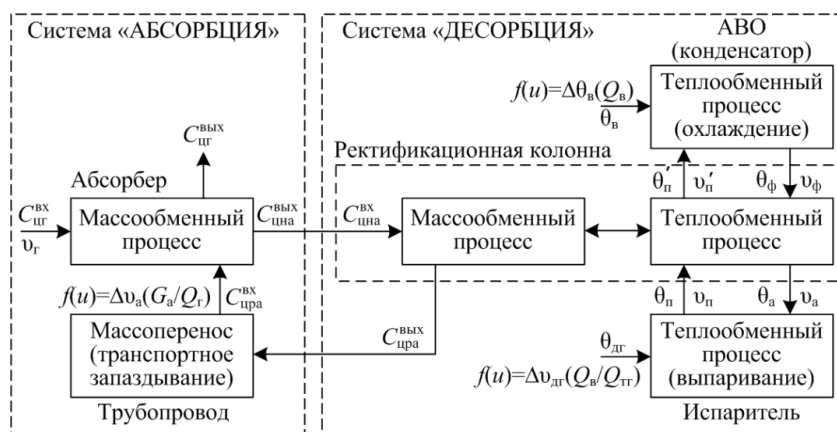


Рис. 1. Структурная схема концептуальной модели комплекса

На схеме приняты следующие обозначения: $C_{цг}^{вх}$, $C_{цг}^{вых}$ – концентрации целевого компонента (ЦК) в газе на входе и выходе абсорбера; v_g – скорость газа; $f(u)=\Delta v_a(G_a/Q_g)$ – 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_g – расход газа; $C_{цра}^{вх}$, $C_{цра}^{вых}$ – концентрации ЦК в регенерированном абсорбенте на входе абсорбера и выходе ректификационной колонны (РК); $C_{цна}^{вх}$, $C_{цна}^{вых}$ – концентрации ЦК в насыщенном абсорбенте на входе РК и выходе абсорбера; θ_n , θ'_n – температура пара на выходе испарителя и РК; v_n , v'_n – 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; θ_s – температура окружающей среды (воздуха); $f(u)=\Delta\theta_v(Q_v)$ – функция управления температурой воздуха, подаваемого в АВО, в зависимости от расхода воздуха, где Q_v – расход воздуха; $\theta_{дг}$ – температура дымовых газов в жаровых трубах испарителя;

$f(u)=\Delta v_{дг}(Q_{в}/Q_{тг})$ – функция управления скоростью дымовых газов, в зависимости от соотношения расходов воздух/топливный газ, где $v_{дг}$ – скорость дымовых газов; $Q_{тг}$ – расход топливного газа.

Концептуальная модель¹ взаимосвязанных физических процессов, происходящих в КТС «Абсорбция–Десорбция», положена в основу составления динамических ММ массо- и теплообменных процессов в целом.

Модель управляемого массообменного процесса. При разработке ММ управляемых массообменных процессов в насадочном абсорбере принимались следующие основные допущения: жидкая фаза в насадках отвечает модели идеального перемешивания; режимом продольного перемешивания фаз можно пренебречь; массообменные процессы между газообразной и жидкой фазами соответствуют гидродинамической модели полного вытеснения; скорость жидкой фазы не меняется при постоянном давлении; концентрация газообразной и жидкой фаз одинакова по сечению аппарата; массопередача на насадке эквимолярная; образование зон простоя и зависание жидкой фазы исключается.

С учетом принятых допущений нелинейная динамическая ММ управляемого массообменного процесса в абсорбере представляется системой ДУЧП:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{гз}}{\partial t} &= -v_{гз}(\bar{G}_z, \theta_z, p_z) \frac{\partial C_{гз}}{\partial z} - R_z(v_{гз})[C_{гз} - C_{гз}^p(C_{жз})]; \\ \frac{\partial C_{жз}}{\partial t} &= f(u) \frac{\partial C_{жз}}{\partial z} + R_{жз}[C_{гз} - C_{гз}^p(C_{жз})], \end{aligned} \quad (1)$$

$$0 < z < l_a, \quad t > 0,$$

где $C_{гз}$, $C_{жз}$ – концентрации ЦК в газе и жидкости (абсорбенте); $C_{гз}^p$ – равновесная концентрации ЦК в газе; $v_{гз}(\bar{G}_z, \theta_z, p_z)$ – скорость газа вдоль оси z , которая зависит от внешних факторов (расхода, температуры и давления газа); l_a – высота абсорбера.

Коэффициенты $R_z(v_{гз})$ и $R_{жз}$ определяются физическими свойствами фаз и геометрическими особенностями аппарата. Управление процессом абсорбции осуществляется изменением подачи жидкого компонента в абсорбер, что отражено введением управляющей функции $f(u)$, где u – сигнал управления, поступающий от регулятора. Соответствующая (1) структурная схема приведена на рис. 2.

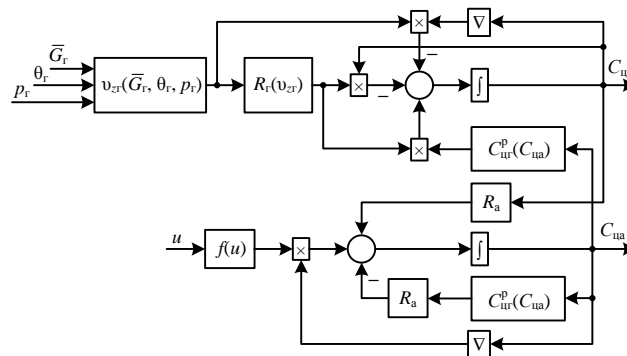


Рис. 2. Структурная схема модели управляемого процесса в абсорбере

¹ Здесь концептуальная модель – это абстрактная модель, которая определяет структуру моделируемого комплекса технологических систем, динамические свойства её элементов и причинно-следственные связи, присущие КТС и существенные для достижения цели моделирования.

Зависимость скорости газообразной фазы от изменения внешних факторов [15] определяется соотношением

$$v_z(\bar{G}_z, \theta_z, p_z) = \frac{V_m \bar{G}_z (\theta_0 + \theta_z) p_0}{(\pi/4) \theta_0 p_z D^2}, \quad (2)$$

где $V_m = 22,4$ – объем моля идеального газа при нормальных условиях; \bar{G}_z – расход газообразной фазы; $\theta_0 = 273 K$ – нормальная температура; θ_z – рабочая температура газообразной фазы, °C; $p_0 = 0,1 MPa$ – нормальное давление; p_z – рабочее давление газообразной фазы, МПа; D – диаметр колонны.

Для ДУЧП (1), характеризующих изменения концентраций целевого компонента в газе и жидкости, граничные условия приняты следующими:

$$C_{цг}(z, t)|_{z=0} = C_{цг}^{ex}(t); \quad C_{цж}(z, t)|_{z=l_a} = C_{цж}^{ex}(t).$$

Начальные условия определены исходными профилями концентраций ЦК:

$$C_{цг}(z, t)|_{t=0} = C_{цг}(z); \quad C_{цж}(z, t)|_{t=0} = C_{цж}(z).$$

Результаты моделирования при подаче возмущающего воздействия по скорости газа на входе абсорбера представлены на рис. 3.

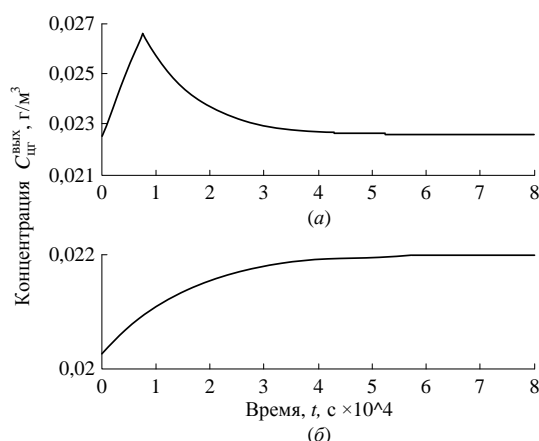


Рис. 3. Графики переходных процессов по концентрации ЦК в газе при прямоугольном импульсном (а) и ступенчатом (б) возмущениях

Модель управляемого теплообменного процесса в испарителе. Анализ работы системы «ДЕСОРБЦИЯ» [16–19] показал, что возможность напрямую управлять тепломассообменными процессами в РК исключена. Управление процессом ректификации в РК осуществляется в испарителе и АВО.

При разработке ММ теплообменного процесса подсистемы «Выпаривание» принималось, что газовый и жидкий потоки движутся в противоточном режиме идеального вытеснения; продольное перемешивание потоков теплоносителей не учитывается; поперечное перемешивание потоков идеально; удельные теплоемкости, коэффициенты теплопередачи по длине аппарата – константы; потери тепла вследствие тепловой изоляции аппарата отсутствуют.

С учетом принятых допущений ММ управляемого теплообменного процесса в испарителе имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \theta_{\text{дз}}}{\partial t} &= -f(u) \frac{\partial \theta_{\text{дз}}}{\partial x} - R_{\text{дз}} (\theta_{\text{дз}} - \theta_{\text{ст}}); \\
 \frac{\partial \theta_{\text{жс}}}{\partial t} &= v_{\text{жс}} \frac{\partial \theta_{\text{жс}}}{\partial x} + R_{\text{жс}} (\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{жс}}); \\
 \frac{d\theta_{\text{ст}}}{dt} &= R_{\text{дзст}} (\theta_{\text{дз}} - \theta_{\text{ст}}) - R_{\text{жст}} (\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{жс}}),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $\theta_{\text{дз}}, \theta_{\text{жс}}, \theta_{\text{ст}}$ – температуры дымовых газов, жидкой фазы и стенки; $v_{\text{жс}}$ – скорость жидкой фазы; $R_{\text{дз}}, R_{\text{жс}}, R_{\text{дзст}}, R_{\text{жст}}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств дымовых газов, жидкости и материала стенки жаровой трубы; $f(u) = v_{\text{дз}} (Q_{\text{мг}}, Q_{\text{в}})$ – функция управления; $Q_{\text{мг}}, Q_{\text{в}}$ – расходы топливного газа и воздуха.

Для ММ (3) принимались следующие граничные условия:

$$\theta_{\text{дз}}(x)|_{x=l} = \theta_{\text{дз}}^{\text{вх}}(t), \quad \theta_{\text{жс}}(x)|_{x=0} = \theta_{\text{жс}}^{\text{вх}}(t),$$

а также начальные распределения температур теплоносителей:

$$\theta_{\text{дз}0}(x) = \theta_{\text{дз}}(x, t)|_{t=0}, \quad \theta_{\text{жс}0}(x) = \theta_{\text{жс}}(x, t)|_{t=0}.$$

Управление теплообменными процессами в испарителе осуществляется прямым регулированием температуры абсорбента $\theta_{\text{жс}}$ за счет изменения соотношения расходов топливного газа $Q_{\text{мг}}$ и воздуха $Q_{\text{в}}$ на входе горелки.

На рис. 4 представлены графики переходных процессов при ступенчатом возмущающем воздействии по температуре жидкости $\theta_{\text{жс}}$ на входе испарителя. По графикам видно, что температура жидкости $\theta_{\text{жс}}^{\text{вх}}$ в управляемой системе возвращается к заданному значению, температура стенки $\theta_{\text{ст}}^{\text{вх}}$ и температура дымовых газов $\theta_{\text{дз}}^{\text{вх}}$ устанавливаются при новых значениях.

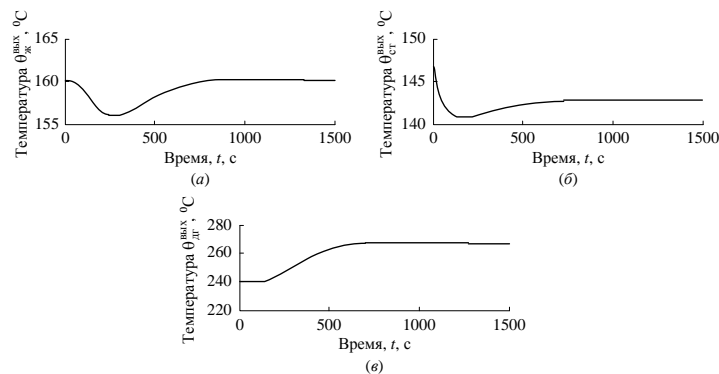


Рис. 4. Графики переходных процессов по температуре жидкости (а), стенки жаровой трубы (б) и дымовых газов (в)

Модель управляемых теплообменных процессов в АВО. Модель управляемых теплообменных процессов в подсистеме «Воздушное охлаждение» разрабатывалась при следующих допущениях: насыщенный пар в конденсационных секциях АВО движется в режиме идеального вытеснения; поперечное перемешивание идеально; теплообменный процесс сопровождается конденсацией насыщенного пара.

С учетом допущений ММ управляемого теплообменного процесса в конденсационных секциях АВО приобретает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{nn}}{\partial t} &= -v_{nn}(\bar{G}_{nn}, \theta_{nn}) \frac{\partial \theta_{nn}}{\partial x} - R_{nn} [\theta_{nn} - \theta_{cm}], \\ \frac{d\theta_{cm}}{dt} &= R_{c1} f(u) + R_{c2} \theta_{nn} - R_c \theta_{cm}, \end{aligned} \quad (4)$$

где θ_{nn}, θ_{cm} – рабочая температура насыщенного пара и стенки трубного пучка АВО; v_{nn} – скорость насыщенного пара; \bar{G}_{nn} – расход насыщенного пара; $R_{nn}, R_c = R_{c1} + R_{c2}$ – физико-технологические коэффициенты, $f(u) = \theta_\theta(G_\theta)$ – функция управления; θ_θ – температура воздуха; G_θ – расход воздуха.

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

$$\theta_{nn}(x)|_{x=0} = \theta_{nn}^{ex}(t); \quad \theta_{nn}(x)|_{x=l_{avo}} = \theta_{nn}^{bex}(t),$$

где l_{avo} – длина трубы теплообменника.

Начальные распределения температур вдоль трубы АВО:

$$\theta_{nn}(x)|_{t=0} = \theta_{nn}^{ex}(x); \quad \theta_{cm}(x)|_{t=0} = \theta_{cm}^{ex}(x).$$

Структурная схема ММ управляемого теплообменного процесса в конденсационных секциях АВО представлена на рис. 5.

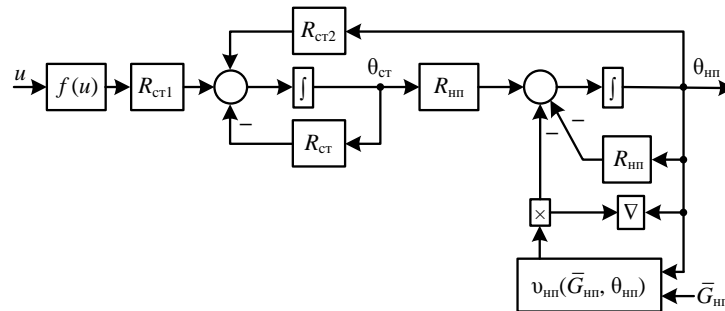


Рис. 5. Структурная схема модели управляемого теплообмена в подсистеме «Воздушное охлаждение»

На рис. 6 приведены графики переходных процессов при ступенчатом возмущающем воздействии по температуре пара на входе АВО. Возмущение подавалось через 100 с. По графикам видно, что температура насыщенного пара θ_{nn}^{bex} в управляемой системе возвращается к заданному значению, температура стенки θ_{cm}^{bex} и температура воздуха θ_θ устанавливаются при новых значениях.

Сравнение графиков показывает, что теплообменные процессы устанавливаются более чем на порядок быстрее, чем массообменные процессы.

Многорежимное управление комплексом технологических систем «Абсорбция–Десорбция». Модели управляемых массо- и теплообменных процессов позволяют применять их для разработки и исследования СУ. Данному объекту управления

присущи различные динамические ситуации², обусловленные изменением технологического режима установки и внешних факторов (расход, температура и давление газа). Для поддержания заданных величин в широком интервале изменения воздействий предлагается использовать концепцию многорежимного управления [20].

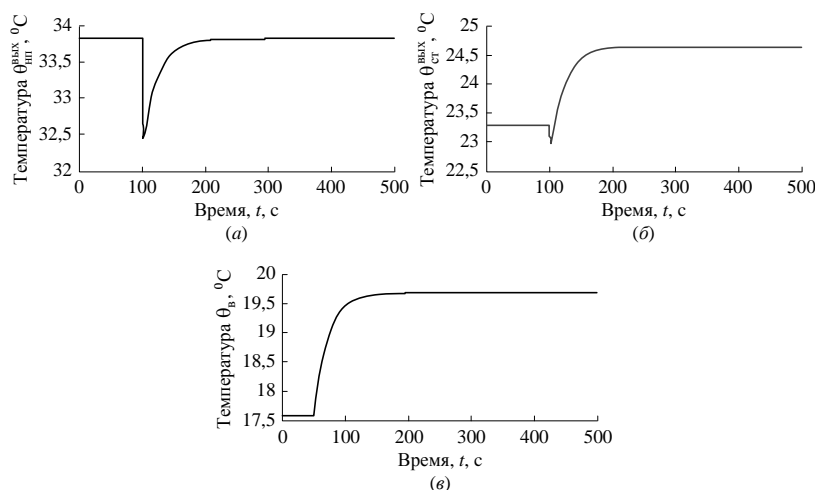


Рис. 6. Графики переходных процессов по температуре насыщенного пара (а), стенки (б) и воздуха (в)

За десятилетия работы газодобывающей промышленности накоплен большой массив данных о режимах работы типовых УКПГ. Для анализа и последующего применения накопленных Больших Данных для целей управления необходимо применение аналитических систем, построенных на базе ММ управляемых процессов. Такие системы позволяют отследить скрытые закономерности и тенденции и использовать их для проектирования новых месторождений и прогностического управления ТП УКПГ в режиме реального времени.

В соответствии с принципом многорежимного регулирования для каждого режима работы КТС устанавливается локальная цель регулирования и выбирается локальный закон регулирования с учетом ранее наработанных рекомендаций и сложившихся типовых решений на УКПГ. В газовой промышленности для каждого типа ТП существуют базы знаний по поддержанию заданного технологического режима, накопленные в процессе разработки месторождений.

Использование концепции многорежимного регулирования применительно к ТП осушки газа основывается на обеспечении различных режимов их функционирования за счет подключения локального регулятора (субрегулятора) из имеющегося множества в соответствии со сложившейся на данный момент времени динамической (технологической) ситуации. Изменение закона управления многорежимного регулятора происходит при получении определенных информативных признаков, которые формируются на основе измеренных величин, характеризующих текущее состояние ТП и состояние окружающей среды. Базируясь на полученной информации, многорежимный регулятор в соответствии с текущим технологическим режимом вырабатывает нужный управляющий сигнал.

² Здесь динамическая ситуация – это совокупность Больших Данных, присущих текущему технологическому режиму, полученных от измерительной системы, из баз данных и баз знаний, на основе которых принимается решение о необходимости изменения режима функционирования объекта.

На рис. 7 представлена функциональная схема многорежимного регулятора. В структуру такого регулятора входит набор локальных регуляторов и анализатор динамических ситуаций (АДС). Локальные регуляторы обслуживают соответствующие технологические режимы. Набор информативных признаков текущей динамической ситуации обрабатывается в АДС и вырабатывается команда на включение соответствующего локального регулятора.

На схеме видно, что АДС и локальные регуляторы обмениваются набором информативных признаков с источниками Больших Данных. Источниками Больших Данных в данном случае являются сигналы, поступающие из информационно-измерительной системы, хранилища баз данных и баз знаний. Сигналы на подключение локальных регуляторов формирует АДС. Они, в свою очередь, формируют управляющие сигналы для исполнительных механизмов.

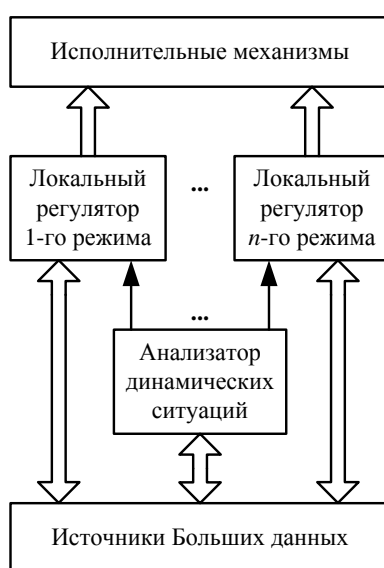


Рис. 7. Функциональная схема многорежимного регулятора

На рис. 8 представлена функциональная схема АДС, которая отражает классификацию возмущающих воздействий для ТП абсорбционной осушки.

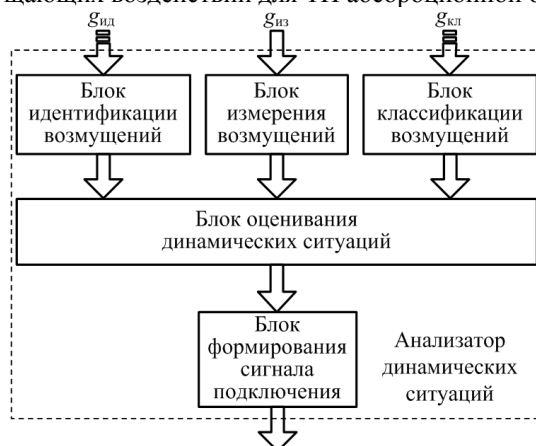


Рис. 8. Функциональная схема анализатора динамических ситуаций

На схеме приняты обозначения: $g_{из}$ – 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.; $g_{ид}$ – непосредственно неизмеряемые возмущения, но которые могут быть идентифицированы по результатам наблюдения процесса регулирования или получены по результатам, взятым из хранилища баз данных. Например, концентрации ЦК в газовой и жидкой фазах непосредственно не измеряются, но могут быть получены на основании данных специальных экспериментов и сохраненных в базах данных; $g_{кл}$ – возмущения, которые не имеют 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.

Выводы. Разработана концептуальная модель процессов комплекса технологических систем «Абсорбция–Десорбция» как объекта управления. В рамках предложенной концепции получены математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов подсистем «Абсорбция газа», «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение». Отличительной особенностью представленных моделей является учтенная в них зависимость скорости газообразной фазы (природный газ, пар) от внешних возмущений. Построение систем управления с учетом этих моделей базируется на принципе многорежимности, который заключается в том, что управляющее воздействие вырабатывается в зависимости от текущей динамической ситуации. Для формирования управляющих воздействий используются данные измерений, получаемые от информационно-измерительной системы ТП в режиме реального времени, а также Большие Данные, накопленные за время эксплуатации комплекса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулиев А.М., Алекперов Г.З., Тагиев В.Г. Технология и моделирование процессов подготовки природного газа. – М.: Недра, 1978. – 232 с.
2. Кафаров В.В. Моделирование химических процессов. – М.: Знание, 1968. – 62 с.
3. Тараненко Б.Ф., Герман В.Т. Автоматическое управление газопромысловыми объектами. – М.: Недра, 1976. – 213 с.
4. Протодьяконов И.О., Муратов О.В., Евлампиев И.И. Динамика процессов химической технологии: учеб. пособие для вузов. – Л.: Химия, 1984. – 304 с.
5. Ahsan A. Evaporation, Condensation and Heat transfer. – InTech, 2011.
6. Cussler E.L. Diffusion mass transfer in fluid systems. – 3rd ed. – Cambridge University Press, 2007.
7. Iguchi Manabu, Ilegbusi Olusegun J. Modeling Multiphase Materials Processes: Gas-Liquid Systems. – Springer, 2010.
8. Luyben W.L. Process Modeling Simulation and Control for Chemical Engineers – 2nd ed. – McGraw-Hill, 1996.
9. Mikles J., Fikar M. Process Modelling, Identification, and Control. – Springer, 2007.
10. Seborg D.E., Mellichamp D.A., Edgar T.F., Doyle III F.J. Process Dynamics and Control, International Student Version – 3rd ed. – Wiley, 2011.
11. Kubrusly C.S., Malebranche H. Sensors and controllers location in distributed systems – a survey // Automatica. – 1985. – Vol. 21, No. 2. – P.117-128.

12. Foias C., Tannenbaum A. Optimal sensitivity theory for multivariate distributed plants // *International Journal of Control*. – 1988. – Vol. 47, No. 4. – P.985-992.
13. Майер-Шенбергер В., Кукьер К. Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. – 240 с.
14. Селезнев К. Проблемы анализа больших данных // *Открытые системы. СУБД*. – 2012. – № 7. – С. 25-29.
15. Чеботарев В.В. Расчеты основных показателей технологических процессов при сборе и подготовке скважинной продукции: учеб. пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2007.
16. Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Кузьмин Н.Н. Математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов в комплексе технологических систем «Абсорбция–Десорбция» // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 6 (119). – С. 255-264.
17. 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: Труды X Международной Четаевской конференции. Т. 1. Секция 1. Аналитическая механика. Казань, 12–16 июня 2012 г.* – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – С. 3-10.
18. Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Поляшова К.А. Математическая модель управляемого теплообменного процесса в испарителе // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2011. – Вып. 9. – С. 32-36.
19. Абрамкин С.Е., Грудяева Е.К., Душин С.Е. Система регулирования теплообменного процесса в аппарате воздушного охлаждения // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2011. – Вып. 6. – С. 35-40.
20. Филимонов Н.Б. Концепция многорежимного регулирования // *Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: Межвуз. сб. науч. тр.* – Новосибирск: НЭТИ, 1988. – С. 88-92.

REFERENCES

1. Kuliev A. M., Alekperov G. Z., Tagiev V.G. Tekhnologiya i modelirovanie protsessov podgotovki prirodnogo gaza [Technology and Modeling of Processes of Natural Gas Preparation]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 232 p.
2. Kafarov V.V. Modelirovanie khimicheskikh protsessov [Simulation of Chemical Processes]. Moscow, Znanie Publ., 1968, 62 p.
3. Taranenko B F., German V.T. Avtomaticheskoe upravlenie gazopromyslovymi ob'ektami [Automatic Control of Gas Production Works]. Moscow, Nedra Publ., 1976, 213 p.
4. Protod'yakonov I.O., Muratov O.V., Evlampiev I.I. Dinamika protsessov khimicheskoy tekhnologii [Dynamics of Processes of Chemical Technologies]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984, 304 p.
5. Ahsan A. Evaporation, Condensation and Heat transfer. InTech, 2011.
6. Cussler E.L. Diffusion mass transfer in fluid systems. 3rd ed. Cambridge University Press, 2007.
7. Iguchi Manabu, Ilegbusi Olusegun J. Modeling Multiphase Materials Processes: Gas-Liquid Systems. Springer, 2010.
8. Luyben W.L. Process Modeling Simulation and Control for Chemical Engineers 2nd ed. McGraw-Hill, 1996.
9. Mikles J., Fikar M. Process Modelling, Identification, and Control. Springer, 2007.
10. Seborg D.E., Mellichamp D.A., Edgar T.F., Doyle III F.J. Process Dynamics and Control, International Student Version. 3rd ed. Wiley, 2011.
11. Kubrusly C.S., Malebranche H. Sensors and controllers location in distributed systems – a survey, *Automatica*, 1985, Vol. 21, No. 2, pp. 117-128.
12. Foias C., Tannenbaum A. Optimal sensitivity theory for multivariate distributed plants, / *International Journal of Control*, 1988, Vol. 47, No. 4, pp. 985-992.
13. Mayer-Shenberger V., Kuk'er K. Bol'shie dannye. Revolyutsiya, kotoraya izmenit to, kak my zhivem, rabotaem i myslim [Big Data. A Revolution that Will Change the Way We Live, Work and Think]. Moscow, Mann, Ivanov i Ferber, 2014, 240 p.
14. Seleznev K. Problemy analiza bol'shikh dannykh [Problems of Analysis of Big Data], *Otkrytye sistemy. SUBD* [Open Systems], 2012, No. 7, pp. 25-29.
15. Chebotarev V.V. Raschety osnovnykh pokazateley tekhnologicheskikh protsessov pri sbore i podgotovke skvazhinnoy produktsii [Calculation of Basic Indicators of Technological Processes in the Collection and Preparation of Well Production]. Ufa, UGNTU Publ., 2007.

16. Abramkin S.E., Dushin S.E., Kuz'min N.N. Matematicheskie modeli upravlyaemykh masso- i teploobmennykh protsessov v komplekse tekhnologicheskikh sistem «Absorbtsiya–Desorbtsiya» [Mathematical models of controlled mass- and heat exchange processes in technologic complex of systems «Absorption–Desorption»], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 6 (119), pp. 255-264.
17. Abramkin S.E., Dushin S.E., Kuz'min N.N. Modelirovanie upravlyaemykh masso- i teploobmennykh protsessov v sisteme podgotovki prirodnogo gaza k transportirovke [The simulation of controlled mass- and heat exchange processes in the system of preparation of natural gas for transportation], *Analiticheskaya mekhanika, ustoychivost' i upravlenie: Trudy X Mezhdunarodnoy Chetaevskoy konferentsii. T. 1. Sektsiya 1. Analiticheskaya mekhanika* [Analytical mechanics, stability and control: Proceedings of X International conference Kitaiskoi. Vol. 1. Section 1. Analytical mechanics. Kazan, 12-16 June 2012]. Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2012, pp. 3-10.
18. Abramkin S.E., Dushin S.E., Polyashova K.A. Matematicheskaya model' upravlyaemogo teploobmennogo protsessa v isparitele [A mathematical model of the controlled heat-exchange process in the evaporator], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya SPbGETU «LETI»], 2011, Issue 9, pp. 32-36.
19. Abramkin S.E., Grudyaeva E.K., Dushin S.E. Sistema regulirovaniya teploobmennogo protsessa v apparate vozdušnogo okhlazhdeniya [The system of regulation of heat exchange process in the device of air cooling], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya SPbGETU «LETI»], 2011, Issue 6, pp. 35-40.
20. Filimonov N.B. Kontseptsiya mnogorezhimnogo regulirovaniya [The concept of multi-mode regulation], *Avtomaticheskoe upravlenie ob"ektami s peremennymi kharakteristikami: Mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Automatic control of objects with varying characteristics: interuniversity collection of scientific papers]. Novosibirsk: NETI, 1988, pp. 88-92.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Григорьев.

Абрамкин Сергей Евгеньевич – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: abrsergey@yandex.ru; 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5; тел.: +79217767124; кафедра автоматизации и процессов управления; к.т.н.; ассистент.

Душин Сергей Евгеньевич – e-mail: dushins@yandex.ru; тел.: +79219704631; кафедра автоматизации и процессов управления; д.т.н.; профессор.

Abramkin Sergey Evgen'evitch – St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI», e-mail: abrsergey@yandex.ru; 5, Professor Popov street, St. Petersburg, 197376, Russia; phone: +79217767124; the department of automation and control Processes; cand. of eng. sc.; assistant professor.

Dushin Sergei Evgen'evich – e-mail: dushins@yandex.ru; phone: +79219704631; the department of automation and control processes; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.51

Г.Е. Веселов, А.С. Сеницын

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНОЙ ПОДВЕСКОЙ С УЧЁТОМ ФИЗИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ АМОТИЗАТОРА

Современная транспортная промышленность неуклонно стремится к повышению безопасности и комфортабельности производимых автотранспортных средств. Одним из наиболее перспективных тенденций в этом направлении считается внедрение амортизаторов с изменяющимися характеристиками. Систему амортизаторов с управляемыми характеристиками принято называть «адаптивной подвеской». Эксплуатационные требования к адаптивной подвеске транспортных средств включают в себя: а) комфорт