

Исследование управляемых процессов охлаждения и конденсации при подготовке газа к транспортировке

С. Е. Абрамкин¹, С. Е. Душин²

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

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

Аннотация. Представлены результаты исследования работы различных структур системы управления температурой в общем выходном коллекторе установки охлаждения. Структуры системы управления построены с учетом известной математической модели объекта управления – аппарата воздушного охлаждения. Результаты вычислительных экспериментов подтвердили адекватность модели реальному технологическому процессу и применимость контуров регулирования на практике.

Ключевые слова: теплообмен; охлаждение; конденсация; аппарат воздушного охлаждения; математическое моделирование; контур регулирования

I. ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы (ТП) подготовки газа к транспортировке характеризуются разнообразными физическими явлениями. В частности, широко распространены теплообменные процессы: охлаждение, нагревание и конденсация [1]. Они легли в основу охлаждения природного газа различными методами, извлечения жидких углеводородов из природного газа методом низкотемпературной сепарации (процессы однократной конденсации) и одновременного охлаждения и конденсации паров, полученных при регенерации диэтиленгликоля и метанола.

Процессы охлаждения, применяемые в газопромышленной технологии, в основном базируются на следующих физических явлениях [2]:

- фазового превращения веществ;
- дросселирования;
- адиабатического расширения газов.

Основным направлением исследования стало изучение процессов воздушного охлаждения природного газа, конденсации паров и управления ими. Это обусловлено широким применением воздушного охлаждения в ТП подготовки природного газа к транспортировке. В частности, охлаждение газа до заданных температур осуществляется для снижения мощности на транспортировку, увеличения пропускной способности и повышения надежности магистральных газопроводов (МГ), а в районах Крайнего Севера, для предотвращения глубокого оттаивания грунта [3].

II. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) имеют различное конструктивное оформление. Наиболее распространены в газовой промышленности АВО горизонтального типа (рис. 1). На рисунке приняты следующие обозначения: 1 – электродвигатель; 2 – муфта сцепления; 3 – редуктор; 4 – кольцевой диффузор; 5 – кольцевая коническая камера; 6 – лопасти вентилятора; 7 – трубы с оребрением; 8 – патрубки коллекторов; 9 – коллекторы; 10 – ограждение вентилятора.

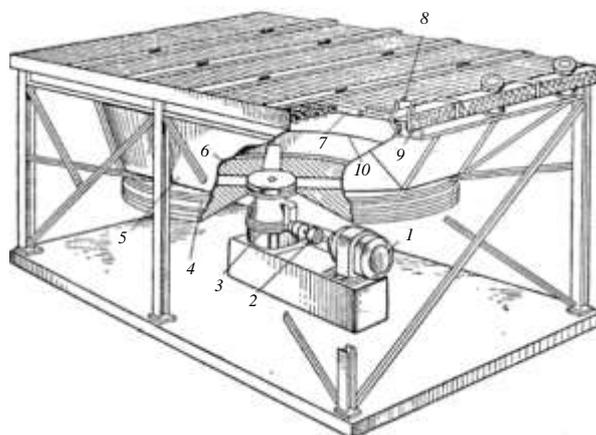


Рис. 1. Аппарат воздушного охлаждения горизонтального типа

Принцип действия АВО заключается в следующем: нагретый природный газ подается через патрубки 8 в коллекторы 9 и далее распределяется по трубам с оребрением 7. Охлаждающий агент (атмосферный воздух) нагнетается лопастями вентилятора 6 в межтрубное пространство. При этом осуществляется перенос тепла от потока газа к стенке трубы с оребрением, которая в свою очередь отдает тепло охлаждающему агенту. Таким образом, газ охлаждается, а нагретый воздух отводится в атмосферу.

В случае получения в качестве продукта дистиллята из насыщенного пара, поступающего от колонны регенерации диэтиленгликоля, в АВО происходит сначала изобарическое охлаждение, а затем процесс конденсации паров.

Отметим, что по способу передачи теплоты АВО относятся к рекуперативным аппаратам, т.е. теплота в них от горячего теплоносителя к холодному передается через разделяющую их теплопроводную стенку одновременно, а направление теплового потока в ней остается неизменным. При этом теплоносители движутся во взаимно перпендикулярных направлениях: хладагент (воздух) совершает однократный ток через теплообменные секции АВО, а нагретый газ или пар движется внутри труб с обрешением либо однократно, либо многократно [3].

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АППАРАТАХ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Математическая модель (ММ) теплообменных процессов в АВО представлена в виде системы дифференциальных уравнений [4]:

$$\frac{\partial \theta_{\Gamma}(x, t)}{\partial t} = -v_{\Gamma} \frac{\partial \theta_{\Gamma}(x, t)}{\partial x} - R_{\Gamma} [\theta_{\Gamma}(x, t) - \theta_{\text{ст}}(x, t)];$$

$$\frac{d\theta_{\text{ст}}}{dt} = R_{\Gamma, \text{ст}} (\theta_{\Gamma} - \theta_{\text{ст}}) - n R_{\text{ст, в}} (\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{в}}),$$

где θ_{Γ} , $\theta_{\text{ст}}$, $\theta_{\text{в}}$ – температура газа (пара), стенки труб и воздуха; v_{Γ} – скорость газа (пара); n – количество труб; R_{Γ} , $R_{\Gamma, \text{ст}}$, $R_{\text{ст, в}}$ – коэффициенты, учитывающие физико-технологические характеристики фаз.

Граничные условия для ММ:

$$\theta_{\Gamma}^{\text{вх}}(t) = \theta_{\Gamma}(x)|_{x=0}; \theta_{\Gamma}^{\text{вых}}(t) = \theta_{\Gamma}(x)|_{x=l},$$

где l – длина труб с обрешением.

Начальные распределения температур вдоль теплообменной секции для ММ:

$$\theta_{\text{ст}}(x)|_{t=0} = \theta_{\text{ст}}^{\text{вх}}(x); \theta_{\Gamma}(x)|_{t=0} = \theta_{\Gamma}^{\text{вх}}(x).$$

Для проведения компьютерного эксперимента осуществлен переход к дискретно-непрерывному виду ММ [4]. Проведено исследование поведения ТП (охлаждения и конденсации) при следующих возмущающих воздействиях:

- изменение расхода газа;
- изменение температуры газа на входе;
- изменение температуры окружающего воздуха.

Анализ полученных результатов показал, что для достижения заданных температур газа (пара) необходимо осуществлять управление теплообменными процессами в АВО [4].

IV. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ В АППАРАТАХ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

В конструкциях АВО предусматриваются технические решения для осуществления процессов управления при

сезонных и суточных изменениях температуры воздуха. Работу АВО стабилизируют следующими способами [5]–[7]:

- изменением частоты вращения колеса вентилятора;
- изменением угла атаки лопастей вентилятора;
- отключением части или всех вентиляторов (зимний режим работы);
- увлажнением воздуха (летний режим работы) за счет орошения водой;
- жалюзированием с целью дросселирования потока нагнетаемого воздуха;
- рециркуляцией части воздуха и дренированием в атмосферу.

Отметим, что последние два способа не обеспечивают экономию электроэнергии.

Жалюзирование – самый распространенный способ регулирования температуры. Управление жалюзи осуществляется либо вручную, либо в автоматическом режиме. Вторым по распространенности является изменение угла атаки лопастей вентилятора. И наконец, третьим и наиболее эффективным способом является плавное изменение частоты вращения колеса вентилятора. Применение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) позволяет достичь относительно высокой точности поддержания заданной температуры фазы (газообразной, жидкой) на выходе АВО, увеличить срок службы оборудования и снизить затраты на электроэнергию. В работе проведено исследование управления ТП на примере АВО типа 2АВГ-75 с двумя вентиляторами и электроприводами. Функциональная схема работы данного АВО представлена на рис. 2.

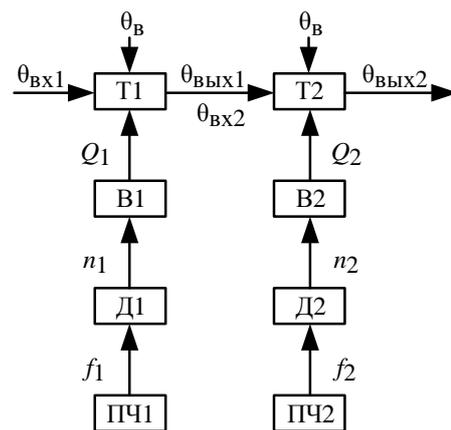


Рис. 2. Функциональная схема работы блока АВО с ЧРП

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

- элементы АВО: Т1, Т2 – теплообменные секции; В1, В2 – вентиляторы; Д1, Д2 – двигатели; ПЧ1, ПЧ2 – преобразователи частоты;
- параметры: $\theta_{\text{вх}}$, $\theta_{\text{вых}}$ – температура фазы (газовой, паровой) на входе и выходе теплообменных

секций; θ_v – температура воздуха; Q – расход воздуха; n – скорость вращения двигателя; f – частота вращения.

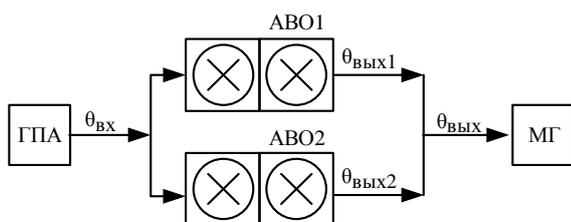


Рис. 3. Информационно-потокоская схема объекта управления

В качестве объекта управления представлена установка охлаждения газа, состоящая из 2 блоков-модулей 2АВГ-75, информационно-потокоская схема которого представлена на рис. 3.

Здесь поток природного газа с температурой $\theta_{вх}$ от газоперекачивающего агрегата (ГПА), через теплообменные секции АВО1, АВО2 подаются в МГ. Температура газа на выходе установки/входе в МГ является суммой температур газа на выходе каждого блока АВО $\theta_{ввых} = \theta_{ввых1} + \theta_{ввых2}$. Отметим, что каждый вентилятор оборудован преобразователем частоты для осуществления плавного регулирования скорости вращения колес вентилятора.

А. Структурные схемы контуров регулирования

Рассмотрим работу 3 структурных схем контуров регулирования температуры из теплообменных секций АВО (рис. 4 – 6).

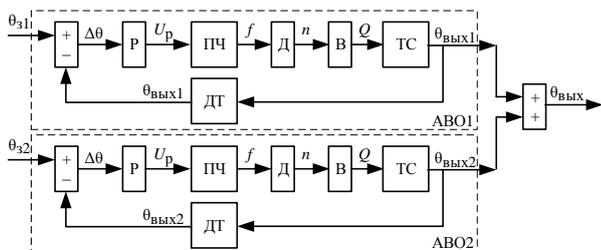


Рис. 4. Структурная схема системы управления температурой отдельных блоков-модулей АВО

На рис. 4 представлена структурная схема №1 системы управления температурой отдельных АВО. Такая структура позволяет осуществлять регулирование температуры газа на выходе каждого АВО. При этом работа АВО1 и АВО2 независима, что делает систему отказоустойчивой. В случае отказа одного из контуров регулирования, производится перенастройка другого контура с целью поддержания заданного технологического режима.

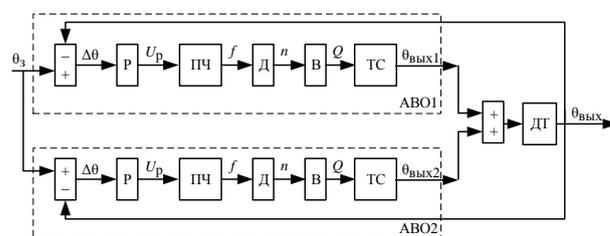


Рис. 5. Структурная схема системы управления температурой в общем выходном коллекторе установки (с двумя регуляторами)

Структурная схема №2 системы управления, представленная на рис. 5, отличается от предыдущего варианта тем, что обратной связью для регуляторов является сигнал, полученный от датчика температуры, расположенного в выходном коллекторе установки. При такой структуре заданная температура газа одинакова для всех блоков-модулей АВО, и температура среды на выходе блоков-модулей АВО приблизительно равна. Минусом такой структуры является то, что при отказе или некорректной работе датчика температуры на выходе установки система теряет управляемость.

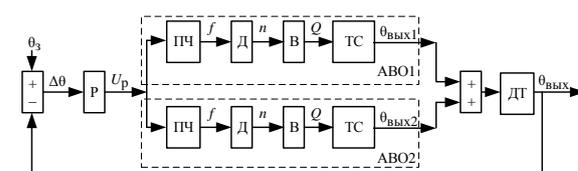


Рис. 6. Структурная схема контура регулирования температуры в общем выходном коллекторе установки (с одним регулятором)

Одна из самых простых структурных схем системы регулирования изображена на рис. 6. К достоинствам такой структуры относится сравнительно невысокая стоимость. Недостатком является низкая отказоустойчивость системы, меньшая точность регулирования по сравнению с двумя предыдущими структурами.

В. Исследование управляемого теплообменного процесса в аппарате воздушного охлаждения

Проведен анализ работы контура регулирования температуры, представленного на рис. 4. В серии экспериментов для каждого блока-модуля АВО на входе регуляторов заданы такие температуры, поддержание которых позволило поддерживать на требуемом уровне температуру в общем выходном коллекторе установки (рис. 7, рис. 8).

Анализ работы системы управления температурой (структурная схема №2), представлен графиком переходных процессов на рис. 9.

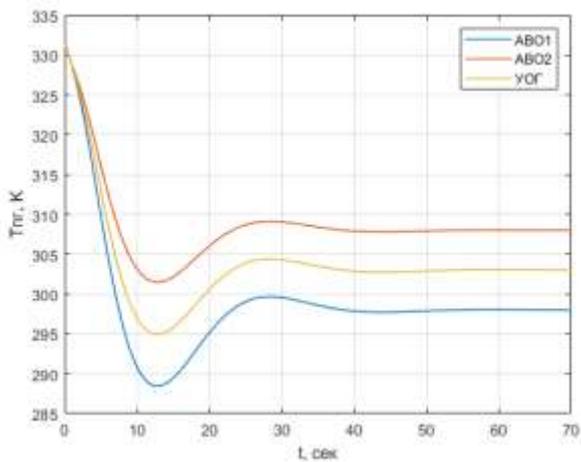


Рис. 7. Графики переходных процессов на выходе отдельных АВО и в общем выходном коллекторе установки

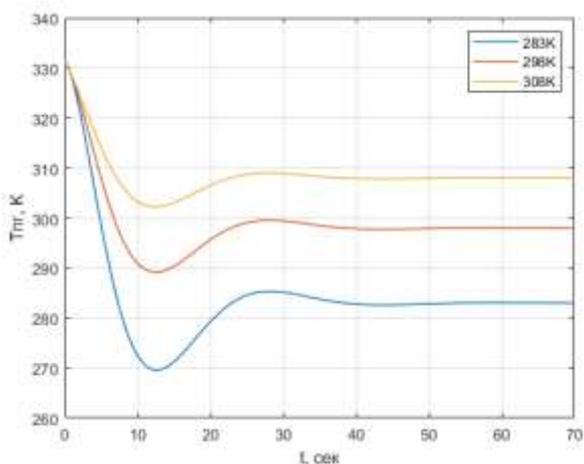


Рис. 8. Графики переходных процессов в общем выходном коллекторе установки при изменении задания на входе регуляторов

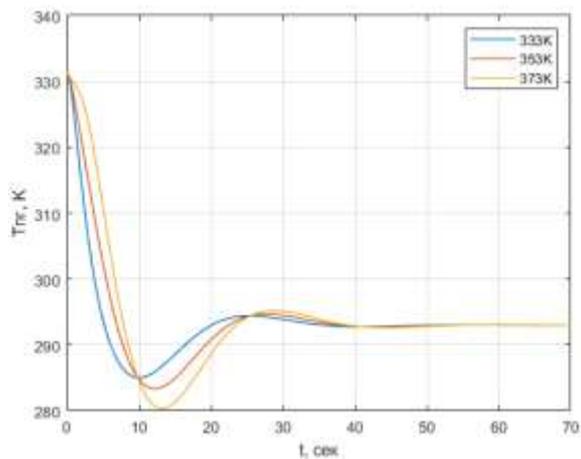


Рис. 9. Графики переходных процессов в общем выходном коллекторе установки при изменении задания на входе регуляторов

Графики переходных процессов, представленные на рис. 7–9, позволяют сделать вывод о том, что обе структуры контура регулирования работают корректно и позволяют достигать заданную температуру газа в общем выходном коллекторе установки независимо от изменения возмущающих воздействий.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании проведен анализ различных структур системы управления температурой газовой фазы в общем выходном коллекторе установки охлаждения. Исследование проведено на основе математической модели объекта управления, полученной в [4]. Оно подтвердило адекватность ее применения при изучении различных технологических процессов газовой промышленности.

Вычислительный эксперимент проведен с помощью компьютерных моделей двух структурных схем системы управления температурой в общем выходном коллекторе установки охлаждения.

Результаты вычислительного эксперимента подтвердили адекватность полученных моделей реальному технологическому процессу.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Васину Дмитрию Михайловичу за помощь в реализации и проверке адекватности моделей в программном средстве Matlab/Simulink.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Добыча, подготовка и транспорт природного газа и конденсата. Справ. рук. в 2-х т. Т.2 / Под ред. Ю.П. Кортаева, Р.Д. Маргулова. М.: Недра, 1984. 288 с.
- [2] Калекин В.С. Процессы и аппараты химической технологии: гидромеханические и тепловые процессы. Ч.1. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. 212 с.
- [3] Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справ. / А.Н. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш, В.И. Евенко, Ю.Н. Васильев, А.Э. Пиир, О.П. Кректунов, В.И. Слухин, А.А. Бриль; Под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
- [4] Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
- [5] Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А.И. Скобло, Ю.К. Молоканов, А.И. Владимирова, В.А. Щелкунов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. 677 с.
- [6] Сидягин А.А., Косырев В.М. Расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения. Н.Новгород: Нижегород. Гос. Техн. ун-т им. Р.Е. Алексева, 2009. 150 с.
- [7] Крюков Н.П. Аппараты воздушного охлаждения. М.: Химия, 1983. 168 с.