

# Моделирование управляемых теплообменных процессов в подогревателях с промежуточным теплоносителем

С. Е. Абрамкин<sup>1</sup>, С. Е. Душин<sup>2</sup>, Н. Д. Сингх<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup>seabramkin@etu.ru, <sup>2</sup>dushins@yandex.ru, <sup>3</sup>ninok\_s@list.ru

**Аннотация.** Целью исследования является обеспечение качества управления теплообменными процессами в подогревателях с промежуточным теплоносителем. Задачами исследования являются анализ подогревателя как объекта управления и разработка математической модели управляемых теплообменных процессов в подогревателях с промежуточным теплоносителем. В результате исследования: на основе анализа объекта определены управляющие и возмущающие воздействия, управляемая величина, получены математическая модель теплообменного процесса и модель с учетом управления по соотношению расходов «топливный газ – воздух», осуществлен переход к дискретно-непрерывной модели для реализации на компьютере.

**Ключевые слова:** математическая модель; теплообмен; подогреватель; уравнения в частных производных; управление

## I. ВВЕДЕНИЕ

Подогреватели жидких (нефть, конденсат газовый) и газовых (природный газ) флюидов с промежуточным теплоносителем являются неотъемлемой частью объектов нефтяной и газовой промышленности. Важным является обеспечение их эффективной эксплуатации с учетом возмущающих факторов, в частности, таких как изменение расхода и температуры нагреваемой среды, температуры окружающего воздуха и режима сжигания топливного газа.

В [1] отмечено, что в настоящее время отсутствуют теоретическая и экспериментальная базы, предназначенные для расчета переменных параметров теплообменных аппаратов. Указана необходимость разработки этих баз с целью проектирования адекватных систем управления тепловыми потоками с учетом аварийных режимов эксплуатации.

Авторы [2] утверждают, что сложность теплоэнергетического оборудования и его математических описаний, с учетом отсутствия эффективного теоретического и программного обеспечения не позволяют эффективно оценивать его режимы работы и проводить идентификацию параметров математических моделей (ММ) для него. Таким образом, актуальной задачей является разработка ММ, алгоритмов и программного обеспечения для качественного решения проблем управления теплоэнергетическими объектами.

Технологическим объектом в данном исследовании является подогреватель конденсата газового нестабильного (КГН) с промежуточным теплоносителем. Он применяется в системе подготовки к транспорту КГН, после его получения на установке низкотемпературной сепарации газа. В качестве промежуточного теплоносителя используется 60 % водный раствор диэтиленгликоля (ДЭГ).

Математические модели теплообменных процессов в типовых теплообменных аппаратах приведены в [3]. Эти ММ построены на основе идеализированных моделей гидродинамики. Однако данные модели не учитывают особенности рассматриваемого класса теплообменников (подогревателей КГН с промежуточным теплоносителем).

В связи с вышеизложенным требуется разработка ММ теплообменного процесса в подогревателе конденсата газового с промежуточным теплоносителем с целью повышения эффективности управления им.

## II. ОПИСАНИЕ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Подогреватель КГН с промежуточным теплоносителем представлен на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: ТГ – топливный газ; ДГ – дымовые газы;  $Q_{ТГ}$  – расход топливного газа объемный;  $G_{КГН}$  – расход КГН массовый;  $\theta_{КГН}$  – температура КГН;  $\theta_{ДГ}$  – температура ДГ;  $V_{ДЭГ}$  – объем ДЭГа;  $\theta_{ДЭГ}$  – температура ДЭГа;  $Q_{В}$  – расход воздуха объемный.

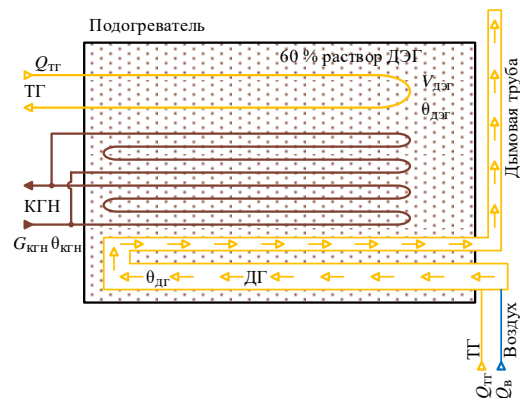


Рис. 1. Потокосхема подогревателя КГН с промежуточным теплоносителем

Подогреватель КГН с промежуточным теплоносителем относится к классу поверхностных (рекуперативных) трубчатых погружных теплообменников. Теплоносители в таких аппаратах разделены стенкой, через которую теплота передается от нагретого теплоносителя к холодному за счет теплопроводности материала стенки. При этом необходимо учесть, что для обеспечения качества КГН и безопасной работы недопустим даже кратковременный его перегрев. В связи с этим применяется способ нагревания с использованием промежуточного теплоносителя.

В данном исследовании получение необходимой температуры КГН на выходе установки комплексной подготовки газа осуществляется способом нагревания дымовыми газами через жидкостную баню (60 % раствор ДЭГа). Следует отметить, что нагревание через жидкостные бани не обеспечивают высоких коэффициентов теплопередачи. Это вызвано тем, что в жидком промежуточном теплоносителе возникают только очень слабые конвекционные токи.

Таким образом, нагретым теплоносителем являются ДГ, полученные в результате сжигания газозоудной смеси. От них тепловая энергия путем радиационно-конвективного теплообмена через стенку передается 60 % раствору ДЭГа. Он нагревает стенку змеевика воспринятым от ДГ теплом. При этом достигается заданная температура КГН на выходе подогревателя.

К технологическим особенностям подогревателя относится то, что змеевик для нагрева КГН разделяется для работы в два потока – верхний и нижний (рис. 1). Он представляет собой четырех- и трехсекционные теплообменные пучки из труб Ду80. С целью интенсификации теплообмена со стороны 60 % раствора ДЭГа секции в подогревателе смещены относительно друг друга. В верхней части подогревателя расположен змеевик нагрева газа. В нижней части расположена топка из труб Ду700, в которой для интенсификации теплообмена и увеличения поверхности нагрева установлены трубки Ду50 в количестве 123 шт.

Подогреватель представляет собой систему с семью динамическими каналами (рис. 2).

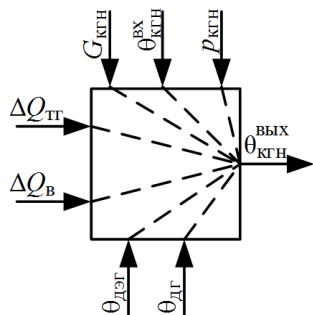


Рис. 2. Структурная схема динамических каналов подогревателя

В качестве управляющих воздействий приняты изменения расходов ТГ  $\Delta Q_{ТГ}$  и воздуха  $\Delta Q_{В}$ , за счет изменения проходного сечения трубопровода ТГ и частоты вращения вентилятора. К возмущающим воздействиям относятся расход КГН  $G_{КГН}$ , температура

КГН на входе  $\theta_{КГН}^{вх}$  в подогреватель, давление КГН  $p_{КГН}$ . Так же к входным переменным, определяющим условия течения процесса, относятся температура ДГ  $\theta_{ДГ}$  и температура 60 % раствора ДЭГа  $\theta_{ДЭГ}$ .

Управляемой величиной является температура КГН на выходе  $\theta_{КГН}^{вых}$  из подогревателя. В [4] указано, что «при подогреве газа и нефти, транспортируемых по трубопроводам, нет необходимости строго поддерживать определенную температуру этих продуктов, поэтому контроль подогрева ограничивается только регулированием температуры ванны». Таким образом, в случае отсутствия требований по качеству регулирования управляемой величиной может быть выбрана температура 60 % раствора ДЭГа  $\theta_{ДЭГ}$ .

Анализ подогревателя как объекта управления показал, что он представляет собой одномерный односвязный объект с одной выходной величиной. С точки зрения распределения температурного профиля ДГ и КГН подогреватель является системой с распределенными параметрами, так как в определенный момент времени температуры ДГ и КГН непрерывно изменяются по длине труб [5].

Подогреватель является пяти емкостным объектом, так как обладает следующими тепловыми емкостями: ТГ в змеевике; КГН в 2 змеевиках; 60 % раствор ДЭГа в корпусе подогревателя и ДГ в топочно-дымовой трубе. Сопротивлением здесь является термическое сопротивление металла змеевиков и топочно-дымовой трубы. Это свойство подогревателя характеризует его инерционность.

С целью обеспечения качества управления процессом нагрева КГН необходимо разработать ММ подогревателя как объекта с распределенными параметрами.

### III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ПРОЦЕССА НАГРЕВА КОНДЕНСАТА ГАЗА НЕСТАБИЛЬНОГО

В подогревателе производится нагрев ТГ и КГН. Данное исследование посвящено процессу нагрева КГН.

С целью получения ММ объекта (процесса нагрева КГН) приняты следующие допущения [6], [7]:

- КГН и ДГ движутся по схеме противотока;
- течение ДГ направлено по оси  $x$ ;
- КГН и ДГ движутся в режиме идеального вытеснения, т. е. продольное перемешивание в каждом из потоков отсутствует;
- поперечное перемешивание в потоках КГН и ДГ считается идеальным;
- КГН течет внутри прямой трубы, погруженной в 60 % раствор ДЭГа;
- удельные теплоемкости и плотности КГН, 60 % раствора ДЭГа и газа в области рассматриваемых температур постоянны;
- коэффициенты теплопередачи постоянны по всей поверхности подогревателя;
- потерями тепла в окружающее пространство пренебрегаем;

- сечение и форма потока неизменны;
- тепловая емкость разделяющих стенок змеевика и топочной трубы мала по сравнению с теплоемкостью КГН, 60 % раствора ДЭГа и ДГ, что позволяет пренебречь накоплением теплоты в стенках змеевиков, топочной трубы и подогревателя в целом;
- при изменении температур движущихся сред тепловой поток через стенки змеевика и топочной трубы устанавливается мгновенно.

С учетом принятых допущений процесс нагрева КГН в подогревателе с промежуточным теплоносителем запишем в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{\text{ДГ}}}{\partial t} &= -v_{\text{ДГ}} \frac{\partial \theta_{\text{ДГ}}}{\partial x} - R_{\text{ДГ}} (\theta_{\text{ДГ}} - \theta_{\text{ДЭГ}}); \\ \frac{\partial \theta_{\text{КГН}}}{\partial t} &= v_{\text{КГН}} \frac{\partial \theta_{\text{КГН}}}{\partial x} + R_{\text{КГН}} (\theta_{\text{ДЭГ}} - \theta_{\text{КГН}}); \\ \frac{d\theta_{\text{ДЭГ}}}{dt} &= R_{\text{ДГ-ДЭГ}} (\theta_{\text{ДГ}} - \theta_{\text{ДЭГ}}) - R_{\text{КГН-ДЭГ}} (\theta_{\text{ДЭГ}} - \theta_{\text{КГН}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $v_{\text{ДГ}}$ ,  $v_{\text{КГН}}$  – скорости ДГ и КГН;  $R_{\text{ДГ}}$ ,  $R_{\text{КГН}}$ ,  $R_{\text{ДГ-ДЭГ}}$ ,  $R_{\text{КГН-ДЭГ}}$  – физико-технологические коэффициенты ДГ, КГН и ДЭГ.

Система уравнений (1) является замкнутой и описывает нестационарный теплообмен с учетом тепловой емкости промежуточного теплоносителя, находящегося между ДГ и КГН.

Граничные условия для (1):

$$\begin{aligned} \theta_{\text{ДГ}}(x, t) \Big|_{x=l_{\text{ТТ}}} &= \theta_{\text{ДГ}}^{\text{ВХ}}(t); \\ \theta_{\text{КГН}}(x, t) \Big|_{x=l_3} &= \theta_{\text{КГН}}^{\text{ВХ}}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $l_{\text{ТТ}}$  – длина топливной трубы;  $l_3$  – длина змеевика.

Начальные распределения температур ДГ и КГН для (1):

$$\begin{aligned} \theta_{\text{ДГ}0}(x, t) &= \theta_{\text{ДГ}}(x, t) \Big|_{t=0}; \\ \theta_{\text{КГН}0}(x) &= \theta_{\text{КГН}}(x, t) \Big|_{t=0}. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку управляющими воздействиями для подогревателя являются расходы ТГ и воздуха, подаваемые в горелку подогревателя, то в первое уравнение системы (1) вместо  $v_{\text{ДГ}}$  подставим функцию управления  $f(u) = \Delta v_{\text{ДГ}} (Q_{\text{ТГ}}/Q_{\text{В}})$ .

При сжигании газовой смеси в камере сгорания (камере радиации) образуется факел. От его температуры, размеров и формы зависит количество тепла, передаваемое 60 % раствору ДЭГа. Эти параметры факела в свою очередь зависят от теплоты сгорания газовой смеси, конструктивных особенностей горелки, расхода воздуха и его температуры.

Отметим, что температуру ДГ можно регулировать, изменяя подачу избыточного воздуха в топочное

пространство. Однако физико-химические процессы в топке характеризуются большой сложностью, быстротечностью, недостаточной изученностью и предельно высокими температурами. Время пребывания газовой смеси в топке не превышает 1,0...2,5 с. Обеспечение работы подогревателя с максимальной тепловой эффективностью, необходимо в режиме реального времени контролировать соотношение расходов «ТГ-воздух» в горелках с целью поддержания избытка воздуха в топке на оптимальном значении.

Таким образом, ММ процесса нагрева КГН в подогревателе (1) с учетом управления примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{\text{ДГ}}}{\partial t} &= -f \left( \frac{Q_{\text{ТГ}}}{Q_{\text{В}}} \right) \frac{\partial \theta_{\text{ДГ}}}{\partial x} - R_{\text{ДГ}} (\theta_{\text{ДГ}} - \theta_{\text{ДЭГ}}); \\ \frac{\partial \theta_{\text{КГН}}}{\partial t} &= v_{\text{КГН}} \frac{\partial \theta_{\text{КГН}}}{\partial x} + R_{\text{КГН}} (\theta_{\text{ДЭГ}} - \theta_{\text{КГН}}); \\ \frac{d\theta_{\text{ДЭГ}}}{dt} &= R_{\text{ДГ-ДЭГ}} (\theta_{\text{ДГ}} - \theta_{\text{ДЭГ}}) - R_{\text{КГН-ДЭГ}} (\theta_{\text{ДЭГ}} - \theta_{\text{КГН}}), \end{aligned} \quad (4)$$

Компьютерная реализация осуществляется в программной среде MATLAB/Simulink. Для этого (1) преобразуем к дискретно-непрерывной модели вида [8]:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{\text{ДГ}i}}{dt} &= - \left( \frac{v_{\text{ДГ}}}{h} + R_{\text{ДГ}} \right) \theta_{\text{ДГ}i} + R_{\text{ДГ}} \theta_{\text{ДЭГ}i} + \frac{v_{\text{ДГ}}}{h} \theta_{\text{ДГ}i-1}; \\ \frac{d\theta_{\text{КГН}i}}{dt} &= - \left( \frac{v_{\text{КГН}}}{h} + R_{\text{КГН}} \right) \theta_{\text{КГН}i} + R_{\text{КГН}} \theta_{\text{ДЭГ}i} + \frac{v_{\text{КГН}}}{h} \theta_{\text{КГН}i-1}; \\ \frac{d\theta_{\text{ДЭГ}i}}{dt} &= R_{\text{ДГ-ДЭГ}} (\theta_{\text{ДГ}i} - \theta_{\text{ДЭГ}i}) - R_{\text{КГН-ДЭГ}} (\theta_{\text{ДЭГ}i} - \theta_{\text{КГН}i}), \\ 0 &\leq i \leq 3, \end{aligned}$$

где  $h$  – шаг дискретизации вдоль испарителя по оси  $x$ .

«Распределенность» вдоль пространственной оси  $x$  сосредоточена в трех точках. Это связано с тем, что пространство подогревателя вдоль оси  $x$  можно условно разбить на 3 сечения: точка ввода КГН в змеевиковую теплообменную секцию; ее середина и точка изменения направления потока КГН в змеевиковой теплообменной секции.

Источниками возмущений для теплообменных процессов в подогревателе являются:

- изменение расхода КГН, подаваемого в змеевиковые секции подогревателя;
- изменение температуры КГН, подаваемого в змеевиковые секции подогревателя.

Задача системы регулирования состоит в стабилизации значения  $\theta_{\text{КГН}}$  на выходе подогревателя. Система регулирования теплообменных процессов осуществляет прямое регулирование температуры КГН на выходе подогревателя изменением соотношения расходов «ТГ – воздух» в горелку подогревателя с коррекцией по температуре  $\theta_{\text{КГН}}$  на выходе

подогревателя. Так реализуется схема каскадного регулятора, в которой внешним контуром регулирования является контур по температуре  $\theta_{\text{КГН}}$  на выходе подогревателя, а внутренним – контур регулирования расходов «ТГ – воздух». Исполнительным устройством в данном случае является клапан регулирующий с электроприводом по расходу ТГ и преобразователь частотный вентилятора по воздуху.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом исследования является получение ММ теплообменных процессов, управляемых по каналу «соотношение расходов «ТГ – воздух» – температура КГН на выходе из подогревателя». При анализе ТП в подогревателе газа с промежуточным теплоносителем выявлены управляющие и возмущающие воздействия, управляемая переменная. Произведен переход от непрерывной модели к дискретно-непрерывной с целью проведения в дальнейшем компьютерных экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рафальская Т.А., Рудяк В.Я. Влияние расходов теплоносителей на параметр теплообменника при переменных режимах его работы // Вестник МГСУ. 2019. №5 (128). С. 621-633.
- [2] Клер А.М., Алексеюк В.Э. Эффективная методика настройки математических моделей теплоэнергетического оборудования на его фактическое состояние // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. №31. С. 136-157
- [3] Вейнский В.В. Математическое моделирование процессов теплообмена на основе идеализированных моделей // Теория и технология металлургического производства. 2010. №1. С. 182-192.
- [4] Кемпбел Д.М. Очистка и переработка природных газов. М.: Недра, 1977. 349 с.
- [5] Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007, 690 с.
- [6] Альбом математических описаний и алгоритмов управления типовыми процессами химической технологии / В.В. Кафаров, В.П. Плюто, В.Л. Перов и др. // Абсорбционные и тепловые процессы: руководящие технические материалы ОКБА. Вып. 1. / Опыт.-конструкт. бюро автоматизации. М.: НИИТЭХИМ, 1965. 20 с.
- [7] Протодьяконов И.О., Муратов О.В., Евлампиев И.И. Динамика процессов химической технологии. Л.: Химия, 1984. 304 с.
- [8] Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.