

# Исследование управляемых процессов теплообмена в кожухотрубном аппарате

С. Е. Абрамкин, С. Е. Душин, А. В. Кузьмина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

seabramkin@etu.ru, dushins@yandex.ru

**Аннотация.** Представлено исследование управляемых процессов теплообмена в кожухотрубном аппарате с противотоком. Разработана математическая модель на основе дифференциальных уравнений в частных производных. Определены начальные и граничные условия. Синтезирована система управления теплообменными процессами в аппарате на основе ПИ-регулятора.

**Ключевые слова:** кожухотрубный аппарат; теплообменный процесс; математическая модель; дифференциальное уравнение в частных производных; синтез системы управления.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Теплообмен является одной из основ технологических процессов (ТП) нефтяной, газовой, газо-, нефтеперерабатывающей и химической промышленности. Он характеризует процессы нагревания, охлаждения, конденсирования, испарения и т. д. Нарушение теплообмена вызывает перерасход взаимодействующих веществ, перегрев или переохлаждение оборудования, ухудшение качества товарной продукции, что в конечном итоге приводит к аварийной ситуации.

Управление процессом теплообмена является сложной задачей, в связи с влиянием множества разнородных факторов (воздействие окружающей среды, изменение входных и выходных переменных, загрязнение теплообменных элементов и т. п.). Еще одной проблемой является ограничение возможности проведения исследования экспериментальным путем. Это связано с тем, что теплообмен, как правило, осуществляется на опасных производственных объектах. Отметим, что существует множество способов управления теплообменом. Таким образом, определить какой способ эффективен для определенного ТП является нетривиальной задачей. Решение подобной задачи основано на исследовании управляемых теплообменных процессов с привлечением математического и компьютерного моделирования.

В данной работе объектом управления является кожухотрубный теплообменный аппарат с противоточным течением взаимодействующих фаз. В трубной его части течет жидкая фаза (холодный теплоноситель), а в межтрубном пространстве паровая фаза (горячий теплоноситель). Теплообмен обеспечивается за счет механизмов конвекции и теплопроводности.

Цель работы заключается в синтезе системы управления процессами в кожухотрубном теплообменном аппарате на основе математической модели (ММ).

## II. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ КОЖУХОТРУБНЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ

Статья [1] посвящена вопросам обеспечения качества управления во всем интервале значений входных параметров кожухотрубного испарителя установки стабилизации нефти. Для решения этой проблемы предлагается использовать ММ в целях управления. В работе предложена ММ кожухотрубного испарителя в виде системы дифференциальных уравнений (ДУ) теплового баланса. При этом коэффициенты в них выражены через конструктивно-технологические параметры. Осуществлен переход к передаточным функциям (ПФ) по различным каналам. Проанализировано построение ММ объекта с корректировкой коэффициентов по экспериментальным данным. Система автоматического регулирования (САР) объекта реализована в *Simulink*. Коэффициенты модели по выбранному критерию найдены с применением функции оптимизации *fminsearch*. Начальными условиям поиска являются вычисленные значения коэффициентов ММ в виде теплового баланса. Средняя относительная погрешность аппроксимации явилась критерием качества модели. Утверждается, что предложенный способ идентификации параметров динамической ММ кожухотрубного испарителя повышает точность моделей. Отмечено, что данная ММ объекта применима при разработке тренажеров, исследовании режимов работы САР и управлении процессом по ММ.

В статье [2] исследование посвящено изучению процесса теплопередачи, происходящего в кожухотрубных теплообменниках. В качестве рабочих сред приняты: азот в межтрубном пространстве и природный газ в трубном пространстве. Взаимодействие между ними происходит через стенку. Моделирование процессов теплопередачи осуществлялось в специализированном пакете моделирования HTRI Xchanger Suite. В результате:

- получены значения переменных состояния термодинамической системы в зависимости от изменения температуры;
- проанализированы физические и термодинамические процессы в аппарате при изменении скоростей фаз и распределении температур фаз в трубном и межтрубном пространстве по длине аппарата, а также при изменении коэффициентов теплоотдачи;
- на основе изменения чисел Рейнольдса определены режимы течения фаз в трубах и кожухе;

- проанализированы изменение коэффициента теплопередачи по пространственной координате аппарата и увеличение тепловой нагрузки с учетом изменения коэффициентов теплоотдачи азота и природного газа.

Адаптивная САР выходной температуры конденсата газового нестабильного в составе ПИ-регулятора и последовательного псевдолинейного корректирующего устройства динамических свойств системы предложена в [3]. Доказана эффективность системы управления при изменении во времени переменных объекта управления.

Проблема моделирования нестационарных процессов теплопереноса в теплообменниках с противоточным течением фаз представлены в [4]. Решение этой проблемы представлено одномерными ММ нестационарного конвективного переноса тепла. Здесь учтены изменения теплофизических параметров по пространственному распределению потоков теплоносителей. Отмечена актуальность данного решения при наличии фазовых переходов в теплоносителях с учетом изменения переменных состояния термодинамической системы.

Система управления температурой на выходе теплообменника с переменной площадью теплообмена представлена в [5]. При этом площадь поверхности изменяется снижением/увеличением уровня нагреваемого теплоносителя в аппарате. В работе приведены две схемы дискретизации ДУ динамики заданного объекта с использованием метода прямых и метода бегущего счета. При использовании схемы с двумя насосами для регулирования площади теплообмена динамика объекта зависит от знака производной сигнала управления. При положительном знаке производной сигнала управления объект описывается системой уравнений с запаздыванием, а при отрицательном знаке – системой уравнений без запаздывания. Однако, несмотря на это, в исследовании утверждается, что для регулирования выходной величины возможно применением стандартных ПИД-регуляторов. Отмечено, что результаты работы можно применять при проектировании систем управления различными типами теплообменников.

В работе [6] показана разработка системы управления теплообменниками с изменяющейся площадью поверхности теплообмена. Представлена методика решения дифференциально-интегральных уравнений статики. Задача решена аналитически путем выражения отношения среднеинтегральных значений температур теплоносителей с учетом пространственной координаты аппарата. Реализованы системы управления с ПИД-регулятором (обыкновенным и с последовательным корректирующим звеном). Эти схемы могут быть основой для построения структур систем управления теплообменников со вставкой. В частности, систем автоматического управления (САУ) с прогнозирующей моделью.

Режимы перемещения элементарных частиц внутри жидкости, возникающие в процессе теплообмена, исследуются в [7]. Посредством имитационного моделирования найдены количественные характеристики каждого режима. Их используют для идентификации и управления тепловыми процессами с учетом внешних возмущений. Управление реализовано системой с переменной структурой.

В [8] представлена динамическая модель трубчатого теплообменника, предназначенная для моделирования теплообменного процесса:

- с учетом вариаций его параметров и характеристик;
- с целью определения оптимальной траектории задания температуры на выходе из аппарата;
- в системах автоматического управления с целью определения параметров регулятора температуры жидкости на выходе из аппарата.

Структура модели представлена тремя блоками, каждый из которых описан ДУ на основе закона сохранения энергии. Модель теплообменника приведена в матричном виде для удобства решения методом Эйлера. Анализ результатов моделирования процессов показал устойчивость и наблюдаемость процессов.

Задача моделирования и оптимального управления ректификационными установками рассмотрена в [9]. Установка исследуется как система с распределенными параметрами. На основе феноменологического подхода, разработана ММ тепловых процессов в аппаратах установки. Она содержит описание процессов тепломассообмена и гидродинамики течения дымовых газов в технологической печи и массопередачи в ректификационной колонне (РК). Так как процессы осуществляются с рециркуляцией взаимодействующих потоков, то граничные условия массообмена в РК включают обыкновенные ДУ. Оптимизация режимов установки осуществляется по критерию качества целевого продукта с учетом необходимых условий оптимальности, которые содержат исходную крайнюю задачу, сопряженную относительно функций Лагранжа. Вариации управлений в области и на границе не являются независимыми, что отражается на структуре сопряженной задачи. Это обусловлено тем, что управляющие функции входят в основные граничные уравнения. При этом применяется вариационное исчисление. Решение исходной и крайней задач позволяет определить оптимальное управление и параметры ТП.

Задача оптимизации системы распределенного контроля для объектов с распределенными параметрами сформулирована и решена в [10]. Оптимизация осуществляется с применением вариационного метода. Получены ПФ основных каналов возмущений, управлений и распределенного контроля. Описание процессов во временной области осуществлено численным методом обращения преобразования Лапласа. Проведен численный эксперимент для противоточного теплообменника. Регулирование теплообменных процессов осуществлялось с использованием И- и ПИ-регуляторов. Показана эффективность распределенного контроля зон одно- и двухконтурной САР.

Проблема построения ММ процессов и аппаратов технологических систем, использующих жидкие среды при совместном течении химических, массо-, теплообменных и других процессов исследована в [11]. Унификация построения моделей объектов основана на общности базовой модели накопления в любом технологическом объеме вещества или энергии, которые обобщены понятием субстанции. Для этого вводятся базовые переменные, обозначающие накапливаемые

субстанции, аккумулирующие объемы и потоки обмена с другими объектами технологической системы. Отмечено, что унификация возможна при сосредоточенности параметров. Аппарат, имеющий единый объем с ТП, представлен системой однотипных базовых ДУ баланса преобразуемых в нем субстанций. Они преобразуются в рабочие ММ изменения технологических переменных аппарата. Для этого вместо базовых переменных подставляют локальные ММ отдельных свойств ТП. Эти модели выражаются через измеряемые переменные аппарата с учетом конструктивных, механических, физико-химических и других параметров ТП. Выявлены факторы, влияющие на эффективность управления ТП. Важнейшими из них являются существенная нелинейность и связность переменных состояния ТП, решение задачи синтеза законов управления ТП в общем накопителе на основе ММ низкого порядка.

Оценка динамики САУ температурой в жидкостно-паровых теплообменниках с П-регуляторами и учетом показателей динамической модели рассмотрены в [12]. Предложена методика построения ММ по переходной функции для определения динамических характеристик системы. В инженерной практике исследования динамики САУ используются частотные критерии по показателям ПФ разомкнутой системы по критериям Найквиста. Они позволяют адекватно оценивать устойчивость замкнутой САУ. Проведен анализ САУ температурой в кожухотрубном теплообменнике и составлена ММ системы на основе экспериментально полученной переходной функции. Применена типовая схема автоматизации кожухотрубного парового теплообменника. В результате проведенных исследований определены основные величины для исследования устойчивости САУ и выбора показателей настройки П-регулятора для получения оптимального процесса управления.

Анализ приведенной литературы показывает, что задача синтеза системы управления процессами в кожухотрубном теплообменном аппарате на основе ММ является актуальной.

### III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОЖУХОТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

#### A. Допущения, принятые для разработки математической модели

Для построения ММ объекта приняты следующие допущения:

- жидкая фаза течет внутри прямой трубы, омываемой паровой фазой;
- стенки труб не накапливают теплоту;
- течение жидкой фазы однонаправленно по оси  $x$ ;
- удельные теплоемкости и плотности взаимодействующих фаз и стенки в области рассматриваемых температур постоянны;
- потерями тепла в окружающее пространство пренебрегаем;
- сечение и форма потоков неизменны.

#### B. Математическая модель процесса с распределенными параметрами

Запишем систему уравнений теплообменного противоточного процесса в виде ДУ в частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{\text{п}}}{\partial x} &= -v_{\text{п}} \frac{\partial \theta_{\text{п}}}{\partial x} - R_{\text{п}} (\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{в}}); \\ \frac{\partial \theta_{\text{в}}}{\partial x} &= v_{\text{в}} \frac{\partial \theta_{\text{в}}}{\partial x} - R_{\text{в}} (\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{в}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\theta_{\text{п}}$ ,  $\theta_{\text{в}}$  – температуры пара и воды;  $v_{\text{п}}$ ,  $v_{\text{в}}$  – скорости пара и воды;  $R_{\text{п}}$ ,  $R_{\text{в}}$  – коэффициенты учитывающие физические и технологические особенности аппарата.

Граничные условия для (1):

$$\theta_{\text{п}}(x)|_{x=l} = \theta_{\text{п}}^{\text{BX}}(t); \quad \theta_{\text{в}}(x)|_{x=0} = \theta_{\text{в}}^{\text{BX}}(t).$$

Начальные распределения температур для (1):

$$\theta_{\text{п}0}(x) = \theta_{\text{п}}(x, t)|_{t=0}; \quad \theta_{\text{в}0}(x) = \theta_{\text{в}}(x, t)|_{t=0}.$$

#### C. Компьютерное моделирование управляемого теплообменного процесса

Для реализации ММ в среде графического программирования *Simulink* произведена ее дискретизация по пространственной переменной  $x$ . При этом ММ приведена к дискретно-непрерывному виду с шагом интегрирования  $h$ .

В данном случае целевой функцией системы управления является поддержание температуры воды на выходе аппарата с учетом возмущающих воздействий.

Схема системы управления в *Simulink* представлена на рис. 1.

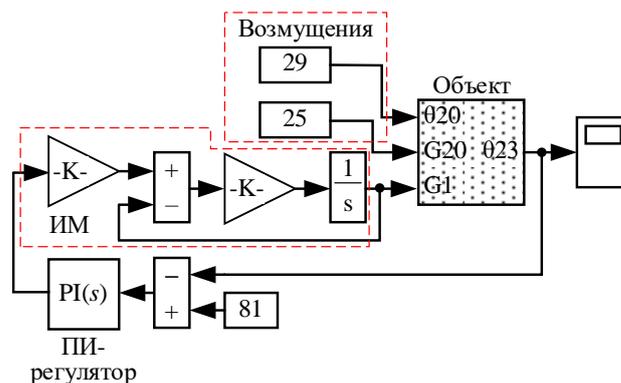


Рис. 1. Компьютерная модель системы управления в *Simulink*

На схеме  $\theta_{20}$ ,  $\theta_{23}$  – температура воды на входе и выходе;  $G_1$  – массовый расход пара;  $G_{20}$  – массовый расход воды; ИМ – исполнительный механизм с электроприводом.

Основными возмущающими воздействиями для данной системы являются: расход воды  $G_{20}$  и ее температура на входе в аппарат  $\theta_{20}$ .

Регулирующим воздействием является массовый расход греющего пара  $G_1$ . Регулируемой переменной – температура воды на выходе  $\theta_{23}$ .

Отметим, что перепад давления на клапане-регуляторе постоянен. В связи с этим расход пара через него зависит только от положения затвора по отношению к седлу клапана.

В данном исследовании для регулирования  $\theta_{23}$  применена одноконтурная замкнутая САР с использованием ПИ-регулятора, изменяющего  $G_1$ . Настройка ПИ-регулятора произведена с помощью инструмента *Simulink PID Tuner*. При этом получены следующие значения: пропорциональная составляющая – 0,57; интегральная составляющая – 0,74.

Моделирование в *Simulink* показало, что при значительных изменениях расхода или температуры воды на входе в теплообменник снижается качество переходных процессов. При этом сильнее на процесс влияет изменение расхода воды. При увеличении расхода воды на 5 % от номинального значения температура воды на выходе аппарата ниже, чем заданное значение приблизительно на 1 °С. При уменьшении расхода воды на 5 % САР выводит значение регулируемого параметра на заданный уровень, однако наблюдаются незначительные колебательные процессы.

Увеличение или снижение температуры воды на входе в теплообменник на 5 % в начале переходного процесса показывает незначительное отклонение от заданного значения. При этом процессы устанавливаются примерно за 4 с. Это обусловлено тем, что температура пара достаточно высока (143,6 °С).

Отметим, что при переходных процессах наблюдается так называемая «инверсия температуры». Это объясняется разнотемповостью протекающих в аппарате процессов, которые с разной силой влияют на процесс. Изменение температуры в итоге определяется наиболее сильным, но медленным процессом, а начальное изменение задает наиболее быстрый, но слабый процесс.

С учетом того, что в системе возможны возмущающие воздействия по обоим каналам (расхода и температуры воды на входе) необходимо применить каскадную САР соотношения расходов пара и воды с коррекцией по температуре воды на выходе аппарата. Такая структура системы позволит получить более качественный переходный процесс по заданному регулируемому параметру и оптимизировать подачу пара в теплообменник в зависимости от возмущающего воздействия по расходу воды.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании представлен подробный обзор литературных источников по управлению кожухотрубными теплообменными аппаратами. На основе их анализа сделано заключение, что задача синтеза системы управления процессами в таких аппаратах на основе математических моделей является актуальной.

Определены: допущения, на основе которых построена математическая модель объекта; начальные и граничные условия; основные возмущающие

воздействия (расход и температура воды на входе), регулируемая и регулирующая переменные.

Произведена дискретизация математической модели по пространственной переменной  $x$  для проведения компьютерного эксперимента в *Simulink*.

Результаты компьютерного моделирования показали, что более сильное влияние на процесс оказывает изменение расхода воды. При этом качество переходного процесса оказывается неудовлетворительным (наблюдаются незначительные колебательные процессы).

Намечены пути решения проблемы улучшения качества переходного процесса путем применения каскадной системы автоматического регулирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Идентификация параметров динамической модели теплообменного аппарата // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. №33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/identifikatsiya-parametrov-dinamicheskoy-modeli-teploobmennogo-apparata> (дата обращения: 27.05.2023).
- [2] Артемьев Д.В., Зайцев А.В., Санавбаров Р.И. Моделирование процесса теплопередачи в кожухотрубном теплообменном аппарате // Вестник МАХ. 2021. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-protsesssa-teploperedachi-v-kozhuhotrubnom-teploobmennom-apparate> (дата обращения: 27.05.2023).
- [3] Скороспешкин М.В., Скороспешкин В.Н., Аврамчук В.С. Адаптивная система регулирования температуры // Проблемы информатики. 2011. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnaya-sistema-regulirovaniya-temperatury> (дата обращения: 27.05.2023).
- [4] Толстых В.К., Пшеничный К.А. Математическое моделирование нестационарных тепловых процессов в противоточных теплообменных аппаратах // Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. №51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskoe-modelirovanie-nestatsionarnyh-teplovyh-protsessov-v-protivotochnyh-teploobmennyyh-apparatah> (дата обращения: 27.05.2023).
- [5] Шит М.Л., Журавлев А.А., Пацюк В.И., Тимченко Д.В. Система автоматического управления кожухомеевиковым теплообменником с переменной площадью поверхности теплообмена // Проблемы региональной энергетики. 2022. №4 (56). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-avtomaticheskogo-upravleniya-kozhuhomezeevikovym-teploobmennikom-s-peremennoy-ploschadyu-poverhnosti-teploobmena> (дата обращения: 27.05.2023).
- [6] Шит М.Л., Пацюк В.И., Журавлев А.А., Бурчу В.И., Тимченко Д.В. Управление теплообменным аппаратом с переменной площадью поверхности теплообмена // Проблемы региональной энергетики. 2019. №1 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-teploobmennym-apparatom-s-peremennoy-ploschadyu-poverhnosti-teploobmena> (дата обращения: 27.05.2023).
- [7] Васильев Е. М. Исследование критических режимов в системах управления теплообменом // Вестник ВГТУ. 2012. №12-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-kriticheskikh-rezhimov-v-sistemah-upravleniya-teploobmenom> (дата обращения: 27.05.2023).
- [8] Тишин О.А., Силаев А.А., Силаева Е.Ю. Динамическая модель трубчатого теплообменного аппарата // Вестник ИргТУ. 2016. №2 (109). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-model-trubchatogo-teploobmennogo-apparata> (дата обращения: 27.05.2023).
- [9] Демиденко Н.Д., Кулагина Л.В. Моделирование и оптимизация технологических систем с распределенными параметрами // Сибирский аэрокосмический журнал. 2014. №3 (55). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-optimizatsiya-tehnologicheskikh-sistem-s-raspredelemnymi-parametrami> (дата обращения: 27.05.2023).

- [10] Демиденко Н.Д., Кулагина Л.В., Пьяных А.А. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2019. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-upravlenie-sistemami-s-raspredelemnymi-parametrami> (дата обращения: 27.05.2023).
- [11] Нейдорф Р.А., Мохсен М.Н., Нейдорф А.Р. Унификация задач математического моделирования технологических объектов и синтеза законов управления технологическими переменными // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. №6 (179). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/unifikatsiya-zadach-matematicheskogo-modelirovaniya-tehnologicheskikh-obektov-i-sinteza-zakonov-upravleniya-tehnologicheskimi-peremennymi> (дата обращения: 27.05.2023).
- [12] Калинин Ц.И., Куницын Р.А. Особенности построения динамической модели системы регулирования температуры в кожухотрубном теплообменнике с пропорциональным регулятором // Вестник АГАУ. 2022. №6 (212). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-postroeniya-dinamicheskoy-modeli-sistemy-regulirovaniya-temperatury-v-kozhuhotrubnom-teploobmennike-s-proporcionalnym-regulyatorom> (дата обращения: 29.05.2023).