

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕЧИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

В. А. Дмитриев¹✉, С. А. Милушенко¹, К. В. Беляев²

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5

²Омский автобронетанковый инженерный институт,
Россия, 644098, г. Омск, 14-й Военный городок, 119

✉ vitaliy.dmitriyev.02@bk.ru

Повышение эффективности и качества автоматического управления трубчатыми печами является приоритетной задачей для современных нефтеперерабатывающих предприятий. В данной работе представлена математическая модель печи установки первичной переработки нефти, предназначенная для стабилизации температуры нефти перед её разделением на фракции. Объектом исследования выступает двухскатная трубчатая печь шатрового типа установки первичной переработки нефти с контуром регулирования температуры нефтепродукта на выходе из змеевика по расходу топливного газа.

Моделирование базируется на синтезе передаточных функций элементов системы: датчик температуры представлен апериодическим звеном первого порядка, исполнительный механизм — интегрирующим звеном, регулирующий клапан — апериодическим звеном, объект управления — апериодическим звеном. Особенностью предложенного подхода является комплексный учёт физико-химических факторов: переменной теплотворной способности топливного газа, вычисляемой через показатель Воббе; аккумулирующей способности стенок жаровых труб; зависимости теплоёмкости нефти от её влагосодержания.

Имитационная модель реализована в среде SimInTech; исследование выполнено методом вычислительного эксперимента при последовательном приложении ступенчатых возмущений. Установлено, что при повышении температуры сырья на входе на 50 °С, увеличении массового расхода нефти на 30 % и пятикратном росте влагосодержания регулируемая величина достигает экстремальных значений 410, 350 и 340 °С относительно уставки 370 °С при времени регулирования не более 15 000 с. Разработанная модель позволяет минимизировать отклонения технологического режима, обеспечивая условия для чёткого фракционирования.

Ключевые слова: математическая модель, нефтепереработка, трубчатая печь, тепловая инерционность, первичная переработка, передаточная функция

Для цитирования: Дмитриев В. А., Милушенко С. А., Беляев К. В. Математическая модель печи первичной переработки нефти. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 117–124. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-117-124>. EDN: NSVNV5.



© Дмитриев В. А., Милушенко С. А., Беляев К. В., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATHEMATICAL MODEL OF THE OIL PRIMARY PROCESSING FURNACE

V. A. Dmitriyev¹✉, S. A. Milyushenko¹, K. V. Belyaev²

¹Siberian State Automobile and Highway University,
Mira Ave., 5, Omsk, 644080, Russia

²Omsk Tank-Automotive Engineering Institute,
14th Voyenny gorodok, 119, Omsk, 644098, Russia

✉ vitaliy.dmitriyev.02@bk.ru

Improving the precision of automatic control systems for process heaters is a critical factor in optimizing crude oil primary distillation units. The article introduces a dynamic mathematical model designed to maintain tight control over the outlet temperature, a vital parameter for subsequent high-quality fractionation.

The object of the research is a gable barrel-type oil refinery furnace within a primary crude oil processing unit, featuring a temperature control loop for the petroleum product at the coil outlet based on fuel gas flow rate.

The modeling is based on the synthesis of transfer functions of system elements: the temperature sensor is represented as a first-order lag element, the actuator — as an integrating element, the control valve — as an aperiodic link and the controlled process — as an aperiodic link. A distinctive feature of the proposed approach is the comprehensive consideration of physicochemical factors: the variable calorific value of the fuel gas calculated via the Wobbe index; the heat accumulation capacity of the fire tube walls; and the dependence of crude oil specific heat capacity on its moisture content.

The simulation model is implemented in the SimInTech environment; the research is conducted using computational experiments involving the sequential application of step disturbances. Therefore, the authors conclude that with an increase in the feedstock inlet temperature by 50 °C, a 30 % rise in the mass flow rate of oil and a fivefold increase in moisture content, the controlled variable reaches extreme values of 410, 350 and 340 °C relative to the setpoint of 370 °C, with a regulation time not exceeding 15 000 seconds. The developed model enables minimization of technological regime deviations providing conditions for precise fractionation.

Keywords: mathematical model, oil refining, tube furnace, thermal inertia, primary processing, transfer function

For citation: Dmitriev V. A., Milyushenko S. A., Belyaev K. V. Mathematical model of the oil primary processing furnace. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):117–124. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-117-124>. EDN: NSNVNS. (In Russ.).



© Dmitriev V. A., Milyushenko S. A., Belyaev K. V., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Печь установки первичной переработки нефти является одним из центральных аппаратов, поскольку именно она определяет тепловой режим подогрева нефти и, как следствие, стабильность работы атмосферной колонны и качество получаемых фракций. Даже незначительные отклонения температуры сырья на выходе печи приводят к перераспределению компонентов между фракциями и ухудшению технико-экономических показателей процесса [1, 2].

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка математической модели печи, так как она обеспечивает понимание и взаимосвязь между различными параметрами — от горения до нагрева сырья. В том числе и моделирование остаётся актуальной задачей в условиях повышения требований к энергоэффективности, надёжности и экологической безопасности нефтеперерабатывающих производств [3, 4].

Общая информация об объекте управления

Рассматриваемый объект управления — двухскатная трубчатая печь шатрового типа — представляет собой многосвязную термодинамическую систему с распределёнными параметрами [5].

Архитектура объекта управления представлена на рис. 1. Она включает в себя радиантные камеры (1 и 2), в которых происходит горение жидкого и/или газового топлива, а также конвекционную секцию, которая расположена в центре (3). С точки зрения автоматического регулирования, ключевой спецификой объекта является тепловая инерционность, формирующаяся за счёт высокой способности накапливания огнеупорной кладки перевальных стен, а также значительного объёма топочного пространства. Данное свойство производит существен-

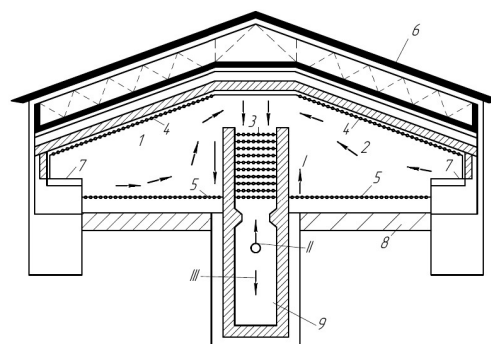


Рис. 1. Принципиальная схема двухскатной трубчатой печи шатрового типа:

- 1, 2 — радиантные секции; 3 — конвекционная секция;
- 4, 5 — экранные трубы (потолочные и подовые);
- 6 — несущий каркас; 7 — горелочные устройства;
- 8 — воздуховоды; 9 — дымовой канал;
- I, II — выходящий и входящий продукт;
- III — дымовые газы¹

Fig. 1. Schematic diagram of a double-pitched tent-roof tubular furnace: 1, 2 — radiant sections; 3 — convection section; 4, 5 — firewall tubes (ceiling and floor); 6 — supporting frame; 7 — burner devices; 8 — air ducts; 9 — smoke channel; I, II — outgoing and incoming product; III — flue gases¹

ное транспортное запаздывание: реакция температуры нагреваемого сырья на изменение подачи топлива происходит не сразу, а с экспоненциальным переходным процессом.

Производство тепловой энергии осуществляется в радиантных секциях посредством сжигания (жидкого или газообразного) топлива. Механизмом теплопередачи к экранным трубам выступает радиационный теплообмен, основным источником которого является светящийся факел. В межкамерном пространстве, ограниченном перевальными стена-

ми, интегрирована конвекционная секция. Усиление теплообмена в данной секции реализуется посредством вынужденной конвекции при омывании восходящим потоком высокотемпературных дымовых газов трубного пучка. Подогрев нефтепродукта осуществляется двумя ступенями: поток первично аккумулирует тепловую энергию в конвекционной секции (доля передаваемого тепла — около 20–25 %) [6], после чего поступает в радиантную секцию, где воспринимает основную тепловую нагрузку (70–80 %)².

Подготовка горючей смеси протекает в горелочных устройствах, обеспечивающих смешение топлива с воздухом, что гарантирует полноту сгорания смеси. Аэродинамика факела спроектирована таким образом, чтобы его взаимодействие с футеровкой перевальных стен приводило к их интенсивному нагреву, формируя мощный вторичный источник инфракрасного излучения. Сами параметры факела (размер, температурный градиент и так далее) являются функцией множества переменных: коэффициента избытка и температуры дутьевого воздуха, а также конструктивных характеристик топочного объема³.

Архитектура системы автоматического управления (САУ) двухскатной шатровой печи П-1 отражена на функциональной схеме рис. 2. Транспортировка отбензиненной нефти в змеевики печи обеспечивается насосом Н-1. Стабилизация нагнетания реализуется посредством контура регулирования давления (первичный преобразователь 1а), сигнал с которого управляет частотным преобразователем (ЧП) электродвигателя. Далее магистральный поток

разделяется на два параллельных контура, мониторинг которых осуществляется датчиками давления (3а, 6а) и расхода (4а, 7а). Данные датчики передают аналоговые сигналы для формирования управляющих воздействий на исполнительные механизмы — регулирующие клапаны (4е, 7е). Давление пара к форсункам печи П-1 регистрируется и регулируется группой датчиков расхода (9а), давления (10а) и температуры (12а). Измерительная информация передается на уровень программируемого логического контроллера (ПЛК), алгоритм которого вычисляет и передает управляющее воздействие на регулирующий орган (10е).

Для обеспечения максимальной эффективности и гибкости регулирования печь П-1 оснащена комбинированной системой сжигания, используя топливный газ и мазут в качестве жидкого агента. Управление тепловой нагрузкой в радиантных камерах достигается за счёт расхода топливного газа клапанами (14е, 20е). Управление данными исполнительными механизмами построено на основе каскада: давление газа перед горелками (датчики 14а, 19а) с температурной компенсацией (16а, 18а). В качестве вспомогательного технологического мониторинга реализована регистрация температуры футеровки перевальных стен (13а, 21а), а также контроль температуры уходящих дымовых газов (17а).

Идентификация передаточных функций

Динамическая работа печи формируется под непрерывным воздействием массива возмущающих факторов⁴. Ключевыми из них выступают давление подаваемого топливного газа, а также КПД

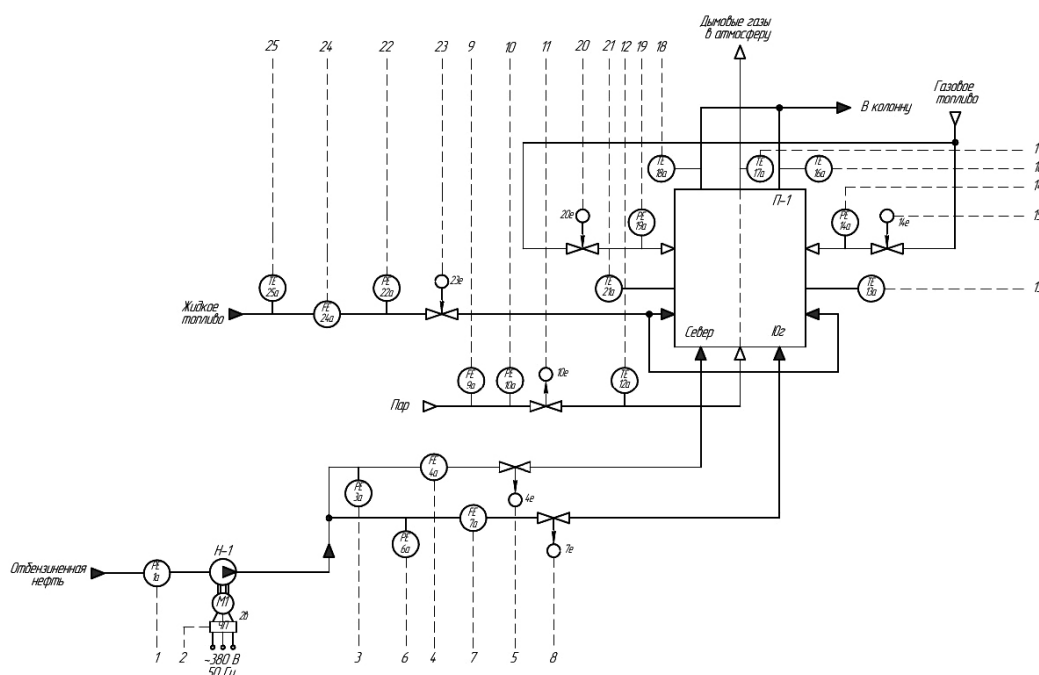


Рис. 2. Функциональная схема САУ двухскатной трубчатой печи П-1

Fig. 2. Functional diagram of the automatic control system of the П-1 double-pitched tubular furnace

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

² Ентус Н. Р., Шарихин В. В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Москва: Химия, 1987. 304 с.

³ Ентус Н. Р., Шарихин В. В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Москва: Химия, 1987. 304 с.

⁴ Лепешкин А. Р., Доронин Ю. А. Теория горения и взрыва: учебное пособие. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. 85 с. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/5/tr25-85>.

горелочных устройств. На кинетику горения оказывают воздействие и условия дутьевого воздуха (температурный напор, барометрическое давление, влажность), и коэффициент его избытка. Кроме того, переходные характеристики объекта управления определены технологическими возмущениями со стороны сырья (массовый расход), коэффициентов теплоотдачи и активной площади теплообменной поверхности.

Взаимосвязи между этими многочисленными переменными и параметрами требуют создания строгой математической модели, позволяющей точно отразить динамическое поведение печи. Для разработки модели был выбран контур регулирования температуры нефти на выходе из печи газовым топливом.

Опишем передаточную функцию датчика температуры через уравнение:

$$Q_1(T) = Q_2(T, T_m) + Q_3(T, T_o(\alpha)) + Q_4(T(x)) + Q_5. \quad (1)$$

Теплопередача между датчиком и окружающей средой включает конвекцию, излучение, теплопроводность и накопление энергии. В уравнении (1) перечисленные компоненты обозначены следующим образом [7]:

— процесс накопления тепла Q_1 :

$$\frac{d\Delta Q_1(x)}{dt} = \Delta m(x) \cdot c \cdot x \cdot \frac{dT(x)}{dt}, \quad (2)$$

где $T(x)$ — температура термопары вдоль ее проводов и головки x ; Δm — масса в точке x ; c — удельная теплоемкость провода термопары;

— передача тепла за счёт конвекции Q_2 :

$$\frac{d\Delta Q_2(x)}{dt} = \Delta A(x) \cdot r(x) \cdot (T(x) - T_m(x)), \quad (3)$$

где ΔA — наружный уголок; $r(x)$ — локальный коэффициент конвективной теплоотдачи; $T_m(x)$ — температура измеряемой жидкости;

— теплообмен с окружающей средой посредством излучения Q_3 :

$$\frac{d\Delta Q_3(x)}{dt} = \sigma \cdot \sum_{\varphi} \Delta A(x) \cdot \varepsilon(\varphi) \cdot (T^4(x) - T_o^4(\varphi)), \quad (4)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана; ε — коэффициент излучения и температуры окружающей среды $T_o(\varphi)$, который меняется в зависимости от угла φ ;

— тепловой поток через провода термопары Q_4 :

$$\frac{dQ_4(x)}{dt} = -\lambda \cdot S(x) \cdot \frac{\partial(x)}{\partial x}, \quad (5)$$

где λ — теплопроводность сплавов датчика; $S(x)$ — площадь пересечения.

Хотя уравнение (1) показывает одновременный поток тепла по проводам, а также теплопередачу между проводами и окружающей средой, последний процесс зависит от местных условий; точная

модель должна состоять из трёхмерных уравнений в частных производных с распределёнными параметрами. С другой стороны, упрощение модели возможно, если один из факторов является доминирующим, как в случае измерения температуры твёрдых тел и жидкостей. Однако, несмотря на такую сложную модель, взаимосвязь между выходным сигналом датчика температуры T_s и измеренной температурой T_m сводится к динамике первого порядка, которую можно сформулировать в виде уравнения (6):

$$\frac{m_{eq} \cdot c_{mean}}{r_{mean} \cdot A_{eq}} \cdot \frac{dT_s}{dt} = T_m - \Delta T_m - T_s = K \cdot T_m - T_s. \quad (6)$$

В этом уравнении мы имеем эквивалентную массу m_{eq} и среднюю удельную теплоёмкость c_{mean} рассматриваемой массы, а также средний коэффициент теплопередачи r_{mean} и эквивалентную площадь A_{eq} , которые являются параметрами теплопередачи между датчиком и средой, для которой измеряется температура. Кроме того, ΔT_m — это температурная погрешность, обусловленная потерей тепла, которая может быть выражена как коэффициент усиления передаточной функции K . Предполагая использование незранированной термопары, применяется динамика первого порядка в виде передаточной функции (7), полученной из уравнения (6) по техническим характеристикам термопары $\tau = 10$ с:

$$F(s) = \frac{T_s(s)}{T_m(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}; \quad (7)$$

$$\tau = \frac{m_{eq} \cdot c_{mean}}{r_{mean} \cdot A_{eq}}. \quad (8)$$

Таким образом, передаточная функция датчика температуры выражается уравнением:

$$W_A = \frac{1}{10s + 1}. \quad (9)$$

Приводы в системах управления часто моделируются с использованием передаточных функций, которые включают динамику интегратора для учёта их физического поведения. Таким образом, сигнал поворота регулирующего органа имеет линейную зависимость [8]. Следовательно, передаточная функция привода будет выражаться уравнением:

$$W_{им} = \frac{0,00833}{s}. \quad (10)$$

Если выходной сигнал контроллера отличается от значения, соответствующего текущему установившемуся режиму на величину шага, положение регулирующего клапана не достигает нового требуемого значения мгновенно [9]. Это свидетельствует о необходимости учёта динамических характеристик исполнительного механизма и позиционера⁵.

В связи с этим передаточная функция регулирующего клапана в большинстве практических слу-

⁵ Теслов К. С., Гебель Е. С. Разработка каскадной системы автоматического управления многопоточной трубчатой печью нефтеперерабатывающей установки // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов. Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2024. С. 1908 — 1913. EDN: ESHOX5.

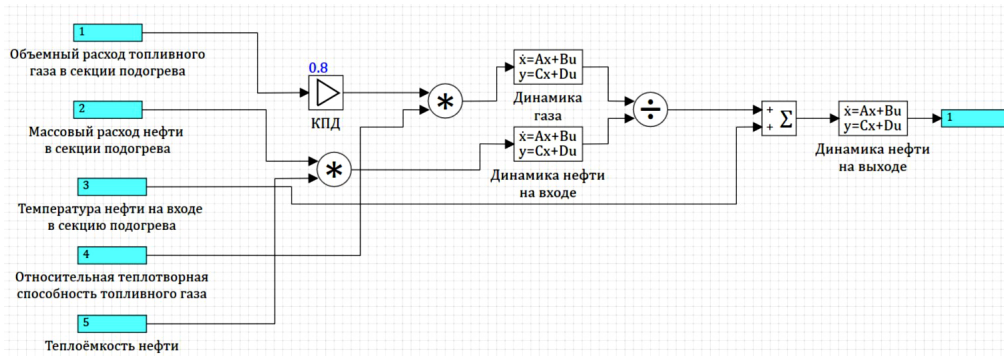


Рис. 3. Вид подсистемы «Объект управления»
Fig. 3. View of the "Control Object" subsystem

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

чаев может быть с достаточной точностью аппроксимирована передаточной функцией инерционного звена первого порядка и представлена в уравнении [10]:

$$W_{PK} = \frac{K}{Ts + 1} = \frac{7,5}{40s + 1}. \quad (11)$$

Числитель в уравнении (11) соответствует номинальному расходу подаваемого топливного газа, что детерминирует статический коэффициент передачи исполнительного механизма $K = 7,5$. Динамическая инерционность срабатывания регулирующего клапана (перемещение штока) учтена посредством постоянной времени $T = 40$ с.

Учитывая монотонный характер разгона и ёмкостные свойства футеровки, идентификация объекта будет в виде апериодического звена 1-го порядка. Коэффициент передачи по каналу управления температурой составляет $K = 0,4933$, что отражает установившуюся чувствительность теплового объекта к изменениям расхода топливного газа. Колоссальная теплоёмкость футеровки обуславливает высокую тепловую инерционность системы, которая в рамках апериодического звена соответствует постоянной времени $T = 650$ с.

С учётом полученных параметрических характеристик получается итоговая передаточная функция объекта управления в виде операторного уравнения:

$$W_{Oy} = \frac{0,4933}{650s + 1}. \quad (12)$$

Математическая модель

Построение модели расчёта для прогнозирования температуры нефтепродукта на выходе $T_{вых}$ из змеевика основывается на уравнении энергетического баланса:

$$T_{вых} = T_{вх} + 0,01 + V_{г} + \eta + \frac{Q_{г}}{G_{н} \cdot C_{н}}, \quad (13)$$

где $T_{вх}$ — температуры нефтепродукта на входе в змеевик, °C; $V_{г}$ — объёмный расход топливного газа, м³/ч; η — тепловой КПД печи, %; $Q_{г}$ — теплота сгорания топлива, МДж/м³; $G_{н}$ — массовый расход нефтепродукта, т/ч; $C_{н}$ — удельная теплоёмкость нефти, МДж/(т·град).

Устройство модели на рис. 3 учитывает характер тепло- и массообмена путём внедрения апериодических звеньев 1-го порядка:

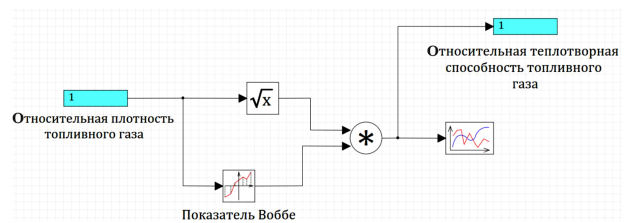


Рис. 4. Вид подсистемы «Теплотворная способность потока топливного газа»
Fig. 4. View of the "Calorific value of the fuel gas flow" subsystem

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

— введение динамического звена с постоянной времени $T_{gas} = 60$ с моделирует транспортное запаздывание и тепловую инерцию огнеупорной кладки;

— $T_{em_in} = 200$ с имитирует инерционность гидродинамического смещения и начального конвективного теплообмена на входе в печь;

— $T_{em_out} = 1000$ с отражает совокупную теплоёмкость потока на выходе из печи (при параметре $T_{em_in} = 200$ с).

Для программной реализации апериодических звеньев в модели используется матричное представление в пространстве состояний. Элементы матриц (A, B, C, D) рассчитываются по формуле [11–13]:

$$A = \frac{-1}{T_{об}}; B = 1; C = \frac{1}{T_{об}}; D = 0; I_0 = t_0 \cdot T_{об}, \quad (14)$$

где A, B, C, D — переменные состояния; $T_{об}$ — постоянная времени соответствующего объекта; I_0 — параметр начальных условий; t_0 — номинальное значение выходного параметра.

Показатель Воббе на рис. 4 реализует функцию кусочно-линейной интерполяции теплофизических свойств метана.

На основе входного вектора относительной плотности вычисляется итоговая теплотворная способность газовой смеси [14, 15]. Такой подход реализован и для непрерывного пересчёта удельной теплоёмкости нефти (рис. 5).

Разработанные функциональные блоки внедрены в подсистему объекта управления (рис. 6), что позволяет подавать ступенчатые возмущения по заданному временному алгоритму на входы, обеспечивая робастность замкнутого контура управления.

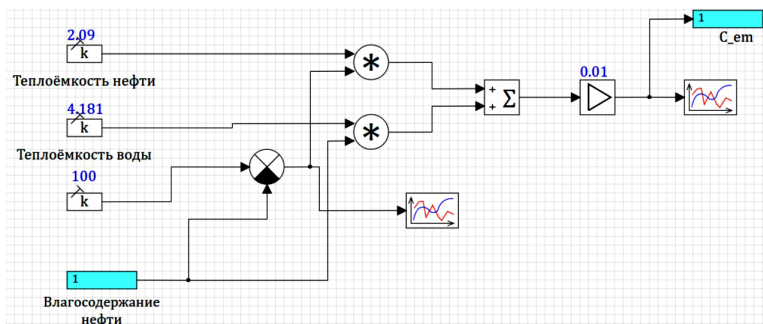


Рис. 5. Вид подсистемы «Расчёт показателя теплоёмкости нефти»

Fig. 5. View of the "Calculation of the heat capacity of oil" subsystem

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

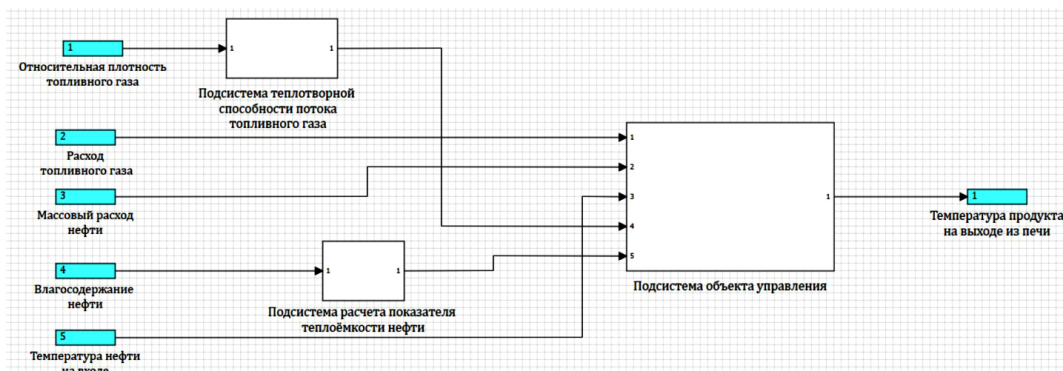


Рис. 6. Устройства подсистемы печи П-1

Fig. 6. Devices of the П-1 furnace subsystem

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

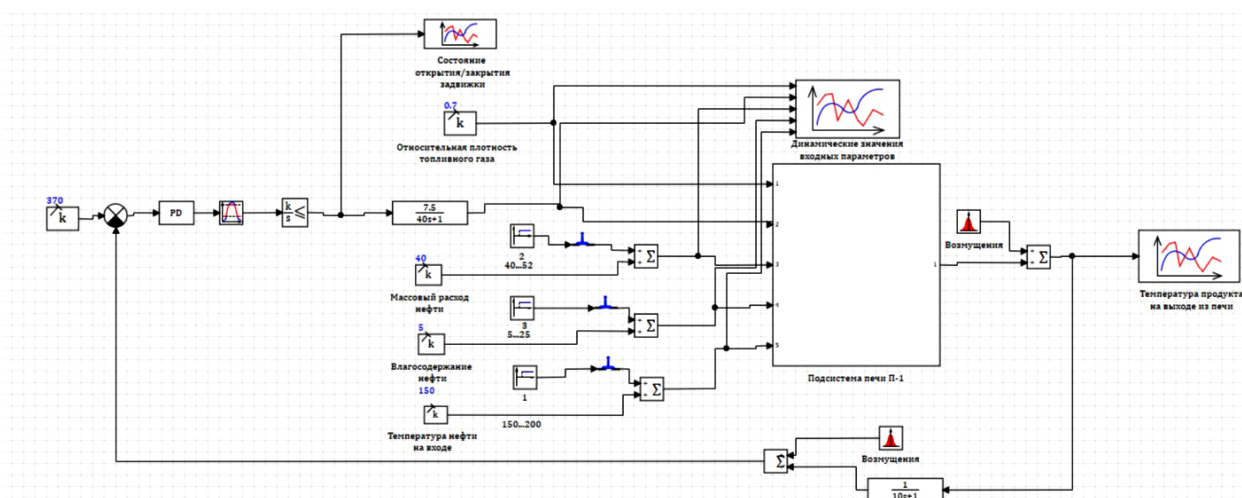


Рис. 7. Замкнутая система регулирования температуры

Fig. 7. Closed-loop temperature control system

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Математическая модель (рис. 7) отображает динамику работы печи с учётом внешних возмущений. Каждый входной параметр должен будет изменяться поочерёдно, чтобы регулятор смог стабилизировать систему.

На графике переходного процесса (рис. 8) наблюдается следующий характер поведения системы: в начальный период (0 ... 40 000 с) происходит выход на уставку 370 °С. Затем последовательно вводятся значительные возмущающие воздействия:

— скачкообразное повышение температуры нефти на входе в печь на 50 °С (с 150 до 200 °С),

вызывающее кратковременный перегрев выше 400 °С;

— ступенчатое увеличение массового расхода нефти на 30 % (с 40 до 52 т/ч), приводящее к снижению температуры до уровня около 340 °С;

— резкое возрастание влагосодержания нефти в 5 раз (с 5 до 25 %), также вызывающее заметное отклонение регулируемой величины.

Во всех рассмотренных случаях пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор демонстрирует высокую эффективность подавления возмущений, обеспечивая возвращение температу-

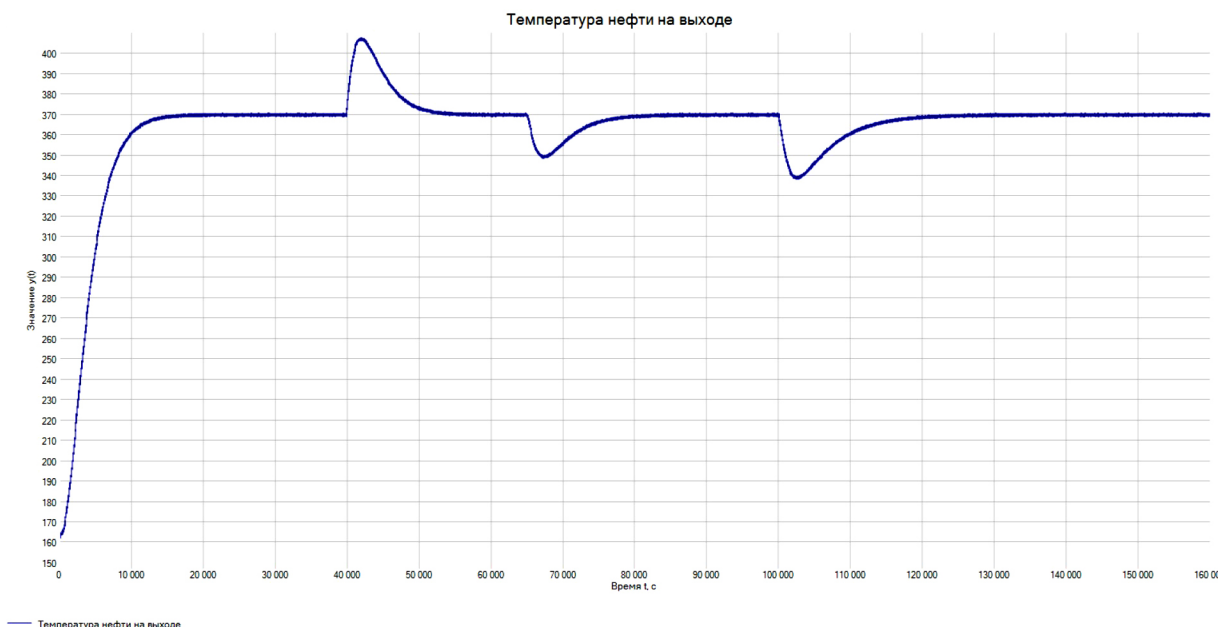


Рис. 8. Переходный процесс с постепенными возмущениями на печь
Fig. 8. Transient process with gradual disturbances on the furnace
 Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

ры к заданному значению 370 °С без существенного перерегулирования и с удовлетворительным временем регулирования.

Заключение

В ходе исследования была разработана имитационная модель системы автоматического регулирования температуры нефти на выходе из двухскатной трубчатой печи шатрового типа, включающая в себя передаточные функции датчика температуры, исполнительного механизма и объекта управления.

Новизна работы состоит в учете трех факторов: теплотворной способности топливного газа через показатель Воббе, аккумулирующей способности стенок жаровых труб и зависимости теплоёмкости сырья от его влагосодержания. Учет трех факторов позволил реализовать каналы возмущений, обычно не воспроизводимые в моделях трубчатых печей.

Созданная модель подтвердила работоспособность самого контура: при трех последовательных возмущениях регулируемая величина достигает экстремальных значений 410, 350 и 340 °С относительно уставки 370 °С при времени регулирования не более 15 000 с. Полученные показатели следует считать оценочными, так как модель верифицирована только средствами моделирования, а линеаризованное описание объекта справедливо в окрестности рабочей точки.

Предложенная модель применима на действующих нефтеперерабатывающих заводах в качестве предварительного этапа настройки регулятора до вывода на реальный контур, а также в качестве тренажёра для операторов установки, инженеров автоматизации и контрольно-измерительных приборов. Распространение модели на контур жидкого топлива будет представлено в следующих исследованиях.

Список источников / References

1. Jacas-Portuondo F., Peña-Pupo L., Forgas-Brioso M. R., Mulet-Hing M. Modelling of the tubular furnace for the heating crude oil. *Tecnología Química*. 2025;45:51 – 68.

2. Chen X. Temperature control in electric furnaces: Methods, applications, and challenges. *Journal of Physics Conference Series*. 2023;2649:012032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2649/1/012032>.

3. Hentati M., Boussetta A., Elleuch A., Halouani K. Technical, environmental and economic evaluation of a kW-level flared gas-fuel GT-SOFC hybrid system. *Energy Conversion and Management*. 2024;317:118825. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118825>.

4. Safarova A. A. Development of mathematical model of the main apparatus of the oil fractionation unit. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2024;16(2):97 – 102. https://doi.org/10.52171/2076-0515_2024_16_02_97_102.

5. Liu L., Zhai R., Hu Y. Performance evaluation of wind-solar-hydrogen system for renewable energy generation and green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic. *Energy*. 2023;276:127386. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127386>.

6. Салякин А. Е., Гарифуллина Э. В., Бронская В. В., Мухаметзянова А. Г. Трубчатые печи первичной переработки нефти с использованием цифрового двойника // Компетентность. 2025. № 9. С. 46 – 49. <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2025-9-46-49>. EDN: TLXWPX.

- Salyakin A. E., Garifullina E. V., Bronskaya V. V., Mukhametzyanova A. G. Tubular furnaces for primary oil refining using a digital twin. *Competency*. 2025;9:46 – 49. <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2025-9-46-49>. EDN: TLXWPX. (In Russ.).

7. Mei L., Yuan T., Jie W. [et al.]. Optimization of combustion parameters in the fire tube of water jacket heating furnace based on FLUENT. *Processes*. 2025;13(1):190. <https://doi.org/10.3390/pr13010190>.

8. Wang R., Qi B., Zhou Y. [et al.]. Numerical investigation on combustion and heating characteristics of metal fiber burner. *Energies*. 2023;16(11):4301. <https://doi.org/10.3390/en16114301>.

9. Gude J. J., Bringas P. G. Proposal of a general identification method for fractional-order processes based on the process reaction curve. *Fractal and Fractional*. 2022;6(9):526. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6090526>.

10. Modelling and control of switched reluctance machines / ed. by R. E. Araújo, J. R. Camacho. London: IntechOpen, 2020. 158 p. ISBN 978-1-78984-455-9.

11. Tan W., Han W., Xu J. State-space PID: A missing link between classical and modern control. *IEEE Access*. 2022;10:116540–116553. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3218657>.
12. Yuan T., Wang C., Feng Q. [et al.]. Computational fluid dynamics simulation on oxy-fuel combustion performance of a multiple-burner furnace firing coking dry gas. *Applied Thermal Engineering*. 2024;252:123728. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123728>.
13. Dong L., Huang S., Qian B. [et al.]. Numerical Simulation of hydrogen-coal blending combustion in a 660 MW tangential boiler. *Processes*. 2024;12(2):415. <https://doi.org/10.3390/pr12020415>.
14. Zhou Z., Han X., Jin G. [et al.]. New coefficients of the weighted-sum-of-gray-gases model for gas radiation characteristics of hydrogen/natural gas blends combustion. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2023;149:107090. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107090>.
15. Fan G., Chen M., Wang C. [et al.]. Numerical study on oxy-fuel combustion characteristics of industrial furnace firing coking dry gas. *Energy*. 2024;286:129643. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129643>.

Вклад авторов:

В. А. Дмитриев. Постановка цели и задач исследования, разработка архитектуры математической модели объекта управления, аналитический расчёт статических и динамических коэффициентов апериодических звеньев 1-го порядка, программная реализация имитационной модели в SimInTech.

С. А. Милушенко. Проведение анализа предметной области, разработка общей методологии исследования, верификация адекватности результатов математического моделирования и научное редактирование рукописи.

К. В. Беляев. Оценка практической значимости разработанной модели, анализ эксплуатационной надёжности и отказоустойчивости созданной системы управления, экспертная оценка применимости результатов исследования для обеспечения технологических процессов производства нефтепродуктов.

Authors' contribution:

Vitaliy A. Dmitriev. Setting research goal and objectives, developing the architecture of a mathematical model of a control object, analytical calculation of static and dynamic coefficients of aperiodic links of the 1st order, software implementation of a simulation model in SimInTech.

Sergey A. Milyushenko. Conducting an analysis of the subject area, developing a general research methodology, verifying the adequacy of mathematical modeling results, editing of the text.

Konstantin V. Belyaev. Assessment of the practical significance of the developed model, analysis of the operational reliability and fault tolerance of the created control system, expert evaluation of the research findings' applicability for ensuring petroleum product manufacturing processes.

Информация об авторах:

ДМИТРИЕВ Виталий Андреевич, магистрант кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностро-

ение» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), г. Омск.

e-mail: vitaliy.dmitriyev.02@bk.ru

МИЛЮШЕНКО Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение» СибАДИ, г. Омск.

SPIN-код: 4080-6327

AuthorID (РИНЦ): 650473

e-mail: sergey19812003@mail.ru

БЕЛЯЕВ Константин Владимирович, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика» Омского автобронетанкового инженерного института, г. Омск.

SPIN-код: 9227-7073

AuthorID (РИНЦ): 191199

e-mail: bkv775@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 03.02.2026; одобрена после рецензирования 07.08.2026; принята к публикации 21.08.2026.

Information about the authors:

DMITRIEV Vitaliy Andreyevich, Master's Student of the Automation and Power Engineering Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk.

e-mail: vitaliy.dmitriyev.02@bk.ru

MILYUSHENKO Sergey Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Automation and Power Engineering Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk.

SPIN-code: 4080-6327

AuthorID (RSCI): 650473

e-mail: sergey19812003@mail.ru

BELYAEV Konstantin Vladimirovich, Associate Professor of the Electrical Equipment and Automation Department, Omsk Tank-Automotive Engineering Institute, Omsk.

SPIN-code: 9227-7073

AuthorID (RSCI): 191199

e-mail: bkv775@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 03.02.2026; approved after reviewing 07.08.2026; accepted for publication 21.08.2026.