

**Управление печью подогрева нефти на основании
расчета теплового баланса**

Р. А. Смуйкас*, Т. В. Пискажова, С. М. Тинькова

Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов, Красноярск, Россия

**roman.smukas@mail.ru*

Аннотация. Печь подогрева нефти является важным входным технологическим звеном на участке подготовки нефти и в качестве топлива может использовать попутный нефтяной газ. При этом газ разного состава требует разное количество воздуха для полного сгорания, также в зависимости от химического состава газа изменяется не только объем требуемого воздуха, но и теплота сгорания. На данный момент управление печью для получения заданной выходной температуры продукта основано на ПИД-регуляторе. При поддержании задаваемого давления в трубе топливного газа система выставляет количество подаваемого воздуха по заранее подобранным коэффициентам (по редким измерениям количества кислорода в отходящих газах). В процессе эксплуатации зачастую соотношение воздух — газ подстраивается вручную по цвету пламени, а система управления давлением воздуха не используется или используется неэффективно. Настройки коэффициентов ПИД производится крайне редко и эффективность сжигания более насыщенного попутного нефтяного газа значительно снижается, что приводит к выбросу несгоревших компонентов топливного газа в атмосферу и перегреву нагреваемого продукта.

Авторами статьи предложен алгоритм управления печью на основе динамических расчетов теплового и массового балансов. Основными задачами описываемого алгоритма являются: поддержание температуры нефти на выходе из аппарата и эффективное сжигание попутного нефтяного газа.

Ключевые слова: автоматизация печи подогрева нефти, расчет теплового баланса, алгоритм управления на основе теплового баланса, трубчатая печь подогрева нефти

Для цитирования: Смуйкас, Р. А. Управление печью подогрева нефти на основании расчета теплового баланса / Р. А. Смуйкас, Т. В. Пискажова, С. М. Тинькова. – DOI 10.31660/0445-0108-2025-3-138-150 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2025. – № 2. – С. 138–150. – EDN: KCWLNK

Oil heating furnace control based on calculation of the heat balance

Roman A. Smuykas*, Tatiana V. Piskazhova, Svetlana M. Tinkova

Abstract. The oil heating furnace is a crucial component of the oil treatment unit and can utilize associated petroleum gas as fuel. However, gases of varying compositions require different amounts of air for complete combustion.

The required air volume and the heat of combustion can vary significantly depending on the chemical composition of the gas. Currently, the furnace control is carried out using a PID controller to maintain a target outlet temperature for the product. The fuel gas pressure in the supply line is kept constant, and the amount of air is set using pre-calculated coefficients, which are occasionally adjusted based on oxygen measurements in the flue gases. In practice, the air-to-gas ratio is often manually adjusted based on the flame color, while the automatic air pressure control system is either not utilized or operates inefficiently. PID coefficient settings is infrequently performed, leading to inefficient combustion, particularly when burning richer associated petroleum gas. This results in the release of unburned fuel components into the atmosphere and can cause overheating of the oil product.

In this study, the authors propose furnace control algorithm based on dynamic calculations of heat and mass balances. The primary goals of this algorithm are to maintain the desired outlet temperature of the oil and to ensure the efficient combustion of associated petroleum gas.

Keywords: automation of the oil heating furnace, calculation of the thermal balance, control algorithm based on the thermal balance, tubular oil heating furnace

For citation: Smuykas, R. A., Piskazhova, T. V., Tinkova, S. M. (2025). Oil heating furnace control based on calculation of the heat balance // *Oil and Gas Studies*, (2), pp. 138-150. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-3-138-150

Введение

Нефтяная эмульсия, извлекаемая на нефтяных скважинах, перекачивается на установку подготовки нефти. Вначале эмульсия попадает на площадку подогрева нефти. Далее эмульсия требуемой температуры проходит через сепаратор нефти, отстойник нефти, а также концевую сепарационную установку. На этапах сепарации из нефтяной эмульсии активно выделяется попутный нефтяной газ. После этих технологических аппаратов подготовленная нефть переливается в резервуар товарной нефти [1].

Для ведения технологического процесса подготовки нефти необходим постоянный подогрев эмульсии. На удаленных месторождениях для этой цели преимущественно используют трубчатые печи подогрева нефти (ПТБ). Печи имеют достаточно высокий КПД и довольно простую конструкцию. Эксплуатация такого типа печей позволяет использовать попутный нефтяной газ, что обеспечивает уменьшение выбросов, экономический эффект, обеспечение непрерывного и качественного хода технологического процесса [2].

Так как попутный нефтяной газ — спутник нефти, эффективное сжигание данного продукта не являлось важной задачей для производства на месторождениях. Однако в современных условиях попутный нефтяной газ должен использоваться более эффективно, так как неполное его сгорание при неправильно подобранном количестве подаваемого воздуха приводит к экологической нагрузке на окружающую среду.

Газ разного состава требует разное количество воздуха для полного сгорания. В зависимости от химического состава газа изменяется не только объем требуемого воздуха, но и теплота сгорания, что влияет на стабильность подогрева.

Обычно при настройке ПИД-регулятора в выхлопную трубу печи устанавливается переносной газоанализатор и соотношение воздух — газ выставляется таким, чтобы при незначительном избытке кислорода не было недожога топлива. При дальнейшей работе печи состав газа может меняться (это фиксируется периодическим отбором проб) и тогда выставленное соотношение воздух — газ теряет свою актуальность. Подстройка расхода воздуха технологическим персоналом зачастую неэффективна [3].

Таким образом, задача состоит в разработке алгоритма автоматической регулировки соотношения газ — воздух при возможных изменениях состава топлива.

Технология подогрева нефти

Для обеспечения технологического процесса требуется разогрев нефтяной эмульсии до заданной температуры (чаще всего в диапазоне 40–45 градусов). Перегрев или недостаточный нагрев эмульсии крайне негативно сказывается на разделении нефтяной эмульсии на нефть, воду, газ и примеси. При завышении температуры происходит преждевременное разделение эмульсии, выделение газа на более ранних стадиях.

Основное разделение нефти и воды проходит на сепараторе, расположенном в цепочке течения эмульсии сразу после печи подогрева нефти. Поэтому печь является важным оборудованием, обеспечивающим ведение технологического процесса [3, 4].

В качестве топлива на этих печах чаще всего используется попутный нефтяной газ, который прошел подготовку и осушку. Использование не осушенного газа влечет за собой появление конденсата в питающей газовой трубе, а попадание конденсата в горелки вызывает копоть и снижает качество горения смеси.

На рисунке 1 представлена печь в разрезе. Показан путь прохождения нефти, размещение газовых горелок, подача воздуха.

Конструкция печи максимально проста и надежна, поэтому этот тип печей используется не только на месторождениях по добыче нефти.

Размеры печи составляют: порядка 10 м в длину, 4 м в высоту (без учета выхлопных труб) и порядка 3 м в ширину, стенки печи практически не имеют теплоизоляции. В комплект данной печи входит блок управления, система автоматизации и пожарной защиты [4].

Газовый факел горит в нижней части печи, получившиеся дымовые газы обтекают змеевик (состоит из труб с оребрением). Протекание дымовых газов через пространство печи происходит за счет высокого давления топливовоздушной смеси, подаваемой на вход печи. Путь прохождения газов внутри печи представлен на рисунке 1.

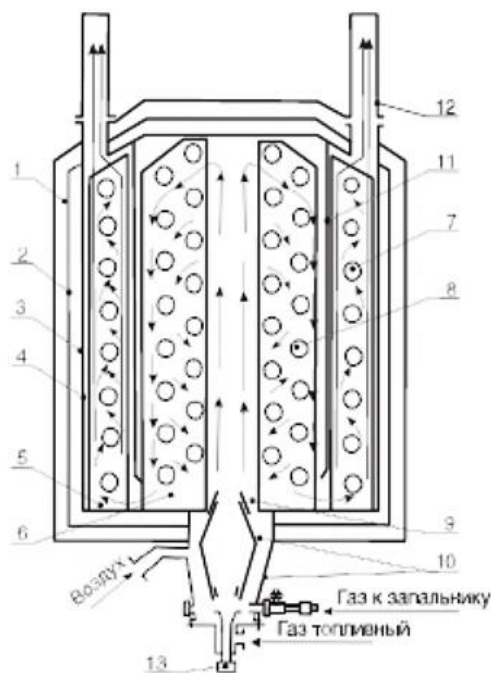


Рис. 1. Печь трубчатая блочная (разрез): 1 — каркас; 2 — обшивка внешняя; 3 — тепловая изоляция; 4 — обшивка внутренняя; 5 и 6 — доска трубная; 7 — змеевик однорядный; 8 — змеевик двухрядный; 9 — направляющая; 10 — камера сгорания; 11 — перегородка (экран); 12 — труба дымовая; 13 — устройство контроля пламени

Для нагнетания воздуха используется блок управления вентиляцией (БУВ), состоящий из вентилятора и частотного привода. Благодаря частотному регулированию можно добиться тонкого регулирования соотношения воздух — газ в камере сгорания. Активный наддув воздуха создает развитую конвекцию в камере сгорания печи и позволяет равномерно нагревать змеевик с нефтью.

Процесс подогрева нефти характеризуется основными параметрами:

- расход нагреваемой нефтяной эмульсии;
- температура нефти на входе в печь;
- температура нефти на выходе из печи;
- характеристики топлива (попутного газа);
- расход газа;
- соотношение воздух — газ;
- температура внутри камеры горения;
- температура воздуха снаружи печи.

На данный момент эффективность сжигания газа на печах подогрева нефти целиком и полностью зависит от правильности подбора коэффициентов ПИД-регулятора. Технологи, зачастую не имеющие значительного опыта в подборе данных коэффициентов, пользуются стандартным эмпирическим методом подбора коэффициентов. Однако с изменением условий сжигания топлива качество процесса нагрева падает и чаще всего находит-

ся в удовлетворительном состоянии, это приводит к низкоэффективному использованию дорогостоящего оборудования, малой эффективности его работы и вредным выбросам.

Условия сгорания подаваемого топлива (в данном случае — попутного газа) влияют на температуру подогрева нефти, которая в значительной степени зависит также от состава газа и расхода воздуха, идущего на горение. Регулировка температуры подстройкой расхода воздуха техническим персоналом не является эффективной, и печь начинает работать на избытке (чаще всего) или реже на недостатке газа в воздушно-газовой смеси.

Зависимость между составом газа и расходом воздуха можно выявить из расчета горения топлива. Необходимые реальные данные для дальнейших расчетов представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1

Состав попутного нефтяного газа (топлива)

Компонент газа	Содержание, % об.
Метан, CH_4	97,65
Азот, N_2	1,795
Этан, C_2H_6	0,311
Пропан, C_3H_8	0,132
Бутан, C_4H_{10}	0,0336
Гелий, He	0,074
Пентан, C_5H_{12}	0,005

Таблица 2

Состав воздуха

Компонент	Содержание, % об.
Азот, N_2	78,084
Кислород, O_2	20,946
Аргон, Ar	0,934
Углекислый газ, CO_2	0,132

Таблица 3

Средние значения параметров печи для расчета теплового баланса

Наименование параметра	Среднее значение	Размерность
Расход продукта	525,80	$\text{м}^3/\text{ч}$
Температура нефти на входе в печь	40,15	$^{\circ}\text{C}$
Температура нефти на выходе из печи	44,8	$^{\circ}\text{C}$
Давление топливного газа	51,28	кПа
Температура в дымовой трубе	153,82	$^{\circ}\text{C}$
Давление в дымовой трубе	–0,02	кПа
Избыточное давление нагнетаемого воздуха	0,78	кПа

Таким образом, разница температуры нефти (продукта) на входе и выходе печи составляет 4,65 °С.

Методика расчета теплового баланса

Расчет горения топлива с определением его теплоты сгорания, расхода воздуха и объема получившегося дыма проведен по методике, изложенной в [5].

Действительный объем требуемого воздуха можно рассчитать по формулам

$$L_a = \alpha \cdot L_o, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad L_o = V_{O_2}/k_{O_2}, \quad (1)$$

где $\alpha = 1,1$ — коэффициент расхода воздуха; L_o — теоретический объем воздуха, k_{O_2} — доля кислорода в воздухе, а V_{O_2} — теоретический объем кислорода, рассчитывается по уравнению

$$V_{O_2} = 0,01[0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_4 + 1,5H_2S + \sum(k + 0,25m) C_kH_m - O_2], \quad (2)$$

здесь CO, H₂ и т. д. — содержание компонентов в составе топлива, об. %.

Основу для обеспечения эффективной работы теплового агрегата составляет уравнение теплового баланса [6].

Тепловой баланс составим в расчете на 1 кубометр топлива.

Приходные статьи баланса включают теплоту от сгорания топлива Q_n ; теплоту подогретого топлива Q_r .

Расходные статьи включают полезно затраченное тепло, то есть тепло на нагрев нефти $Q_{\text{полезн}}$; потери тепла с отходящими газами (с дымом) Q_d ; потери тепла через корпус печи $Q_{\text{корп.}}$.

Согласно формуле расчета низшей теплоты сгорания (3) можно рассчитать количество теплоты, выделяющееся при сгорании одного кубометра газа. Теплота, вносимая подогретым газом, учитывая отсутствие конвектора, незначительна и не учитывается в расчетах.

$$Q_n = 358 \cdot CH_4 + 637 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1186 \cdot C_4H_{10} + 1461 \cdot C_5H_{12}, \quad (3)$$

где Q_n — низшая теплота сгорания топливного газа.

При заданном составе попутного нефтяного газа, исходя из формулы (3) из таблицы 1, низшая теплота при условии полного сгорания одного кубического метра газа составит 35324,478 кДж.

Теоретический расход кислорода по формуле (2) составит

$$V_{O_2} = 1,973 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический расход воздуха

$$L_o = 1,973/0,20946 = 9,4198.$$

Действительный расход воздуха

$$L_a = 1,1 \cdot 9,4198 = 10,362.$$

При этом объем дыма составит $11,360 \text{ м}^3/\text{м}^3$, а состав дыма, об. %

$\text{CO}_2 - 8,699$; $\text{H}_2\text{O} - 17,335$; $\text{N}_2 - 72,229$; $\text{O}_2^{\text{изб}} - 1,736$.

В соответствии с составом топлива и воздуха.

Чтобы рассчитать тепло, затрачиваемое на нагрев продукта, необходимо использовать средний расход продукта (нефтяной эмульсии) через печь — $525 \text{ м}^3/\text{ч}$ (проведем расчет на м^3); температуру продукта на входе в печь — $40,15 \text{ }^\circ\text{C}$; температуру продукта на выходе из печи — $44,83 \text{ }^\circ\text{C}$. Удельную теплоемкость нефти возьмем равной $2000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; плотность нефти $850 \text{ кг}/\text{м}^3$. Расчет проведем в соответствии с формулой

$$Q_{\text{полезн.}} = c_n \cdot m_n \cdot (t_{\text{выход}} - t_{\text{вход}}), \quad (4)$$

здесь c_n — теплоемкость нефти, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; m_n — масса 1 м^3 нефти; температура нефти на входе $t_{\text{вход}}$ и выходе $t_{\text{выход}}$ из печи, $^\circ\text{C}$.

Для расчета потерь тепла, уносимого отходящими газами, используем следующие данные: средняя температура в дымовой трубе $153,82 \text{ }^\circ\text{C}$. Для расчета количества тепла, уносимого отходящими газами, воспользуемся формулой (5):

$$Q_d = c_d^t \cdot t_d V_d = i_d^t \cdot V_d, \quad (5)$$

где c_d^t — объемная теплоемкость дыма при его температуре, $\text{Дж}/(\text{м}^3\text{K})$; V_d — объем дыма, м^3 ; t_d — температура дыма, $^\circ\text{C}$; i_d^t — энтальпия дыма, $\text{кДж}/\text{м}^3$.

Энтальпия дыма с учетом его температуры и состава составит

$$i_d^t = (\text{CO}_2 \cdot 361,67 + \text{N}_2 \cdot 260,6 + \text{O}_2 \cdot 267,38 + \text{H}_2\text{O} \cdot 303,47) / 100 = 276,98 \text{ кДж}/\text{м}^3$$

Тогда количество тепла, уносимого с отходящими газами, составит

$$Q_d = 276,98 \cdot 11,36 = 4867,48 \text{ кДж}.$$

Стенки печи практически не имеют теплоизоляции, поэтому тепловым сопротивлением стального корпуса можно пренебречь, тогда тепловые потери через стенки корпуса в окружающий воздух, согласно формуле (6)

$$Q_{\text{корп.}} = \alpha_k \cdot (t_{\text{стенки наружной}} - t_{\text{окр.воздуха}}) \cdot F, \quad (6)$$

где α_k — это коэффициент теплоотдачи, $t_{\text{стенки внутр.}}$ — температура внутренней стенки печи, $t_{\text{снаружи}}$ — температура окружающего воздуха, F — площадь теплоотдающей поверхности, равная 164 м^2 .

Значение коэффициента α_k , было определено по критериальной зависимости $Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$, где α_k входит в критерий Нуссельта.

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / l.$$

Для определения α_k вычислим критерий Нуссельта, используя формулу для свободной конвекции в неограниченном пространстве

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n.$$

Исходя из критериальной зависимости рассчитаем значение α_k

$$\alpha_k = 6,298 \quad \text{и тогда} \quad Q_{\text{пот. корп}} = 66,76 \text{ кВт.}$$

Итоговый тепловой баланс

Для теплового баланса было вычислено количество нефти, прошедшее через печь за время сгорания одного кубометра топлива. Реально расход топливного газа равен $130 \text{ м}^3/\text{ч}$ (среднее значение расхода газа с реального объекта), то есть за 1 секунду в камеру сгорания подается $0,036 \text{ м}^3$ газа. За это же время через расходомер проходит $0,146 \text{ м}^3/\text{с}$ нефти. Таким образом, 1 м^3 газа расходуется для нагрева $4,06 \text{ м}^3$ нефти. В зависимости от изменяющихся условий расчет будет автоматически корректироваться.

Тепловой баланс на 1 м^3 газа и $4,06 \text{ м}^3$ нефти представлен в таблице 4.

Таблица 4

Тепловой баланс на 1 м^3 топливного газа

№	Статья прихода	Кол-во	Статья расхода	Кол-во
1	Теплота от сгорания топлива, кДж	35 324,48	Полезно затраченная теплота, кДж	32 301
2			Потери тепла с отходящими газами, кДж	3 140,31
3			Потери через корпус печи, кДж	66,76
Итого	Приход, кДж	35 324,48	Расход, кДж	35 288,01

Коэффициент газ/воздух составил $1/10,362$.

В зависимости от скважины, кустовой площадки, пласта или месторождения состав выделяемого попутного нефтяного газа может значительно меняться, что фиксируется периодическим отбором проб.

Произведя пересчет на попутный нефтяной газ другого состава, рассчитаем, насколько изменятся результаты вычислений. Полученные результаты позволяют сделать вывод о качестве ведения технологического процесса, эффективности сгорания топливного газа, численном значении коэффициента газ/воздух.

Таблица 5

Состав попутного нефтяного газа (сравнительный)

Компонент газа	Состав, % об.
Метан, CH_4	56
Азот, N_2	3,4
Этан, C_2H_6	12,8
Пропан, C_3H_8	12,4
Бутан, C_4H_{10}	8,9
Гелий, He	0,9
Пентан, C_5H_{12}	5,6

Расчеты горения этого газа, по формулам 1–4 и данным таблицы 5, дают следующие результаты:

$$Q_H = 58259,80 \text{ кДж/м}^3; \quad V_{O_2} = 2,7665 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad L_o = 15,3466 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$L_a = 16,881 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad V_{\text{дыма}} = 18,297 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

состав дыма, об. %: CO_2 – 9,969; H_2O – 15,20; N_2 – 73,071; $\text{O}_2^{\text{изб}}$ – 1,761.

Таблица 6

Тепловой баланс на 1 м³ топливного газа иного состава

№	Статья прихода	Кол-во	Статьи расхода, кДж	Кол-во
1	Сгорание топлива, кДж	58 259,80	Нагрев нефти, кДж	32 301
2			Потери с отходящими газами, кДж	3 140,31
3			Потери через корпус печи, кДж	66,76
Итого	Приход, кДж	58 259,80	Расход, кДж	35 288,01

Дисбаланс пойдет на перегрев нефти при том же расходе газа.

Коэффициент газ/воздух для этого состава газа составил 1/16,838.

Из сравнения результатов, приведенных в таблицах 4 и 6, можно сделать вывод о разнице результатов при горении газов различного состава. Коэффициент газ/воздух (указан под таблицей) для двух этих составов значительно отличается.

Наиболее вероятно, что при постепенном изменении состава попутного нефтяного газа качество ведения процесса будет снижаться, оперативный персонал изменит количество подаваемого воздуха, ориентируясь на цвет пламени. Однако ручная подстройка неэффективна и требует изменять давление газа (уменьшить/увеличить его подачу), но чаще всего регулирующий клапан не позволяет этого сделать, так как программа ПИД регулятора работает по своему заданию, и оператор видит перегрев, но уменьшить давление газа не может без изменений в ПО.

Алгоритмы расчета теплового баланса и управления печью

Расчет теплового баланса для печи начинается с получения данных о составе попутного нефтяного газа. Получив эти данные, можно рассчитать соотношение воздуха к газу. После этого, взяв разницу температуры нефти на входе и заданную температуру, вычисляем количество газа, которое требуется на нагрев продукта.

Зная теплопотери с отходящими газами и через стенки, можно определить, сколько газа и воздуха подавать на горелки. После этого сравниваем температуру нефти на выходе и уставку, после чего корректируем количество подаваемой топливной смеси. Корректировки по количеству газа и

воздуха производятся контурами регулирования, состоящими из регулируемого клапана и датчика давления (установлен на трубе, сразу после клапана). Алгоритм представлен на рисунке 2.

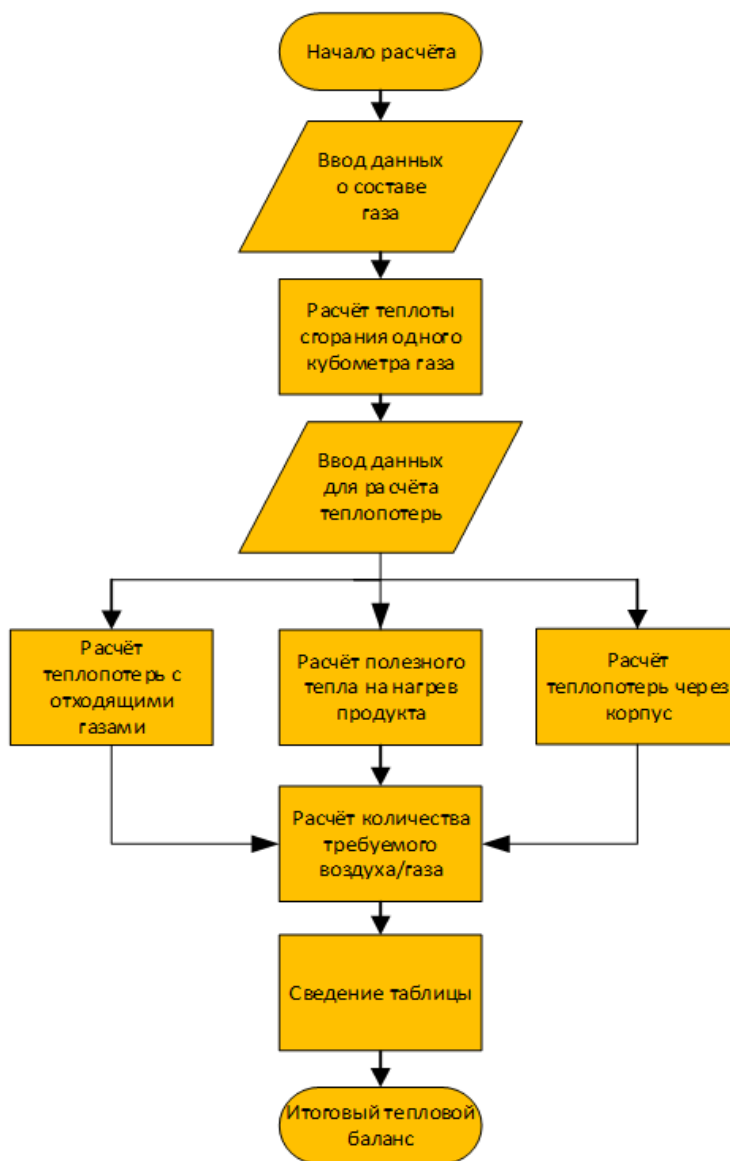


Рис. 2. Алгоритм расчета теплового баланса

Основой для создания алгоритма управления является расчет теплового баланса печи. Учитывая изменения химического состава попутного нефтяного газа, алгоритм выбирает оптимальное соотношение газ/воздух для оптимальной работы оборудования. Алгоритм представлен на рисунке 3. Актуальность рассматриваемой задачи и разработки подобных алгоритмов подтверждают работы [7, 8].



Рис. 3. Алгоритм управления работой печи

Выводы

Для решения поставленной задачи был рассчитан тепловой баланс печи и на его основании, как результат, был разработан алгоритм работы печи, включающий в себя корректировки по составу попутного нефтяного газа (периодические анализы газа), по количеству газ — воздух (корректировка по тепловому балансу печи), по объему проходящей нефти (расчет полезно затрачиваемого тепла).

При использовании предложенного алгоритма управления, основанного на тепловом балансе печи, повысится эффективность использования топлива, будут исключены факторы ручной подстройки оборудования, будет учитываться компонентный состав топлива.

Список источников

1. Сбор и подготовка нефти и газа. Технология и оборудование / А. Р. Хафизов, Н. В. Пестрецов, В. В. Чеботарев [и др.] ; под ред. А. Р. Хафизова, Н. В. Пестрецова, В. В. Шайдакова. — Уфа : Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2002. — 475 с. — Текст : непосредственный.
2. Геология нефти и газа : учебник для вузов / Э. А. Бакиров, В. И. Ермолкин, В. И. Ларин [и др.] ; под ред. Э. А. Бакирова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Недра, 1990. — 240 с. — Текст : непосредственный.
3. Скобло, А. И. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, / А. И. Скобло, И. А. Трегубова, Ю. К. Молоканов. — Москва : Химия, 2010. — 584 с. — Текст : непосредственный.
4. Арнольд, Кен Е. Справочник по оборудованию для комплексной подготовки нефти (= Surface production operations design of oil handling systems and facilities) / К. Арнольд, М. Стюарт ; пер. с англ. Фалалеев Б. Л. ; под ред. Паляя А. О. — 3-е изд. — Москва : Премиум Инжиниринг, 2011. — 752 с. — Текст : непосредственный.
5. Тинькова, С. М. Теплофизика и металлургическая теплотехника : учебное пособие / С. М. Тинькова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2017. — 167 с. — Текст : непосредственный.
6. Прошкин, А. В. Теплотехника металлургического производства : учебное пособие / А. В. Прошкин, С. М. Тинькова ; Федеральное агентство по образованию, Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и золота. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2007. — 144 с. — Текст : непосредственный.
7. Доу Чжэньхай. Самоадаптирующийся алгоритм нечеткого управления печью для нагрева сырой нефти с изменяемыми правилами наклона / Доу Чжэньхай. — Текст : непосредственный // Материалы Международного конгресса по образовательным информационным технологиям, 2010. — С. 122–124.
8. Разработка виртуального тренажера — имитатора возникновения аварийной ситуации — снижения расхода нагреваемого продукта в трубчатой нагревательной печи / А. М. Хафизов, Н. А. Кошелев, Д. А. Гумеров [и др.]. — Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. — 2016, № 10-3. — С. 576–580.

References

1. Khafizov, A. R., Chebotarev, V. V., Pestretsov, N. V., Shaydakov, V. V., Laptev, A. B., Bugay, D. E., ... & Chernova, K. V. (2002). Sbor i podgotovka nefiti i gaza. Tekhnolo-giya i oborudovanie. Ufa. Ufimskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskoy universitet Publ., 475 p. (In Russian).
2. Bakirov, E. A., Ermolkin, V. I., Larin, V. I., Mal'tsev, A. K., & Rozhkov, E. L. (1990). Geologiya nefiti i gaza. Moscow. Nedra Publ., 240 p. (In Russian).
3. Skoblo, A. I., Tregubova, I. A., & Molokanov Yu. K. (2010). Protsessy i apparaty neftepererabatyvayushchey i neftekhimicheskoy promyshlennosti. Moscow. Khimiya, Publ., 584 p. (In Russian).
4. Arnold, K., & Stewart, M. (2008). Surface Production Operations: Design of Oil Handling Systems and Facilities, Elsevier. (In English).
5. Tin'kova, S. M. (2017). Teplofizika i metallurgicheskaya teplotekhnika. Krasnoyarsk. Sibirskiy federal'nyy universitet Publ., 167 p. (In Russian).
6. Proshkin, A. V. (2007). Teplotekhnika metallurgicheskogo proizvodstva : uchebnoe posobie. Krasnoyarsk, Sibirskiy federal'nyy universitet Publ., 144 p. (In Russian).
7. Dou Chzhen'khay. (2010). Samoadaptiruyushchiysya algoritm nechetskogo upravleniya pech'yu dlya nagreva syroy nefiti s izmenyaemyimi pravilami naklona. Materialy Mezhdunarodnogo kongressa po obrazovatel'nyim informatsionnym tekhnologiyam, pp. 122-124. (In Russian).
8. Khafizov, A. M., Koshelev, N. A., Gumerov, D. A., Kryshko, K. A., & Sidorov, D. A. (2016). The development of the virtual simulator — imitator of an emergency is to decrease the consumption of the heated product in a tubular heating furnace. Fundamental research, (10-3), pp. 576-580. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about the authors

Смуйкас Роман Александрович, аспирант кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии, Института цветных металлов, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Пискажова Татьяна Валериевна, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии Института цветных металлов, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Тинькова Светлана Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры общей металлургии Института цветных металлов, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Roman A. Smuykas, Postgraduate at the Department of Production Process Automation in Metallurgy, Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Tatiana V. Piskazhova, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Production Process Automation in Metallurgy, Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Svetlana M. Tinkova, Candidate of Engineering, Associate Professor at the General Metallurgy Department, Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Статья поступила в редакцию 04.12.2024; одобрена после рецензирования 09.01.2025; принята к публикации 14.01.2025.

The article was submitted 04.12.2024; approved after reviewing 09.01.2025; accepted for publication 14.01.2025.