

УДК 004.942  
DOI 10.17513/snt.40388

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ИТЕРАЦИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛНОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Воробьев М.С., Орехов В.А., Бобков В.И., Быков А.А.

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Смоленске, Смоленск, e-mail: vorobeow.mischa@yandex.ru

Целью данного исследования являлось изучение алгоритмов расчета калориметрической температуры горения различных видов в условиях доменной плавки. В работе представлены результаты численного моделирования процессов сгорания, включая сравнительный анализ различных типов топлива и динамику горения в доменной печи. Выполнен расчёт низшей температуры сгорания топлива, при которой происходит преобразование продуктов горения в газообразное состояние и их удаление вместе с дымом. На основании имеющихся данных определены коэффициенты перерасчёта расхода воздуха, требующегося для полного сгорания единицы топлива. Установлено, что в условиях дефицита кислорода происходит неполное сгорание топлива, что приводит к его перерасходу и снижению экономических показателей, это актуально для доменных печей, которые составляют до 70% от общего расхода теплоносителей на металлургических предприятиях с полным циклом. Выявлена целесообразность применения попутного нефтяного газа в доменных печах предприятий черной металлургии с точки зрения повышения энергоэффективности и экологичности. Для определения калориметрической температуры горения топлива произведено сравнение численных методов итерации и интерполяции с созданием математической модели, которая позволяет повысить экономические показатели за счёт точности расчетов соотношения температуры, количества топлива и расхода воздуха в зоне горения. На основании эксперимента научно обоснована целесообразность применения газообразного топлива вместо твёрдого или жидкого. Разработанный численный метод реализован в комплексе программ для проведения вычислительного эксперимента с применением современных компьютерных технологий. Программа разработана с применением языка программирования C++ и кроссплатформенной среды Visual Studio, что гарантирует её работу на любой операционной системе. Наличие в программе существующей базы данных, содержащих основные химические показатели газообразного, жидкого или твёрдого топлива, позволяет автоматизировать процесс расчёта.

**Ключевые слова:** метод итераций, интерполяция, моделирование, горение, печь, топливо, температура горения

*Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2023-0012.*

## THE USE OF THE ITERATION METHOD FOR CALCULATING COMPLETE FUEL COMBUSTION IN BLAST FURNACES OF IRON AND STEEL ENTERPRISES

Vorobyov M.S., Orekhov V.A., Bobkov V.I., Bykov A.A.

Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute,  
Smolensk, e-mail: vorobeow.mischa@yandex.ru

The purpose of this study was to investigate algorithms for calculating the calorimetric combustion temperature of various types of combustion under blast furnace melting conditions. The paper presents the results of numerical modeling of combustion processes, including a comparative analysis of various types of fuel and combustion dynamics in a blast furnace. The calculation of the lowest fuel combustion temperature has been performed, at which the combustion products transform into a gaseous state and are removed together with the smoke. Based on the available data, air flow recalculation coefficients required for complete combustion of a unit of fuel have been determined. It has been established that under conditions of oxygen deficiency, incomplete fuel combustion occurs, leading to its overconsumption and a decrease in economic performance, which is relevant for blast furnaces, which account for up to 70% of the total consumption of heat carriers at integrated steel plants. The feasibility of using associated petroleum gas in blast furnaces of ferrous metallurgy enterprises has been identified from the standpoint of improving energy efficiency and environmental friendliness. To determine the calorimetric temperature of fuel combustion, a comparison of numerical methods of iteration and interpolation has been made with the creation of a mathematical model, which allows increasing economic indicators due to the accuracy of calculations of the ratio of temperature, amount of fuel, and air flow in the combustion zone. Based on the experiment, the scientific rationale for the feasibility of using gaseous fuel instead of solid or liquid fuel has been scientifically substantiated. The developed numerical method is implemented in a set of programs for conducting a computational experiment using modern computer technologies. The program is developed using the C++ programming language and the cross-platform Visual Studio environment, which guarantees its operation on any operating system. The presence of an existing database in the program containing basic chemical parameters of gaseous, liquid, or solid fuel allows automating the calculation process.

**Keywords:** iteration method, interpolation, modeling, combustion, furnace, fuel, combustion temperature

*The work was carried out within the framework of the state assignment, project No. FSWF-2023-0012.*

### Введение

На заводах чёрной металлургии и горно-обогатительных комбинатах наибольшее распространение получили следующие виды топлива: кокс, каменные и бурые угли, природный, доменный и коксовый газы [1; 2]. В связи с выработкой газовых и нефтяных месторождений может вновь возрасти роль генераторных газов [3]. При процессе горения возможны колебания параметров подаваемого в зону горения топлива, что приводит к изменению калориметрической температуры горения и изменениям в технологическом процессе работы плавильной печи [4]. В зависимости от химического состава руды, загружаемой в доменные или агломерационные печи, может потребоваться изменение состава рабочего топлива [5; 6]. Такая необходимость возникает, например, при определении состава горючей массы кокса для расчёта шихты доменной плавки [7]. Состав сухого газообразного топлива на рабочее пересчитывают с использованием коэффициента пересчёта, а также процент водяных паров по объёму в топливе [8].

**Цель исследования** – разработка численных методов определения калориметри-

ческой температуры горения газообразного, твёрдого или жидкого топлива в условиях доменной плавки.

### Материалы и методы исследования

На предприятиях черной металлургии и агломерационных фабриках преимущественно используется полное сжигание топлива в зоне горения. При полном сжигании топлива в продуктах горения присутствуют только высшие окислы и простые газы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  [9]. Расчёты полного горения топлива ведутся в соответствии с химическими реакциями полного горения компонентов топлива. Эти расчёты не отражают динамику процесса горения и проводятся на основе простых уравнений теплового и материального баланса. Целесообразно определять теплоту сгорания топлива при условии, когда продукты горения находятся в газообразном состоянии, то есть температура их больше  $100^\circ\text{C}$ , так как это соответствует условиям удаления дыма из печи. Теплота сгорания топлива, определённая для таких условий, называется низшей –  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ . Так как состав твёрдого, жидкого и газообразного топлива определён различным способом, то формулы для определения  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  также различаются.

Для твердого и жидкого топлива (табл. 1) чаще всего употребляется формула:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 340C^{\text{p}} + 1030H^{\text{p}} - 109(O^{\text{p}} - S^{\text{p}}) - 25W^{\text{p}} \text{ кДж/кг},$$

для газообразного (табл. 2) используют формулу:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 127.7\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358\text{CH}_4 + 596\text{C}_2\text{H}_4 + 564\text{C}_2\text{H}_2 + \\ + 636\text{C}_2\text{H}_6 + 913\text{C}_3\text{H}_8 + 1185\text{C}_4\text{H}_{10} + 1465\text{C}_5\text{H}_{12} + 234\text{H}_2\text{S} \text{ кДж/м}^3.$$

**Таблица 1**

Элементарный состав некоторых видов твёрдого и жидкого топлива [10]

| Топливо          | C <sup>p</sup> | H <sup>p</sup> | O <sup>p</sup> | N <sup>p</sup> | S <sup>p</sup> | A <sup>p</sup> | W <sup>p</sup> |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Торф             | 30.36          | 3.31           | 19.87          | 1.49           | 0.17           | 4.8            | 40             |
| Бурый уголь      | 32.7           | 2.44           | 11.71          | 0.46           | 1.45           | 16.24          | 35             |
| Кокс             | 85.51          | 0.69           | 0.13           | 0.17           | 0.7            | 9.6            | 3.2            |
| Мазут            | 83.76          | 10.22          | 0.48           | 0.47           | 0.57           | 0.5            | 4.0            |
| Бензин           | 85.0           | 14.9           | 0.05           | -              | 0.05           | -              | -              |
| Керосин          | 86.0           | 13.7           | 0.1            | 0.1            | 0.1            | -              | -              |
| Соляровое масло  | 86.5           | 12.8           | 0.15           | 0.15           | 0.4            | -              | -              |
| Смола перегонная | 85.72          | 5.79           | 3.68           | 3.58           | 0.78           | 0.15           | 0.3            |

Таблица 2

Состав некоторых видов газообразного топлива [10]

| Вид топлива                         | Составляющая газообразного топлива |    |                 |                               |                               |                               |                                |                                |                 |                |                |
|-------------------------------------|------------------------------------|----|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------|----------------|
|                                     | H <sub>2</sub>                     | CO | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | f <sub>в</sub> |
| Природный газ                       | -                                  | -  | 93.21           | -                             | 4.11                          | 0.8                           | 0.23                           | 0.36                           | -               | 1.29           | -              |
| Коксовальный газ                    | 55                                 | 6  | 27              | 1.5                           | 0.8                           | 0.6                           | -                              | -                              | -               | 9              | 35             |
| Доменный газ                        | 2.1                                | 29 | 0.5             | 0.4                           | -                             | -                             | -                              | -                              | 10              | 58             | 30             |
| Попутный газ нефтяных месторождений | -                                  | -  | 43              | -                             | 14.8                          | 15.6                          | 7.8                            | 3.3                            | 2.8             | 12.7           | -              |

Теоретическим расходом воздуха  $L_o^B$  называют минимальное количество воздуха, требующееся для полного сгорания единицы (массы или объёма) топлива. Для расчёта  $L_o^B$  необходимо определить минимальный объём кислорода для полного сжигания единицы топлива –  $V_{O_2}^{теор}$ , так как азот не принимает участия в горении [11; 12]. Объём  $V_{O_2}^{теор}$  определяют в соответствии со стехиометрическими коэффициентами в реакциях полного горения по формулам:

а) для твёрдого и жидкого топлива

$$V_{O_2}^{теор} = 0.01 \cdot [1.867C^P + 5.6H^P - 0.7(S^P - O^P)], \text{ м}^3 / \text{кг топлива};$$

б) для газообразного топлива

$$V_{O_2}^{теор} = 0.01 \cdot [0.5H_2 + 0.5CO + 1.5H_2S + \sum (m + n / 4) C_m H_n - O_2], \text{ м}^3 / \text{м}^3 \text{ топлива}.$$

Если обозначить объёмную долю кислорода в воздухе, идущем на горение –  $K_{O_2}$ , то теоретически необходимое количество воздуха определяется по формуле  $L_o^B = V_{O_2}^{теор} / K_{O_2}$ . Действительный расход воздуха  $L_d^B$  – это количество воздуха, в действительности подающееся на горение топлива, оно может быть меньше и больше теоретически необходимого [13; 14]. Для характеристики полноты горения введено понятие коэффициента расхода воздуха  $n = L_d^B / L_o^B$ . Понятно, что если  $n \geq 1$ , то горение полное, если  $n < 1$ , то горение не полное. При полном горении топлива рекомендуются следующие значения расхода воздуха:

- для газообразного топлива

$$n = 1.05 \div 1.1;$$

- для жидкого топлива

$$n = 1.15 \div 1.2;$$

- для твёрдого топлива при факельном горении

$$n = 1.2 \div 1.3.$$

Так как составляющие продуктов горения известны, то определение объёма продуктов полного горения дыма сводится к определению объёмов отдельных составляющих  $V_{CO_2}$ ,  $V_{SO_2}$ ,  $V_{H_2O}$ ,  $V_{N_2}$ ,  $V_{O_2}$  в соответствии с реакциями горения и к суммированию их для получения объёма дыма  $V_d$ . Состав дыма в % по объёму находится обычным способом, а расчёт  $V_d$  для твёрдых и жидких топлив производится по формулам:

$$V_{CO_2} = 0.01867C^P \text{ м}^3_{CO_2} / \text{кг топлива},$$

$$V_{SO_2} = 0.007S^P \text{ м}^3_{SO_2} / \text{кг топлива},$$

$$V_{H_2O} = 0.112H^P + 0.01242W^P + 0.00124f_v L_o^B \text{ м}^3_{H_2O} / \text{кг топлива},$$

$$V_{N_2} = 0.008N^P + (1 - K_{O_2}) L_d^B \text{ м}^3_{N_2} / \text{кг топлива},$$

$$V_{O_2}^{наб} = (n - 1) K_{O_2} L_d^B \text{ м}^3_{O_2} / \text{кг топлива},$$

$$V_d = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}^{наб} \text{ м}^3 \text{ дыма} / \text{кг топлива}.$$

Для газообразного топлива:

$$V_{\text{CO}_2} = 0.01 \cdot [\text{CO}_2 + \text{CO} + \sum m C_m \text{H}_n], \text{ м}^3_{\text{CO}_2} / \text{м}^3 \text{ топлива},$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0.01 \text{H}_2\text{S}, \text{ м}^3_{\text{SO}_2} / \text{м}^3 \text{ топлива},$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0.01(\text{H}_2 + \sum n / 2 C_m \text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}) + 0.00124 f_{\text{в}} L_{\text{д}}^{\text{в}} \text{ м}^3_{\text{H}_2\text{O}} / \text{кг топлива},$$

$$V_{\text{N}_2} = 0.01 \text{N}_2 + (1 - K_{\text{O}_2}) L_{\text{д}}^{\text{в}} \text{ м}^3_{\text{N}_2} / \text{кг топлива}.$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Калориметрическая температура горения  $t_{\text{кал}}$  – это температура, которую имели бы продукты горения, если бы всё тепло, внесённое в очаг горения и выделившееся при горении, пошло бы на их нагревание.  $t_{\text{кал}}$  определяется по формуле:

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{н}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{фт}} - Q_{\text{хн}}}{V_{\text{д}} \cdot c_{\text{д0}}^{\text{кал}}}, \quad (1)$$

полученной из уравнения теплового баланса, где  $Q_{\text{фв}} = L_{\text{д}}^{\text{в}} c_{\text{в0}}^{\text{н}} t_{\text{в}}$  – тепло, внесённое в очаг горения нагретым воздухом, кДж/м<sup>3</sup>,  $Q_{\text{фт}} = c_{\text{т0}}^{\text{т}} t_{\text{т}}$  – тепло, внесённое в очаг горения нагретым топливом, кДж/м<sup>3</sup>,  $Q_{\text{хн}}$  – теплота химического недожога топлива,  $c_{\text{в0}}^{\text{н}}$ ,  $c_{\text{т0}}^{\text{т}}$ ,  $c_{\text{д0}}^{\text{кал}}$  – удельные, средние теплоёмкости воздуха, топлива и дыма.

Если ввести некоторые стандартные условия при расчёте калориметрической температуры горения, то получается удобное понятие для сравнения различных видов топлива между собой – стандартная калориметрическая температура горения  $t_{\text{кал}}^0$ , называемая также иногда жаропроизводительностью [15; 16]. Стандартные условия следующие:

1) подогрев топлива и воздуха отсутствует –  $t_{\text{г}} = t_{\text{в}} = 0^\circ\text{C}$ ;

2) химический недожог отсутствует –  $Q_{\text{хн}} = 0$ ;

3) сгорание топлива идёт с коэффициентом избытка воздуха  $n = 1$ ;

4) горение идёт при стандартных внешних условиях: атмосферное давление – 760 мм рт. ст., температура окружающей среды  $0^\circ\text{C}$ . При этих условиях

$$t_{\text{кал}} = t_{\text{кал}}^0 = \frac{Q_{\text{н}}}{V_{\text{д}} \cdot c_{\text{д0}}^{\text{кал}}}. \quad (2)$$

Прямое определение  $t_{\text{кал}}$  по формулам (1), (2) невозможно, так как  $c_{\text{д0}}^{\text{кал}}$  зависит от  $t_{\text{кал}}$ , которая неизвестна, поэтому в расчётной практике используют три способа

определения калориметрической температуры горения: 1) метод итераций; 2) интерполяционный способ; 3) с использованием  $i$ - $t$  диаграммы (или её компьютеризированного аналога) для дыма расчётного состава.

Метод итераций или последовательных приближений состоит в том, что в первом приближении произвольно задаются некоторым значением калориметрической температуры –  $t_{\text{кал}}^{(1)}$  определяют  $c_{\text{д0}}^{\text{кал}(1)}$ , а затем по формуле (1) или (2) определяют значение калориметрической температуры во втором приближении –  $t_{\text{кал}}^{(2)}$ . Затем находят разность

$\Delta = |t_{\text{кал}}^{(2)} - t_{\text{кал}}^{(1)}|$  и сравнивают её с некоторым наперёд заданным значением этой разности –  $\delta$   $^\circ\text{C}$ , которая характеризует точность расчёта. Если  $\Delta > \delta$ , то делают следующий шаг, если  $\Delta < \delta$ , то считают, что  $t_{\text{кал}}^{(2)} = t_{\text{кал}}$ . В общем случае  $t_{\text{кал}} = t_{\text{кал}}^{(i)}$ , если  $|t_{\text{кал}}^{(i)} - t_{\text{кал}}^{(i-1)}| < \delta$ . Метод удобен при программной реализации на компьютере. На рисунке 1 представлена форма ввода типа топлива и его химического состава для расчета калориметрической температуры и низшей теплоты сгорания и параметров металлургической печи. Интерфейс позволяет выбрать вид и топливо с автоматическим заполнением формы химического состава.

В методе интерполяции калориметрическую температуру горения определяют по калориметрическому теплосодержанию:

$$i_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{н}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{фт}} - Q_{\text{хн}}}{V_{\text{д}}}.$$

Для этого задаются некоторым значением температура дыма  $t_{\text{д1}}$ , рассчитывают соответствующее ей удельное теплосодержание  $i_1$ , сравнивают  $i_1$  и  $i_{\text{кал}}$ . Пусть  $i_{\text{кал}} > i_1$ , тогда выбираем значение  $t_{\text{д2}}$ , такое, чтобы  $t_{\text{кал}} < i_2$ , и определяем  $t_{\text{кал}}$  по интерполяционной формуле:

$$t_{\text{кал}} = t_{\text{д1}} + \frac{t_{\text{д2}} - t_{\text{д1}}}{i_2 - i_1} (i_{\text{кал}} - i_1).$$

1. Выбор топлива

Вид топлива:

Топливо:

Избыточное давление дутья:  кПа

Скорость дутья:  м/с

Фокус горения:  °C

2. Состав выбранного газообразного топлива

|                               |    |                                |      |                 |      |
|-------------------------------|----|--------------------------------|------|-----------------|------|
| H <sub>2</sub>                | -  | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 14.8 | CO <sub>2</sub> | 2.8  |
| CO                            | -  | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 15.6 | N <sub>2</sub>  | 12.7 |
| CH <sub>4</sub>               | -  | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 7.8  | f <sub>0</sub>  | -    |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 43 | C <sub>3</sub> H <sub>12</sub> | 3.3  |                 |      |

Рис. 1. Форма ввода параметров топлива  
Источник: составлено авторами

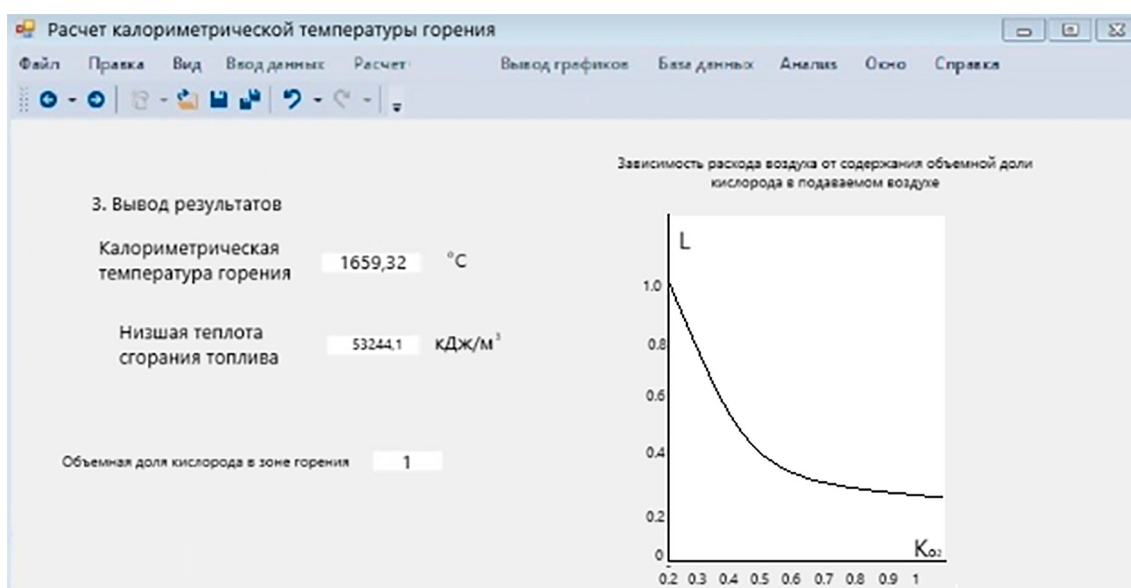


Рис. 2. Графическое представление результатов расчёта  
Источник: составлено авторами

При графическом способе определения  $t_{\text{кал}}$  следует иметь диаграмму зависимости удельного теплосодержания дыма расчетного состава от температуры и по известному удельному калориметрическому теплосодержанию определять  $t_{\text{кал}}$ .

Графические способы определения результатов процесса горения базируются на формулах, приведенных выше. Форма представления графиков может быть различной, обычно чем больше требование

к полноте расчёта, тем сложнее получаются графики зависимостей, а точность определения снижается.

Авторами разработан комплекс программ для компьютеризированного расчёта полного горения разнообразного топлива и построения графика зависимости расхода воздуха, с использованием предложенного метода итераций (рис. 2). Результаты вычислительных экспериментов по расчёту  $V_{\text{д}}^{\text{отн}}$  и  $L_{\text{д}}^{\text{в}}$  приведены на рисунках 3, 4.

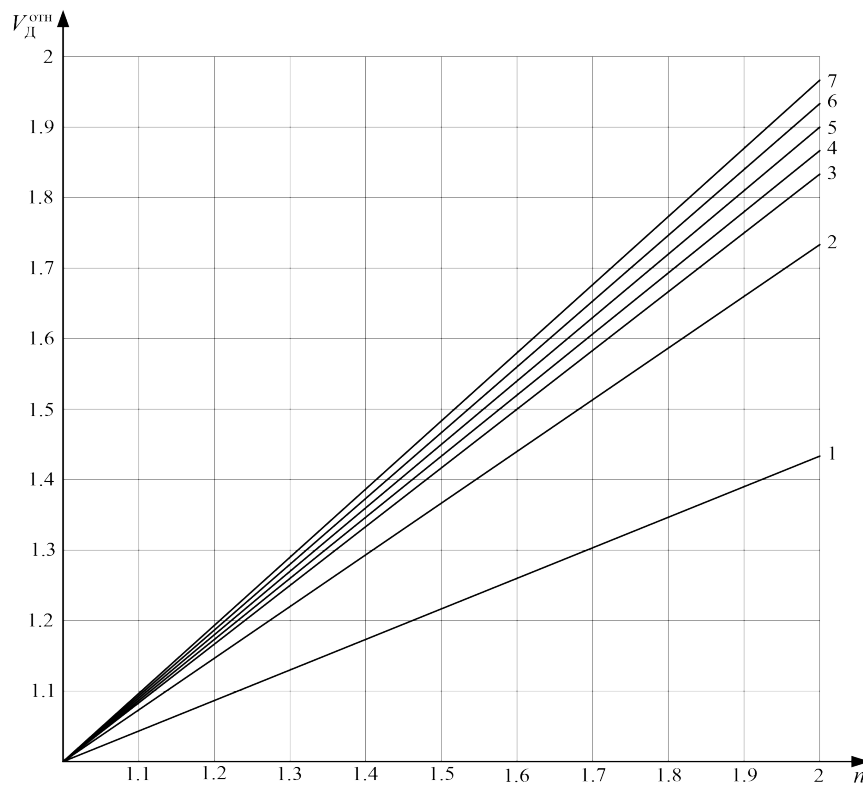


Рис. 3. Зависимость безразмерного удельного выхода дыма от коэффициента расхода воздуха при  $K_{O_2} = 0.21$  для некоторых промышленных видов топлива:

1 – доменный газ; 2 – КДС 10МДж/м<sup>3</sup>; 3 – бурый уголь; 4 – коксовый газ;  
5 – природный газ; 6 – смесь 75% природного газа, 25% мазут; 7 – мазут.

Значения  $V_d^0$  м<sup>3</sup> дыма/м<sup>3</sup> (кг) топлива: 1 – 1.57; 2 – 3.11; 3 – 3.87; 4 – 4.95; 5 – 11.71; 6 – 14.01; 7 – 10.8

Источник: составлено авторами

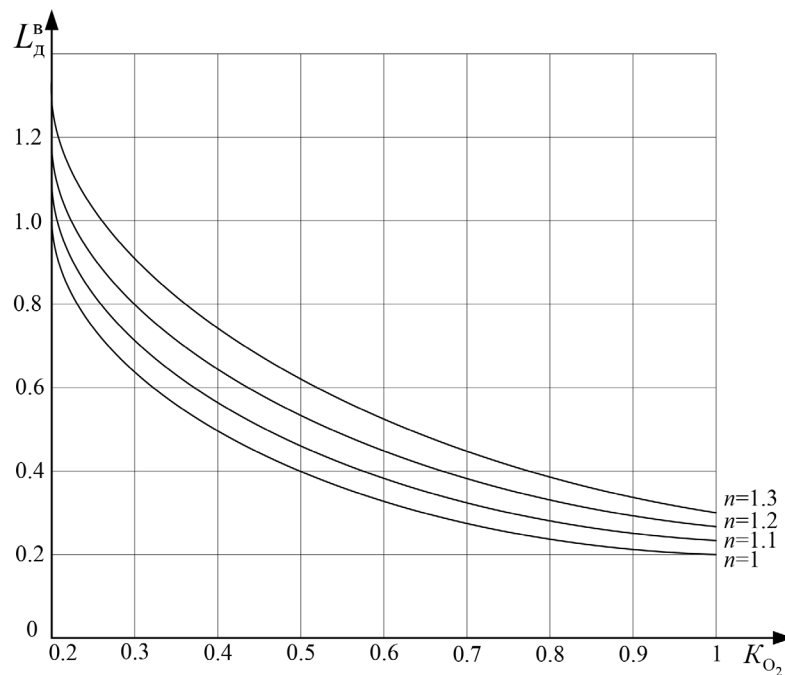


Рис. 4. Зависимость относительного действительного расхода воздуха от объёмной доли кислорода в воздухе

Источник: составлено авторами

### Заключение

Результатом исследования стала программа для упрощения и автоматизации расчетов зависимости безразмерного выхода дыма от коэффициента расхода воздуха для обеспечения полноты сгорания топлива. Наличие встроенной базы данных, содержащих химический состав различных типов топлива, сокращает время процесса ввода данных в программу. Определено, что лучшие показатели теплоты сгорания и пониженного удельного выхода дыма были у попутного нефтяного газа. Его использование в доменных печах помогает избежать потери ценного ресурса в процессе нефтедобычи. В исследовании было проведено сравнение методов итерации и интерполяции для точного определения калориметрической температуры горения. Для программной реализации наиболее точным является метод итерации, так как он имеет превосходство по скорости расчёта по сравнению с другими численными методами и более удобен в реализации на практике.

### Выводы

На основании проведённого исследования можно сделать выводы:

- установлено минимальное необходимое количество воздуха для полного сгорания единицы топлива;
- проведено сравнительное исследование численных методов определения калориметрической температуры горения, что позволило выбрать наиболее эффективный и точный способ расчёта;
- научно обоснована эффективность применения попутного нефтяного газа в доменных печах предприятий чёрной металлургии.

### Список литературы

1. Кокшаров В.А., Киршина И.А. Стратегия энергопотребления природного газа предприятиями черной металлургии // Микроэкономика. 2020. № 4. С. 38-46. DOI: 10.33917/mic-4.93.2020.38-46.
2. Magerramova T.M., Dadashev K.E. Automation of the technological coke production process // Флагман науки. 2025. № 2 (25). Р. 191-193. DOI: 10.37539/2949-1991.2025.25.2.018.
3. Безуглов Р.В., Воловиков В.Ю., Папин В.В., Белов А.А., Дьяконов Е.М., Михайлов В.В. Исследование процесса выработки электрической энергии от генераторного газа, полученного путем переработки твердых отходов //

Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2024. Т. 67. № 4. С. 125-133. EDN: AQPOQE.

4. Рядинская А.П., Череповицына А.А. Утилизация попутного нефтяного газа в России: методы и перспективы производства продуктов газохимии // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2022. Т. 25. № 2 (76). С. 19-34. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2022.76.002.

5. Сеченов П.А. Выбор критериев для сокращения неизвестных в методе Ньютона-Рафсона в задаче нахождения равновесного состава железной руды и топлива // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2024. № 5. С. 82-90. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.5.082-090.

6. Прохоров С.Г., Глазунов С.А. Повышение энергоэффективности плавильной печи // Нефтегазовое дело. 2021. № 1. С. 5-12. DOI: 10.17122/ogbus-2021-1-5-12.

7. Иванов А.В. Повышение эффективности доменной плавки в результате стабилизации влажности кокса // Наука и производство Урала. 2020. Т. 16. С. 15-17. EDN: THVAKB.

8. Кузин А.В., Афанасьева З.К., Падалка А.В., Кочура В.В., Кураковская А.В. Повышение эффективности технологии доменной плавки при вдувании пылеугольного топлива // Металлург. 2024. № 7. С. 16-21. EDN: XVQSSO.

9. Калинин В.В., Черненко А.С. Влияние давления газовой смеси на характеристики зажигания, горения и самопроизвольного погасания коксов углей разного полиморфизма // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. № 2. С. 96-103. DOI: 10.15372/FGV20210210.

10. Семикин И.Д., Аверин С.И., Радченко И.И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. М.: Металлургия, 1965. 391 с.

11. Росляков П.В., Сергеева А.В., Гусева Т.В., Рудомазин В.В., Черкасский Е.В. Отраслевая методика оценки выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании органических видов топлива на предприятиях теплоэнергетики // Энергетик. 2024. № 3. С. 29-39. DOI: 10.34831/EP.2024.42.46.006

12. Васильев М.И., Андреев С.М., Васильев И.И. Регулятор подачи воздуха в рабочее пространство тепловой установки, основанный на нечеткой логике // Прикладная математика и вопросы управления. 2020. № 2. С. 99-121. URL: [https://vestnik.pstu.ru/matmech/archives/?id=&folder\\_id=9395](https://vestnik.pstu.ru/matmech/archives/?id=&folder_id=9395). DOI: 10.15593/2499-9873/2020.

13. Васильев М.И., Андреев С.М., Васильев И.И. Нечеткое управление подачей воздуха в рабочее пространство тепловой установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2020. № 2. С. 137-159. DOI: 10.15593/2224-9400/2020.2.11.

14. Титов В.Н., Карпов А.В., Хоперский Р.И. Аналитическая оценка поведения биоугля как дополнительно вдуваемого топлива в условиях доменной плавки // Черные металлы. 2022. № 8. С. 4-9. URL: <https://rudmet.com/journal/2135/article/35554/>. DOI: 10.17580/chm.2022.08.01.

15. Рутковский А.Л., Макоева А.К., Бутов Х.А., Хмара В.В. Процессы факельного горения топлива в промышленных вращающихся печах барабанного типа // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 8 (122). С. 8-14. EDN: XOSUUC.

16. Белозеров В.В. О вероятностно-физическом и энтропийном подходах к процессам горения и определения пожарной опасности // Безопасность техногенных и природных систем. 2021. № 4. С. 36-51. DOI: 10.23947/2541-9129-2021-4-36-51.