

УДК 669.162.231.085 (088.8)

Левченко Б.А., Лышеленко В.М.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА РАБОТЫ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

К воздухонагревателям доменных печей предъявляют высокие требования к надежности и эффективности работы, к методам контроля температурных полей в кожухе, стенах воздухонагревателя, камере горения, куполе, поднасадочном устройстве, а также в насадочной камере, особенно на стыке зон с различными огнеупорными материалами.

Решающая роль в совершенствовании этих устройств и выбора оптимальных условий их работы принадлежит математическому моделированию, учитывающему технологические требования доменной плавки, аэродинамику потоков теплоносителей, переизлучение вдоль каналов и конвекцию газов в насадке в режиме отделения, а также при перекидке клапанов.

Исследованию температурных полей и аэродинамики доменных воздухонагревателей посвящены работы отечественных и зарубежных ученых М. Хаузена, Э.М. Гольдфарба, В.М. Малкина, Ф.Р. Шкляра, С.Л. Соломенцева, В.Л. Советкина, Ю.Г. Ярошенко и др.

Математическая модель функционирования блока воздухонагревателей на базе метода элементарных тепловых балансов [1] также была разработана в Харьковском политехническом институте в 70-х годах прошлого столетия. Бурное развитие вычислительной техники, ее скоростные возможности позволяют отказаться от ряда допущений заложенных в старых программах расчета, сформулировать математическую модель, отражающую более адекватно реальные физические процессы в воздухонагревателях доменных печей, и этим самым повысить точность получаемых результатов.

Разработана концепция универсального вычислительного комплекса (УВК) с учетом особенностей конструкции, эксплуатации и параметров объекта (рис. 1). При разработке УВК применен принцип модульной компоновки, что дает возможность при необходимости расширить функциональные возможности комплекса.

Модули 1,2 содержат данные о различных по конструкции воздухонагревателях, типах насадок, критериальных зависимостей для определения теплообмена в каналах насадки (нами использованы критериальные зависимости, предложенные ВНИИМТом для каналов строительной конструкции), теплофизических свойствах огнеупоров и теплоносителей.

Модуль 3 содержит относительно самостоятельные блоки расчета температурных полей насадки и продуктов сгорания в газовый период, а также температурных полей насадки и воздуха в дутьевой период.

Разбивая исследуемую область (канал воздухонагревателя и насадку) сеткой, ищем вместо непрерывных функций температур насадки и теплоносителей сеточные функции. Расчетные зависимости для определения температур следующие:

– для элемента объема насадки

$$t_{i,\tau+1} = t_{i,\tau} + \frac{\alpha_{i,\tau} F_{\delta,i} \Delta\tau (t_{i,\tau}^e - t_{i,\tau})}{V_i C_H(t_{i,\tau}) \rho_H(t_{i,\tau})} + \frac{\lambda_H(t_{i-1,\tau}) F_{m,i} \Delta\tau (t_{i-1,\tau} - t_{i,\tau})}{V_i C_H(t_{i,\tau}) \rho_H(t_{i,\tau}) \Delta z} - \frac{\lambda_H(t_{i,\tau}) F_{m,i} \Delta\tau (t_{i,\tau} - t_{i+1,\tau})}{V_i C_H(t_{i,\tau}) \rho_H(t_{i,\tau}) \Delta z}; \quad (1)$$

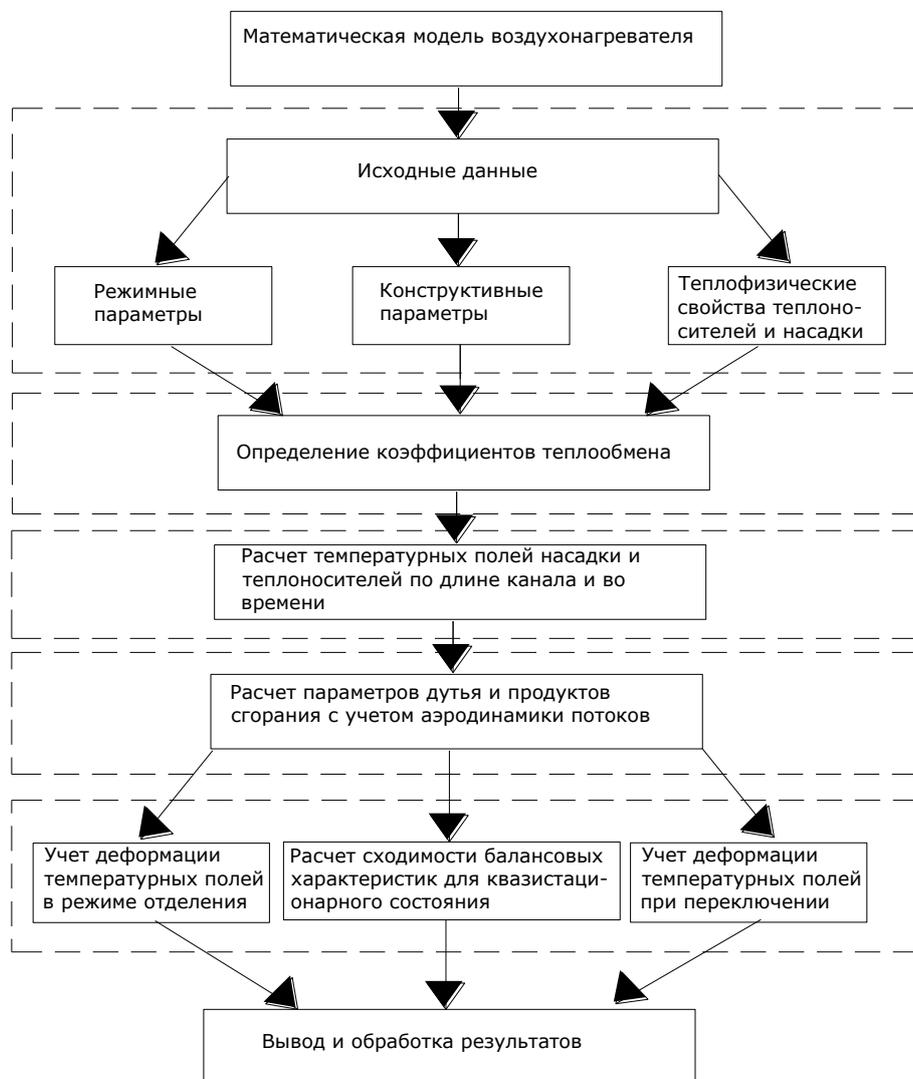


Рисунок 1 – Схема математической модели регенеративного воздухонагревателя доменной печи

– для продуктов сгорания:

$$t_{i+1,\tau}^r = t_{i,\tau}^r - \frac{\alpha_{i,\tau} F_{\delta,i} \Delta\tau (t_{i,\tau}^r - t_{i,\tau})}{G_r C_r(t_{i,\tau}^r)}, \quad (2)$$

$$t_{i+1,\tau}^r = t_{i,\tau}^r - \frac{V_i C_H(t_{i,\tau}) \rho_H(t_{i,\tau}) (t_{i,\tau} - t_{i,\tau-1})}{G_r C_r(t_{i,\tau}^r)}. \quad (3)$$

Аналогично можно получить уравнения для насадки и потока в дутьевой период. Для расчета распределения температуры потоков в последующий момент времени при временном шаге $\Delta\tau$ необходимо располагать данными о распределении температуры по длине канала на этом временном шаге.

Одномерная постановка задачи предполагает введение приведенного коэффициента теплоотдачи как функции коэффициента массивности насадки.

Чтобы стабилизировать температуру дутья, поддерживая ее на достаточно высоком уровне, применяются различные приемы включения регенеративных воздухонагревателей и байпасирование их холодным дутьем. Вычислительный комплекс учитывает такие режимы работы блоков воздухонагревателей, а также работу аппаратов при отключенном байпасе.

Модули 4, 5 состоят из новых блоков, которые позволяют учитывать поля скоростей теплоносителей в поперечном сечении насадочной камеры воздухонагревателей, изменение температурного поля при переключениях за счет продувки каналов вентилятором воздухом, а также за счет переизлучения в каналах насадки.

Тепловой поток, передаваемый излучением от участка i к участку $i+1$, учтен в математической модели следующим образом:

$$Q_{л,i} = \frac{C_0 F_{\delta,i} \Delta\tau \left[\left(\frac{t_i + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{i+1} + 273}{100} \right)^4 \right]}{1 + 2 \left(\frac{1}{A_1} - 1 \right) \phi_{1-2}}. \quad (4)$$

Здесь $\phi_{1-2} = 0,023$ – угловой коэффициент, определен для каналов цилиндрической формы; A_1 – степень черноты материала насадки.

Модуль 7 ответственен за выход регенератора на квазистационарный режим, который контролировался сравнением количества аккумулированного тепла в текущем k и предыдущем $(k-1)$ циклах расчета воздухонагревателя с заданной погрешностью.

Универсальный вычислительный комплекс позволяет исследовать и переходные процессы в доменных воздухонагревателях, которые возникают при их пуске, изменение теплового режима и при различных нарушениях технологии плавки.

Расчетно-теоретическое исследование нами проведено для блока воздухонагревателей доменной печи объемом $V_{\text{п}}=1719 \text{ м}^3$, со следующими конструктивными и режимными параметрами: расход дутьевого воздуха $V_{\text{в}}=198000 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура продуктов сгорания под куполом $t_{\text{к}}=1350 \text{ }^\circ\text{C}$, температура холодного дутья – $100 \text{ }^\circ\text{C}$, высота насадки $H=38,2 \text{ м}$, тип насадки – БНИ–12–2. Живое сечение насадки $S_{\text{н}}=12,8 \text{ м}^2$. Высота расчетного элемента насадки $\Delta z=0,42 \text{ м}$. Блок воздухонагревателей из четырех аппаратов работает в последовательном режиме. Длительность периодов нагрева и охлаждения насадки $\tau_1 = 2,85 \text{ ч}$, $\tau_2 = 1 \text{ ч}$, время перекидки клапанов $\Delta\tau_{\text{п}}=0,15 \text{ ч}$.

Для реализации математической модели регенератора использован язык программирования Turbo Pascal.

В рамках настоящей статьи рассмотрены и даны сравнительные оценки влияния на температурные характеристики регенератора следующих факторов:

- режима со смесителем и без смесителя горячего и холодного дутья;
- полутароминутной продувки вентилятором воздухом каналов насадки при переводе воздухонагревателя на дутье, а также учет переизлучения по длине канала;

– неравномерности скоростей продуктов сгорания на входе в насадочную камеру.

Работа блока воздухонагревателей со смесителем (базовый режим) характеризуется следующими показателями: температура горячего дутья 1284 °С; максимальная температура отходящих газов – 400 °С, расход продуктов сгорания $G_r=50594$ кг/(м²с). В газовый период коэффициенты теплоотдачи изменялись в диапазоне от $\alpha_1=34$ Вт/(м²К) в верхней части насадки до $\alpha_1=9$ Вт/(м²К) в нижней части, в воздушном периоде коэффициент теплоотдачи изменялся от $\alpha_2=24$ Вт/(м²К); до $\alpha_2=21$ Вт/(м²К). Температурные поля в насадке представлены на рисунке 2.

Одним из путей повышения температуры дутья является интенсификация теплообмена в период охлаждения аппарата, что достигается переходом на работу воздухонагревателя без смесителя.

Известны случаи, когда доменщики используют режим работы без смесителя или с закрытым смесителем в течении части периода, когда воздухонагреватели не могут обеспечить требуемого нагрева дутья.

Работа блока воздухонагревателей без смесителя приводит к повышению использования его тепловой мощности, и, как следствие, к повышению температуры нагрева дутья. При одинаковых расходах топлива наблюдается повышение средней температуры дутья до 1301°С, снижению максимальной температуры отходящих газов до 358 °С. Величина нагрева дутья еще более может быть повышена за счет дополнительного сжигания топлива и выхода на максимальную температуру дымовых газов в конце газового периода. При расчете этого режима работы были получены следующие результаты: средняя температура дутьевого воздуха $\bar{t}_в=1311$ °С; максимальная температура отходящих газов $t_r=402$ °С; расход дымовых газов $V_r=51980$ м³/ч. В этом варианте уменьшаются также и колебания температуры дутья за период с $\Delta t_d=65$ °С до $\Delta t_d=53$ °С.

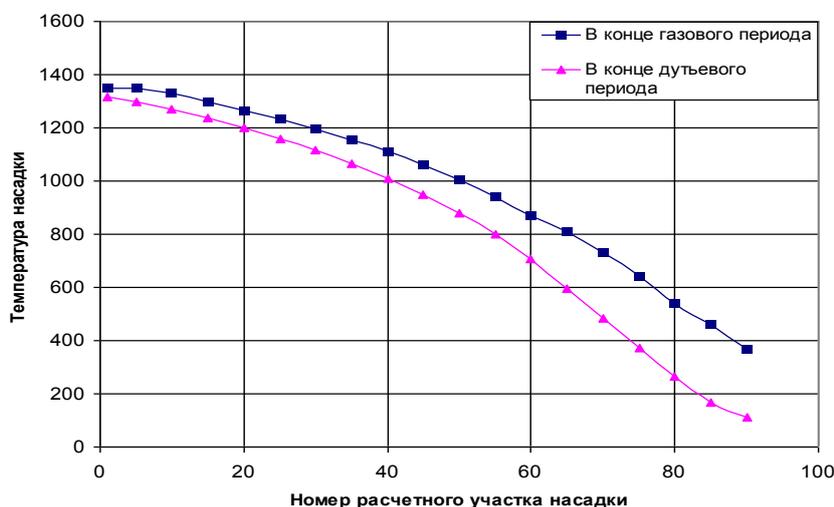


Рисунок 2 – Изменение температуры насадки во времени

В результате проведенных расчетов работы воздухонагревателя с продувкой длительностью 1,5 мин были получены следующие результаты представленные на рис. 3. Удельный расход вентиляторного воздуха при продувке насадки составлял $G_{пр}=0,213$ кг/(м²с), температура воздуха на входе в насадку определялась с учетом нагрева воздуха в камере сгорания и составила $t_{пр}=185$ °С. Как видно из рисунка в верх-

ней зоне насадочной камеры происходит снижение температуры насадки, однако температура дутья изменяется незначительно (на 2 °С).

Известно, что аэродинамика воздухонагревателей существенно влияет на температурное поле насадки, деформацию огнеупоров, и температурные напряжения в кладке насадки, камере горения и стенах.

Неравномерность потоков теплоносителей, поступающих в насадку воздухонагревателей экспериментально исследована в Липецком политехническом институте под руководством проф. С.Л. Соломенцева [2]. Экспериментально установлено, что перепад температур на одинаковых горизонтах насадки составляет 125 °С, и что это не является максимальной величиной. Колебания скоростей продуктов сгорания по их оценкам $\pm 15\%$. Таковую же количественную оценку колебания скоростей дает и Я.П. Калугин [3]. Чешские специалисты исследуя блок воздухонагревателей доменной печи $V=1080 \text{ м}^3$, получили картину и количественно определили поле скоростей продуктов сгорания на входе в насадку (см. рис. 4) [4]. Ими также отмечено, что неравномерность скоростей в дутьевой период значительно меньше, чем в газовый.

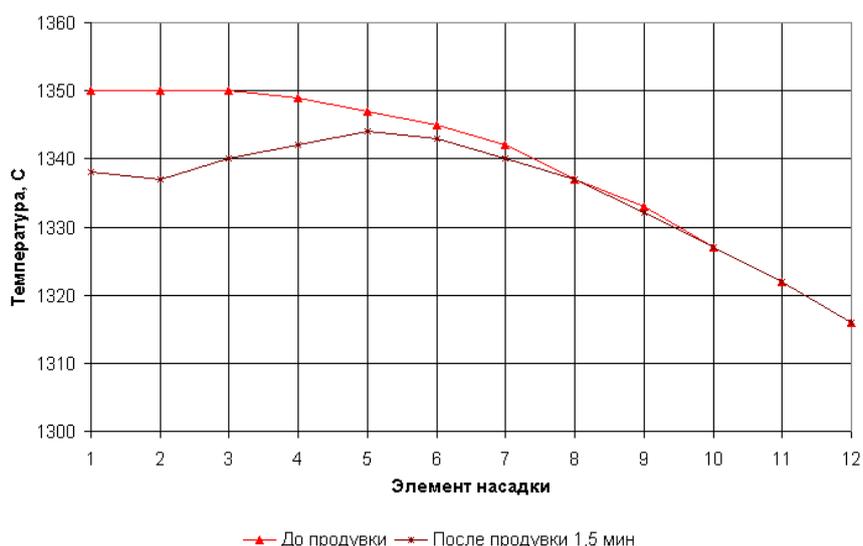


Рисунок 3 – Влияние продувки на температуру насадки

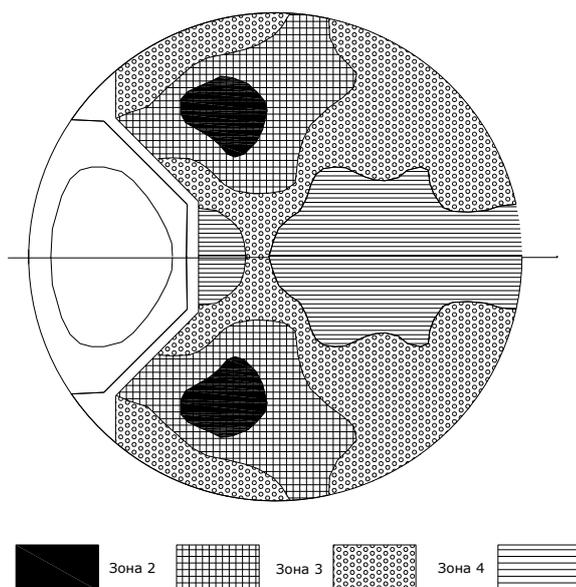


Рисунок 4 – Поля скоростей в воздухонагревателе доменной печи:
 1 – $\bar{w}_1 = 2,5$ м/с; 2 – $\bar{w}_2 = 7,5$ м/с; 3 – $\bar{w}_3 = 12,5$ м/с; 4 – $\bar{w}_4 = 17,5$ м/с

Нами зоны по сечению насадки и степень неравномерности скоростей продуктов сгорания по этим зонам выбраны с соблюдением аналогии с чешским вариантом (см. рис. 5). Суммарный расход греющих газов оставался таким, как и при равномерном распределении теплоносителей, а именно $V_r = 51980$ м³/ч. Результаты расчета температурных полей насадки по зонам для варианта работы воздухонагревателя без смесителя представлены на рис. 6. Температуры горячего дутья и продуктов сгорания на входе в боров определялись по известным формулам смешения при постоянной температуре сравнения при равнении теплоносителей.

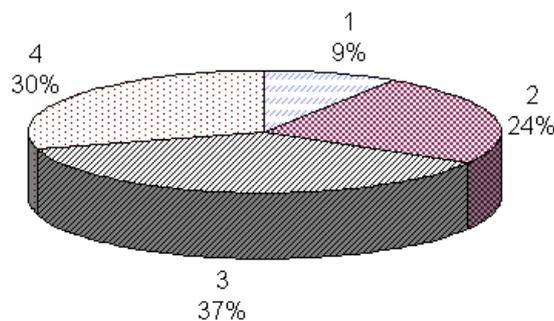


Рисунок 5 – Зоны воздухонагревателя:
 1 – $\bar{w}_1 = 4,74$ м/с; 2 – $\bar{w}_2 = 5,3$ м/с; 3 – $\bar{w}_3 = 6,4$ м/с; 4 – $\bar{w}_4 = 7,53$ м/с

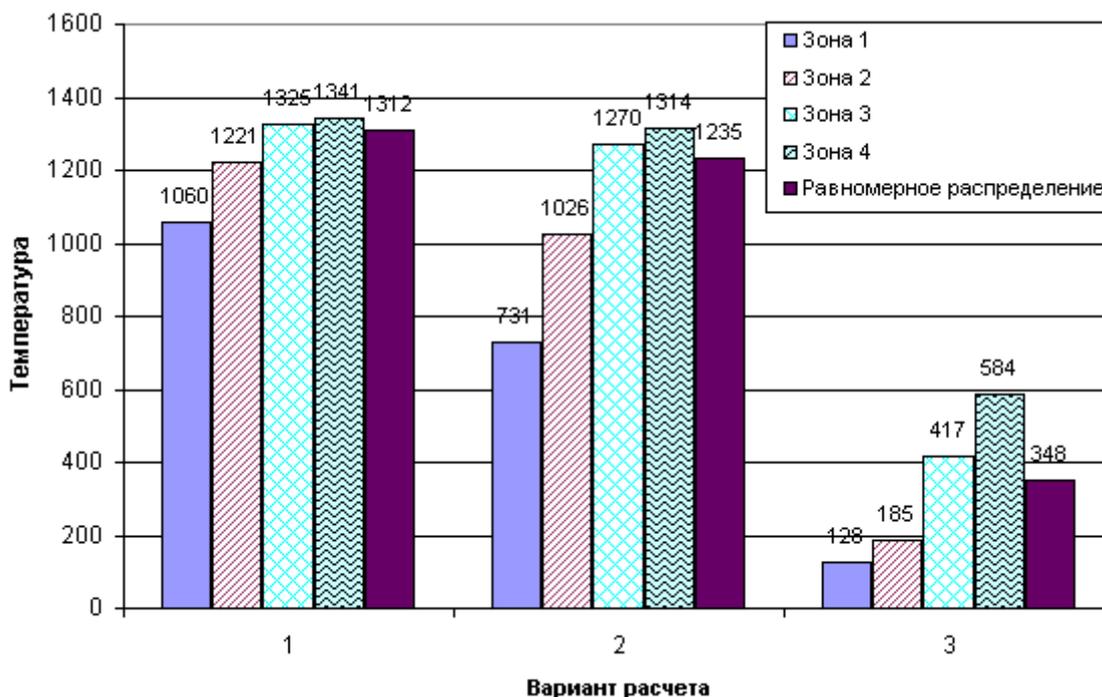


Рисунок 6 – Влияние неравномерности скоростей в поперечном сечении на температуру насадки:

1 – на высоте 5 м от верха, 2 – на высоте 10 м от верха, 3 – внизу насадочной камеры

Расчет показывает, что в исследуемом случае средняя температура нагрева дутья снижается на 24 °С, средняя температура дымовых газов при входе в боры уменьшилась на 118 °С. Однако условия работы поднасадочного устройства усложняются, т.к. оно омывается газами, изменяющими температуру от 144 до 645 °С в конце периода нагрева насадки.

Если степень неравномерности распределения дутья и продуктов сгорания одинаковы по знаку, то значения разницы температур горячего дутья при равномерном и неравномерном распределении теплоносителей может значительно уменьшиться. Также уменьшится деформация температурного поля насадки по зонам.

Выводы. Сформулирована усовершенствованная математическая модель расчета температурных полей воздухонагревателей. Получены уточненные значения температуры дутья, картина деформированного температурного поля в поперечном сечении из-за неравномерного распределения скоростей в насадочной камере в газовый период.

Обозначения:

$\Delta\tau$ – временной шаг, с; C_0 – постоянная Стефана–Больцмана; $F_{\sigma,i}$ – площадь боковой поверхности элемента насадки, м²; $F_{\tau,i}$ – площадь торцевой поверхности элемента насадки, м²; t_i, t_{i+1} – температура элементов насадки, °С; t_i^b – температура воздуха на расчетном участке, °С; t_i^r – температура продуктов сгорания на расчетном участке, °С; $\alpha_{i,\tau}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); V_i – объем элемента насадки, м³; C_n, ρ_n – объемная теплоемкость и плотность материала насадки, кДж/(м³·К), кг/м³; λ_n – коэффициент теплопроводности насадки, Вт/(м·К); G_r – расход газа в расчетном участке, кг/с; C_r – массовая теплоемкость газа, кДж/(кг·К).

Литература

1. Левченко Б.А. Научные основы повышения эффективности высокотемпературных регенеративных теплообменных аппаратов и использования низкопотенциальных тепловых ВЭР в доменном производстве.//Автореф. докт. дисс. Днепропетровск: ДМЕТИ, 1990, 32 с.
2. Соломенцев С.Л., Коршиков В.Д. Неравномерность распределения дутья и продуктов горения по сечению насадки доменных воздухонагревателей // Сталь, 1976.– № 11.–С. 982–984.
3. Калугин Я.П. Перспективный бесшахтный воздухонагреватель // Сталь, 2001.– №10.– С. 3–6.
4. Cernoch S., Ssullung Fa. Verbesserung der Stromung in Winderhitzern durch aerodynamische Modellversuche. "Radex Rdsch", 1969, №5, 744–754.

УДК 669.162.231.085 (088.8)

Левченко Б.О., Лишеленко В.М.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТЕПЛООВОГО РОЗРАХУНКУ РОБОТИ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

У роботі розглянуто вдосконалену методику теплового розрахунку роботи повітрянагрівачів доменних печей. Надано опис математичної моделі та результати розрахунку повітрянагрівача доменної печі об'ємом 1719 м³.