

Список использованных источников

1. Спирин Н. А., Лавров В. В., Рыболовлев В. Ю., Краснобаев А. В., Онорин О. П., Косаченко И. Е. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
2. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О. П. Онорин, Н. А. Спирин, В. Л. Терентьев [и др.]. / под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
3. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С. В. Емельянов, С. К. Коровин, Л. П. Мышляев, А. С. Рыков, В. Ф. Евтушенко, С. М. Кулаков, Н. Ф. Бондарь. – Кемерово; М.: Издат. объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2008. – 487 с.
4. Одинцов И. О. Профессиональное программирование. Системный подход. 2-е изд. перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 624 с.
5. Дубейковский В. И. Эффективное моделирование с СА ERwin Process Modeler (BPwin; AllFusion Process Modeler). – М.: Диалог-МИФИ, 2009. – 384 с.
6. Фленов М. Е. Библия C#. – 2-е издание. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 560 с.

УДК 669-042

Т. О. Девярых, Е. А. Девярых

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШАХТНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВКИ МЕДНЫХ ПЛАСТИН

Аннотация

В данной работе описано создание математической модели шахтной печи для переплавки медных пластин. Помимо математической модели создан программный продукт, рассчитывающий изотермическую и неизотермическую задачи движения газов, задачи теплообмена. В результате расчета получены таблицы распределения параметров (температуры, скорость и др.) с возможностью экспорта в MathCad.

Ключевые слова: математическая модель, газодинамика, шахтная печь, дискретный аналог, среда программирования Microsoft Visual Studio 2010, MathCad.

Abstract

In this article there are description of creation of mathematical model of a shaft furnace for melting copper plates. In addition to the mathematical model software was created, which calculates the isothermal and non-isothermal gas movement, heat transfer. As a result there are distribution table of parameters (temperature, velocity, etc.) obtained. Data can be exported to MathCad.

Keywords: mathematical model, gas dynamics, shaft furnace, the discrete analog environment of programming Microsoft Visual Studio 2010, MathCad.

Несмотря на выполненные в последнее время работы по математическому моделированию шахтных печей различного назначения, вопрос о надежных методах оптимизации их конструктивных и режимных параметров все еще остается актуальным, поскольку имеющиеся математические модели газодинамики и теплообмена не учитывают механизма движения слоя материала, подвергающегося тепловой обработке. В каждой конкретной шахтной печи источники движения материала специфичны, однако имеется класс агрегатов, в которых побудительной причиной движения является плавление шихты. В этом случае скорость движения (опускания) материалов сама является суммарным результатом развития теплофизических процессов, что должно найти отражение в математической модели шахтной печи.

Физическая постановка задачи заключается в следующем (рис. 1). В шахтную печь высотой H и характерным средним радиусом R через дискретно расположенные газораспределительные устройства диаметром d_{ϕ} (в дальнейшем называемые фурмами) вдувается газ в количестве Q_V , м³/с, с температурой T_0 , °С. Для создания необходимой высоты зоны плавления газораспределительные устройства размещаются на 2–3 горизонтах, причем расстояние от «днища» печи до плоскостей осей фурм составляет $H_{1\phi}$, $H_{2\phi}$, $H_{3\phi}$, м. Сверху в печь загружают шихтовые материалы, эквивалентный диаметр частиц которых d_{m0} , м, температура – t_0 , °С, а объемный расход – Q_m , м³/с. В процессе передачи теплоты от газов к материалу происходит нагрев, плавление и перемещение последнего. Требуется найти распределение температур и скоростей материала и газов в объеме печи.

Хотя горячий газ вводится в рабочее пространство печи дискретно, будем считать движение теплоносителей осесимметричным. Основанием для такого упрощения является то обстоятельство, что для рассматриваемой конструкции печи расстояние между осями фурм по окружности наружной поверхности не превышает 0,54 м, а при этих условиях уже на расстоянии R от плоскости фурм течение газов становится практически двумерным.

Математическая формулировка поставленной задачи в предположении о безвихревом установившемся характере движения газов и материалов включает следующие уравнения.

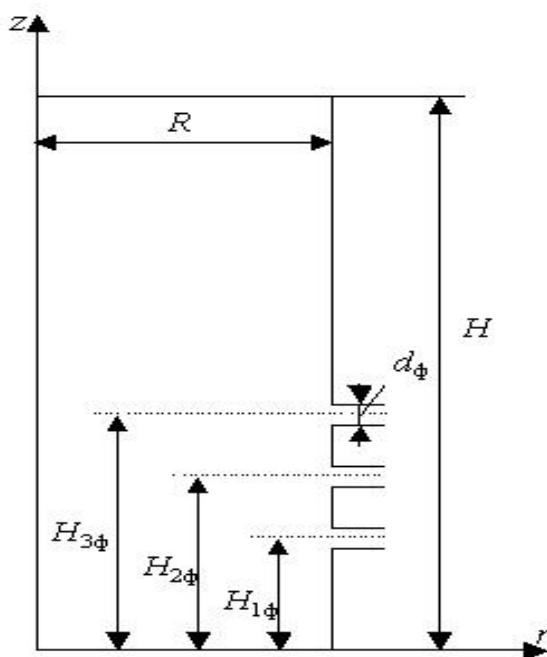


Рис. 1. Принципиальная схема газовой шахтной печи

Уравнение баланса массы газов (уравнение неразрывности) имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon \rho_r r w_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon \rho_r w_{rz}) = 0, \quad (1)$$

где r и z – радиальная и аксиальная координаты, м; w_{rr} и w_{rz} – радиальная и аксиальная компоненты скорости газа, м/с; ρ_r (кг/м³) и ε (доли единицы) – плотность газа и порозность слоя соответственно. Вводя функцию тока $\psi(r, z)$, имеющую смысл массового расхода газа, соотношениями:

$$w_{rr} = \frac{1}{\varepsilon \rho_r r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w_{rz} = -\frac{1}{\varepsilon \rho_r r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad (2)$$

и используя условие отсутствия завихренности $\partial w_{rr}/\partial z - \partial w_{rz}/\partial r = 0$, получаем определяющее уравнение для функции тока

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\varepsilon \rho_r r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varepsilon \rho_r r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = 0. \quad (3)$$

Уравнение теплового баланса (энергии), объединенное с уравнением неразрывности, запишется так:

$$c_r \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(T \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right] = -\alpha_v r (T - t_{\text{мас}}) - r L \rho_m (1 - \varepsilon) \frac{d\gamma}{d\tau}, \quad (4)$$

где c_r и T – удельная теплоемкость [Дж/(кг·К)] и температура (°С) газа; $t_{\text{мас}}$ и L – среднемассовая температура (°С) и удельная теплота плавления (Дж/кг) материала; α_v – объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³·К); $\gamma = (d_{m0}^3 - d_m^3)/d_{m0}^3$ – степень расплавления куска шихты, доли; ρ_m – плотность материала «куска» шихты, кг/м³; τ – время, с.

Соответствующие схеме (рис. 1) граничные условия уравнения (3) имеют вид:

$$\psi = \begin{cases} \rho_r Q_V & \text{при } r = 0 \text{ и } 0 \leq z < H; \\ \rho_r Q_V & \text{при } 0 \leq r \leq R \text{ и } z = 0; \\ \rho_r Q_V & \text{при } r = R \text{ и } 0 \leq z < H_{1\phi}; \\ \rho_r Q_V - \frac{\rho_r Q_{1V}}{d_\phi} \left(z - H_{1\phi} + \frac{d_\phi}{2} \right) & \text{при } r = R \text{ и } H_{1\phi} - \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{1\phi} + \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_V - \rho_r Q_{1V} & \text{при } r = R \text{ и } H_{1\phi} + \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{2\phi} - \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_V - \rho_r Q_{1V} - \frac{\rho_r Q_{2V}}{d_\phi} \left(z - H_{2\phi} + \frac{d_\phi}{2} \right) & \text{при } r = R \text{ и } H_{2\phi} - \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{2\phi} + \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_V - \rho_r Q_{1V} - \rho_r Q_{2V} & \text{при } r = R \text{ и } H_{2\phi} + \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{3\phi} - \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_V - \rho_r Q_{1V} - \rho_r Q_{2V} - \frac{\rho_r Q_{3V}}{d_\phi} \left(z - H_{3\phi} + \frac{d_\phi}{2} \right) & \text{при } r = R \text{ и } H_{3\phi} - \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{3\phi} + \frac{d_\phi}{2}; \\ 0 & \text{при } r = R \text{ и } H_{3\phi} + \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $Q_{1V} + Q_{2V} + Q_{3V} = Q_V$.

$$\partial \psi / \partial z = 0 \text{ при } z = H \text{ и } 0 \leq r \leq R. \quad (5a)$$

Заметим, что соотношение (5а) эквивалентно утверждению об одномерном характере движения газов на выходе из слоя.

На стенках печи (кроме фурм) задаются потери теплоты конвекцией и теплопроводностью в окружающую среду при $r = R$:

$$-\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} = k(T - T_{\text{окр}}), \quad k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_i \frac{S_i}{\lambda_{mi}} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \quad (6)$$

где k – коэффициент теплопередачи от газа в рабочем пространстве печи в окружающую среду, Вт/(м²·К); α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхностях стенки печи, Вт/(м²·К); S_i и λ_{mi} – толщина (м) и коэффициент теплопроводности [Вт/(м·К)] i -го огнеупорного слоя кладки, соответственно; λ_r – коэффициент теплопроводности газа у внутренней поверхности стенки, Вт/(м·К).

На уровне засыпи, а также у стенки печи движение газа одномерное, поэтому уравнение теплового баланса упрощается до соотношения:

$$c_r \rho_r \varepsilon w_{rz} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_v (t_{\text{mac}} - T) \quad (7)$$

при $z = H$, причем здесь $t_{\text{mac}} = t_0 = \text{const}$. Тогда уравнение (7) превращается в ОДУ первого порядка, имеющее решение

$$T(z) = t_0 + A \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_v z}{c_r \rho_r \varepsilon w_{rz}}\right), \quad (7a)$$

где A – постоянная интегрирования. При $r = R$ и $z = H_{1\phi}$ $T = T_0$, следовательно,

$$A = (T_0 - t_0) \cdot \exp\left(\frac{\alpha_v H_{1\phi}}{c_r \rho_r \varepsilon w_{rz}}\right)$$

и $T = t_0 + (T_0 - t_0) \cdot \exp\left[-\frac{\alpha_v (H - H_{1\phi})}{c_r \rho_r \varepsilon w_{rz}}\right], \quad (7б)$

при $z = H$ и $0 \leq r \leq R$.

Совокупность уравнений (1)–(7б), представленная (в различных сочетаниях) в конечно-разностном виде, и составляет математическую инженерную модель шахтной печи для плавки черновой меди.

Полученная математическая модель была реализована в среде Microsoft Visual Studio 2010 Professional и MathCad. Программный продукт состоит из нескольких блоков, которые выполняют следующие функции:

1. Загрузка исходных данных, включая все геометрические, расходные и теплофизические параметры. Предусмотрен ввод горячих газов на трех горизонтах печи, причем соотношение расходов на горизонтах можно менять.

2. Решение изотермической осесимметричной задачи в цилиндрической системе координат, при этом порозность слоя принимается постоянной, среднестатистической.

3. Решение задачи теплообмена (т. е. уравнения нагрева материала и охлаждения газов) на основании полученного поля скорости. Теплофизические свойства газов и материалов принимаются зависящими от температуры. Пункты 2 и 3 образуют предварительный этап решения задачи.

4. Решение неизотермической задачи движения газов. Данный этап является основным. Здесь одновременно решаются все уравнения модели.

В качестве примера на рис. 2 и 3 представлены график линий тока (экспортированный в MathCad) и распределение температур материала в неизотермической задаче.

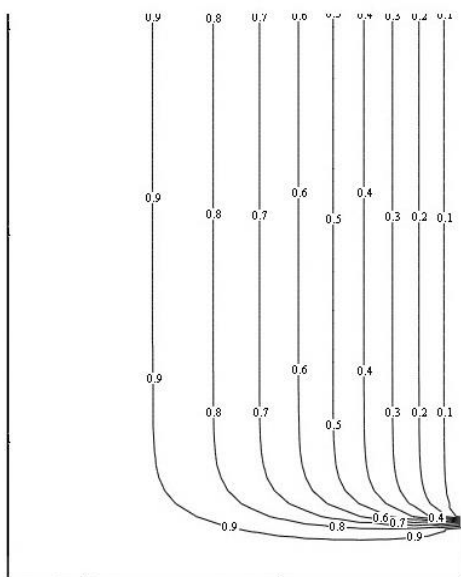


Рис. 2. График линий тока в Mathcad

Файл Экспорт в MathCad текущей таблицы

Исходные данные Изотермическая задача Неизотермическая задача

Отобразить распределение Температур

	1.206m	1.139m	1.072m	1.005m	0.939m	0.871m	0.804m	0.737m	0.67m	0.603m	0.536m	0.469m	0.402m	0.335m	0.268m	0.201m	0.134m
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2
80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5
105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7	105.7
122.87	123.8	124.73	125.66	126.59	127.52	128.45	129.38	130.31	130.38	130.45	130.53	130.6	130.67	130.74	130.8	130.85	130.85
148.07	149	149.93	150.86	151.79	152.72	153.65	154.58	155.51	155.58	155.65	155.73	155.8	155.87	155.94	156	156.05	156.05
173.37	174.3	175.23	176.16	177.09	178.02	178.95	179.88	180.81	180.88	180.95	181.03	181.1	181.17	181.24	181.3	181.35	181.35
198.57	199.5	200.43	201.36	202.29	203.22	204.15	205.08	206.01	206.08	206.15	206.23	206.3	206.37	206.44	206.5	206.55	206.55
223.77	224.7	225.63	226.56	227.49	228.42	229.35	230.28	231.21	231.28	231.35	231.43	231.5	231.57	231.64	231.7	231.75	231.75
248.97	249.9	250.83	251.76	252.69	253.62	254.55	255.48	256.41	256.48	256.55	256.63	256.7	256.77	256.84	256.9	256.95	256.95
274.97	275.2	276.13	277.06	277.99	278.92	279.85	280.78	281.71	281.78	281.85	281.93	282	282.07	282.14	282.2	282.25	282.25
299.47	300.4	301.33	302.26	303.19	304.12	305.05	305.98	306.91	306.98	307.05	307.13	307.2	307.27	307.34	307.4	307.45	307.45
324.67	325.6	326.53	327.46	328.39	329.32	330.25	331.18	332.11	332.18	332.25	332.33	332.4	332.47	332.54	332.6	332.65	332.65
349.97	350.9	351.83	352.76	353.69	354.62	355.55	356.48	357.41	357.48	357.55	357.63	357.7	357.77	357.84	357.9	357.95	357.95
375.17	376.1	377.03	377.96	378.89	379.82	380.75	381.68	382.61	382.68	382.75	382.83	382.9	382.97	383.04	383.1	383.15	383.15
400.37	401.3	402.23	403.16	404.09	405.02	405.95	406.88	407.81	407.88	407.95	408.03	408.1	408.17	408.24	408.3	408.35	408.35
425.57	426.5	427.43	428.36	429.29	430.22	431.15	432.08	433.01	433.08	433.15	433.23	433.3	433.37	433.44	433.5	433.55	433.55
450.87	451.8	452.73	453.66	454.59	455.52	456.45	457.38	458.31	458.38	458.45	458.53	458.6	458.67	458.74	458.8	458.85	458.85
476.07	477	477.93	478.86	479.79	480.72	481.65	482.58	483.51	483.58	483.65	483.73	483.8	483.87	483.94	484	484.05	484.05
501.27	502.2	503.13	504.06	504.99	505.92	506.85	507.78	508.71	508.78	508.85	508.93	509	509.07	509.14	509.2	509.25	509.25
526.47	527.4	528.33	529.26	530.19	531.12	532.05	532.98	533.91	533.98	534.05	534.13	534.2	534.27	534.34	534.4	534.45	534.45
551.77	552.7	553.63	554.56	555.49	556.42	557.35	558.28	559.21	559.28	559.35	559.43	559.5	559.57	559.64	559.7	559.75	559.75
576.97	577.9	578.83	579.76	580.69	581.62	582.55	583.48	584.41	584.48	584.55	584.63	584.7	584.77	584.84	584.9	584.95	584.95
602.17	603.1	604.03	604.96	605.89	606.82	607.75	608.68	609.61	609.68	609.75	609.83	609.9	609.97	610.04	610.1	610.15	610.15
627.47	628.4	629.33	630.26	631.19	632.12	633.05	633.98	634.91	634.98	635.05	635.13	635.2	635.27	635.34	635.4	635.45	635.45
652.67	653.6	654.53	655.46	656.39	657.32	658.25	659.18	660.11	660.18	660.25	660.33	660.4	660.47	660.54	660.6	660.65	660.65
677.87	678.8	679.73	680.66	681.59	682.52	683.45	684.38	685.31	685.38	685.45	685.53	685.6	685.67	685.74	685.8	685.85	685.85
703.07	704	704.93	705.86	706.79	707.72	708.65	709.58	710.51	710.58	710.65	710.73	710.8	710.87	710.94	711	711.05	711.05
728.27	729.3	730.23	731.16	732.09	733.02	733.95	734.88	735.81	735.88	735.95	736.03	736.1	736.17	736.24	736.3	736.35	736.35
753.57	754.5	755.43	756.36	757.29	758.22	759.15	760.08	761.01	761.08	761.15	761.23	761.3	761.37	761.44	761.5	761.55	761.55
778.77	779.7	780.63	781.56	782.49	783.42	784.35	785.28	786.21	786.28	786.35	786.43	786.5	786.57	786.64	786.7	786.75	786.75
803.97	804.9	805.83	806.76	807.69	808.62	809.55	810.48	811.41	811.48	811.55	811.63	811.7	811.77	811.84	811.9	811.95	811.95
829.27	830.2	831.13	832.06	832.99	833.92	834.85	835.78	836.71	836.78	836.85	836.93	837	837.07	837.14	837.2	837.25	837.25
854.47	855.4	856.33	857.26	858.19	859.12	860.05	860.98	861.91	861.98	862.05	862.13	862.2	862.27	862.34	862.4	862.45	862.45
879.67	880.6	881.53	882.46	883.39	884.32	885.25	886.18	887.11	887.18	887.25	887.33	887.4	887.47	887.54	887.6	887.65	887.65
904.97	905.9	906.83	907.76	908.69	909.62	910.55	911.48	912.41	912.48	912.55	912.63	912.7	912.77	912.84	912.9	912.95	912.95
930.17	931.1	932.03	932.96	933.89	934.82	935.75	936.68	937.61	937.68	937.75	937.83	937.9	937.97	938.04	938.1	938.15	938.15
955.37	956.3	957.23	958.16	959.09	960.02	960.95	961.88	962.81	962.88	962.95	963.03	963.1	963.17	963.24	963.3	963.35	963.35
980.57	981.5	982.43	983.36	984.29	985.22	986.15	987.08	988.01	988.08	988.15	988.23	988.3	988.37	988.44	988.5	988.55	988.55
1005.87	1006.8	1007.73	1008.66	1009.59	1010.52	1011.45	1012.38	1013.31	1013.38	1013.45	1013.53	1013.6	1013.67	1013.74	1013.8	1013.85	1013.85
1031.07	1032	1032.93	1033.86	1034.79	1035.72	1036.65	1037.58	1038.51	1038.58	1038.65	1038.73	1038.8	1038.87	1038.94	1039	1039.05	1039.05
1056.27	1057.2	1058.13	1059.06	1059.99	1060.92	1061.85	1062.78	1063.71	1063.78	1063.85	1063.93	1064	1064.07	1064.14	1064.2	1064.25	1064.25
1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7	1083.7
1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4	1084.4

Рис. 3. Распределение температур материала в неизотермической задаче

На основе полученных данных также планируется решение задачи плавления.

Список использованных источников

1. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б. И. Китаев, В. Н. Тимофеев, Б. А. Боковиков – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.

2. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / В. С. Швыдкий, Н. А. Спирин, М. Г. Ладыгичев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 1999. – 520 с.

3. Био М. Вариационные принципы в теории теплообмена. Перевод с англ. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.

УДК 669-5

С. А. Дианов

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ ДОМЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

Аннотация

Рассмотрены основные конструктивные решения доменных воздухонагревателей. Описаны методы расчета конструкции насадки доменных воздухонагревателей. Выполнена аппроксимация табличных зависимостей, встречающихся в литературе. Создан программный продукт, позволяющий автоматизировать процесс расчета. Кратко рассмотрены функциональные возможности программного продукта.

Ключевые слова: доменный воздухонагреватель, программное обеспечение, расчет, нагрев дутья, насадка, аппроксимация.

Abstract

The basic designs of hot-air stoves for blast furnaces are explored. There is describes the methods of calculation of the nozzle design hot-air stoves. Performed approximation of table dependencies found in the literature. There are created software to automate the calculation process. Functionality of the software is briefly describes.

Keywords: blast furnace, software, calculation os heat BV, nozzle, approximation.

Нагрев дутья – важный технологический процесс, позволяющий использовать такой вторичный энергетический ресурс, как доменный газ. Доменный газ, как известно, является одним из продуктов доменного процесса, который состоит на 12–20 % из CO_2 , 20–30 % CO , до 0,5 % CH_4 , 1–4 % H_2 , 55–58 % N_2 [1]. Такой газ является не самым калорийным топливом, но декларация по окружающей среде и развитию [2] предписывает максимальное использование любых ВЭР. Поэтому доменный газ повсеместно используется как топливо, служащее для нагрева доменного дутья. Первые попытки нагрева дутья были проведены еще в конце XIX века; тогда воздух был подогрет до 300 °С, что позволило значительно сократить расход кокса. В настоящее время существуют технологии, позволяющие нагреть дутье до 1400 °С. Нагрев дутья осуществляется в теплообменных аппаратах регенеративного типа. Полный рабочий период регенеративных воздухонагревателей состоит из цикла нагрева насадки, когда продукты горения проходят через отверстия в насадке и отдают ей тепло, и цикла нагрева