

DOI: 10.58168/OpEq2025_212-217

УДК 536.12

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ
В ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА**
MODELING OF AIR FLOW HYDRODYNAMICS IN A GAS INDUSTRIAL
FURNACE TO ASSESS THE TEMPERATURE PROFILE OF AN OBJECT'S
SURFACE

Слободин Александр Дмитриевич

аспирант кафедры технологии сварочного производства и диагностики ВГТУ,
г. Воронеж, Россия

Селиванов Владимир Фёдорович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии
сварочного производства и диагностики ВГТУ, г. Воронеж, Россия

Иванов Андрей Валентинович

доцент кафедры автоматизированных систем управления процессами и
производствами ВГУИТ, г. Воронеж, Россия

Хвостов Анатолий Анатольевич

Доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и
механики ВГТУ, г. Воронеж, Россия

Slobodin Aleksandr Dmitrievich

postgraduate student of the department of welding production technology and
diagnostics Voronezh state technical university, Voronezh, Russia

Selivanov Vladimir Fyodorovich

Doctor of technical sciences, professor, head of department of welding production
technology and diagnostics Voronezh state technical university, Voronezh, Russia

Ivanov Andrey Valentinovich

Candidate of technical sciences, associate professor at department of automated process and production control systems, Voronezh state university of engineering technologies, Voronezh, Russia

Khvostov Anatoly Anatolyevich

Doctor of technical sciences, professor of department of applied mathematics and mechanics Voronezh state technical university, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос математического моделирования гидродинамики воздушных потоков в газовой печи с учетом расположения, геометрических и напорно-расходных параметров газовых форсунок, расположения и параметров вентиляционного отверстия, а также формы, размеров, положения и материала помещенного в печь объекта. Математическая модель используется для оценки влияния вышеперечисленных параметров на температурное поле поверхности объекта и вызванную этим неравномерность его прогрева.

Abstract. The article examines the issue of mathematical modeling of air flow hydrodynamics in a gas furnace, taking into account the location and geometric and pressure-flow parameters of gas nozzles, the location and parameters of the ventilation opening, as well as the shape, size, position and material of the object placed in the furnace. The mathematical model is used to assess the influence of the above parameters on the temperature field of the object's surface and the resulting unevenness of its heating.

Ключевые слова: математическое моделирование, термоконвекция.

Key words: mathematical modeling, thermal convection.

Технологические процессы, включающие в себя стадии нагрева полуфабриката или готового продукта в газовых конвекционных печах широко используются в машиностроении, металлургии и пищевой промышленности.

Методики расчета времени прогрева, необходимого для достижения заданных технологией температурных полей в объекте, базируются на тепловом балансе тепловых потоков (поступающих в печь, отраженных от изделия, отводимых из зоны нагрева и затраченных на нагрев изделия и окружающей среды [1]). В расчетах обычно фигурирует средняя температура изделия или температура отдельной зоны нагрева [1]. Однако, такие методики не учитывают сложную термическую картину, стратификацию и «мёртвые» зоны, возникающие в процессе термоконвективного нагрева [2].

Для принятия решения о применимости конкретной расчетной методики предлагается использовать сопряженную модель внутреннего пространства печи и расположенного в ней нагреваемого объекта, формализующую газодинамические и тепловые потоки с учетом геометрических параметров системы (рис. 1).

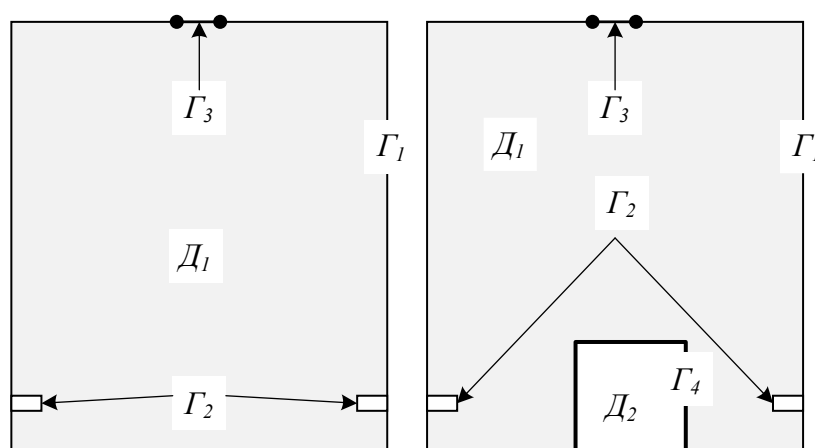


Рис. 1 Расчетные схемы

Для оценки пространственной динамики потоков рассмотрены схемы с объектом квадратного сечения, расположенным в печи и без него (рис. 1).

Уравнения сохранения импульса, энергии, массы [3]

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1: \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = \nabla \cdot \left\{ -p + \mu \left[\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right] \right\} + \rho \bar{g}; \\ \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0; \\ \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \bar{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T); \\ D_2: \rho^* c_p^* \frac{\partial T^*}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda^* \nabla T^*); \end{array} \right. \quad (1)$$

где D_1 – домен воздушного пространства печи, D_2 – домен объекта, $\bar{u}$ – скорость, м/с; p – давление, Па; t – время, с; μ – динамическая вязкость, Па·с; $\bar{g}$ – ускорение свободного падения, м/с²; ρ, ρ^* – плотность, кг/м³; T, T^* – температура, К; c_p, c_p^* – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); λ, λ^* – коэффициент теплопроводности воздуха и объекта (индекс *), Дж/(с·м²·К). Начальные условия $\bar{u}|_{t=0} = 0$,

$p|_{t=0} = p_0$, $T|_{t=0} = T^*|_{t=0} = T_0$. Граничные условия на Γ_1 : $-\lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = \alpha(T - T_{oc})$, $\bar{u} = 0$;

Γ_2 : $T = T_{ex}$, $\bar{n} \cdot \bar{u} = u_{ex}$; Γ_3 : $T = T_0$, $p = 0$; Γ_4 : $T = T^*$, $\frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = \frac{\partial T^*}{\partial \bar{n}}$, $\bar{u} = 0$, где p_0, T_0 –

начальные значения давления, температуры, α – коэффициент теплоотдачи к воздуху окружающей среды, Вт/(м²·К); $\bar{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности; T_{oc} – температура окружающей среды, К.

Вычислительный эксперимент проведен на примере печи ТХМ-ДО-50.130.30/1100 и заключался непрерывной подаче горячего воздуха в объём печи. Система (1) решена численно методом конечных элементов в Comsol Multiphysics. В качестве модельных сред использованы воздух и сталь. Результатами моделирования представлены на (рис. 2).

Разработанная модель может быть использована для исследования пространственной динамики нагрева воздуха в печи и в объекте.

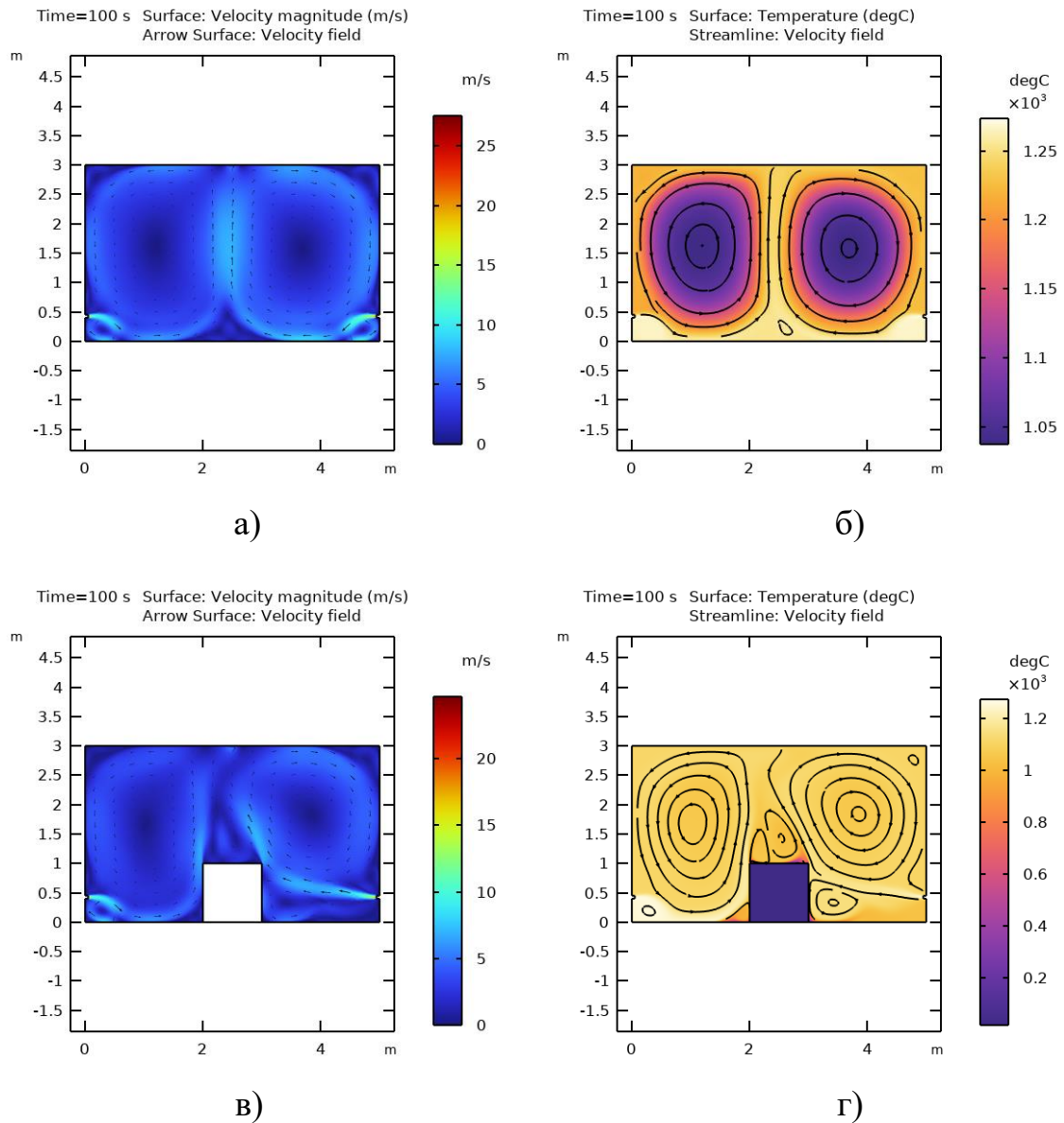


Рис. 2 Температурные и тепловые поля

Список литературы

1. Расчёт нагревательных и термических печей: Справ. Изд. Под ред. Тымчака В.М. и Гусовского В.Л. Авт.: Василькова С.Б., Генкина М.М., Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е., Масалович В.Г., Перимов А.А., Спивак Э.И., Тымчак В.М. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
2. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея-Бенара. Структуры и динамика М.: Эдиториал УРСС, 1999. — 248 с.

3. Конвекция и тепловые волны Лыков А.В., Берковский Б.М. М.: Энергия, 1974 – 336 с.

References

1. Calculation of heating and thermal furnaces: Reference Edition by Tymchak V.M. and Gusovsky V.L. Authors: Vasilkova S.B., Genkina M.M., Gusovsky V.L., Lifshits A.E., Masalovich V.G., Perimov A.A., Spivak E.I., Tymchak V.M. M.: Metallurgia, 1983. 480 p.

2. Getling A.V. Rayleigh-Benard convection. Structures and dynamics M.: Editorial URSS, 1999. - 248 p.

3. Convection and heat waves Lykov A.V., Berkovsky B.M. Moscow: Energy, 1974 – 336 p.