

Компьютерное моделирование теплоутилизатора для повышения энергоэффективности промышленных процессов

А.А. Тишаков

Самарский государственный технический университет, СамГТУ

Аннотация: Работа посвящена исследованию распределения температур и эквивалентного напряжения на поверхности приемника теплового излучения в ходе экспериментальных и расчетных серий. Эксперименты показали качественное и количественное совпадение температурных данных, полученных тепловизионной съемкой, с результатами численного моделирования. Средняя погрешность составила 0.5° , с максимальным отклонением в 1.5° в отдельных точках, что связано с краевыми эффектами и особенностями теплоизоляции. Расчетная модель воспроизводит основные характеристики температурного поля, включая влияние экранирования, при использовании сравнительно низкой плотности расчетной сетки. В рамках верификации численной модели был проведен анализ сеточной сходимости, а также выполнялся контроль невязок и контроль параметров решения.

Ключевые слова: теплоутилизатор, численно-аналитический расчет, конвективный и лучистый теплообмен, повышение эффективности, уходящий дымовой газ, рекуперация теплоты, газожидкостный теплообменник, численное моделирование, математическая модель, программное обеспечение ANSYS Workbench.

Введение

Современные тенденции в энергетике и промышленности требуют повышения эффективности использования топлива, снижения энергопотерь и минимизации вредного воздействия на окружающую среду. Глубокая рекуперация тепла является одним из наиболее перспективных решений этих задач. Она позволяет экономить ресурсы, повышать экологичность производства и адаптироваться к строгим требованиям по снижению выбросов, что делает её ключевым элементом в стратегии устойчивого развития и энергоэффективности.

Условности и допущения

Рабочая среда рассматривалась как идеальный газ, т.е. без межмолекулярного взаимодействия. Повышенная температура при минимальном избыточном давлении обеспечивает наибольшую адекватность такого допущения, т.к. в таких условиях кинетическая энергия молекул газа существенно превосходит потенциальную, а размеры молекул оказываются

существенно меньше расстояния между ними. Допущение об отсутствии межмолекулярного взаимодействия позволяют существенно упростить модель движения среды, поскольку все основные термодинамические характеристики определяются по уравнению Менделеева-Клапейрона [1].

Продукты сгорания органического топлива представляют собой многокомпонентную газовую смесь. Для природного газа основными компонентами являются [2]: азот, водяной пар и углекислый газ.

В модели газовая смесь была замещена модельным газом с теплофизическими характеристиками, эквивалентными природному газу среднего состава: азот 76%, водяной пар 11% и углекислый газ 13%. Основные термодинамические параметры модельного газа определялись по молярным долям его компонентов с учетом температурных зависимостей (рис. 6).

Температура точки росы для продуктов сгорания природного газа составляет порядка 55°C [3], а средняя ожидаемая температура газов на выходе из разрабатываемого теплоутилизатора составляет 150-250°C. Поэтому в интегральном выражении (т.е. при рассмотрении устройства в целом) конденсация водяных паров из дымовых газов и связанные с ней химические реакции не ожидаются.

В то же время следует отметить, что при температуре охлаждающего теплоносителя (воды) 50°C в застойных зонах газового объема теплоутилизатора могут наблюдаться температуры поверхности теплообмена близкие к 50°C, т.е. теоретически выпадение конденсата возможно. Однако, по предварительным оценкам объемная доля таких зон будет не более 0.6%, а образовавшийся конденсат будет испаряться по мере вытекания из застойных зон.

Таким образом, фазовые переходы хоть и с небольшой вероятностью, но могут иметь место в теплоутилизаторе; при этом их влияние не существенно ввиду их локальности [4,5].

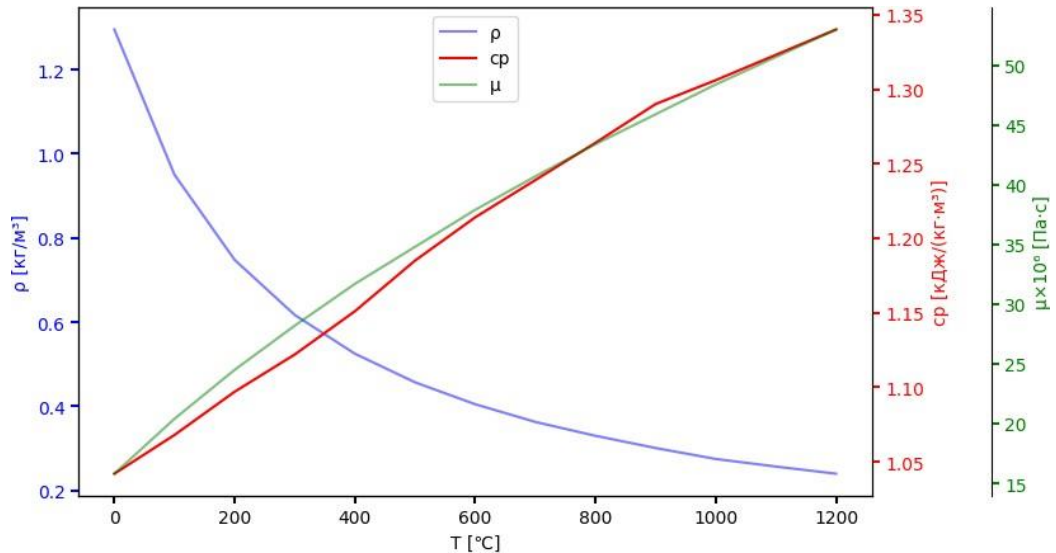


Рис. 6. — Зависимости термодинамических свойств модельного газа от температуры

Моделирование геометрической модели

Геометрическая модель трехмерная — сектор 1/8 окружности теплообменника. Общее количество конфигураций — 81. Переменные конструктивные параметры, которые представлены в таблице 1. Граничные условия традиционно являются одним из определяющих факторов адекватности численной модели. В рассматриваемом случае большинство из них носят компромиссный характер, поэтому будут рассмотрены подробно.

Таблица 1

Переменные конструктивные параметры

№	Наименование параметра	Обозначение	Пределы, [шт/мм]
1	Количество ребер	n	{32, 48, 64}
2	Относительная высота ребер	FHR	{1.5, 2, 3}
3	Толщина ребер	δ	{1, 2, 3}
4	Количество секций	N	{2, 6, 12}

Разработка численной модели

Численная модель комбинированная с расчетом в два этапа:

1. Сопряженный теплообмен (излучение, конвекция и теплопроводность) в стационарной постановке без фазовых переходов и хим. реакций (в т.ч. горения) с учетом турбулентных вихрей и зависимости термодинамических параметров среды (ДГ) и металла от температуры;
2. Тепловая деформация металла со стационарной постановке.

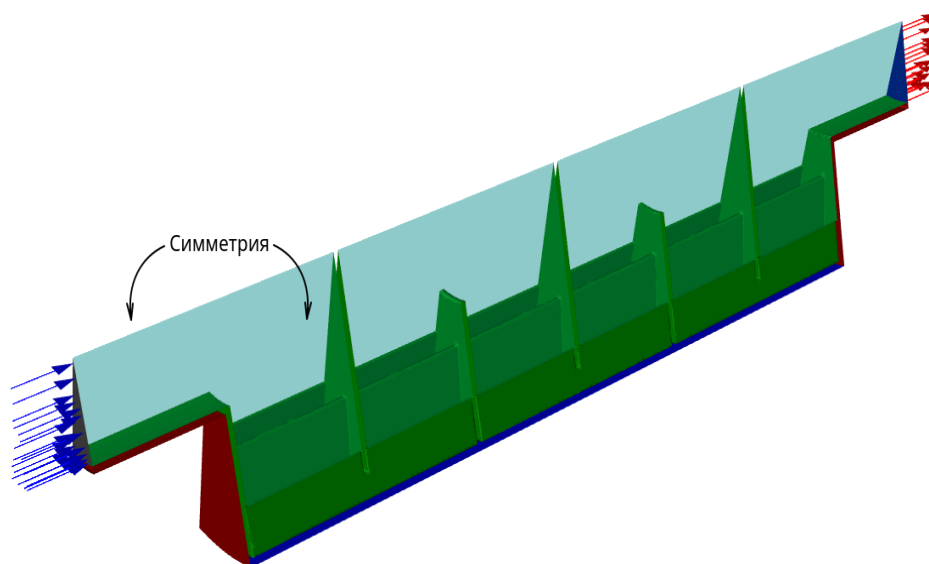


Рис. 2. — Схема граничных условий

Валидация численной модели

Валидация модели проводилась путем сопоставления расчетных данных с заимствованными результатами эксперимента. Эксперимент заключался в определении распределения температуры на поверхностях одной или двух металлических пластин, облучаемых источником тепла. Эксперимент позволил убедиться в адекватности численной модели в части описания сопряженного теплообмена (излучение, конвекция и теплопроводность) [6].

Верификация численной модели

Анализ сеточной сходимости проводился по четырем расчетным сеткам для каждого модуля отдельно: для сопряженного теплообмена и тепловой деформации [7].

В рассмотренном диапазоне плотностей сеток значимых вариаций по модулю сопряженного теплообмена выявлено не было, поэтому для основных расчетов была выбрана наиболее грубая сетка (CFD4). Для модуля тепловой деформации зависимость суммарного напряжения (von Mises equivalent stress) от плотности сетки нелинейная, поэтому была выбрана сетка, обеспечивающая принятый порог точности 10% (рис. 5) [8].

Стабилизация контрольных параметров определялась автоматически по относительному значению отклонения текущего значения от полученного 100 итераций ранее.

Результаты валидации

Расчеты выполнялись в два этапа (модуль сопряженного теплообмена и модуль тепловой деформации) для каждой конфигурации геометрической модели при значениях числа Рейнольдса $Re = \{500, 1000\}$. Общее количество расчетов — $2 \cdot 3^4 = 162$.

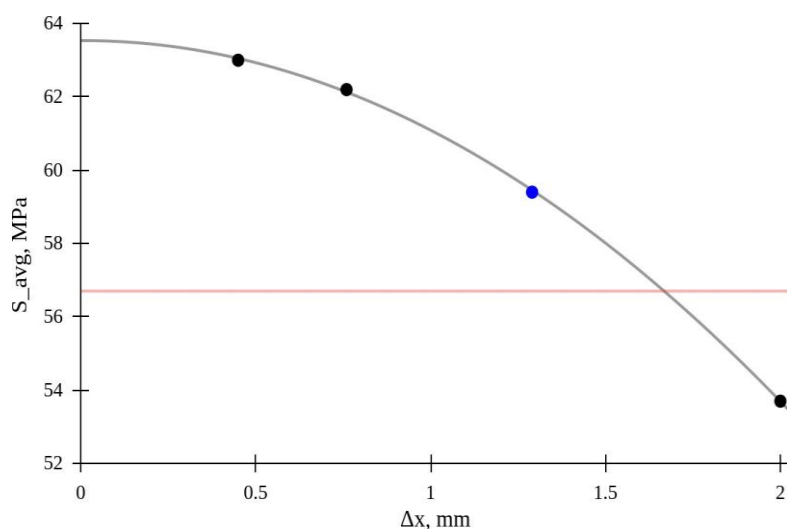


Рис. 5. — Зависимость эквивалентного напряжения от плотности сетки: красная линия — граница 10% отклонения от "истинного" значения

Приведенные распределения, скорости (рис. 6) и эквивалентных напряжений (рис. 7) относятся к одной из рассмотренных конфигураций.

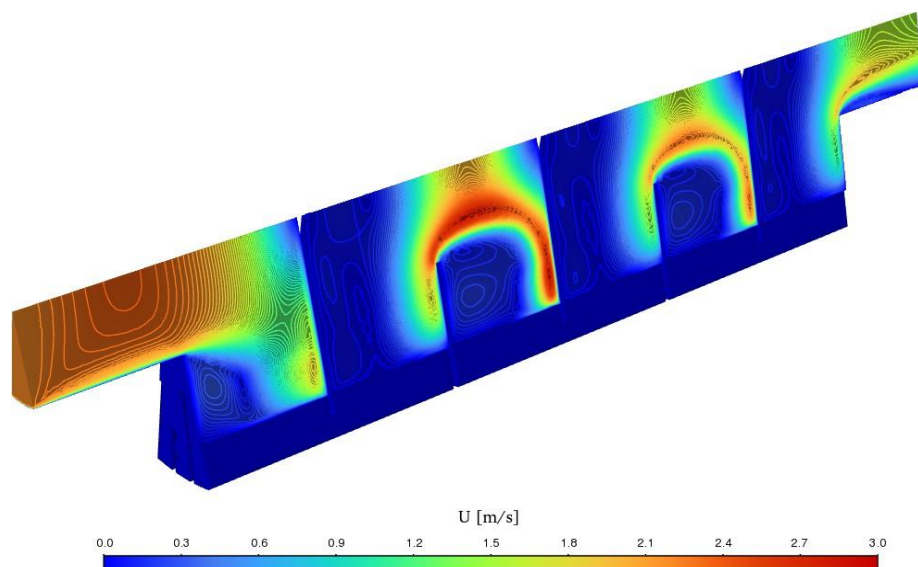


Рис. 6. — Распределение скорости

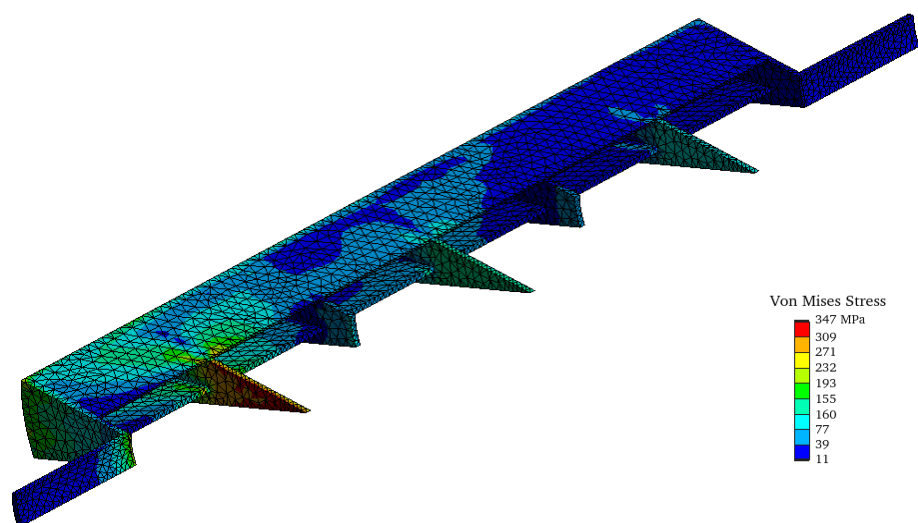


Рис. 7. — Распределение эквивалентного напряжения

Для серии экспериментов распределение температуры по поверхности приемника соответствует полученным тепловизионным изображениям как количественно (таблица 2), так и качественно (рис. 8). Значения температур в точках размещения термопар соответствуют расчетным значениям со

средней точностью 0.5°C и максимальным расхождением в 1.5°C , наблюдаемым в левом верхнем углу [9].

Таблица 2

Результаты моделирования второй серии экспериментов

	$T_1, ^{\circ}\text{C}$	$T_2, ^{\circ}\text{C}$	$T_3, ^{\circ}\text{C}$	$T_4, ^{\circ}\text{C}$
Эксперимент	45,5	45	40	42,6
Модель	44	45	40	42

Расчетная картина распределения температур близка к полученной опытным путем с учетом сглаживания, которое было получено в результате съемки с обратной стороны приемника (рис. 8).

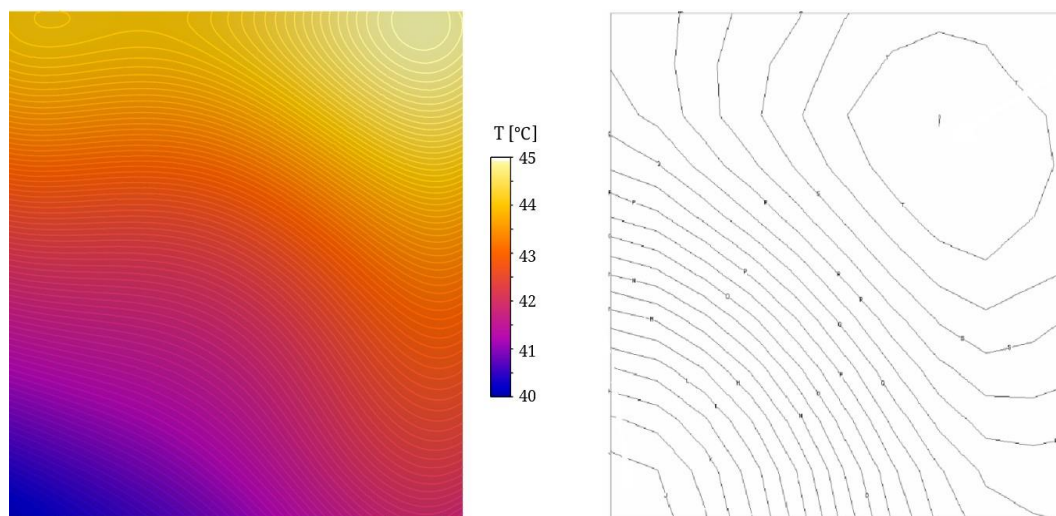


Рис. 8. — Распределение температур на поверхности приемника: расчетные данные (слева) и результаты тепловизионной съемки (справа).

Высокотемпературное пятно в верхнем правом углу пластины не отображается в численной модели, поскольку теплообмен через боковые стенки приемника полностью исключен. Тем не менее, значения предельной температуры (45°C), полученные как в расчетах, так и в эксперименте,

совпадают. Это может быть связано с теплотерями через края приемника, вызванными недостаточной теплоизоляцией, а также возможной повышенной циркуляцией воздуха в этой области.

В целом, результаты валидации являются удовлетворительными. Было получено как количественное, так и качественное совпадение температурных распределений на тепловоспринимающих поверхностях, расположенных на разных расстояниях от источника теплового излучения, включая ситуацию с экраном. Результаты прошли верификацию даже при относительно низкой плотности расчетной сетки (средний объем ячейки 2.25 см^3), что позволило провести моделирование трехмерной области теплоутилизатора с необходимым уровнем детализации [10].

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность предложенной конструкции теплообменного аппарата и его способность значительно повышать интенсивность теплообмена, что способствует снижению энергетических затрат и улучшению экологии при использовании технологий сжигания органических топлив.

Литература

1. Wesseling P. Principles of computational fluid dynamics, Springer -Verlag Berlin Heidelberg. 2001. P. 644.
2. Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Тринченко А.А. Технология сжигания органических топлив. Энергетические топлива. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 92 с.
3. Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д. Методика определения температуры точки росы продуктов сгорания природного газа // Вестник ИГЭУ, 2023, №6, с. 43–49.
4. White F.M. Viscous fluid flow (3rd ed.). McGraw Hill. 2006. P. 629.
5. Chandrasekhar S. Radiative Transfer. New York: Dover. ISBN 978-0-486-60590-6. 1960. P. 393.

6. Тишаков А.А. Математическая модель теплоутилизатора для энергоэффективных промышленных систем // Инженерный вестник Дона, 2024. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9658.
7. Тишаков, А. А. Численно-аналитический тепловой расчёт химического реактора // Молодой ученый. — 2019. — № 7 (245). — С. 87-93. — URL: <https://moluch.ru/archive/245/56494>.
8. Тишаков А.А., Никитин М.Н. Оптимизация режимных параметров теплоутилизатора прямого действия // Инженерный вестник Дона, 2023. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8274.
9. Menter F. R. Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows. 1993. AIAA Paper 93-2906.
10. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal, vol. 32, no 8. 1994. pp. 1598-1605.

References

1. Wesseling P. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2001. P. 644.
 2. Grigoriev K.A., Rundygin Yu.A., Trichenko A.A. Tekhnologiya szhiraniya orranicheskix topliv. E`nergeticheskie topliva. [Combustion technology of fossil fuels. Energy fuels]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 92 p.
 3. Biryukov A.B., Lebedev A.N., Kaminsky K.D. Vestnik IGEU, 2023. № 6. Pp. 43-49.
 4. White F.M. Viscous fluid flow (3rd ed.). McGraw Hill. 2006. P. 629.
 5. Chandrasekhar S. Radiative Transfer. New York: Dover. ISBN 978-0-486-60590-6. 1960. P. 393.
 6. Tishakov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9658.
 7. Tishakov A.A. Young Scientist, 2019. №7 (245). URL: moluch.ru/archive/245/56494.
-



8. Tishakov A.A., Nikitin M.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8274.
9. Menter F. R. Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows. 1993. AIAA Paper 93-2906.
10. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal, vol. 32, no 8. 1994. pp. 1598-1605.

Дата поступления: 6.11.2024

Дата публикации: 15.12.2024