

10.35694/YARCX.2020.51.3.008

ВЫВОД КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ДЛЯ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ХЛЕБОПЕКАРНОЙ ПЕЧИ ПУТЁМ ЧИСЛЕННОГО ТРЁХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.Г. Несиоловский (фото)

к.т.н., доцент, доцент кафедры технического сервиса
Р.Д. Адакинстарший преподаватель кафедры технического сервиса
ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, г. Ярославль

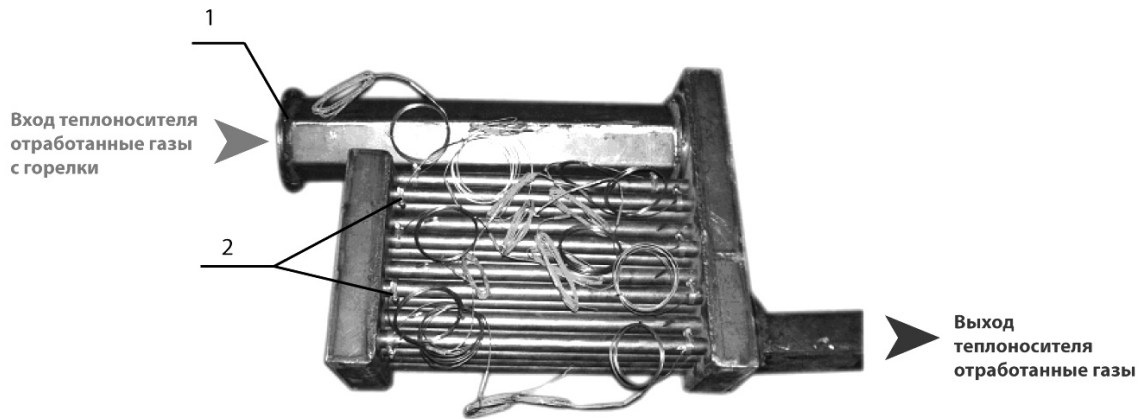
*Численный расчёт,
теплоотдача,
критериальное
уравнение, число
Нуссельта,
теплогенератор,
влажесодержание
теплоносителя,
коэффициент
теплоотдачи*

*Numeric computation, heat
transfer, criterion equation,
Nusselt number, heat
generator, heat transfer
medium moisture content,
heat transfer coefficient*

На хлебозаводах широкое распространение получили компактные роторные печи, площадью выпечки 7...8 м², в которых источником тепла является теплогенератор, состоящий из цилиндрической камеры сгорания и трубчатой теплообменной части (рис. 1). Тепловая мощность теплогенератора около 50 кВт. В этих печах удобно выпекать различные виды хлебобулочных изделий, каждый из которых может использовать специальный тепловой режим. Эти печи имеют низкую тепловую инерцию, то есть быстро прогреваются и меняют параметры теплового режима. Затраты энергии в этих печах в значительной степени зависят от эффективности работы теплогенератора.

Тепло выделяется при сжигании в горелке и камере сгорания жидкого или газообразного топлива. Теплообменник обеспечивает нагрев воздуха, который принято называть вторичным холодным теплоносителем, и он используется для выпечки хлебобулочных изделий.

Подобные теплогенераторы находят широкое применение в тех сферах хозяйства, где нагреваемый воздух не должен содержать продуктов горения топлива. Имеется много исследовательских работ по закономерностям теплопередачи, оптимизации конструктивных элементов, представлены методики расчёта. Приведены опытные значения коэффициентов, учитывающих особенности конструктивного исполнения и расположения элементов, определяющих теплообмен.



1 – камера сгорания; 2 – хомуты для зажима термопар.
Рисунок 1 – Теплогенератор

Ввиду сложности конструкции и разнообразных условий теплоотдачи в разных зонах теплопередающей части, расчёты теплообменников ведут с использованием теории подобия и анализа размерностей. Основными безразмерными коэффициентами, имеющими определённый физический смысл, являются число Нуссельта, число Рейнольдса, число Прандтля. Число Нуссельта представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи. Число Рейнольдса выражает отношение сил инерции потока жидкости или газа к силам вязкого трения. Число Прандтля состоит из величин, характеризующих теплофизические свойства вещества. Значения числа Прандтля приводятся в справочниках.

Критерии подобия определяются при проведении экспериментов и для конкретных конструкций теплопередающей части теплообменников, приводятся эмпирические зависимости для определения числа Нуссельта, являющегося ключевым при выполнении расчётов конкретных теплообменных устройств. И всегда указываются интервалы и значения безразмерных коэффициентов, в которых проведены эксперименты.

Натурные эксперименты затратны и их можно заменить на двумерный численный расчёт, который даст примерный результат, либо на достаточно точное трёхмерное моделирование.

Необходимо отметить, что применение численного моделирования не отменяет необходимость экспериментального исследования, но повышает качество технических решений и культуру проектирования [1].

Не все теплогенераторы нагревают сухой воздух. Специфическими особенностями теплогенераторов, применяемых в хлебопекарных печах, являются высокая влажность вторичного те-

плоносителя (около 0,4 кг влаги на 1 кг воздуха), и перемещение теплоносителя по замкнутому контуру, практически без потери влажности.

Такие особенности могут существенно менять характеристики процессов теплообмена и прежде всего числа Нуссельта.

Для того чтобы обеспечить технологические требования (температуру внутри печи и время её прогрева), а также минимальный расход топлива, необходимо правильно рассчитать площадь теплообмена и подобрать тепловую мощность горелки (Q) [2–4]. Для определения площади теплообмена необходимо знать коэффициент теплоотдачи и число Нуссельта.

Существенными особенностями работы теплогенератора также являются: наличие камеры сгорания, дефлекторы в теплообменной части.

В доступных литературных источниках критериальное уравнение для определения числа Нуссельта при таких условиях не приводится. Расчёт по имеющимся формулам приводит к существенным ошибкам при определении площади теплообмена [5–6].

Таким образом, тема работы является актуальной, поскольку направлена на определение значений коэффициента теплоотдачи (α) и зависимости числа Нуссельта от влагосодержания во вторичном холодном теплоносителе – воздухе.

Методика

Проведём трёхмерное численное моделирование работы теплогенератора [7]. Для этого создадим 3D-модель теплогенератора, идентичную натуральному образцу (испытанного ранее). Назначен материал теплогенератора – жаростойкая сталь (в программе не указаны конкретные марки, задаются лишь свойства сталей) [8–10]. Труб-

ки теплообменника расположены в шахматном порядке.

Зададим граничные условия для трёхмерной модели [11; 12].

Холодный теплоноситель: влажность $d = 0,1...0,6$ кг/кг, скорость варьируется в пределах от 1 до 5 м/с.

Горячий теплоноситель: влажность $d = 0,04$ кг/кг, тепловой поток 45 кВт.

Программный расчёт. Получение выходных значений:

- скорость холодного теплоносителя между трубок V_x , м/с;
- температура холодного теплоносителя на выходе t_x , °С;
- температура горячего теплоносителя на выходе t_r , °С;
- температура поверхности теплогенератора t_r , °С;
- массовый расход воздуха и продуктов горения снаружи и внутри теплогенератора, кг/с;
- гидравлическое сопротивление при обтекании теплоносителем поверхности теплогенератора ΔP , Па.

При экспериментальном исследовании конвективного теплообмена возникает трудность, заключающаяся в том, что коэффициент теплоотдачи (α) зависит от многих параметров: длины теплообменника, скорости набегающего потока и теплофизических параметров теплоносителя: $\alpha = f(l, \omega, \lambda, c, \rho, \nu)$ [12]. Если проводить эксперимент, то число экспериментов будет $N = m^6$.

При этом численный расчёт позволяет сузить число экспериментов и получить значения температур, скоростей теплоносителей и температур поверхности теплогенератора.

На основании полученных данных возможно рассчитать коэффициент теплоотдачи от стенки теплогенератора к нагреваемому теплоносителю (воздуху) по формуле:

$$\alpha = \frac{Q}{t_1 - t_2}, \quad (1)$$

где Q – тепловая мощность горелки, кВт;

t_1 – температура поверхности теплогенератора, °С;

t_2 – температура холодного теплоносителя, °С.

Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu}, \quad (2)$$

где ω – скорость холодного теплоносителя, м/с;

d – эквивалентный диаметр, м;

ν – кинематическая вязкость теплоносителя, м/с.

Число Нуссельта определяется по формуле:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (3)$$

где d – эквивалентный диаметр, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м °С.

Эквивалентный диаметр определяется из выражения:

$$d_3 = \frac{4F}{P}, \quad (4)$$

где F – площадь поперечного сечения, м²;

P – периметр, м.

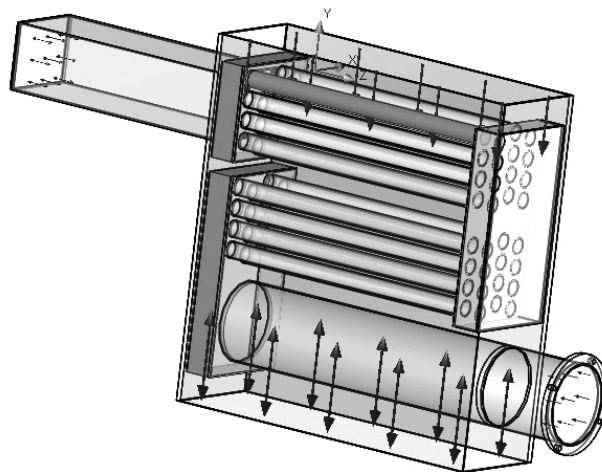


Рисунок 2 – Модель теплогенератора с заданными граничными условиями

Проанализируем полученные результаты значений. Для того чтобы определить коэффициенты критериального уравнения вида $Nu = C \cdot Re^n$, необходимо построить график $Nu = f(Re)$, тангенс угла наклона которого будет коэффициент n (рис. 3).

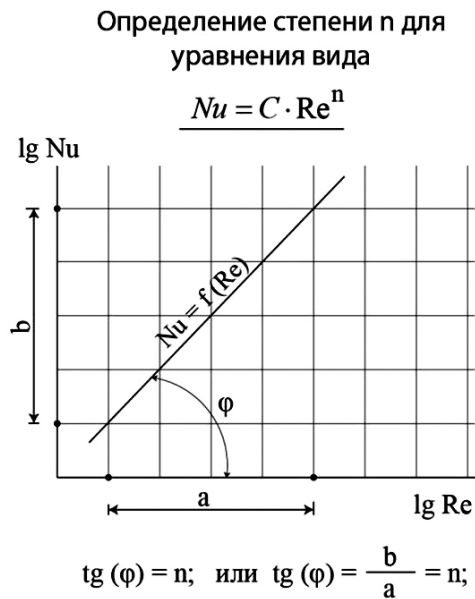


Рисунок 3 – Определение степени критериального уравнения

Коэффициент «С» определяется из выражения:

$$C = \frac{Nu}{Re^n}, \quad (5)$$

Коэффициенты «С» и « n » критериального уравнения теплоотдачи определяются математическими функциями, встроенными в Microsoft

Excel, при построении графика функции $Nu = f(Re)$ выбирается искомое уравнение.

Таким образом, были построены шесть графиков функций $Nu = f(Re)$, по шести точкам влажности $d = 0,1 \dots 0,6$ кг/кг. Для каждого графика было получено своё критериальное уравнение, пример для значения влагосодержания $d = 0,4$ кг/кг показан на рисунке 4.

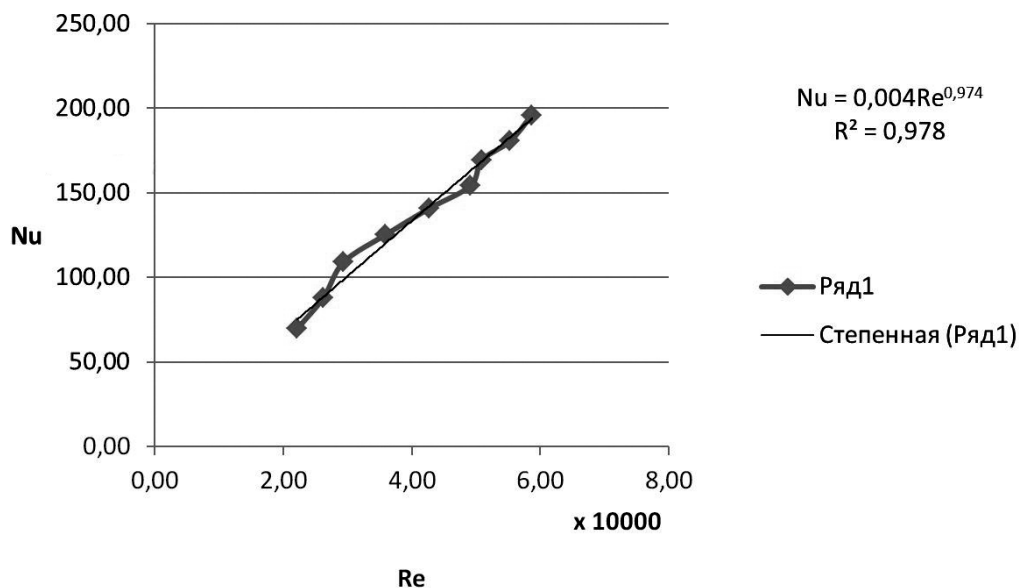


Рисунок 4 – График функции $Nu = f(Re)$, для $d = 0,4$ кг/кг

Найдём зависимость всех шести уравнений от изменяющегося влагосодержания во вторичном теплоносителе в интервале $d = 0,1 \dots 0,6$ кг/кг, решив эту задачу графически в Microsoft Excel, получим итоговое уравнение:

$$Nu = 0.0057d^{0.2274} Re^{0.9602d^{-0.022}} Pr^{0.33},$$

справедливое для диапазона Re 21000...58000.

Несмотря на то, что скорости обдува поверхности теплогенератора невелики (диапазон 1...5 м/с), числа Рейнольдса достаточно большие. Это объясняется тем, что кинематическая вязкость влажного воздуха в несколько раз выше, чем кинематическая вязкость сухого. Поэтому число Рейнольдса для сухого воздуха при тех же скоростях значительно меньше. Аналогично и с числом Нуссельта, поскольку коэффициенты теплопроводности влажного воздуха в несколько раз больше коэффициентов теплопроводности сухого воздуха. Также скорость зависит от площади проходного сечения, между трубок площадь меньше, чем на входе, поэтому скорость теплоносителя увеличивается.

Результатирующее критериальное уравнение, по которому можно рассчитать число Нуссельта, справедливо только для данной конструкции теплогенератора, оснащённого дефлекторами, работающего в условиях высокой влажности вторичного теплоносителя.

Выводы

1. Проведён трёхмерный численный расчёт работы теплогенератора, в ходе которого определены:

- скорость холодного теплоносителя между трубками V_x , м/с;
- температура холодного теплоносителя на выходе t_x , °С;
- температура горячего теплоносителя на выходе t_r , °С;
- температура поверхности теплогенератора t_p , °С;
- массовый расход воздуха и продукта горения снаружи и внутри теплогенератора, кг/с;
- гидравлическое сопротивление при обдуве воздухом теплогенератора ΔP , Па.

2. По результатам расчёта определены: новое критериальное уравнение

$$Nu = 0.0057d^{0.2274} Re^{0.9602d^{-0.022}} Pr^{0.33}$$

и соответственно коэффициенты теплоотдачи α .

3. Физический смысл выведенного уравнения теплоотдачи заключается в том, что безразмерный коэффициент теплоотдачи (Nu) теперь привязан ещё и к функции влагосодержания воздуха (d), который является горячим теплоносителем. Уравнение показывает, насколько увеличивается теплоотдача при добавлении в горячий теплоноситель влаги. Диапазон влагосодержания, в пределах которого используется предлагаемая формула, невелик, всего от 0,1 до 0,6 кг воды на кг воздуха, так как теплогенератор работает в хлебопекарной печи, где другие условия влагосодержания не используются, поэтому расширять исследуемый диапазон влагосодержания не имеет смысла. Предлагаемое уравнение существенно повышает точность расчёта площади теплоотдачи самого теплогенератора, поскольку учитывает влияние влажности на процесс теплоотдачи.

Литература

1. Бадерников, А.В. Модифицированный метод расчёта горения в вихревых противоточных горелочных устройствах [Текст]: автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (01.04.14) / Бадерников Артем Витальевич; ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева». – Рыбинск, 2019. – 16 с.
2. Бакластов, А.М. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок [Текст] / А.М. Бакластов, В.А. Горбатенко, П.Г. Удыма. – М.: Энергоиздат, 1981. – 336 с.
3. Баскаков, А.П. Теплотехника [Текст] / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.; ил.
4. Адакин, Р.Д. Опыт разработки и испытаний теплогенераторов малой мощности [Текст] / Р.Д. Адакин, О.Г. Несиоловский // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2013. – № 2 (58). – С. 33–35.
5. Головачев, В.Л. Аппараты теплообменные [Текст] / В.Л. Головачев, В.И. Родионов; под ред. В.Н. Ермолаева. – М.: АООТ «Вниинефтемаш», 1999. – 93 с.; ил.
6. Иванов, В.Л. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок [Текст]: учебник для вузов / В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, М.И. Осипов; под ред. А.И. Леонтьева. – 2-е изд., стереотип. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 592 с.

7. Бережная, О.К. Моделирование теплогидравлических процессов и разработка методики обобщения данных по эффективным теплообменникам [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Бережная Ольга Константиновна. – М., 2005. – 165 с.

8. Адакин, Р.Д. Компьютерное моделирование процессов теплоотдачи теплогенератора хлебопекарной печи при различной влажности и скорости движения холодного теплоносителя – воздуха [Текст] / Р.Д. Адакин, О.Г. Несиоловский // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2018. – № 1. – С. 98–100.

9. Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации [Текст] / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.

10. Несиоловский, О.Г. Численное моделирование процессов в теплогенераторе хлебопекарной печи [Текст] / О.Г. Несиоловский, Р.Д. Адакин // Инновационные инженерно-технические решения в АПК: сб. науч. тр. по материалам Всеросс. науч.-практ. конф. с международ. участием. – Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, 2018. – С. 101–108.

11. CADArtifex. Solidworks 2015: A Power Guide for Beginner and Intermediate Users. – CADArtifex, 2015. – 768 p.

12. Несиоловский, О.Г. Компьютерное моделирование тепловых процессов в теплогенераторах хлебопекарных печей [Текст] / О.Г. Несиоловский, Р.Д. Адакин // Вестник АПК Верхневолжья. – 2018. – № 2 (42). – С. 74–77.

References

1. Badernikov, A.V. Modificirovannyj metod raschjota gorenija v vihrevykh protivotochnykh gorelochnykh ustrojstvax [Tekst]: avtoref. diss. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk (01.04.14) / Badernikov Artem Vital'evich; FGBOU VO «Rybinskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehničeskij universitet imeni P.A. Solov'eva». – Rybinsk, 2019. – 16 s.

2. Baklastov, A.M. Proektirovanie, montazh i jekspluatacija teplomassoobmennykh ustanovok [Tekst] / A.M. Baklastov, V.A. Gorbatenko, P.G. Udyma. – M.: Jenergoizdat, 1981. – 336 s.

3. Baskakov, A.P. Teplo tehnika [Tekst] / A.P. Baskakov, B.V. Berg, O.K. Vitt [i dr.]. – M.: Jenergoatomizdat, 1991. – 224 s.; il.

4. Adakin, R.D. Opyt razrabotki i ispytanij teplogeneratorov maloj moshhnosti [Tekst] / R.D. Adakin, O.G. Nesiolovskij // Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdenija vysshego professional'nogo obrazovanija «Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet imeni V.P. Gorjachkina». – 2013. – № 2 (58). – S. 33–35.

5. Golovachev, V.L. Apparaty teploobmennyje [Tekst] / V.L. Golovachev, V.I. Rodionov; pod red. V.N. Ermolaeva. – M.: AOOT «Vniineftemash», 1999. – 93 s.; il.

6. Ivanov, V.L. Teploobmennyje apparaty i sistemy ohlazhdenija gazoturbinyh i kombinirovannykh ustanovok [Tekst]: uchebnik dlja vuzov / V.L. Ivanov, A.I. Leont'ev, Je.A. Manushin, M.I. Osipov; pod red. A.I. Leont'eva. – 2-e izd., stereotip. – M.: MGTU im. N.Je. Bauman, 2004. – 592 s.

7. Berezhnaja, O.K. Modelirovanie teplogidravlicheskih processov i razrabotka metodiki obobshhenija dannykh po jeffektivnym teploobmennikam [Tekst]: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.14.04 / Berezhnaja Ol'ga Konstantinovna. – M., 2005. – 165 s.

8. Adakin, R.D. Komp'juternoe modelirovanie processov teplootdachi teplogeneratora hlebopekarnoj pechi pri razlichnoj vlazhnosti i skorosti dvizhenija holodnogo teplonositelja – vozduha [Tekst] / R.D. Adakin, O.G. Nesiolovskij // Istorija i perspektivy razvitija transporta na severe Rossii. – 2018. – № 1. – S. 98–100.

9. Aljamovskij, A.A. SolidWorks Simulation. Inzhenernyj analiz dlja professionalov: zadachi, metody, rekomendacii [Tekst] / A.A. Aljamovskij. – M.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.

10. Nesiolovskij, O.G. Chislennoe modelirovanie processov v teplogeneratore hlebopekarnoj pechi [Tekst] / O.G. Nesiolovskij, R.D. Adakin // Innovacionnye inzhenerno-tehnicheskie reshenija v APK: sb. науч. тр. по материалам Всеросс. науч.-практ. конф. с международ. участием. – Jaroslavl': Izd-vo FGBOU VO Jaroslavskaja GSXA, 2018. – S. 101–108.

11. CADArtifex. Solidworks 2015: A Power Guide for Beginner and Intermediate Users. – CADArtifex, 2015. – 768 r.

12. Nesiolovskij, O.G. Komp'juternoe modelirovanie teplovykh processov v teplogeneratorah hlebopekarnykh pechej [Tekst] / O.G. Nesiolovskij, R.D. Adakin // Vestnik APK Verhnevolzh'ja. – 2018. – № 2 (42). – S. 74–77.