



Научная статья  
УДК 536.3:664.655.1  
doi:10.35694/YARCX.2021.55.3.017

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООТДАЧИ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ХЛЕБОПЕКАРНО-КОНДИТЕРСКОЙ ПЕЧИ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

О. Г. Несиоловский (фото)

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры технического сервиса

Р. Д. Адакин

доцент кафедры технического сервиса

И. М. Соцкая

канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой технического сервиса

*Теплообменный  
аппарат, численное  
моделирование,  
теплоотдача,  
дефлекторы,  
направляющие  
пластины*

*Heat exchanger, numerical  
simulation, heat transfer,  
deflectors, guide plates*

Теплообменные аппараты (ТА) используются в промышленности, в сельском хозяйстве в различных тепловых агрегатах, в том числе и в теплогенерирующих устройствах. Основная задача ТА – нагреть или охладить вторичный теплоноситель. От материалов, расположения трубок, их геометрии (круг, овал, другие поверхности), направления теплоносителей зависит теплоотдача – количество передаваемого тепла от ТА к теплоносителю конвективно.

Чем эффективнее ТА обменивается теплом с теплоносителями, тем выше КПД и меньше затрат приходится на расход топлива. В литературе разными авторами описаны натурные, а также выполненные с помощью численного моделирования эксперименты по определению новых конструктивных решений, позволяющих повысить теплоотдачу ТА. Из основных решений можно выделить следующие: нанесение на поверхность трубок ТА насечек, выбоин, выпуклостей или установление на трубки дисков (пример ТА котельных). Указанные конструктивные мероприятия на гладких трубках образуют небольшие препятствия, создающие микротурбулентные локальные потоки при движении теплоносителя по поверхности трубок ТА, что приводит к завихрению потоков и к увеличению теплоотдачи. Решения сводятся в основном к созданию наиболее удачной формы неровностей на трубках ТА, чтобы повысить теплоотдачу, при этом существенно не увеличить значение гидравлического сопротивления, которое влияет на скорость прохождения теплоносителя через ТА [1].

При обтекании выпуклых или вогнутых поверхностей умеренной кривизны с полусферическими выемками центробежные массовые силы воздействуют на теплоотдачу так же, как и при обтекании гладких криволинейных поверхностей. В то же время при обтекании выпуклых или вогнутых поверхностей, с установленными на них полусферическими или поперечными выступами, воздействие центробежных массовых сил на теплоотдачу не проявляется. Исследования влияния продольного градиента давления при обтекании сферических выемок отрывного типа показали, что процессы релаксации в возвратном течении сферической выемки приводят к противоположному по знаку

изменению уровня интенсивности теплообмена по сравнению с его воздействием без интенсификаторов теплообмена. Установлено, что при одинаковых относительных размерах выемок и условиях проведения экспериментов массив выемок диффузорного типа может обеспечить в 1,4 раза более высокую теплоотдачу по сравнению с отрывными сферическими выемками. Такой же дополнительный прирост теплоотдачи в массиве полусферических выемок может быть получен при наложении на турбулентный поток периодических пульсаций скорости [2].

Теплообменные аппараты теплогенераторов хлебопекарных печей [3; 4; 5; 6] отличаются от промышленных тем, что на хлебопекарные ТА устанавливают сверху кожух, который направляет вторичный холодный теплоноситель на теплообменники, затем в камеру выпечки. Причём все кожухи выполняют гладкими. Их задача заключается в том, чтобы холодный теплоноситель не распространялся по печи, не терял давления, а направлялся конкретно на пучок трубок ТА.

Авторы статьи предлагают установить на кожухе с внутренней стороны небольшие дефлекторы, которые могут создавать дополнительные турбулентные завихрения, а также установить пластины, направляющие холодный теплоноситель на обтекание жаровой трубы камеры сгорания (расположена в нижней части генератора) по заданному закону (рис. 3б).

Применив численное моделирование и рассмотрев несколько конструктивных вариантов установки дефлекторов и направляющих пластин, авторы пришли к выводу, что данные мероприятия существенно повышают теплоотдачу – до 40% в зависимости от скорости теплоносителя, что, в конечном счёте, приводит к экономии топлива.

Задача исследования – определение размеров и местоположения дефлекторов и направляющих

с целью получения максимального теплового эффекта.

Такой же эффект можно достичь увеличением площади теплоотдачи ТА, что приведёт к существенному удорожанию конструкции, за счёт стоимости добавочного жаропрочного материала и увеличения расхода топлива на начальный разогрев агрегата. Предложенный авторами способ, с одной стороны, не приводит к значительному удорожанию конструкции, поскольку дефлекторы – это малогабаритные пластины из нежаропрочного металла, имеющего низкую стоимость, с другой стороны, как показали результаты численного моделирования, не происходит существенного увеличения значения гидравлического сопротивления. Основная масса теплоносителя проходит через пучок ТА и 15...25% – через дефлекторы. Основным эффектом достигается тем, что на выходе из ТА установлены заслонки, которые направляют теплоноситель на жаровую трубу (камеру сгорания), тем самым он дополнительно подогревается.

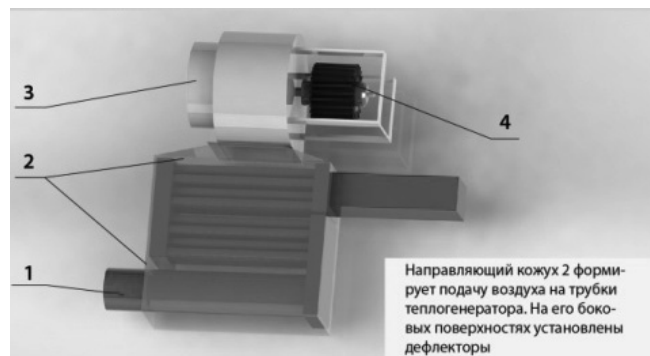
#### Методика

Проанализируем работу теплогенератора с кожухом и без него. Для этого проведём несколько опытов по численному моделированию теплоотдачи теплообменной части (рис. 1 и 2). Кожух теплогенератора направляет поток воздуха от вентилятора на теплообменную часть, а дефлекторы не дают пройти воздуху в зазор между кожухом и корпусом теплогенератора.

Дефлекторы – пластины, установленные внутри кожуха 2 теплогенератора, направляющие воздух на теплообменную часть.

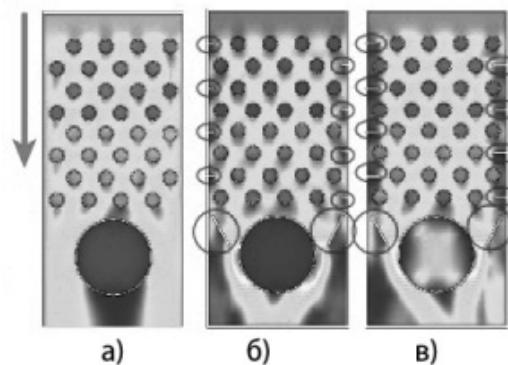
При численном моделировании [7; 8; 9] рассматривались следующие варианты (рис. 2):

- без дефлекторов;
- с дефлекторами – положение 1;
- с дефлекторами – положение 2.



1 – теплогенератор; 2 – направляющий кожух; 3 – вентилятор; 4 – электродвигатель.

Рисунок 1 – Схема сборки теплогенератора с вентилятором



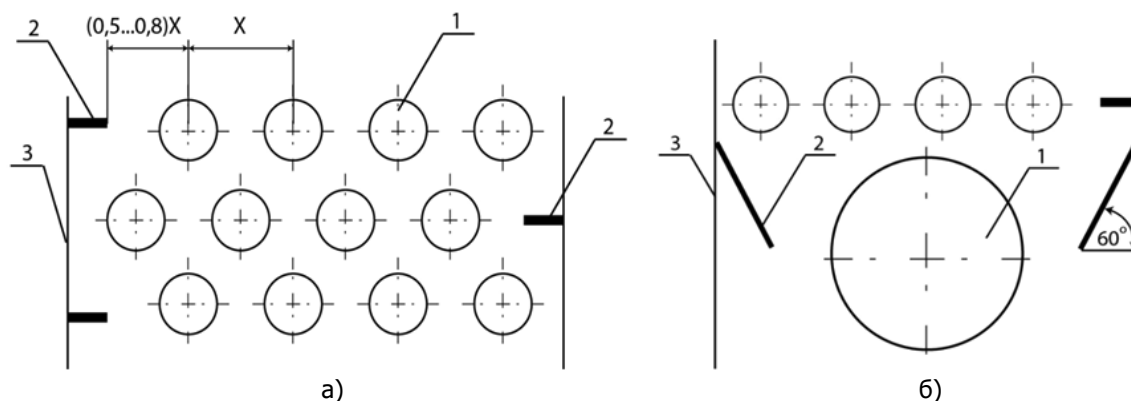
а – без боковых дефлекторов на корпусе; б – дефлекторы, положение 1; в – дефлекторы, положение 2.

Рисунок 2 – Кожух с дефлекторами

Положения дефлекторов выбирались опытным путём. В основу положено рассмотрение графической карты скорости и получение ровного распределения потока теплоносителя на карте скорости (рис. 2), кружками обведены дефлекторы. При каждом изменении положения дефлектора вырисовывалось, соответственно, направление потока теплоносителя, что отображалось графически на карте изменения скорости. При проведении нескольких экспериментов по моде-

лированию работы теплогенератора в SolidWorks были сделаны выводы о наиболее удачном расположении дефлекторов по наибольшим значениям числа Нуссельта, характеризующих теплоотдачу. Использование теплогенератора без дефлекторов сильно снижает теплоотдачу, что наглядно видно на графике рисунка 4, кривая а.

На рисунке 3 (движение теплоносителя сверху вниз) показаны наилучшие положения дефлекторов и направляющих пластин. Оптимальные поло-



а) Первая половина ТА: 1 – трубы ТА; 2 – дефлекторы; 3 – кожух; х – шаг между трубами ТА;  
б) Вторая половина ТА: 1 – жаровая труба; 2 – направляющие пластины; 3 – кожух.

Рисунок 3 – Схема расположения дефлекторов и направляющих пластин

жения определены в результате проведения нескольких испытаний численного моделирования. Дефлектор устанавливается на кожухе там, где смещена крайняя трубка ТА. Дефлектор устанавливается на шаг  $(0,5...0,8) \cdot X$ , где  $X$  – шаг между трубками. Таким образом дефлектор замещает недостающую трубку и создаёт дополнительные локальные турбулентные завихрения теплоносителя. На рисунке 3б отображены направляющие пластины, оптимальный угол атаки которых составляет  $60^\circ$ . Значения угла пластины выбраны таким образом, чтобы теплоноситель плавно менял направление без потери скорости. Пластины направляют теплоноситель на внешнюю стенку жаровой трубы (рис. 3б), в которой происходит сжигание топлива. Температура жаровой трубы максимальная среди всех поверхностей ТА. Теплоноситель направлен на разогретую поверхность жаровой трубы, и происходит дополнительный подогрев перед выходом из кожуха.

Данная методика применима к любым размерам трубок других теплообменных аппаратов, достаточно выдержать углы пластин и коэффициент шага между дефлектором и трубкой ТА.

Результаты исследований отображены на графике (рис. 4). По оси ординат отложены значения числа Нуссельта, характеризующие теплоотдачу

ТА, а по оси абсцисс – значения числа Рейнольдса, характеризующие скорость движения теплоносителя.

На основании полученных данных рассчитан 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,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_2$  – температура холодного теплоносителя,  $^\circ\text{C}$ ;

Число Рейнольдса определяется по формуле:

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

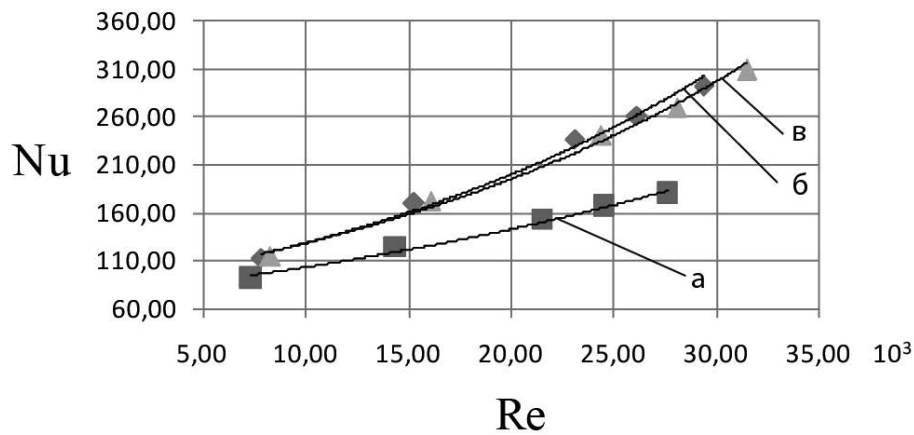
где  $\omega$  – скорость холодного теплоносителя, м/с;  
 $d$  – эквивалентный диаметр, м;  
 $\nu$  – кинематическая вязкость теплоносителя, м/с.

Число Рейнольдса выражает отношение сил инерции потока жидкости или газа к силам вязкого трения.

Число Нуссельта представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи и определяется по формуле:

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

где  $d$  – эквивалентный диаметр, м;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м К.



■  $s_s = 65$ ; без боковых дефлекторов;

◆  $s_s = 65$ ; дефлекторы положение 1;

▲  $s_s = 65$ ; дефлекторы положение 2.

Рисунок 4 – График функции Nu от Re в зависимости от положения дефлекторов

Эквивалентный диаметр определяется из выражения:

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

где  $F$  – площадь поперечного сечения, м;  
 $P$  – периметр, м.

Испытания показали, что дефлекторы существенно увеличивают теплоотдачу теплогенератора. Причём дефлекторы с положением 2 показали лучший результат по сравнению с дефлекторами с положением 1 (рис. 3). Теплоотдача увеличивается от 10 до 40% при росте скорости теплоносителя, причём максимального значения достигает при значении  $Re = 30000$ .

Ранее авторами было выведено критериальное уравнение для данной конструкции ТА [10].

Итоговое уравнение:

$$Nu = 0,0057 d^{0,2274} Re^{0,9602} d^{-0,022} Pr^{0,33}$$

позволяет более точно рассчитать теплоотдачу ТА, поскольку в уравнении учитывается влажность при выпечке.

Вышеизложенный материал показывает, что использование дефлекторов и направляющих

пластин ведёт к повышению КПД ТА, снижению расхода топлива, более эффективному использованию выработанного тепла для выпечки хлебобулочных изделий.

#### Выводы

Определены оптимальные параметры дефлекторов, формирующих поток нагреваемого воздуха: коэффициент шага между дефлектором и трубкой ТА, угол направляющих пластин. Дефлекторы и направляющие пластины дополнительно увеличивают теплоотдачу на 10...40%, в зависимости от скорости теплоносителя, существенно повышая КПД теплогенератора. Авторы рекомендуют использовать предложенные конструктивные доработки направляющего кожуха при изготовлении хлебопекарных печей, так как это существенно влияет на экономию топлива, поскольку увеличенная теплоотдача напрямую сокращает подачу топлива и время работы горелки, а требуемая температура в камере выпечки хлебопекарной печи достигается значительно быстрее.

#### Список источников

1. Подвальный, С. Л. Интенсификация теплообмена в хаотических режимах / С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев. – Текст : непосредственный // Альтернативная и интеллектуальная энергетика : материалы II Международной научно-практической конференции. – Воронеж : Изд-во Воронежский государственный технический университет, 2020. – С. 68–69. – ISBN 978-5-7731-0862-7.
2. Ильинков, А. В. Интенсификация теплообмена в полях массовых сил, градиента давления, пульсаций скорости и импульсных струй / А. В. Ильинков, А. В. Щукин, В. В. Такмонцев [и др.]. – Текст : непосредственный // Теплоэнергетика. – 2020. – № 1. – С. 44–52. – ISSN 0040-3636.
3. Несиоловский, О. Г. Некоторые особенности теплового расчета теплогенераторов малой мощности / О. Г. Несиоловский, Р. Д. Адакин. – Текст : непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2017. – № 1. – С. 156–159.

4. Патент 2555624 С2 Российская Федерация, МПК F24H 3/02 (2006.01). Теплогенератор с трубчатый теплообменником : № 2012131374/06 : заявл. 20.07.2012. : опубликовано 10.07.2015, Бюл. № 19 / Несиоловский О. Г., Адакин Р. Д. ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия». – 5 с. – Текст : непосредственный.

5. Несиоловский, О. Г. Ограничения, накладываемые на теплогенератор конструкции хлебопекарной печи / О. Г. Несиоловский, Р. Д. Адакин. – Текст : непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2015. – № 1. – С. 142–144.

6. Несиоловский, О. Г. Анализ конструкций теплогенераторов / О. Г. Несиоловский, Р. Д. Адакин. – Текст : непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2014. – № 1. – С. 149–151.

7. Адакин, Р. Д. Computer modelling regenerative heat generator for the purpose of optimization and constructive refinement / Р. Д. Адакин, О. Г. Несиоловский. – Текст : непосредственный // Энергетик. – 2018. – № 8. – С. 41–43. – ISSN 0013-7278.

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

9. Несиоловский, О. Г. Компьютерное моделирование тепловых процессов в теплогенераторах хлебопекарных печей / О. Г. Несиоловский, Р. Д. Адакин. – Текст : непосредственный // Вестник АПК Верхневолжья. – 2018. – № 2 (42). – С. 74–77. – ISSN 1998-1635.

10. Несиоловский, О. Г. Вывод критериального уравнения теплоотдачи для теплогенератора хлебопекарной печи путём численного трёхмерного моделирования / О. Г. Несиоловский, Р. Д. Адакин. – Текст : непосредственный // Вестник АПК Верхневолжья. – 2020. – № 3 (51). – С. 62–67. – ISSN 1998-1635.

#### References

1. Podval'nyj, S. L. Intensifikaciya teploobmena v haoticheskikh rezhimah / S. L. Podval'nyj, E. M. Vasil'ev. – Текст : neposredstvennyj // A'l'ternativnaya i intellektual'naya energetika : materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Voronezh : Izd-vo Voronezhskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2020. – S. 68–69. – ISBN 978-5-7731-0862-7.

2. Il'inkov, A. V. Intensifikaciya teploobmena v polyah massovyh sil, gradienta davleniya, pul'sacij skorosti i impaktnyh struj / A. V. Il'inkov, A. V. Shchukin, V. V. Takmontsev [i dr.]. – Текст : neposredstvennyj // Teploenergetika. – 2020. – № 1. – S. 44–52. – ISSN 0040-3636.

3. Nesiolovskij, O. G. Nekotorye osobennosti teplovogo rascheta teplogeneratorov maloj moshchnosti / O. G. Nesiolovskij, R. D. Adakin. – Текст : neposredstvennyj // Istoriya i perspektivy razvitiya transporta na severe Rossii. – 2017. – № 1. – S. 156–159.

4. Patent 2555624 С2 Rossijskaya Federaciya, МПК F24H 3/02 (2006.01). Teplogenerator s trubchatym teploobmennikom : № 2012131374/06 : zayavl. 20.07.2012. : opublikovano 10.07.2015, Byul. № 19 / Nesiolovskij O. G., Adakin R. D. ; patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Yaroslavskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya». – 5 s. – Текст : neposredstvennyj.

5. Nesiolovskij, O. G. Ogranicheniya, nakladyvaemye na teplogenerator konstrukciej hlebopekarnoj pechi / O. G. Nesiolovskij, R. D. Adakin. – Текст : neposredstvennyj // Istoriya i perspektivy razvitiya transporta na severe Rossii. – 2015. – № 1. – S. 142–144.

6. Nesiolovskij, O. G. Analiz konstrukcij teplogeneratorov / O. G. Nesiolovskij, R. D. Adakin. – Текст : neposredstvennyj // Istoriya i perspektivy razvitiya transporta na severe Rossii. – 2014. – № 1. – S. 149–151.

7. Adakin, R. D. Computer modelling regenerative heat generator for the purpose of optimization and constructive refinement / R. D. Adakin, O. G. Nesiolovskij. – Текст : neposredstvennyj // Energetik. – 2018. – № 8. – S. 41–43. – ISSN 0013-7278.

8. Adakin, R. D. Komp'yuternoe modelirovanie processov teplootdachi teplogeneratora hlebopekarnoj pechi pri razlichnoj vlazhnosti i skorosti dvizheniya holodnogo teplonositelya – vozduha / R. D. Adakin, O. G. Nesiolovskij. – Текст : neposredstvennyj // Istoriya i perspektivy razvitiya transporta na severe Rossii. – 2018. – № 1. – S. 98–100.

9. Nesiolovskij, O. G. Komp'yuternoe modelirovanie teplovyh processov v teplogeneratorah hlebopekarnyh pechej / O. G. Nesiolovskij, R. D. Adakin. – Текст : neposredstvennyj // Vestnik APK Verhnevolzh'ya. – 2018. – № 2 (42). – S. 74–77. – ISSN 1998-1635.

10. Nesiolovskij, O. G. Vывод kriterial'nogo uravneniya teplootdachi dlja teplogeneratora hlebopekarnoj pechi putjom chislennogo trjohmernogo modelirovaniya / O. G. Nesiolovskij, R. D. Adakin. – Текст : neposredstvennyj // Vestnik APK Verhnevolzh'ja. – 2020. – № 3 (51). – S. 62–67. – ISSN 1998-1635.