

УДК 621.1.016.4:662.611/.613

А.В. Лукьянов, д-р техн. наук, проф.,
Д.В. Остапенко, магистр,
Донбас. нац. акад. стр-ва и арх-ры,
Д.В. Басист, канд. техн. наук, доц.,
Одес. гос. акад. стр-ва и арх-ры

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ЖАРОТРУБНОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА С ТУРБУЛИЗАТОРОМ ПОТОКА

Введение. Повышение эффективности теплообмена в конвективной части жаротрубного теплогенератора позволяет увеличить коэффициент полезного действия агрегата, в результате чего становится возможным сокращение потребления топлива. Из-за дороговизны дополнительного теплоутилизирующего оборудования, позволяющего забирать большее количество тепла у уходящих продуктов сгорания, некоторые производители теплогенерирующего оборудования используют вставки в конвективных трубках различной формы — турбулизаторы потока [1]. Снижение расхода органического топлива при получении тепла и сохранение необходимых параметров теплоносителя в настоящее время является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время существует множество различных конструкций турбулизаторов потока для конвективных трубок жаротрубного теплогенератора [1, 2]. Однако все они дают различный конечный эффект. За счет конструктивных особенностей одни позволяют достичь большей эффективности, но чаще всего являются более сложными в изготовлении, из-за чего выше их стоимость. Другие проще в изготовлении, вследствие чего и цена ниже, хотя при этом достигается довольно высокая эффективность [1...4].

Цель работы. В конструкциях котлов отечественных производителей теплогенерирующего оборудования турбулизаторы потока не получили широкого применения. Возникает необходимость внедрения простого в изготовлении и надежного в применении турбулизатора, позволяющего увеличить теплотехнические показатели жаротрубного теплогенератора. Целью исследования является определение тепловых характеристик продуктов сгорания жаротрубного теплогенератора с турбулизатором потока.

Изложение основного материала. Основными требованиями при разработке и создании теплотехнического оборудования, использующего органическое топливо, являются эффективное использование топлива и снижение вредных выбросов, образующихся при сжигании, в атмосферу.

При разработке жаротрубных теплогенераторов одной из главных задач является создание конвективных поверхностей нагрева, которые должны обеспечить повышенный теплосъем при меньших габаритных размерах наряду с высокими экономическими, эксплуатационными и экологическими показателями.

Конвективные поверхности нагрева жаротрубных теплогенераторов выполняются, как правило, в виде каналов круглого сечения, по которым движутся продукты сгорания. Тепловые и гидравлические режимы работы конвективных поверхностей нагрева характеризуются малыми тепловыми напряжениями этих поверхностей, низкими скоростями движения продуктов сгорания и нагреваемой воды [5].

Для увеличения конвективной составляющей в суммарном теплообмене в жаротрубных теплогенераторах в последние годы ведущие котлостроительные фирмы внутрь трубок конвек-

DOI 10.15276/opus.2.44.2014.20

© А.В. Лукьянов, Д.В. Остапенко, Д.В. Басист, 2014

тивного пучка вставляють спеціальні вставки різної форми — турбулізатори. Однак застосування турбулізаторів відбувається без належного теоретичного обґрунтування і експериментальних досліджень.

Так як модель процесу теплообміну газового потоку в конвективних трубках є багаточинною задачею, не маючою в даний час однозначного аналітичного рішення, то при дослідженні вищезазначеного процесу загальноприйнятим є експериментальний метод.

Для проведення досліджень відповідно до вимог теорії моделювання [6] на основі узагальнення різноманітних конструкцій жаротрубних теплогенераторів розроблена і виготовлена експериментальна модель в масштабі 1:10 котлоагрегату теплової потужністю 1,6 МВт, яка представлена на рис. 1.

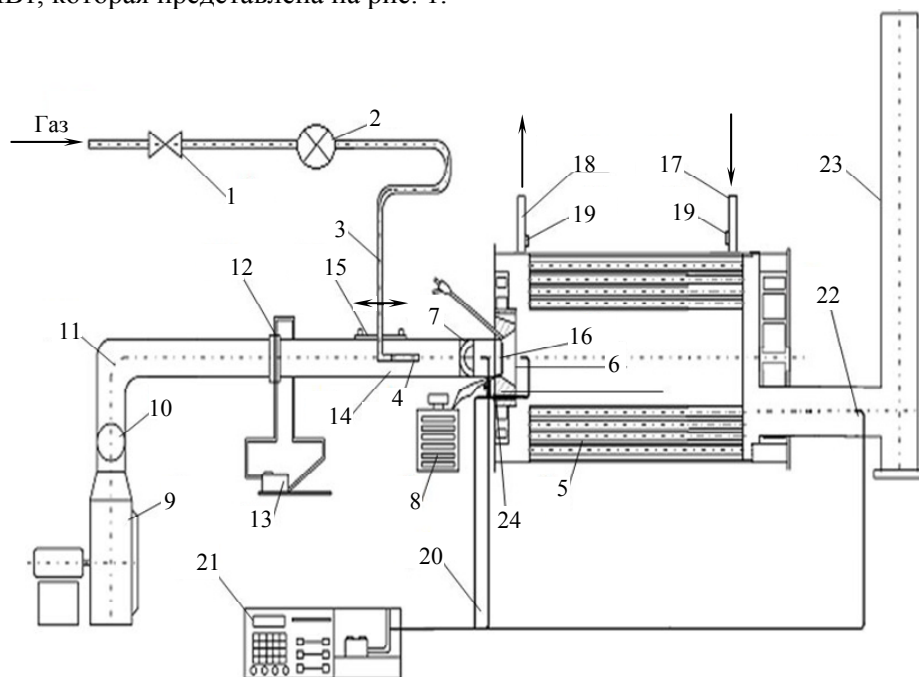


Рис. 1. Експериментальна модель жаротрубного теплогенератора : 1 — кран подачі газу; 2 — газовий счетчик; 3 — газоподводяча трубка; 4 — насадок; 5 — модель теплогенератора; 6 — амбразура; 7 — горелочний камінь; 8 — автотрансформатор; 9 — вентилятор; 10 — шибєр; 11 — воздуховод; 12 — інтегральна трубка; 13 — мікроманометр; 14 — горелка; 15 — фіксувальна планка; 16 — ніхромовий нит; 17 — підвод води; 18 — відвод води; 19 — температурний датчик; 20, 22 — капіляри газоаналізатора; 21 — газоаналізатор; 23 — димовий труба; 24 — передня трубна дошка

В якості вставки в конвективні трубки використовувався турбулізатор у вигляді ламаної ленти, який розташовувався вертикально. Діаметр трубки $57 \times 3,5$ мм, тобто умовний діаметр дорівнює 50 мм. Турбулізатор виконаний з нержавіючої сталі товщиною 3 мм, висота зубців і крок між ними змінювалися в залежності від ступеня перекриття сечення каналу при змінному куті в 90° .

Конструкція трубки з турбулізатором потоку представлена на рис. 2.

Установка включає вузол підводу природного газу до горелки 14, що складається з пробкового відключаючого крана 1, газового счетчика 2, газоподводячої трубки 3, закріпленої в фіксувальній координатній планці 15. Горелка має сменний насадок 4, довжина якого не менше $4d_r$, і вставляється в модель теплогенератора 5, в якій виконаний лючок 20 для вводу датчика газоаналізатора "Ecoline Plus" 22 за допомогою капілярної трубки 21. З переднього торця теплогенератора кріпиться фронтальна плита 25, на якій з однієї сторони встановлено

горелочный камень 7 с конической амбразурой 6, а с другой — запальник 26 и опытная горелка 14 диаметром $d_r=50$ мм и относительной длиной $l/d_r=20$. Для визуального наблюдения выполнена гляделка. Перед устьем горелки 14 установлен завихритель 27. На срезе горелки размещена нихромовая нить 16 для стабилизации факела, которая подключена к автотрансформатору 8.

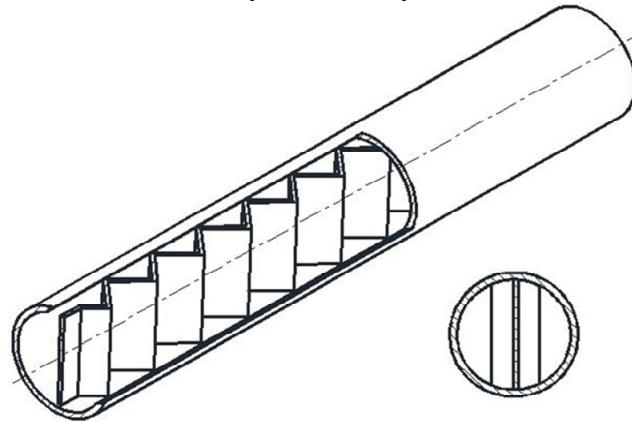


Рис. 2. Схема конвективной трубки с примененным турбулизатором потока

Для подачи воздуха к горелке используется воздуховод 11, подсоединенный к вентилятору 9, за которым установлен шибер 10. Перед входом в проточную часть горелки 14 на расстоянии $4d_r$ встроена интегральная трубка 12 с тарировочным коэффициентом 0,97, подключенная к микроманометру 13. За теплогенератором в газоход вводится капилляр 23 газоанализатора. Газоход соединен с дымовой трубой 24.

На поверхности внутренней трубы топки и на наружной поверхности крепились по 5 температурных датчиков DS 1921.

Проведение исследований на описанной опытно-промышленной установке осуществлялось в следующей последовательности. Включались в работу вентилятор 9 и открывался кран подачи воды для охлаждения камеры сгорания теплогенератора 5. Затем зажигали дутьевой запальник 26. Устанавливались необходимые расход воздуха на горение с помощью шибера 10, открывали кран 1 подачи газа. Газ через насадок 4 поступал в горелку 14, где смешивался с потоком воздуха. На выходе из горелки 14 происходило воспламенение газозвушной смеси от дутьевого запальника 26. После этого запальник 26 убирали, а гнездо запальника уплотняли. Стабилизация факела осуществлялась с помощью нихромовой нити 16, размещенной в центре устья горелки 14. На нихромовую нить 16 подавалось напряжение от сети переменного тока через лабораторный автотрансформатор 8. Нижний предел напряжения на нихромовую нить определялся по отсутствию пульсации пламени, что зависело от режима сжигания газа (неполноты смешения газа с воздухом в горелке) и тепловой нагрузки горелки. Величина напряжения регулировалась при минимальной неполноте смешения газа с воздухом в горелке, зависящей от его расположения относительно среза горелки. После розжига горелки 14, размещения газового насадка 4 в необходимое положение и установки по расходомерам воздуха и газа заданной тепловой нагрузки и коэффициента избытка воздуха производились замеры температуры и анализ состава продуктов сгорания за теплогенератором. Если коэффициент избытка воздуха отличался от заданного, осуществляли регулировку расхода воздуха и горение (одновременно контролировали расход газа) до получения заданного α_T .

После выполнения указанного перечня исследований при необходимости производилась регулировка до первоначального заданного значения расхода газа и коэффициента избытка воздуха, и повторялся весь цикл.

Для определения влияния турбулизатора потока на теплообмен в конвективной части за определяющий фактор принята степень перекрытия сечения канала, которая изменялась высотой вставки и составила 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 и 1/6 от общей площади проходного сечения трубки.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований получены данные зависимости температуры уходящих продуктов сгорания в зависимости от степени перекрытия сечения канала. Результаты для оптимального варианта приведены в виде графика на рис. 3.

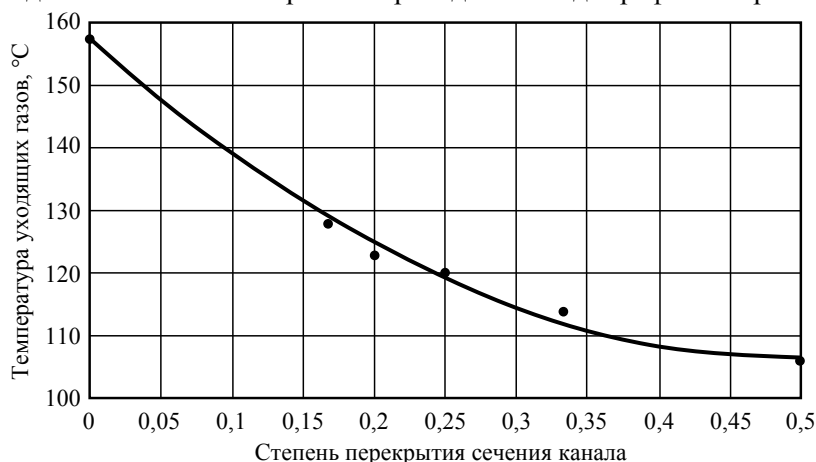


Рис. 3. Зависимость температуры уходящих газов от степени перекрытия канала

Из графика (рис. 3) видно, что значение температуры уменьшается при увеличении степени перекрытия сечения канала. Зависимость в данном случае описывается уравнением (1) при коэффициенте корреляции $R=0,994$:

$$t = 206,05A^2 - 204,45A + 157,37 \quad (1)$$

где t — температура уходящих газов, °C;

A — степень перекрытия сечения канала.

Выводы. В результате ряда проведенных экспериментов выяснилось, что вертикальное расположение турбулизатора позволяет исключить его прогиб, который возможен при горизонтальном расположении, и, следовательно, позволяет избежать изменения проходного сечения канала.

Получены оптимальные значения высоты турбулизатора и шага между его зубьями, которые составили 7 и 14 мм соответственно.

Уменьшение температуры продуктов сгорания на выходе из конвективных трубок жаротрубного теплогенератора позволяет судить о росте теплоотдачи, увеличение которой обратно пропорционально связано с расходом топлива. Данная конструкция турбулизатора потока проста в изготовлении и является весьма надежной, а также позволяет увеличить коэффициент полезного действия теплогенератора до 2 %.

Использование данного типа турбулизатора позволит сократить потребление топлива, что позволит вывести отечественное котлостроение на качественно новый уровень.

Литература

1. Интенсификация теплообмена — рациональный способ повышения эффективности газотрубных котлоагрегатов / И.А. Попов, А.Б. Яковлев, А.В. Щелчков, Д.В. Рыжков // Энергетика Татарстана. — 2010. — № 4. — С. 8 — 15.
2. Дрейцер, Г.А. Влияние геометрической формы турбулизаторов на эффективность интенсификации конвективного теплообмена в трубах / Г.А. Дрейцер, А.С. Мякочин // Теплоэнергетика. — 2002. — № 6. — С. 57 — 59.
3. Selvam, S. Effect of wire coiled coil matrix turbulators with and without bonding on the wall of the test section of concentric tube heat exchanger / S. Selvam, Pr. Thiyagarajan, S. Suresh // Thermal Science. — 2012. — Vol. 16, No. 4. — PP. 1151 — 1164.

4. Anil Singh Yadav. Experimental Investigation of Heat Transfer Performance of Double Pipe U-Bend Heat Exchanger using Full Length Twisted Tape / Anil Singh Yadav // *International Journal of Applied Engineering Research*. — 2008. — Vol. 3, No. 3. — PP. 399 — 407.
5. К вопросу об определении размеров топки теплогенераторов с жаровой трубой / М.З. Флер, С.А. Губарь, А.В. Лукьянов, В.Ф. Губарь // *Коммунальное хозяйство городов*. — 2002. — Вып. 38. — С. 179 — 182.
6. Теплосиловые системы. Оптимизационные исследования: монография / А.М. Клер, Н.П. Деканова, Э.А. Тюрина [и др.]; отв. ред. Э.А. Таиров. — Новосибирск: Наука, 2005. — 236 с.

References

1. Popov, I., Yakovlev, A., Shchelchikov, A. and Ryzhkov, D. (2010). Intensification of heat exchange in gas turbine coppers. *Energetics of Tatarstan*, 4, 8-15.
2. Dreitser, G.A. and Myakochin, A.S. (2002). The effect of the geometrical shape of turbulizers on the efficiency of enhancing convective heat transfer in tubes. *Thermal Engineering*, 49(6), 497-500.
3. Selvam, S., Thiyagarajan, Pr. and Suresh, S. (2012). Effect of wire coiled coil matrix turbulators with and without bonding on the wall of the test section of concentric tube heat exchanger. *Thermal Science*, 16(4), 1151-1164.
4. Yadav, A.S. (2008). Experimental investigation of heat transfer performance of double pipe U-bend heat exchanger using full length twisted tape. *International Journal of Applied Engineering Research*, 3(3), 399-407.
5. Flior, M.Z., Gubar, S.A., Lukyanov, A.V. and Gubar, V.F. (2002). The question of determining the size of the furnace heat generators with flame tube. *Communal Economy of Cities: Engineerings Sciences and Architecture*, 38, 179-182.
6. Kler, A.M., Dekanova, N.P., Tyurina, E.A., Korneeva, Z.P., Marinchenko, A.Yu., Mikheev, A.V., ... Mednikov, A.S. (2005). *Thermopower Systems: Optimization Research*. Novosibirsk, Russian Federation: Nauka.

АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

О.В. Лук'янов, Д.В. Остапенко, Д.В. Басист. **Визначення теплових характеристик продуктів згорання жаротрубного теплогенератора з турбулізатором потоку.** Котлобудування — одна з найважливіших галузей промисловості будь-якої держави. Метою роботи є визначення впливу турбулізатора потоку на інтенсивність теплообміну в конвективній частині жаротрубного теплогенератора вітчизняного виробництва. Одним з напрямків підвищення енергетичної ефективності жаротрубного теплогенератора є вдосконалення конвективних поверхонь нагріву. Так як модель процесу теплообміну газового потоку в конвективних трубках є багатофакторною і не має в даний час однозначного аналітичного рішення, то при дослідженні вищезазначеного процесу використовується експериментальний метод. Отримано результати застосування турбулізатора потоку у вигляді ламаної стрічки в жаротрубному теплогенераторі типу КВ-ГМ, на підставі яких можна зробити висновок про зростання тепловіддачі в конвективній частині агрегату. Використання ефективного, надійного, простого у виготовленні, відносно недорогого турбулізатора потоку у вітчизняних жаротрубних теплогенераторах дозволить збільшити їх ККД і знизити витрату палива, що призведе до позитивного економічного ефекту.

Ключові слова: жаротрубний теплогенератор, конвективна трубка, турбулізатор, ступінь перекриття, коефіцієнт тепловіддачі.

А.В. Лукьянов, Д.В. Остапенко, Д.В. Басист. **Определение тепловых характеристик продуктов сгорания жаротрубного теплогенератора с турбулизатором потока.** Котлостроение — одна из важнейших отраслей промышленности любого государства. Целью работы является определение влияния турбулизатора потока на интенсивность теплообмена в конвективной части жаротрубного теплогенератора отечественного производства. Одним из направлений повышения энергетической эффективности жаротрубного теплогенератора является совершенствование конвективных поверхностей нагрева. Так как модель процесса теплообмена газового потока в конвективных трубках является многофакторной и не имеет в настоящий момент однозначного аналитического решения, то при исследовании вышесказанного процесса используется экспериментальный метод. Получены результаты применения турбулизатора потока в виде ламаной ленты в жаротрубном теплогенераторе типа КВ-ГМ, на основании которых можно сделать вывод о росте теплоотдачи в конвективной части агрегата. Использование эффективного, надежного, простого в изготовлении, относительно недорогого турбулизатора потока в отечественных жаротрубных теплогенераторах позволит увеличить их КПД и снизить расход топлива, что даст положительный экономический эффект.

Ключевые слова: жаротрубный теплогенератор, конвективная трубка, турбулизатор, степень перекрытия, коэффициент теплоотдачи.

A.V. Lukjanov, D.V. Ostapenko, D.V. Basist. **Determination of thermal characteristics of combustion products of fire-tube heat generator with flow turbulator.** Boiler construction is one of the major industries of any state. The aim is to determine the effect of the turbulator on the intensity of heat transfer in the convective part of the fire-tube heat generator of domestic production. The improvement of convective heating surfaces is one of the ways to increase the energy efficiency of the fire-tube heat generator. Since model of the process of heat transfer of gas flow in the convective tubes is multifactorial and does not have clear analytical solution at present, the study of process above is carried out using the experimental method. The results of applying the flow turbulator as a broken tape in the fire-tube heat generator of KV-GM type are presented. On their basis it can be concluded about increasing of heat transfer in convective part of the unit. The use of efficient, reliable, easy to manufacture, relatively inexpensive turbulator in domestic fire-tube heat generators will allow to increase their energy conversion efficiency and reduce fuel consumption, which will have a positive economic effect.

Keywords: fire-tube heat generator, convective tube, turbulator, degree of overlap, heat transfer coefficient.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. гос. акад. стр-ва и архитектуры Петраш В.Д.

Поступила в редакцию 15 октября 2014 г.