

РАЦІОНАЛЬНІ МЕТОДИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В ГАЗОТРУБНИХ КОТЛАХ

Вінницький національний технічний університет

В роботі проведено дослідження ефективності інтенсифікації теплообміну в газотрубному теплообміннику водогрійного котла, проведено порівняльний аналіз отриманих результатів. Показано, що для газотрубних водогрійних котлів проблема інтенсифікації теплообміну особливо актуальна, оскільки від інтенсивності теплообміну в теплообміннику залежить температура відхідних газів та коефіцієнт корисної дії. Проведено огляд літературної інформації, який показав, що в сучасних газотрубних котлах в основному використовуються інтенсифікатори, виконані у вигляді спіральних дротових вставок, скручених навколо своєї осі металевих пластин, кільцевої чи спіральної накатки, виштамповок різної форми, що дозволяє руйнувати прикордонний шар і турбулізувати пристінні шари газового потоку. В рамках курсового проектування розроблено конструкцію теплогенератора на щепі деревини з розрахунковою потужністю 550 кВт. Для даної конструкції проведено числові дослідження впливу встановлення інтенсифікаторів на показники роботи котла на повному та частковому навантаженні.

Досліджено вплив геометричних параметрів інтенсифікатора на коефіцієнт тепловіддачі з боку газів, температуру димових газів на виході з котла та на зростання гідравлічного опору в газотрубному теплообміннику. Показано, що конвективний коефіцієнт тепловіддачі після встановлення інтенсифікаторів збільшується в 1,7...2,94 рази при зростанні втрат тиску в 2,24...3,11 разів порівняно з варіантом без інтенсифікації теплообміну при цьому коефіцієнт корисної дії котла збільшився на 10,8 – 13 %. Зазначено, що при виборі способу інтенсифікації теплообміну в котлі на твердому паливі та параметрів інтенсифікаторів, необхідно провести детальний тепловий і аеродинамічний розрахунок при зміні теплової потужності котла і оцінити діапазони раціональної роботи, за яких виключатиметься значне охолодження димових газів, а ефект від встановлення інтенсифікаторів буде перевищувати затрати на подолання додаткового гідравлічного опору в теплообміннику.

Ключові слова: водогрійний котел, інтенсифікація теплообміну, коефіцієнт тепловіддачі, втрати тиску.

Вступ. Постановка задачі.

Інтенсифікація теплообміну в теплообмінних пристроях має велике значення в промисловості. В результаті інтенсифікації процесів теплообміну можна досягти суттєвого зменшення маси і габаритів теплообмінного обладнання, а також забезпечити заданий температурний рівень елементів цього обладнання і підвищити надійність їх роботи.

Методи інтенсифікації теплообміну, що дають можливість отримати позитивний ефект, відомі вже тривалий час, але залежності для розрахунку теплообміну і гідравлічного опору у всьому широкому діапазоні геометричних характеристик інтенсифікаторів, гідродинамічних і теплових умов, властивостей рідин і газів визначені не в повній мірі.

В науковій літературі практично відсутні дослідні і теоретичні розробки по інтенсифікації теплообміну для ламінарних режимів течії крапельних рідин і газів. Існуючі дані в основному не систематизовані з огляду на їх малу кількість. Відсутні теоретичні дослідження для багатьох цікавих в практичному відношенні методів інтенсифікації.

Для газотрубних водогрійних котлів проблема інтенсифікації теплообміну особливо актуальна, оскільки від інтенсивності теплообміну в теплообміннику залежить температура відхідних газів та коефіцієнт корисної дії.

В сучасних газотрубних котлах в основному використовуються інтенсифікатори, виконані у вигляді спіральних дротових вставок, скручених навколо своєї осі металевих пластин, кільцевої чи спіральної накатки, виштамповок різної форми, що дозволяє руйнувати прикордонний шар і турбулізувати пристінні шари газового потоку [1].

Застосування раціональних в енергетичному і технологічному сенсі методів інтенсифікації теплообміну в теплообміннику газотрубного котла дозволить підвищити його коефіцієнт корисної дії та зменшити габарити. Тому тематика статті є **актуальною**.

Мета роботи – дослідження впливу геометричних характеристик інтенсифікаторів теплообміну на енергетичні показники газотрубного котла.

Огляд інформації, розміщеної на інтернет-сайтах виробників котлів, показав, що для інтенсифікації теплообміну в газотрубному теплообміннику найчастіше використовуються

інтенсифікатори у вигляді пластин з різними типами закручування і згинання (рис. 1). Використовуються також комбіновані методи інтенсифікації (скручена пластина+дротова спіральна вставка) (рис. 2, а), а також шнекоподібні скручені металеві пластини (рис. 2, б).

Вказані методи підвищують інтенсивність теплообміну в 1,5...4 рази, залежно від режиму руху теплоносія та геометричних параметрів інтенсифікаторів. Слід відзначити, що не для всіх зазначених методів є розрахункові залежності для оцінки збільшення інтенсивності теплообміну в теплообміннику, зокрема для комбінованих методів.



Рисунок 1 – Інтенсифікатор теплообміну у вигляді скрученої пластини



Рисунок 2 – Інтенсифікатори теплообміну : комбіновані (а) та шнекоподібні (б)

На інтенсивність теплообміну впливає відносний крок закручування інтенсифікатора, а також режим руху теплоносія. Як зазначено в роботі [2], в ламінарному потоці інтенсифікація тепловіддачі створюється за рахунок макродії на весь потік, порушенням усієї структури потоку. Для турбулентного режиму руху найбільш ефективним способом інтенсифікації теплообміну є турбулізація пристінного ламінарного прошарку. Режим руху димових газів в теплообмінниках водогрійних котлів здебільшого ламінарний або перехідний. Тому найбільш дієвим способом підвищення інтенсивності теплообміну в конвективній частині є встановлення інтенсифікаторів, що турбулізують ядро потоку.

В рамках курсового проектування розроблено конструкцію теплогенератора на щепі деревини. Розрахункова потужність теплогенератора 550 кВт. Температура води на вході в котел 70 °С; на виході 90 °С; паливо – щепи деревини з таким складом: $W^p=30\%$, $C^p=34,58\%$, $N^p=0,42\%$, $H^p=4,24\%$, $S^p=0,04\%$, $O^p=30,21\%$, $A^p=0,51\%$ $Q_{н.р.}=12,01$ МДж/кг. Коефіцієнт корисної дії котла визначався за зворотнім тепловим балансом. Втрати теплоти від хімічної і механічної неповноти згорання приймалися $q_3=0,5\%$, $q_4=1\%$, $q_5=0,8\%$. Коефіцієнт надлишку повітря α в розрахунках взято 1,4. Дослідження ефективності застосування скручених стрічок в такому котлі наведено в роботі [3].

В даній роботі для дослідження ефективності обрано оригінальний інтенсифікатор, експериментальні дослідження якого наведені в дисертаційній роботі іноземного автора [4]. Загальний вигляд інтенсифікатора наведено на рисунку 3. В роботі [4] досліджувалась ефективність інтенсифікації теплообміну для газових потоків в діапазоні чисел Рейнольдса 3000...20000.

Авторами проведено дослідження впливу геометричних характеристик інтенсифікатора (L/D) та W/D на показники роботи котла за змінного навантаження. Для дослідження характеристик котла в MSExcel реалізована математична модель, розроблена в роботі [5]. На рисунку 4 наведені результати розрахунку температури газів на виході з теплообмінника котла за змінного навантаження і з різним параметром L/D . Розмір W/D взято 0,15.

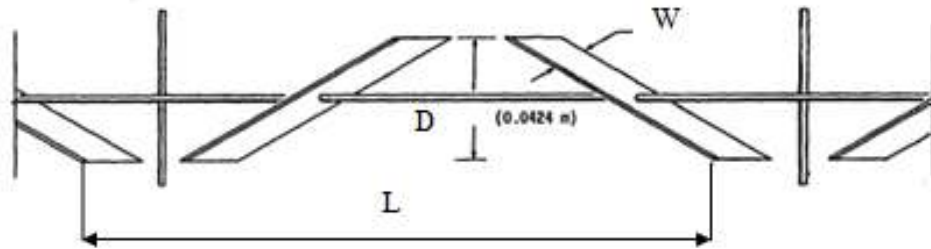
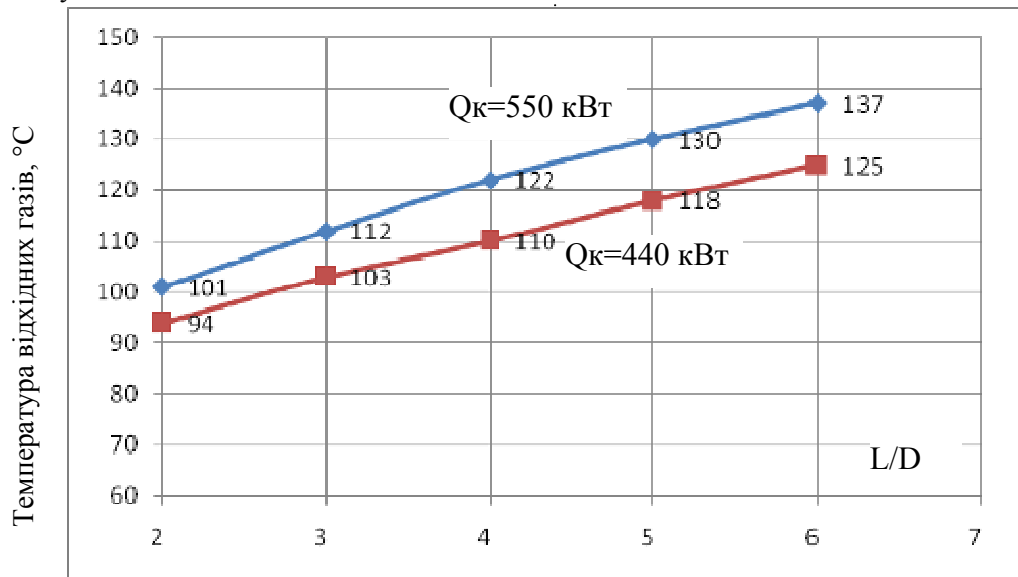


Рисунок 3 – Інтенсифікатори теплообміну

Розглянутий спосіб інтенсифікації теплообміну досить суттєво покращує теплообмін (в 2...3 рази порівняно з варіантом без інтенсифікації). Це призводить до суттєвого зменшення температури відхідних газів, при цьому коефіцієнт корисної дії котла збільшився на 10,8 – 13 %.

На етапі проектування теплогенераторів використання таких інтенсифікаторів сприятиме суттєвому зменшенню габаритних розмірів. При встановленні інтенсифікаторів в існуючу конструкцію буде мати місце значне охолодження димових газів. Для котлів на деревині, зокрема порід, що утворюють багато смол, це може призвести до конденсації останніх в теплообміннику та газоході. В роботі визначено, що температура точки роси становить 64 °С, а середня температура стінки труби теплообмінника з боку газів становить 94 °С (за максимального навантаження). Тобто конденсації водяної пари в теплообміннику не буде. Але вона можлива в газоходах, димовій трубі. Такий спосіб інтенсифікації найбільш раціонально використовувати для котлів на природному газі.

З рисунку 4 видно, що температура відхідних газів суттєво зменшується у всьому діапазоні зміни геометричних розмірів інтенсифікатора. Тому найбільш раціональним геометричним параметром є крок $L/D=6$. При цьому температура відхідних газів становитиме 137 °С при максимальному навантаженні.

Рисунок 4 – Залежність температури відхідних газів від кроку інтенсифікатора L/D за потужності 550 кВт та при потужності 80 % від максимальної (440 кВт)

На рисунку 5 наведено відношення приросту коефіцієнта тепловіддачі α_i/α_0 порівняно з трубою без інтенсифікації та гідравлічного опору ξ_i/ξ_0 в теплообміннику газотрубного котла залежно від кроку інтенсифікатора L/D за потужності 550 кВт.

Як видно з рисунку 5, приріст тепловіддачі становить 2,2...3,1 рази при зростанні опору в 1,7...2,9 рази.

На рисунку 6 наведено результати досліджень впливу зміни параметру W/D на температуру відхідних газів. Параметр L/D для розрахунків взято 6.

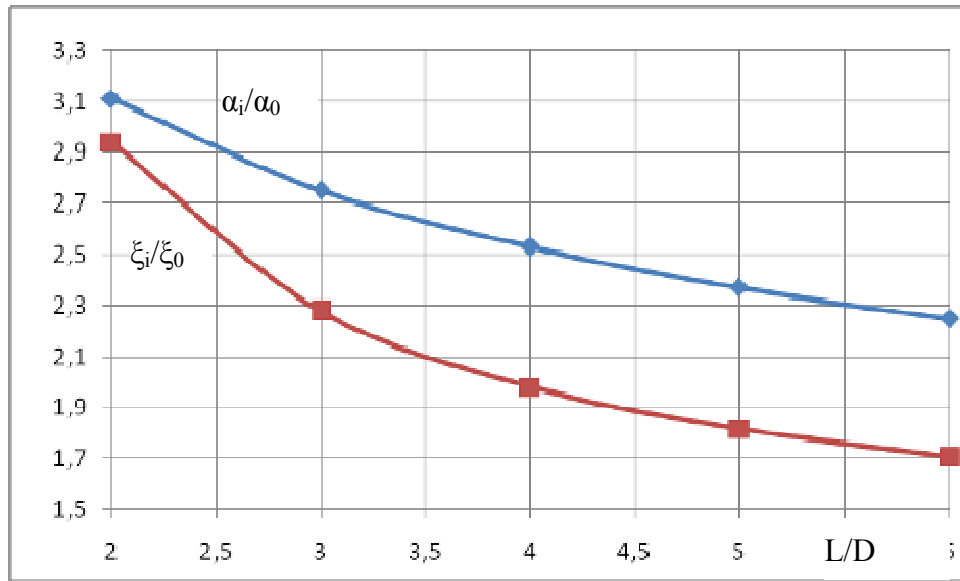


Рисунок 5 – Відношення приросту коефіцієнта тепловіддачі α_i/α_0 та гідралічного опору ξ_i/ξ_0 в теплообміннику газотрубного котла залежно від кроку інтенсифікатора L/D за потужності 550 кВт

Зі зменшенням параметру W/D , ефект інтенсифікації зменшується, що призводить до збільшення температури відхідних газів. Для потужності 550 кВт та параметром $W/D=0,15$ температура відхідних газів становить 138 °С, а ККД становить 90,4 %. Інші параметри інтенсифікатора для розглянутої конструкції (рисунок 3) недоцільні, з огляду на значне охолодження димових газів. Такий інтенсифікатор доцільно використовувати в газотрубних котлах на природному газі.

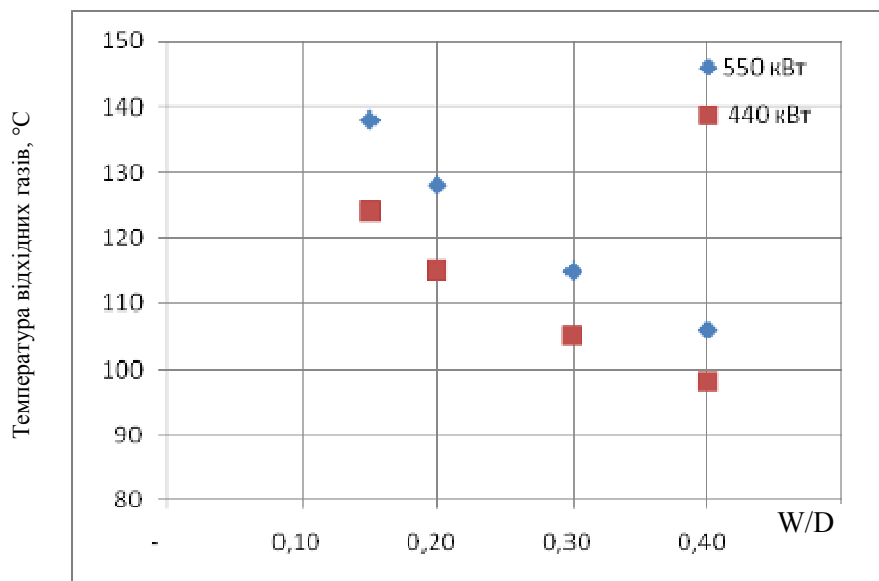


Рисунок 6 – Залежність температури відхідних газів від параметру інтенсифікатора W/D за потужності 550 кВт та при потужності 80 % від максимальної (440 кВт)

Отже, за результатами досліджень, найбільш раціонально використовувати за даних умов, інтенсифікатор з кроком $L/d = 6$ та $W/D=0,15$, оскільки на всьому діапазоні зміни навантаження температура димових газів зменшується в межах, за яких виключається конденсація водяної пари.

При виборі способу інтенсифікації теплообміну в котлі на твердому паливі та параметрів інтенсифікаторів, необхідно провести детальний тепловий і аеродинамічний розрахунок при зміні теплової потужності котла і оцінити діапазони раціональної роботи, за яких виключатиметься значне охолодження димових газів, а ефект від встановлення інтенсифікаторів буде перевищувати затрати на подолання додаткового гідралічного опору в теплообміннику.

Висновки

В роботі проведено дослідження впливу геометричних параметрів інтенсифікатора теплообміну (L/D та W/D на температуру відхідних газів, коефіцієнт корисної дії водогрійного котла на щепі деревини потужністю 550 кВт та на гідравлічний опір. Розглянутий спосіб інтенсифікації теплообміну досить суттєво покращує теплообмін (в 2...4 рази порівняно з варіантом без інтенсифікації). Це призводить до суттєвого зменшення температури відхідних газів. На етапі проектування теплогенераторів використання таких інтенсифікаторів сприятиме суттєвому зменшенню габаритних розмірів. Найбільш раціональним геометричним параметром інтенсифікатора для даної конструкції є крок $L/D=6$ та $W/D=0,15$. При цьому температура відхідних газів становитиме $137\text{ }^{\circ}\text{C}$ при максимальному навантаженні. Гідравлічний опір в досліджуваному діапазоні зміни параметрів збільшується в 1,16...4,79 рази. При виборі способу інтенсифікації теплообміну в котлі та параметрів інтенсифікаторів необхідно провести детальний тепловий і аеродинамічний розрахунок котла при зміні його теплової потужності і оцінити діапазони раціональної роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Попов И. А. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (озор)/ И. А. Попов, Ю. Ф. Гортышов, В. В. Олимпиев// Теплоэнергетика. – 2012. – №1. – с. 3 – 14.
2. Петренко В. П. Интенсифікація теплообміну в апаратах харчових виробництв та холодильних машин / В. П. Петренко. – К.: НУХТ, – 2010 – 170 с.
3. Боднар Л. А. Ефективність інтенсифікації теплообміну в теплогенераторі на щепі деревини / Л. А. Боднар //Всеукраїнський науково-технічний журнал. Техніка, енергетика, транспорт АПК – 2017. – №4. – С. 124 – 128.
4. V. Nirmalan. Investigation of turbulence promoting inserts for augmenting heat transfer from gases in tubes. Dissertation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/8101>.
5. Степанов Д. В. Енергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності. Монографія / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця: ВНТУ, 2011 – 151

REFERENCES

1. Popov Y. A. Promyshlennoe prymenenye yntensyfykatsyy teploobmena – sovremennoe sostoyanye problemy (ozor)/ Y. A. Popov, YU. F. Hortyshov, V. V. Olympyev// Teploénerhetyka. – 2012. – №1. – с. 3 – 14.
2. Petrenko V. P. Intensyfykatsiya teploobminu v aparatakh kharchovykh vyrobnytstv ta kholodyl'nykh mashyn / V. P. Petrenko. – K.: NUKHT, – 2010 – 170 s.
3. Bodnar L. A. Efektyvnist' intensyfykatsiyi teploobminu v teploheneratori na shchepi derevyny / L. A. Bodnar //Vseukrayins'kyu naukovo-tekhnichnyy zhurnal. Tekhnika, enerhetyka, transport APK – 2017. – №4. – S. 124 – 128.
4. V. Nirmalan. Investigation of turbulence promoting inserts for augmenting heat transfer from gases in tubes. Dissertation. [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/8101>.
5. Stepanov D. V. Enerhetychna ta ekolohichna efektyvnist' vodohriynykh kotliv maloyi potuzhnosti. Monohrafiya / D. V. Stepanov, L. A. Bodnar. – Vinnytsya: VNTU, 2011 – 151

Боднар Лілія Анатоліївна – к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету, Vodnar06@ukr.net. ORCID 0000-0001-9497-214X.

Лепетан Іван Васильович – студент Вінницького національного технічного університету.

**L. Bodnar
I. Lepetan**

RATIONAL METHODS OF HEAT EXCHANGE INTENSIFICATION IN GAS-TUBE BOILERS

Vinnitsia National Technical University

In the paper, the study of the effectiveness of heat exchange intensification in the gas-tube heat exchanger of a water-heating boiler was carried out, a comparative analysis of the results was carried out. It is shown that for heat pump gas boilers the problem of heat transfer intensification is especially important, since the temperature of the exhaust gases and the efficiency coefficient depend on the heat transfer intensity in the heat exchanger. The review of literary information has shown that in modern gas-tube boilers the intensifiers are mainly used in the form of spiral wiring inserts, twisted around the axis of metal plates, ring or spiral coil, extrusion of different shapes, which allows to destroy the boundary layer and turbulize the surface layers gas flow. As part of the course design, a heat generator design for wood chips with a rated power of 550 kW was developed. For this design numerical studies of the influence of the installation of intensifiers on the performance of the boiler on the full and partial load are carried out.

The influence of geometrical parameters of the intensifier on the coefficient of heat transfer from the gases, the

temperature of the flue gases at the outlet from the boiler and on the growth of the hydraulic resistance in the gas tube heat exchanger have been investigated. It is shown that the convective coefficient of heat transfer after the establishment of intensifiers is increased in 1,7 ... 2,94 times with the growth of pressure losses in 2,24 ... 3,11 times compared with the option without intensification of heat exchange, while the efficiency of the boiler increased by 10,8 - 13 %. It is noted that when choosing a method for intensifying the heat exchange in a boiler for solid fuel and parameters of the intensifiers, it is necessary to carry out a detailed thermal and aerodynamic calculation when changing the boiler's thermal power and to estimate the ranges of rational work, which will exclude significant cooling of flue gases, and the effect of installing the intensifiers will exceed the cost of overcoming the additional hydraulic resistance in the heat exchanger.

Keywords: hot water boiler, intensification of heat transfer, heat transfer coefficient, pressure loss.

Bodnar Lilia, Ph.D – associate professor of power engineering, Vinnytsia national technical university, Bodnar06@ukr.net.

Lepetan Ivan – student, Vinnytsia national technical university.

Л. А. Боднар
И. В. Лепетан

РАЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ГАЗОТРУБНЫХ КОТЛАХ

Винницкий национальный технический университет

В работе проведено исследование эффективности интенсификации теплообмена в газотрубном теплообменнике водогрейного котла, проведен сравнительный анализ полученных результатов. Показано, что для газотрубных водогрейных котлов проблема интенсификации теплообмена особенно актуальна, поскольку от интенсивности теплообмена в теплообменнике зависит температура отходящих газов и коэффициент полезного действия. Проведен обзор литературной информации, который показал, что в современных газотрубных котлах в основном используются интенсификаторы, выполненные в виде спиральных проволочных вставок, скрученных вокруг своей оси металлических пластин, кольцевой или спиральной накатки, выштамповок различной формы, что позволяет разрушать пограничный слой и турбулизовать пристенные слои газового потока. В рамках курсового проектирования разработана конструкция теплогенератора на щепе древесины с расчетной мощностью 550 кВт. Для данной конструкции проведены численные исследования влияния установления интенсификатора на показатели работы котла на полном и частичном нагрузке.

Исследовано влияние геометрических параметров интенсификатора на коэффициент теплоотдачи со стороны газов, температуру дымовых газов на выходе из котла и на рост гидравлического сопротивления в газотрубном теплообменнике. Показано, что конвективный коэффициент теплоотдачи после установки интенсификатора увеличивается в 1,7 ... 2,94 раза при росте потерь давления в 2,24 ... 3,11 раз по сравнению с вариантом без интенсификации теплообмена при этом коэффициент полезного действия котла увеличился на 10,8-13%. Отмечено, что при выборе способа интенсификации теплообмена в котле на твердом топливе и параметров интенсификаторов, необходимо провести детальный тепловой и аэродинамический расчет при изменении тепловой мощности котла и оценить диапазоны рациональной работы, при которых исключаться значительное охлаждение дымовых газов, а эффект от установки интенсификаторов будет превышать затраты на преодоление дополнительного гидравлического сопротивления в теплообменнике.

Ключевые слова: водогрейный котел, интенсификация теплообмена, коэффициент теплоотдачи, потери давления.

Боднар Лилия Анатольевна – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики Винницкого национального технического университета, Bodnar06@ukr.net.

Лепетан Иван Васильевич – студент Винницкого национального технического университета .