

**ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БУДІВНИЦТВІ**

УДК 621.18

DOI 10.31649/2311-1429-2019-1-134-139

**Л. А. Боднар****І. Ю. Федич****ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВОДОГРІЙНИХ  
КОТЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ  
ТЕПЛООБМІНУ**

Вінницький національний технічний університет

В роботі проведено дослідження ефективності інтенсифікації теплообміну в газотрубному теплообміннику водогрійного котла, проведено аналіз отриманих результатів. Відзначено, що для газотрубних водогрійних котлів проблема інтенсифікації теплообміну особливо актуальна, оскільки коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки в каналах без інтенсифікації досить малий, а від інтенсивності теплообміну в теплообміннику залежить температура відхідних газів та коефіцієнт корисної дії. Проведено огляд літературної інформації, який показав, що в сучасних водогрійних котлах малої і середньої потужності використовуються інтенсифікатори: дотові вставки різноманітної конфігурації, кільцеві канавки, спіральні вставки, стрічкові завихрювачі, шнекові турбулізатори, пластини різної конфігурації, комбіновані методи. 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. Для дослідження енергетичних характеристик котла розроблено математичну модель, яку доповнено залежностями для розрахунку інтенсифікованого теплообміну в теплообміннику котла. Досліджено вплив встановлення інтенсифікатора на температуру димових газів на виході з котла та на коефіцієнт корисної дії. Показано, що найбільше зменшення температури відхідних газів спостерігається для інтенсифікатора у вигляді скрученої стрічки, комбінованого методу, інтенсифікатора оригінальної конструкції та зігнутої пластини з різними геометричними параметрами. 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, пряма пластинка, скручена стрічка, комбінований метод інтенсифікації теплообміну.

**Вступ. Постановка задачі**

В сучасних водогрійних котлах малої та середньої потужності для підвищення енергетичної ефективності в теплообмінниках встановлюють різноманітні інтенсифікатори. Активне дослідження і впровадження в котлах різних методів інтенсифікації теплообміну викликане перш за все великим практичним ефектом зменшення маси теплообмінника та габаритів котла або значним підвищенням його ефективності. Для газотрубних водогрійних котлів проблема інтенсифікації теплообміну особливо актуальна, оскільки коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки в каналах без інтенсифікації досить малий, а від інтенсивності теплообміну в теплообміннику залежить температура відхідних газів та коефіцієнт корисної дії. Незважаючи на широке використання в сучасних котлах різноманітних інтенсифікаторів, публікацій по ефективності їх застосування обмаль. Узагальнену інформацію по експериментальних дослідженнях ефективності застосування інтенсифікаторів теплообміну в котлах наведено в роботі [1]. Числові дослідження ефективності інтенсифікаторів теплообміну в котлі на твердому паливі проведено в роботах [2, 3, 4].

Методи інтенсифікації теплообміну, що використовуються у водогрійних котлах можна поділити на дві групи: надання потоку обертально-поступального характеру руху; руйнування пристінних шарів теплоносія. Перший метод використовується у газотрубних котлах, другий – водотрубних (труби з кільцевою накаткою, рис.1). Для інтенсифікації теплообміну в трубах використовують [5]: дотові вставки різноманітної конфігурації, кільцеві канавками, спіральні вставки, стрічкові завихрювачі, шнекові турбулізатори, пластини різної конфігурації, комбіновані методи. Застосування ефективних методів інтенсифікації теплообміну в теплообміннику газотрубного котла дозволить підвищити його коефіцієнт корисної дії, а отже зменшити витрату палива і викиди парникових газів. Тому тематика статті є **актуальною**.

**Мета роботи** – дослідження впливу встановлення інтенсифікаторів теплообміну на енергетичні показники газотрубного котла.

**Основна частина**

Авторами 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  $\alpha$  в розрахунках взято 1,4. Дослідження ефективності застосування скручених стрічок в такому котлі та його конструкцію наведено в роботі [4].

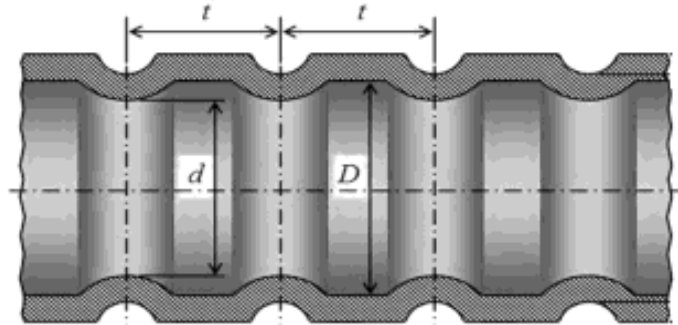


Рисунок 1 – Труба з кільцевою накаткою

В даній роботі для дослідження ефективності обрано такі інтенсифікатори: скручена навколо своєї осі стрічка з кроком  $S/d=6$ , пряма пластина, комбінований інтенсифікатор (рис. 2), інтенсифікатор оригінальної конструкції (рис. 3), інтенсифікатор у вигляді зігнутої з певним кроком пластини (рис. 4).



Рисунок 2 – Комбінований метод інтенсифікації теплообміну [6]



Рисунок 3 – Інтенсифікатор теплообміну оригінальної конструкції [7]

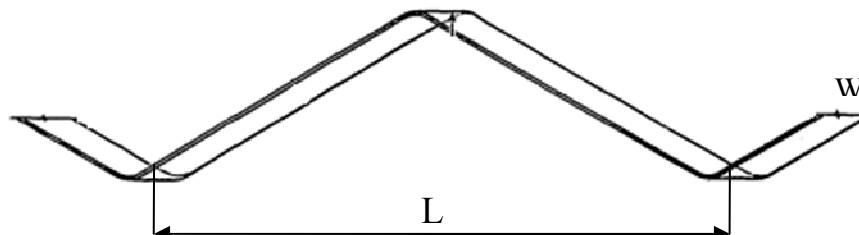


Рисунок 4 – Інтенсифікатор теплообміну у вигляді зігнутої з певним кроком пластини [8]

Для дослідження енергетичних характеристик котла в MSExcel реалізована математична модель, розроблена в роботі [1], яка доповнена залежностями для розрахунку інтенсифікованого теплообміну в теплообміннику котла. Залежності для розрахунку інтенсифікованого теплообміну в каналі зі скрученою стрічкою наведено в роботі [3], в каналі з прямою пластиною в [9]. Дослідження теплообміну в каналі з комбінованим методом інтенсифікації проведені в роботі [6]. В роботі [8] досліджувалась ефективність інтенсифікатора у вигляді зігнутої з певним кроком пластини. З графіків, наведених в роботах [6] та [8] нами визначено приріст тепловіддачі в порівнянні з гладкою трубою для певного режиму руху теплоносія та введено в математичну модель поправку на збільшення інтенсивності теплообміну внаслідок його інтенсифікації. В роботі [10] експериментально досліджено температуру відхідних газів на виході з котла при встановленні в нього інтенсифікаторів у вигляді ламаної пластини (рис. 4). Але в роботі не вказано яка температура відхідних газів була за котлом без інтенсифікаторів теплообміну. Тому неможливо зробити висновок про їхню ефективність для досліджуваної в роботі [10] конструкції котла.

На рисунку 5 наведені результати розрахунку температури газів на виході з теплообмінника котла з різними інтенсифікаторами за умови роботи котла на повну потужність (550 кВт) та при навантаженні 80 % від максимального (440 кВт).

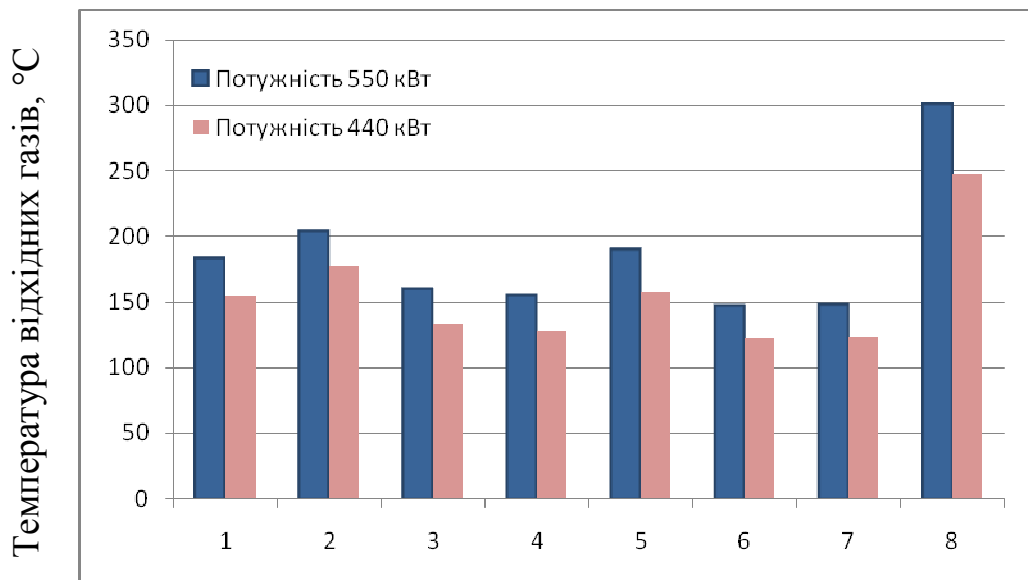


Рисунок 5 – Значення температури відхідних газів за теплообмінником котла для різних способів інтенсифікації теплообміну: 1 – скручена стрічка з кроком  $S/d=6$ , 2 – пряма пластинка, 3 – комбінований метод інтенсифікації (рис.2), 4 – інтенсифікатор оригінальної конструкції (рис.3), 5 – зігнута пластинка (рис.4) з зігнутою пластинкою з  $L=24$  см,  $W=1,27$  см, 6 – зігнута пластинка з  $L=24$  см,  $W=2,2$  см, 7 – зігнута пластинка з  $L=24$  см,  $W=1,9$  см, 8 – гладка труба.

Робота котла на навантаженні меншому від номінального, характеризується тим, що зменшуються витрати палива на котел, змінюється температурний режим (температура води на вході та на виході) та зменшується об'єм димових газів. Це призводить до зменшення температури газів на виході з котла. Тому при проектуванні котла це слід враховувати з метою запобігання сильного охолодження димових газів, що може призвести до конденсації водяної пари чи смол (у котлах на твердому паливі).

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільше зменшення температури відхідних газів спостерігається для інтенсифікатора у вигляді скрученої стрічки (1,64 рази), комбінованого методу (1,875 рази), інтенсифікатора оригінальної конструкції (1,93 рази) та зігнутої пластини (2,03 рази максимального значення) з різними геометричними параметрами.

Як показали результати розрахунків, приріст коефіцієнта корисної дії становить 7,4 – 11 %. Найбільший приріст ККД (11 %) для даної конструкції котла дає інтенсифікатор у вигляді зігнутої стрічки з параметрами  $L=24$  см,  $W=2,2$  см.

Результати числових розрахунків показали високу ефективність розглянутих в роботі інтенсифікаторів. Слід зазначити, що в літературі обмаль інформації по експериментальних

дослідженнях даних інтенсифікаторів на реальних котлах. Експерименти як правило проводяться на експериментальних стендах, де теплоносієм є повітря.

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.

На рисунку 6 наведено дослідження впливу встановлення інтенсифікатора на коефіцієнт корисної дії котла.

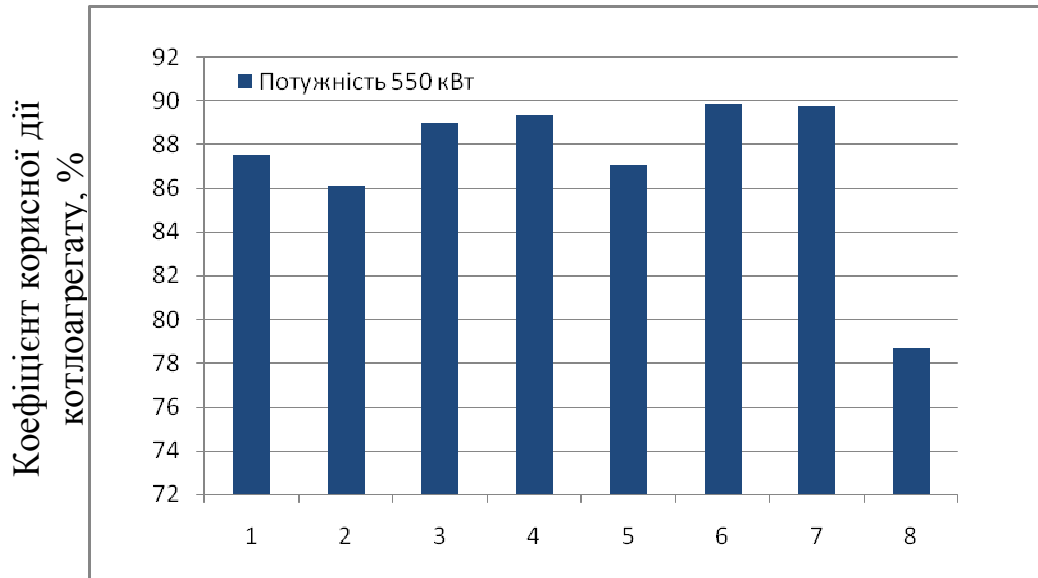


Рисунок 6 – Значення коефіцієнта корисної дії котла для різних способів інтенсифікації теплообміну: 1 – скручена стрічка з кроком  $S/d=6$ , 2 – пряма пластина, 3 – комбінований метод інтенсифікації (рис.2), 4 – інтенсифікатор оригінальної конструкції (рис.3), 5 – зігнута пластина (рис.4) з  $L=24$  см,  $W=1,27$  см, 6 – зігнута пластина з  $L=24$  см,  $W=2$  см, 7 – зігнута пластина з  $L=24$  см,  $W=1,9$  см, 8 – гладка труба.

### Висновки

В роботі досліджено вплив встановлення інтенсифікаторів теплообміну на енергетичні показники котла. Аналіз отриманих результатів показав, що найбільше зменшення температури відхідних газів спостерігається для інтенсифікатора у вигляді скрученої стрічки (1,64 рази), комбінованого методу (1,875 рази), інтенсифікатора оригінальної конструкції (1,93 рази) та зігнутої пластини (2,03 рази максимальне значення) з різними геометричними параметрами. Збільшення коефіцієнта корисної дії котла становить 7,4 – 11 %, залежно від типу інтенсифікатора. Найбільший приріст ККД (11 %) для даної конструкції котла дає інтенсифікатор у вигляді зігнутої стрічки з параметрами  $L=24$  см,  $W=2$  см.

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. Степанов Д. В. Енергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності. Монографія / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця: ВНТУ, 2011 – 151
2. Боднар Л. А. Раціональні методи інтенсифікації теплообміну в газотрубних котлах / Л. А. Боднар, І. В. Лепетан // Науково-технічний збірник "Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві". – 2018. – №2. – С.93 – 98.
3. Боднар Л. А. Дослідження ефективності інтенсифікації теплообміну в газотрубному теплообміннику водогрійного котла /Л. А. Боднар, І. В. Лепетан// Науково-технічний збірник "Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві". – 2016. – №2. – С.93 – 98.
4. 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.
5. 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.

6. Neshumayev D.; Tiikma, T. Experimental and numerical investigation of combined heat transfer augmentation technique in gas-heated channels. In: Proceedings of the 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 18-23 Sept. 2005, Cairo, Egypt.
7. Mozes E., On the development of a high capacity water boiler/ E. Mozes // Enschede: FEBO druk b.v., 2001. – 97 p.
8. 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>.
9. Manglik R. M. Heat transfer and pressure drop correlation for twisted-tape inserts in isothermal tubes: part II / R. M. Manglik, A. E. Bergles // Transactions of the ASME. – 1993. – Vol. 115. – p. 890 – 896. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://vdocuments.site/heat-transfer-and-pressure-drop-correlations-for-twisted-tape-inserts-in-isothermal.html>.
10. Лукьянов А. В. Определение тепловых характеристик продуктов сгорания жаротрубного теплогенератора с турбулизаторами потока/ А. В. Лукьянов, Д. В. Остапенко, Д. В. Басист//Праці Одеського політехнічного університету. – 2014. – № 2. – с. 102 – 107.

## REFERENCES

1. Stepan D. V. Enerhetychna ta ekolohichna efektyvnist' vodoohoronnykh kotiv maloyi potuzhnosti. Monohrafiya / D. V. Stepanov, L.V. A. Bodnar. - Vinnytsya: VNTU, 2011 – 151.
2. Bodnar L. A. Ratsional'ni metody intensyfikatsiyi teploobminu v hazotrubnykh kotlakh / L. A. Bodnar, I. V. Lepetan // Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk "Suchasni tekhnolohiyi materialy i konstruktсии v budivnytstvi". - S. 93 - 98.
3. Bodnar L. A. Doslidzhennya efektyvnosti intensyfikatsiyi teploobminu v hazotrubnomu teploobminnyku vodohriynoho kotla / L. A. Bodnar, I. V. Lepetan // Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk "Suchasni tekhnolohiyi materialy i konstruktсии v budivnytstvi" .- 2016. - №2. - S.93 - 98.
4. Bodnar L. A. Efektyvnist' intensyfikatsiyi teploobminu v teploheneratori na shchepi derevyny / L. A. Bodnar // Vseukrayins'kyi naukovo-tekhnichnyy zhurnal. Tekhnika, enerhetyka, transport APK - 2017. - №4. - s. 124 - 128.
5. Popov I. A. Promyslove zastosuvannya intensyfikatsiyi teploobminy - suchasnyy stan problemy (ozor) / I. A. Popov, YU. F. Horyashov, V. V. Olympyev // Teploenerhetyka. - 2012. - №1. - s. 3 - 14.
6. Neshumaev D.; Tiikma T. T. Eksperymental'ne ta chysel'ne doslidzhennya tekhniki zbil'shennya teploobminu v hazovykh kanalakh. V: Pratsi 4-iy Mizhnarodnoyi konferentsiyi z teploobminu, mekhaniky ridyny i termodynamiky, 18-23 veresnya. 2005, Kayir, Yehypet.
7. Mozes E., Pro rozrobku vodoymy velykoyi yemnosti / E. Mozes // Enskhede: FEBO, b.v., 2001. - 97 s.
8. V. Nirmalan. Doslidzhennya turbulentnykh stymulyuyuchykh vstavok dlya zbil'shennya teploobminu vid haziv u trubakh. Dysertatsiya. [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/8101>.
9. Manhlyk R. M. Teploperedacha i padinnya tysku u vyhyadi skruchenykh strichkovykh vstavok v izotermichnykh trubakh: chastyna II / R. M. Manhlik, A. E. Berhles // Operatsiyi ASME. - 1993. - tom 115. - 890 - 896. [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: <https://vdocuments.site/heat-transfer-and-pressure-drop-correlations-for-twisted-tape-inserts-in-isothermal.html>.
10. Luk'yanov A. V. Vyznachennya teplovykh kharakterystyk produktiv z'horyannya teploheneratora z turbulizatoramy potoku / A. V. Luk'yanov D. V. Ostak, D. V. Basyst // Pratsi Odes'koho politekhnichnoho universytetu. - 2014. - № 2. - s. 102 - 107.

**Боднар Лілія Анатоліївна** – к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики, Вінницького національного технічного університету, [bodnar06@ukr.net](mailto:bodnar06@ukr.net). ORCID: 0000-0001-9497-214X.

**Федич Ілля Юрійович** – студент Вінницького національного технічного університету.

**Л. А. Боднар**

**И. Ю. Федич**

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

*В работе проведено исследование эффективности интенсификации теплообмена в газотрубных теплообменнике водогрейного котла, проведен анализ полученных результатов. Отмечено, что для газотрубных водогрейных котлов проблема интенсификации теплообмена особенно актуальна, поскольку коэффициент теплоотдачи от газов к стенке в каналах без интенсификации достаточно мал, а от интенсивности теплообмена в теплообменнике зависит температура отходящих газов и коэффициент полезного действия. Проведен обзор литературной информации, который показал, что в современных водогрейных котлах малой и средней мощности используются интенсификаторы: проволочные вставки различной конфигурации, кольцевые канавки, спиральные вставки, ленточные завихрители, шнековые турбулизаторы, пластины различной конфигурации, комбинированные методы. В рамках курсового проектирования разработана конструкция теплогенератора на щепе древесины с расчетной мощностью 550 кВт. Для данной конструкции проведения численные исследования влияния установления интенсификаторов на показатели работы котла на полном и частичном нагрузке. Для исследования энергетических характеристик котла разработана математическая модель, которую дополнен зависимостями для расчета интенсифицированного теплообмена в теплообменнике котла. Исследовано влияние установления интенсификатора на температуру дымовых газов на выходе из котла и на коэффициент полезного действия.*

*Показано, что наибольшее уменьшение температуры отходящих газов наблюдается для интенсификатора в виде скрученной ленты, комбинированного метода, интенсификатора оригинальной конструкции и изогнутой пластины с различными геометрическими параметрами. 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 исключается 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, прямая пластина, скрученная лента, комбинированный метод интенсификации теплообмена.*

**Боднар Лилия Анатольевна** – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики Винницкого национального технического университета.

**Федич Илья Юрьевич** – студент Винницкого национального технического университета.

**L. Bodnar**

**I. Fedych**

## **ENHANCING THE ENERGY EFFICIENCY OF WATER BOILERS BY HEAT EXCHANGE INTENSIFICATION**

Vinnitsia National Technical University

*In the work the research of the efficiency of the heat exchange intensification in the gas-tube heat exchanger of the water heating boiler was carried out, the analysis of the obtained results was carried out. It was noted that for heat pump gas boilers the problem of heat transfer intensification is especially important, since the coefficient of heat transfer from gases to the wall in the channels without intensification is rather small, and the temperature of the waste gases and the efficiency coefficient depend on the heat transfer intensity of the heat exchanger. The review of literary information, which showed that in modern water-heating boilers of small and medium power intensifiers are used: wired inserts of various configurations, ring grooves, spiral inserts, band swirls, screw turbulators, plates of different configurations, combined methods. As part of the course design, the design of a heat generator on 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. To study the boiler's energy characteristics, a mathematical model has been developed, which is supplemented with dependencies for the calculation of the intensified heat transfer in the boiler heat exchanger. Influence of installation of the intensifier on the temperature of flue gases at the output from the boiler and on the efficiency coefficient is investigated. It is shown that the greatest reduction of the temperature of the exhaust gases is observed for the intensifier in the form of a twisted tape, a combined method, an intensifier of the original construction and a bent plate with different geometric parameters. It is noted that when choosing a method for intensifying heat exchange in a boiler for solid fuels and parameters of 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: water boiler, heat transfer intensification, heat transfer coefficient, direct plate, twisted tape, combined heat exchange intensification method.*

**Bodnar Lilia** – Ph.D, associate professor of power engineering, Vinnitsia National Technical, University.

**Fedych Ilya** – a student of the Vinnitsia National Technical University.