

## ІНЖЕНЕРНІ МЕРЕЖІ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

УДК 662.76

DOI 10.31649/2311-1429-2019-2-187-193

Л. А. Боднар  
Т. А. СологубПОКАЗНИКИ РОБОТИ ПАРОГЕНЕРАТОРА Е - 1- 9 ПРИ  
ПЕРЕВЕДЕННІ НА СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ВИДІВ  
ПАЛИВ

Вінницький національний технічний університет

В роботі відзначено, що використання поновлюваних видів палив для виробництва теплової та електричної енергії за умов дефіциту енергоносіїв є актуальним завданням сьогодення. В роботі проведено числові дослідження показників роботи парогенератора Е-1-9 при спалюванні відходів деревини, вугілля, торфу, соломи. Проведено аналіз літературної інформації по експериментальних дослідженнях котлів на альтернативних видах палива. На основі аналізу літературної інформації показано, що для широкого використання альтернативних видів палив в котлах малої потужності (до 3 МВт) необхідні ґрунтовні експериментальні дослідження процесів спалювання таких палив і відповідні корегування Нормативного методу. Для дослідження показників роботи парогенератора було створено математичну модель котла, яку реалізовано в середовищі MSExcel. Математична модель складається з чотирьох модулів: модуль розрахунків об'ємів продуктів згорання, модуль розрахунків теплообміну в топці, модуль розрахунків теплообміну в конвективному пучку, модуль розрахунків теплообміну в чавунному економайзері.

Досліджено вплив коефіцієнта надлишку повітря на адиабатну температуру та температуру димових газів на виході з топки. Показано, що при збільшенні коефіцієнта надлишку повітря, адиабатна температура зменшується, що пояснюється тим, що в топку надходить більша кількість холодного повітря. Для торфу і деревини значення адиабатної температури близькі. Адиабатна температура для вугілля майже на 350 °С вища за аналогічне значення для деревини. Проаналізовано вплив коефіцієнта надлишку повітря на коефіцієнт корисної дії парогенератора. Показано, що найбільше значення коефіцієнта корисної дії має парогенератор при спалюванні в ньому вугілля, що пояснюється вищою теплотою згорання та меншою вологістю палива. Порівняно викиди забруднювальних речовин в разі спалювання в парогенераторі твердих видів палива.

Ключові слова: паливо, солома, адиабатна температура, температура відхідних газів, відходи деревини, солома, вугілля, торф, викиди оксидів сірки, викиди золи, парникові гази.

## Вступ

Залучення поновлюваних видів палив для виробництва теплової та електричної енергії – актуальна задача, що постає перед енергетичним сектором України. Її вирішення дозволить розширити паливну базу енергоустановок і знизити дефіцит енергоресурсів. Ефективне використання нових видів палив, як правило, супроводжується створенням нових конструкцій топкових пристроїв, в ході проектування яких необхідні дані про основні закономірності їх термічної конверсії, а також відповідні нормативні документи, згідно яких можна проектувати такі установки. В літературі досить обмежена інформація про енергетичні та екологічні показники [1, 2] роботи котельного обладнання на альтернативних видах палива (відходах сільськогосподарських культур, пелетах, торфу, низькосортного вугілля) та їх сумішах. В зв'язку з вищенаведеним, тема статті є актуальною.

Мета роботи – числові дослідження показників роботи парогенератора Е - 1- 9 при переведенні на спалювання твердих видів палив.

## Основна частина

Для дослідження показників роботи парогенератора було створено математичну модель котла, яку реалізовано в середовищі MSExcel. Математична модель складається з чотирьох модулів: модуль розрахунків об'ємів продуктів згорання, модуль розрахунків теплообміну в топці, модуль розрахунків теплообміну в конвективному пучку, модуль розрахунків теплообміну в чавунному економайзері.

Перед проведенням числових досліджень, нами проаналізовано літературну інформацію по експериментальних дослідженнях котлів на альтернативних видах палива. Проаналізувавши роботи [ 3-11], нами виявлено, що при проектуванні котлів із шаровими топковими пристроями необхідно враховувати, що рівень і характер розподілення теплових потоків в топці суттєво відрізняється від інших видів спалювання твердого палива. При шаровому спалюванні екрани

сприймають теплоту випромінюванням в основному від поверхні шару, і в меншій мірі від газового факела. В нормативному методі теплового розрахунку котельних агрегатів [12], розробленого спеціалістами ВТИ, пропонується та ж розрахункова напівемпірична залежність, що і для факельного спалювання, але із введенням різних поправок [5]. При такому підході не враховується вирішальний вплив шару, оскільки ігнорується його температура, що є головним фактором процесу радіаційного теплообміну, що призводить до зниження інтенсивності інтегрального теплообміну. В існуючих методах розрахунку топкового теплообміну не враховується різний механізм випромінювання газів і твердих тіл, ігнорується відмінність температур газів і поверхні шару. В зв'язку з цим, в котлах малої потужності (3 МВт), як показали дослідження [3] розходження між експериментальною і розрахунковою температурами газів на виході з топки становлять 148...182 °С. Це свідчить про те, що для широкого використання альтернативних видів палив в котлах малої потужності (до 3 МВт) необхідні ґрунтовні експериментальні дослідження процесів спалювання таких палив і відповідні корегування Нормативного методу.

В розрахунках прийнято, що втрати теплоти від хімічної неповноти згорання складають 0,5 %, з механічним недопалюванням 1 %, втрати теплоти в навколишнє середовище 3%. Досліджено роботу котла на таких видах палива як шматковий торф, солома сіра, відходи деревини та вугілля.

Змінним параметром в дослідженнях є коефіцієнт надлишку повітря, який варіювався в межах від 1,3 до 1,9. Нами досліджено вплив коефіцієнту надлишку повітря на адиабатну температуру в топці при спалюванні деревини, соломи, торфу та вугілля (рис. 1). Найбільшу адиабатну температуру має вугілля, що пояснюється тим, що в нього найвища теплота згорання палива.

При збільшенні коефіцієнта надлишку повітря, адиабатна температура зменшується, що пояснюється тим, що в топку надходить більша кількість холодного повітря. Для торфу і деревини значення адиабатної температури близькі. Адиабатна температура для вугілля майже на 350 °С вища за аналогічне значення для деревини.

В роботі досліджено вплив коефіцієнта надлишку повітря на температуру газів на виході з топки (рис. 2). Коефіцієнт надлишку повітря взято від 1,3 до 1,9. При менших надлишках повітря можливе хімічне і механічне недопалювання палива. При надлишку повітря паливо згорає повністю, але частина теплоти витрачається на підігрів надлишкового повітря. Відбувається зниження температури газів на виході і зменшення ККД. Надлишкове повітря що надходить в газовий тракт котла, викликає збільшені втрати теплоти з відхідними газами, збільшується опір тракту, викликає перенавантаження димососів і вентиляторів і внаслідок цього може знизитись продуктивність котла і його ККД.

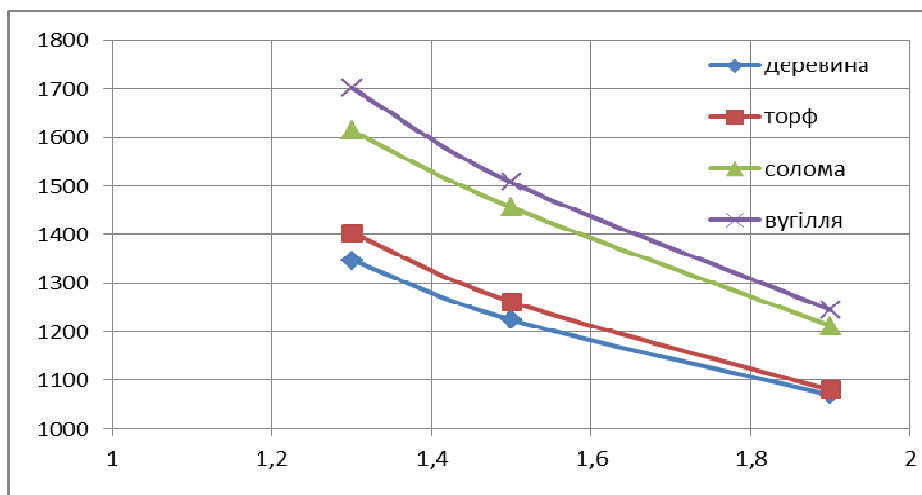


Рисунок 1 – Зміна адиабатної температури в топці при різних коефіцієнтах надлишку повітря

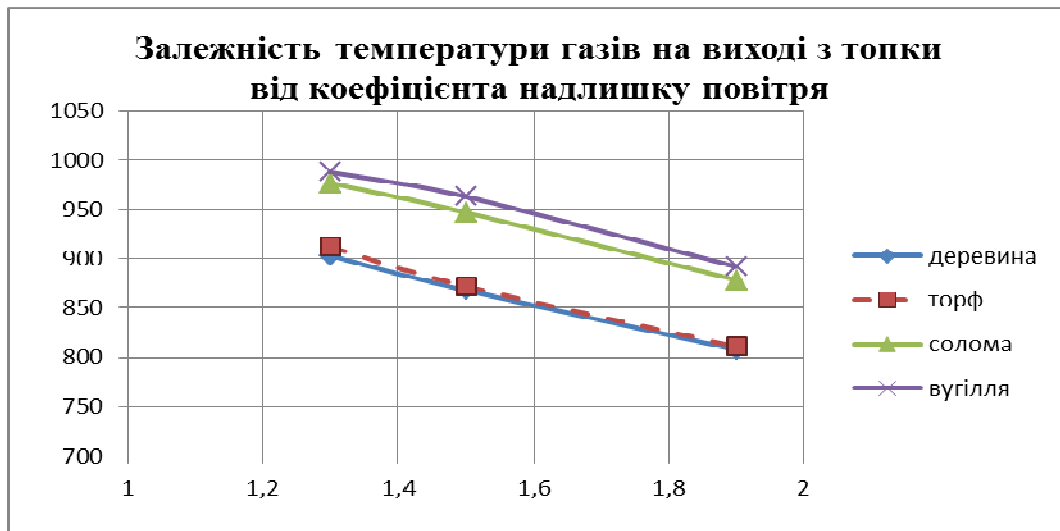


Рисунок 2 – Зміна температури газів на виході з топки при різних коефіцієнтах надлишку повітря

На рисунку 3 наведено залежність зміни ККД котла для різних коефіцієнтів надлишку повітря.

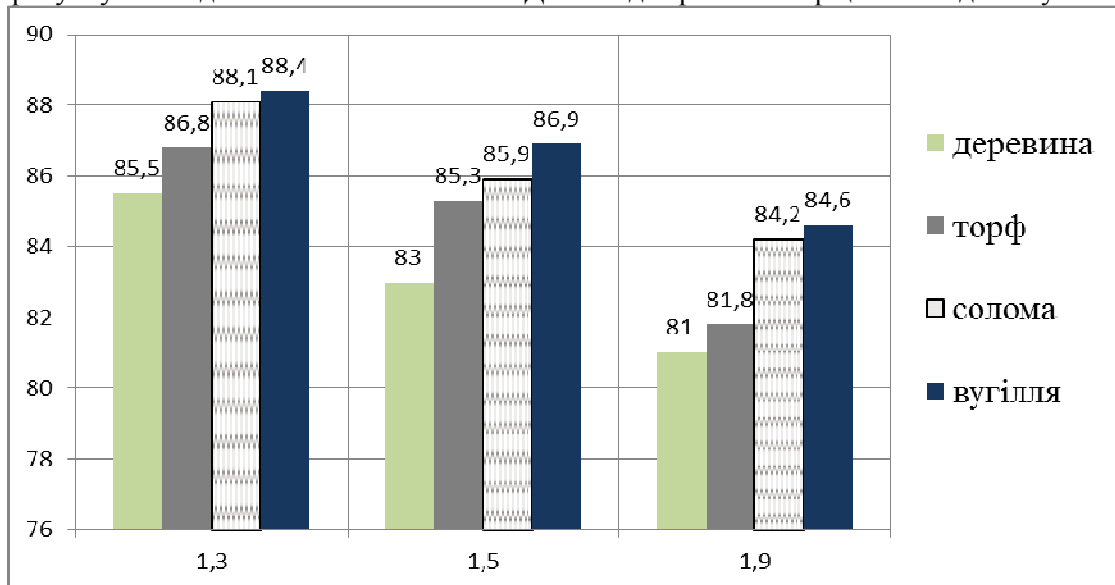


Рисунок 3 – Зміна коефіцієнта корисної дії котла залежно від зміни коефіцієнта надлишку повітря

Найбільше значення коефіцієнта корисної дії має парогенератор при спалюванні в ньому вугілля, що пояснюється вищою теплотою згорання та меншою вологістю палива. Найменше значення коефіцієнта корисної дії має парогенератор при спалюванні деревини, що пояснюється високою вологістю  $W^p=40\%$  та низькою нижньою теплотою згорання  $Q_n^p = 10$  МДж/кг.

Нами проведено порівняльну оцінку викидів шкідливих речовин в разі спалювання в парогенераторі відходів деревини, пелет соломи, торфу та вугілля. Спалювання низькосортних палив пов'язано з утворенням значно більшої кількості шкідливих речовин, ніж при використанні традиційних палив. Оцінка екологічності палива по генерації оксидів азоту може бути виконана лише наближено з врахуванням як вмісту азоту в паливі, як і частки азоту повітря, що бере участь в процесі горіння і утворює відповідний оксид. Сумарний викид  $NO_x$  визначають по емпіричних формулах, що враховують режим горіння палива, конструктивні особливості топкових пристроїв та інші фактори, в тому числі і вміст азоту в паливі. Слід зазначити, що для установок малої потужності методики визначення сумарних викидів  $NO_x$  недостатньо пророблені, тому в даній роботі не розглядаються. Під час спалювання будь-яких видів палива утворюються парникові гази. В розрахунках прийнято, що котел працює протягом 360 діб. Розрахунки проведено з врахуванням ККД характерного для котлоагрегатів в разі спалювання того чи іншого палива. На рис. 4 показано очікувані викиди вуглекислого газу та водяної пари в разі спалювання зазначених видів палив. Як

показали розрахунки, очікувані викиди парникових газів під час спалювання деревини дещо більші, ніж для соломи та торфу. Викиди вуглекислого газу в разі спалювання вугілля менші на 438 тонн порівняно з деревиною. Це пов'язано з тим, що відходи деревини мають високу вологість і меншу, ніж у вугілля, теплоту згорання. Це призводить до більшої кількості спаленого палива, а, отже і до збільшення викидів. Слід зазначити, що до складу соломи, торфу та вугілля входить сірка та зола, тому окрім викидів парникових газів, в навколишнє середовище будуть викидатись оксиди сірки та золи.

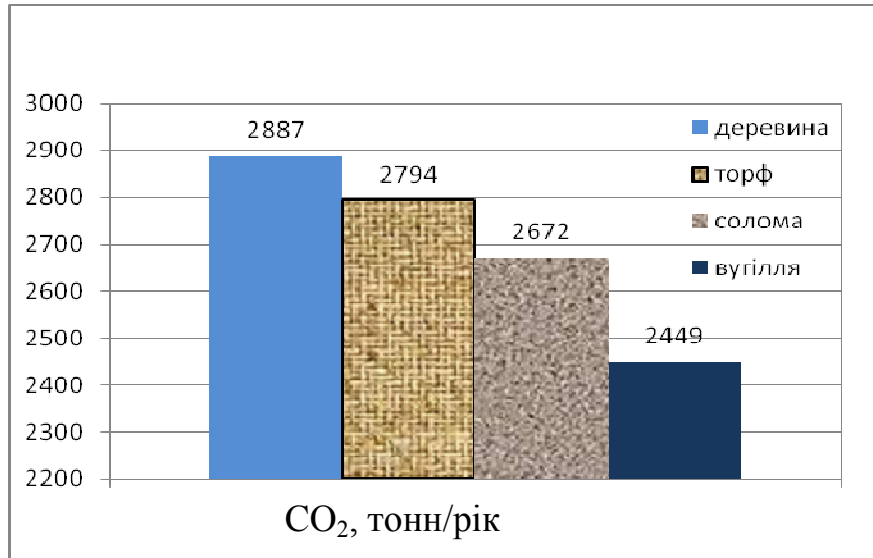


Рисунок 4 – Викиди вуглекислого газу при спалюванні в парогенераторі таких палив: деревини, торфу, соломи, вугілля

Оскільки до складу палива входить зола, то нами також визначено її викиди при спалюванні палива.

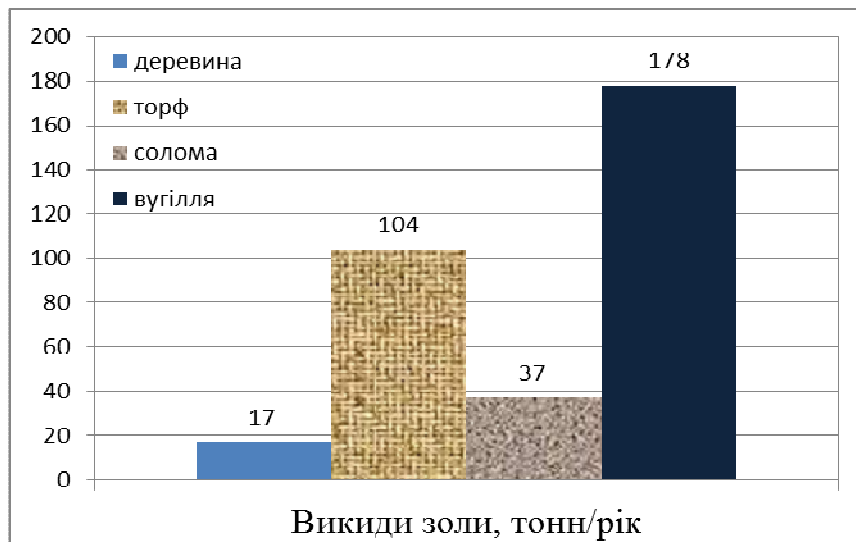


Рисунок 5 – Викиди золи при спалюванні в парогенераторі таких палив: деревини, торфу, соломи, вугілля

Найбільше викидів золи буде при спалюванні вугілля ( на 161 тону більше, ніж для деревини, на 74 тони більше, ніж для торфу та на 141 тону більше, ніж при спалюванні соломи). Для зменшення викидів золи рекомендується встановлювати циклоні.

Оскільки до складу вугілля, торфу та соломи входить сірка, то в роботі також визначено викиди оксидів сірки. До складу деревини, взятої для розрахунків сірка не входить.

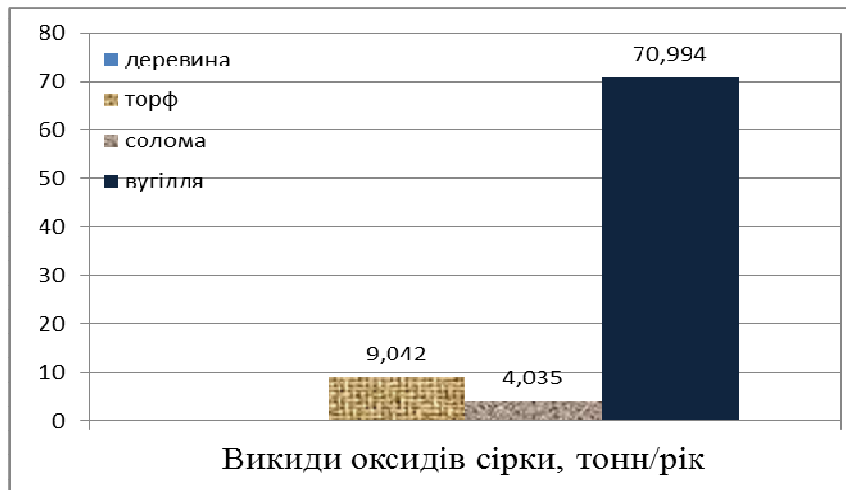


Рисунок 6 – Викиди оксидів сірки при спалюванні в парогенераторі таких палив: деревини, торфу, соломи, вугілля

Найбільше викидів оксидів сірки буде при спалюванні вугілля (в 7,85 рази більше, ніж при спалюванні торфу, та в 17,6 рази більше, ніж при спалюванні соломи).

Кожне з розглянутих видів палива має переваги та недоліки. Для застосування того, чи іншого виду палива необхідно проводити техніко-економічне обґрунтування.

### Висновки

В роботі проведено числові дослідження показників роботи парогенератора Е-1-9 при переведенні його на спалювання твердого палива. Проведено розрахунок парогенератора Е-1-9 при спалюванні в ньому деревини, торфу, соломи та вугілля. Визначено показники енергетичної ефективності парогенератора. Визначено, що найбільший коефіцієнт корисної дії має парогенератор при спалюванні в ньому вугілля 87 %, а найменший – при спалюванні деревини 85 % (при коефіцієнті надлишку повітря 1,5). Проаналізовано вплив коефіцієнта надлишку повітря на адиабатну температуру, температуру газів на виході з топки та коефіцієнт корисної дії котла.

В роботі проведено оцінку викидів забруднювальних речовин. Визначено очікувані викиди, вуглекислого газу, золи та оксидів сірки при спалюванні різних видів палив. Найбільше викидів золи буде при спалюванні вугілля (на 161 тону більше, ніж для деревини, на 74 тони більше, ніж для торфу та на 141 тону більше, ніж при спалюванні соломи). Для зменшення викидів золи рекомендується встановлювати циклони. Найбільше викидів оксидів сірки буде при спалюванні вугілля (в 7,85 рази більше, ніж при спалюванні торфу, та в 17,6 рази більше, ніж при спалюванні соломи). Кожне з розглянутих видів палива має переваги та недоліки. Для застосування того, чи іншого виду палива необхідно проводити техніко-економічне обґрунтування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боднар Л. А. Екологічні аспекти виробництва енергії з низькосортних видів палив / Л. А. Боднар, О. В. Дахновська, М. Г. Робак // Всеукраїнський науково-технічний журнал. Техніка, енергетика, транспорт АПК - 2015. - №2. - С.112-116.
2. Боднар Л. А. Проблеми спалювання низькосортних палив в котлах малої потужності / Л. А. Боднар, С. Й. Ткаченко, О. В. Дахновська // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2012. – № 4.
3. Бабенко Г. С. Слоевое сжигание низькосортных углей с высоким влагосодержанием в механизированных топках водогрейных котлов малой мощности / Г. С. Бабенко, Г. А. Захаров // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2017. – №4. – С. 44 – 55.
4. Каменецкий Б. Я. Выбор оптимального избытка воздуха слоевых топков котлов / Б. Я. Каменецкий // Промышленная энергетика. – 2010. – № 9. - С.24-25.
5. Каменецкий Б. Я. О применимости нормативного метода расчета топчного теплообмена к слоевым топкам / Б. Я. Каменецкий // Теплоэнергетика. – 2006. – №2. - С.58 – 61.
6. Каменецкий Б. Я. Оптимизация воздушного режима слоевых топков / Б. Я. Каменецкий // Теплоэнергетика. – 2006. – № 6. – С. 60-62.
7. Каменецкий Б. Я. Эксплуатационные показатели котлов со слоевыми топками / Б. Я. Каменецкий // Промышленная энергетика. – 2009. – № 10. - С.23-26.
8. Каменецкий Б. Я. Закономерности выгорания твердого топлива в неподвижном слое / Б. Я. Каменецкий // Промышленная энергетика. – 2013. – № 5.-С.21-26.

9. Жумагулов М. Г. К вопросу о математическом моделировании процессов теплопередачи в движущемся слое коксуемых частиц / М. Г. Жумагулов, А. С. Никифоров, А. Г. Калиакпаров // Промышленная энергетика. – 2009. – № 6. – С. 36 – 40.
10. Каменецкий Б. Я. Стадии горения полифракционного топлива в слое / Б. Я. Каменецкий // Теплоэнергетика. – 2009. – № 6. – С.22 – 25.
11. Карницкий Н.Б. Проблемы сжигания местных видов топлива в котлах со слоевыми топками/ Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединенных сил. – 2011. – № 6. – С.47 – 55.
12. Тайлашева Т. С. Оценка условий сжигания высоковлажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования/ Т. С. Тайлашева // Известия Томского политехнического университета. – 2016. – № 1. – С. 121 – 127.
13. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). Под ред. С. И. Мочана. Изд. 3-е. – Л. : Энергия, 1977. – 256 с.
14. Тепловой расчет котлоагрегатов (нормативный метод). Санкт-Петербург: НПО ЦКТИ, 1998.

## REFERENCES

1. Bodnar L. A. Ekolohichni aspekty vyrobnytstva enerhiyi z nyz'kosortnykh vydiv palyv/L. A. Bodnar, O. V. Dakhnov's'ka, M. H. Robak// Vseukrayins'kyu naukovo-tekhnichnyy zhurnal. Tekhnika, enerhetyka, transport APK - 2015. - №2. - S.112-116
2. Bodnar L. A. Problemy spaluyvannya nyz'kosortnykh palyv v kotlakh maloyi potuzhnosti / L. A. Bodnar, S. Y. Tkachenko, O. V. Dakhnov's'ka // Naukovi pratsi Vinnyts'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. – 2012. – № 4.
3. Babenko H. S. Sloevoe szhyhanye nyzkosortnykh uhley s vysokym vlahosoderzhanyem v mekhanizyrovannykh topkakh vodohreynykh kotlov maloy moshchnosti / H. S. Babenko, H. A. Zakharov // Vestnyk ynzhenernoy shkoly DVFU. – 2017. – №4. – С. 44 – 55.
4. Kamenetsky B. YA. Vybory optimal'noho yzbytka vozdukh sloevykh topok kotlov/B. YA. Kamenetsky // Promyshlennaya énerhetyka. – 2010. – № 9. - S.24-25
5. Kamenetsky B. YA. O pryymenymosti normatyvnoho metoda rascheta topochnoho teploobmena k sloevym topkam/B. YA. Kamenetsky // Teploénerhetyka. – 2006. – №2. - S.58 - 61
6. Kamenetsky B. YA. Optymyzatsyya vozdushnoho rezhyma sloevykh topok /B. YA. Kamenetsky // Teploénerhetyka. – 2006. – № 6. – С. 60 – 62
7. Kamenetsky B. YA. Ékspluatatsyonnye pokazately kotlov so sloevymy topkamy /B. YA. Kamenetsky // Promyshlennaya énerhetyka. – 2009. – № 10. - S.23-26
8. Kamenetsky B. YA. Zakonomernosti vyhorannya tverdogo toplyva v nepodvyznom sloe /B. YA. Kamenetsky // Promyshlennaya énerhetyka. – 2013. – № 5.-S.21-26
9. Zhumahulov M. H. K voprosu o matematycheskom modelirovaniy protsessov teploperedachy v dvyzhushchemsya sloe koksuemykh chastyts/M. H. Zhumahulov, A. S. Nykyforov, A. H. Kalyakparov // Promyshlennaya énerhetyka. – 2009. – № 6. – С. 36 – 40.
10. Kamenetsky B. YA. Stadyi horenyya polyfraktsyonnoho toplyva v sloe / B. YA. Kamenetsky // Teploénerhetyka. – 2009. – № 6. – С.22 – 25.
11. Karnitsky N.B. Problemy szhyhanyya mestnykh vydov toplyva v kotlakh so sloevymy topkamy/ Énerhetyka. Yzvestyya vysshykh uchebnykh zavedenyy u énerhetycheskykh ob"edynennykh syl. – 2011. – № 6. – С.47 – 55.
12. Taylasheva T. S. Otsenka uslovyi szhyhanyya vysokovlazhnoho neproektno toplyva v kamernoy topke na osnove chyslennoho modelirovaniya/ T. S. Taylasheva// Yzvestyya Tomskoho polytekhnicheskoho unyversytetu. – 2016. – № 1. – С. 121 – 127.
13. Аэродинамический расчет котел'ных установок (нормативный метод). Под ред. С. И. Мочана. Изд. 3-е. – Л. : Энергия, 1977. – 256 с.
14. Тепловой расчет котлоагрегатов (нормативный метод). Санкт-Петербург: НПО ЦКТИ, 1998.

**Боднар Лілія Анатоліївна** – к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет. E-mail: Bodnar06@ukr.net.

**Сологуб Тетяна Анатоліївна** – студентка, Вінницький національний технічний університет. E-mail: tasologub@gmail.com.

**Боднар Л. А.  
Сологуб Т. А.**

## ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРА Е - 1- 9 ПРИ ПЕРЕВОДЕ НА СЖИГАНИЕ ТВЕРДЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

Вінницький національний технічний університет

*В работе отмечено, что использование возобновляемых видов топлива для производства тепловой и электрической энергий в условиях дефицита энергоносителей является актуальной задачей сегодняшнего дня. В работе проведен численные исследования показателей работы парогенератора E-1-9 при сжигании отходов древесины, угля, торфа, соломы. Проведен анализ литературной информации по экспериментальных исследованиях котлов на альтернативных видах топлива. На основе анализа литературного информации показано, что для широкого использования альтернативных видов топлива в котлах малой мощности (до 3 МВт) необходимы основательные экспериментальные исследования процессов сжигания таких топлив и соответствующие корректировки нормативного метода. Для исследования показателей работы парогенератора была создана математическая модель котла, которую реализовано в среде MSExcel. Математическая модель состоит из четырех модулей: модуль расчетов объемов продуктов сгорания, модуль расчетов теплообмена в топке, модуль расчетов теплообмена в конвективном пучке, модуль расчетов теплообмена в чугунном экономайзере.*

*Исследовано влияние коэффициента избытка воздуха на адиабатную температуру и температуру дымовых газов на выходе из топки. Показано, что при увеличении коэффициента избытка воздуха, адиабатная температура уменьшается, что объясняется тем, что в топку поступает большее количество холодного воздуха. Для торфа и древесины значение адиабатной температуры близки. Адиабатная температура для угля почти на 350 ° C выше аналогичное значение для древесины. Проанализировано влияние коэффициента избытка воздуха на коэффициент полезного действия парогенератора. Показано, что наибольшее значение коэффициента полезного действия имеет парогенератор при сжигании в нем угля, что объясняется высокой теплотой сгорания и меньшей влажностью топлива. Проведено сравнение выбросов загрязняющих веществ при сжигании в парогенераторе твердых видов топлива.*

*Ключевые слова: топливо, солома, адиабатная температура, температура уходящих газов, отходы древесины, солома, уголь, торф, выбросы оксидов серы, выбросы золы, парниковые газы.*

**Боднар Лилия Анатольевна** – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики, Винницкий национальный технический университет. ORCID: 0000-0001-9497-214X., e-mail: bodnar06@ukr.net.

**Сологуб Татьяна Анатольевна** – студентка, Винницкий национальный технический университет. E-mail: tasologub@gmail.com.

**L. Bodnar  
T. Sologub**

## INDICATORS OF OPERATION OF THE E-1- 9 STEAM GENERATOR WHEN TRANSFER TO THE BURNING OF SOLID FUELS

Vinnitsia National Technical University

*In the work it is noted that the use of renewable fuels for the production of heat and electricity under conditions of energy shortages is an urgent task today. The numerical studies of the performance of the steam generator E-1-9 in the combustion of wood, coal, peat, straw wastes were carried out. The analysis of literary information on the experimental studies of boilers using alternative fuels has been carried out. Based on the analysis of the literature, it is shown that for wide use of alternative fuels in low power boilers (up to 3 MW), thorough experimental studies of the combustion processes of such fuels and appropriate adjustments of the Normative method are required. To study the performance of the steam generator, a mathematical model of the boiler was created, which was implemented in the MSExcel. The mathematical model consists of four modules: module of calculations of volumes of combustion products, module of calculations of heat exchange in a furnace, module of calculations of heat exchange in a convective beam, module of calculations of heat exchange in a cast iron economizer.*

*The influence of the coefficient of excess air on the adiabatic temperature and the flue gas temperature at the outlet of the furnace is investigated. It is shown that as the coefficient of excess air increases, the adibat temperature decreases, which is explained by the fact that more cold air enters the furnace. For peat and wood, the values of the adiabatic temperature are close. The adiabatic temperature for coal is almost 350 ° C higher than that of wood. The influence of the coefficient of excess air on the efficiency of the steam generator is analyzed. It is shown that the highest value of the efficiency is the steam generator when burning coal, which is explained by the higher heat of combustion and lower moisture content of the fuel. Comparison of pollutant emissions in the case of solid fuel combustion in a steam generator.*

*Keywords: fuel, straw, adiabatic temperature, flue gas temperature, wood waste, straw, coal, peat, sulfur oxide emissions, ash emissions, greenhouse gases.*

**Bodnar Lilia** – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of power engineering, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, e-mail: bodnar06@ukr.net.

**Sologub T.** – student, Vinnitsia National Technical University.