

2025

SCIENTIFIC

Progress & Innovations



**Vol. 28
Nº2**



Scientific Progress & Innovations

УДК 001

До 2022 року журнал виходив під назвою «Вісник Полтавської державної аграрної академії». У 2023 році журнал переєстровано та перейменовано на «Scientific Progress and Innovation»

Засновник, редакція, видавець:

Полтавський державний аграрний університет.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції:

Серія ДК № 7933 від 13.09.2023 року

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 25459-15399 ПР від 09.03.2023 року

Рік заснування: 1998

Мова видання:

українська, англійська

Рекомендовано до друку та поширення через мережу Інтернет Вченою радою Полтавського державного аграрного університету
(протокол № 11 від 27 травня 2025 року)

Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1554

Ідентифікатор медіа – R30-03924

Науковий журнал включено до категорії Б Переліку наукових фахових видань України,

у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та доктора філософії з сільськогосподарських, ветеринарних та технічних наук (наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. та № 866 від 02.07.2020 р.)

101 – Екологія; 162 – Біотехнології та біоінженерія;

201 – Агрономія; 202 – Захист і карантин рослин;

204 – Технологія виробництва і переробки продукції

тваринництва; 211 – Ветеринарна медицина;

212 – Ветеринарна гігієна, санітарія і експертиза;

208 – Агроінженерія

Журнал представлено у міжнародних наукометричних базах даних, репозитаріях та пошукових системах:

Index Copernicus International, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Directory of open access scholarly resources (ROAD), Національна бібліотека України імені В.І.Вернадського, Національна наукова сільськогосподарська бібліотека НААН, Scientific & Scholarly Research Database (Scilit), Dimensions, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), Google Scholar, Fatcat, Wikidata, Crossref, Електронний репозитарій Полтавського державного аграрного університету

Адреса редакції:

Полтавський державний аграрний університет,
36003, вул. Сковороди, 1/3, м. Полтава, Україна
e-mail: visnyk@pdau.edu.ua
http://www.pdau.edu.ua
https://doi.org/10.31210

© Полтавський державний аграрний університет

UDC 001

Until 2022, the journal was published under the name "Bulletin of Poltava State Agrarian Academy".

In 2023, the journal was re-registered and renamed "Scientific Progress and Innovation"

Founder, Editorial and Publisher:

Poltava State Agrarian University
Certificate of making a publishing house subject to the state register of publishers, manufacturers and distributors of publishing products:

Series DC No. 7933 of September 13, 2023

Certificate of state registration print mass media:
Series KV No. 25459-15399 PR of March 09, 2023

Year of foundation: 1998

Language edition:

Ukrainian, English

Recommended for printing and distribution via the Internet by the Academic Council of Poltava State Agrarian University
(Minutes No. 11 of May 27, 2025)

Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine No. 1554

Media identifier – R30-03924

The scientific journal is included in category B of the List of scientific professional publications of Ukraine,

in which the results of thesis papers for Doctor of Sciences, Candidate of Sciences, and Ph.D degrees in agricultural, veterinary, and technical sciences (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine

No. 409 of March 17, 2020 and №886 July 02, 2020)

101 – Ecology; 162 – Biotechnology and Bioengineering;

201 – Agronomy; 202 – Plant Protection and Quarantine;

204 – Technology of Production and Processing of Livestock

Products; 211 – Veterinary Medicine;

212 – Veterinary hygiene, sanitation and examination;

208 – Agricultural Engineering

The journal is presented international scientometric databases, repositories and scientific systems:

Index Copernicus International, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Directory of open access scholarly resources (ROAD), Vernadsky National Library of Ukraine, National Scientific Agricultural Library, Scientific & Scholarly Research Database (Scilit), Dimensions, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), Google Scholar, Fatcat, Wikidata, Crossref, Electronic repository of Poltava State Agrarian University

Editorial address:

Poltava State Agrarian University,
36003, 1/3, Skovorody str., Poltava, Ukraine
e-mail: visnyk@pdau.edu.ua
http://www.pdau.edu.ua
https://doi.org/10.31210

© Poltava State Agrarian University

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Засновано 10 рудня 1998 р.
Періодичність випуску: 4рази на рік

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Голова Редакційної ради

В. І. АРАНЧІЙ, к. екон. наук (Україна)

Головний редактор

О. О. ГОРБ, к. с.-г. наук, (Україна)

Заступники голови Редакційної ради

М. С. САМОЙЛІК, д. екон. наук, (Україна)

Т. О. ЧАЙКА, к. екон. наук (Україна)

Заступник головного редактора

П. В. ПИСАРЕНКО, д. с.-г. наук, (Україна)

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

Редакційна колегія з галузі СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО:

А. ДОЛГАНЬЧУК-ШЬРУДКА, док. габ. (Польща)

А. В. КАЛІНІЧЕНКО, д. с.-г. наук, (Україна, Польща)

І. В. КОРОТКОВА, к. хім. наук (Україна)

В. Ю. КРИКУНОВА, к. хім. наук (Україна)

М. М. МАРЕНИЧ, д. с.-г. наук, (Україна)

Н. М. ОПАРА, к. с.-г. наук, (Україна)

В. М. ПИСАРЕНКО, д. с.-г. наук, (Україна)

А. А. ПОЛІЩУК, д. с.-г. наук, (Україна)

С. В. ПОСПЕЛОВ, д. с.-г. наук, (Україна)

М. РАЙФУР, док. габ. (Польща)

Т. П. РОМАШКО, к. хім. наук (Україна)

А. О. ТАРАНЕНКО, к. с.-г. наук, (Україна)

А. М. ШОСТЯ, д. с.-г. наук, (Україна)

Редакційна колегія з галузі ВЕТЕРИНАРНА МЕДИЦИНА:

А. А. АНТИПОВ, к. вет. наук (Україна)

В. П. БЕРДНИК, д. вет. н. (Україна)

О. О. БОЙКО, к. біол. наук (Україна)

О. Б. ГРЕБЕНЬ, к. біол. наук (Україна)

В. О. ЄВСТАФ'ЄВА, д. вет. н. (Україна)

Б. П. КИРИЧКО, д. вет. н. (Україна)

Л. М. КОРЧАН, к. вет. наук (Україна)

О. В. КРУЧИНЕНКО, д. вет. наук (Україна)

Т. А. КУЗЬМІНА, к. біол. наук (Україна)

С. М. КУЛИНИЧ, д. вет. н. (Україна)

Т. П. ЛОКЕС-КРУПКА, к. вет. наук (Україна)

В. В. МЕЛЬНИЧУК, д. вет. наук (Україна)

О. Б. ПРИЙМА, к. вет. наук (Україна)

Редакційна колегія з галузі ТЕХНІЧНІ НАУКИ:

О. В. ГОРИК, д. тех. наук (Україна)

І. А. ДУДНИКОВ, к. тех. наук (Україна)

С. Б. КОВАЛЬЧУК, д. тех. наук (Україна)

О. М. КОСТЕНКО, д. тех. наук (Україна)

В. М. САКАЛО, к. тех. наук (Україна)

В. О. СУКМАНОВ, д. тех. наук (Україна)

В. О. ШЕЙЧЕНКО, д. тех. наук (Україна)

Члени Ради почесних членів:

А. БРЗОЗОВСКА, д. екон. наук (Польща)

З. ДАЦКО-ПІКІЄВІЧ, док. габ. (Польща)

О. ПЕРЕХОЖУК, д. екон. наук (Німеччина)

В. М. САМОРОДОВ, заслужений винахідник України (Україна)

Назва, концепція, зміст і дизайн «Scientific Progress & Innovations» є інтелектуальною власністю Полтавського державного аграрного університету й охороняється Законом України «Про авторські та суміжні права». Матеріали друкуються мовою оригіналу. У разі передруковування посилання на «Scientific Progress & Innovations» є обов'язковим.

Редакція залишає за собою право на редагування текстів, яке не змінює позиції автора.

Автор несе відповідальність за фактичний виклад матеріалу.

SCIENTIFIC JOURNAL

Year of establishment: Since December 10, 1998.
Publication frequency: 4 times a year

EDITORIAL BOARD

Chief of Editorial Council

V. I. ARANCHIY, Cand. Econ. Sci. (Ukraine)

Editor-in-chief

O. O. GORB, Cand. Agr. Sci. (Ukraine)

Deputy Head of Editorial Council

M. S. SAMOILIK, Dr. Econ. Sci. (Ukraine)

T. O. CHAIKA, Cand. Econ. Sci. Professor (Ukraine)

Deputy Chief Editor

P. V. PYSARENKO, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

MEMBERS OF THE EDITORIAL COUNCIL

Editorial board in the field of AGRICULTURE:

A. DOLHANCZUK-SRODKA, Dr. hab. (Poland)

A. V. KALINICHENKO, Dr. Econ. Sci. (Ukraine, Poland)

I. V. KOROTKOVA, Cand. Chem. Sci. (Ukraine)

V. YU. KRYKUNOVA, Cand. Chem. Sci. (Ukraine)

M. M. MARENYCH, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

N. M. OPARA, Cand. Agr. Sci. (Ukraine)

V. M. PYSARENKO, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

A. A. POLISHCHUK, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

S. V. POSPIELOV, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

M. RAJFUR, Dr. hab. (Poland)

T. P. ROMASHKO, Cand. Chem. Sci. (Ukraine)

A. O. TARANENKO, Cand. Agr. Sci. (Ukraine)

A. M. SHOSTIA, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

Editorial Board in the field of VETERINARY MEDICINE:

A. A. ANTIPOV, Cand. Vet. Sci. (Ukraine)

V. P. BERDNYK, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

O. O. BOYKO, Cand. Biol. Sci. (Ukraine)

O. B. GREBEN, Cand. Biol. Sci. (Ukraine)

V. O. YEYVSTAFIEVA, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

B. P. KYRYCHKO, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

L. M. KORCHAN, Cand. Vet. Sci. (Ukraine)

O. V. KRUCHYNNENKO, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

T. A. KUZMINA, Cand. Biol. Sci. (Ukraine)

S. M. KULYNYCH, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

T. P. LOKES-KRUPKA, Cand. Vet. Sci. (Ukraine)

V. V. MELNYCHUK, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

O. B. PRIJMA, Cand. Vet. Sci. (Ukraine)

Editorial Board in the field of TECHNICAL SCIENCES:

O. V. HORYK, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

I. A. DUDNIKOV, Cand. Tech. Sci. (Ukraine)

S. B. KOVALCHUK, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

O. M. KOSTENKO, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

V. M. SAKALO, Cand. Tech. Sci. (Ukraine)

V. O. SUKMANOV, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

V. O. SHEICHENKO, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

Members of Council:

A. BRZOZOWSKA, Dr. Econ. Sci. (Poland)

Z. DACKO-PIKIEWICZ, Dr. hab. (Poland)

O PEREKHOZHUK, Dr. Econ. Sci. (Germany)

V. M. SAMORODOV, Honored inventor of Ukraine (Ukraine)

The title, conception, content, and design of the "Scientific Progress & Innovations" are intellectual property of Poltava State Agrarian University and are protected by the Law of Ukraine "On Copyright and Related Rights." Materials are published in original language. In case of reprinting, the reference to the "Scientific Progress & Innovations" is compulsory.

Editorial stuff reserves the right to edit the texts without changing author's attitude.

The author is responsible for the factual account of material.

<i>Сільське господарство. Рослинництво</i>	6	<i>Agriculture. Plant growing</i>
Бараболя О. В., Прудкий Т. А. Якісні показники картоплі та їх зв'язок з кліматичними умовами для забезпечення лежкості	6	Barabolia O., Prudkyi T. Quality indicators of potatoes and their relationship with climatic conditions for ensuring storability
Коваленко Н. П., Поспелова Г. Д., Самородов В. М., Поспелов С. В., Оніпко В. В. Порівняльна характеристика морфометричних показників зростаючих в Україні карантинних видів роду Повитиця (<i>Cuscuta</i> L.)	13	Kovalenko N., Pospelova G., Samorodov V., Pospelov S., Onipko V. Comparative characteristics of morphometric indicators of quarantine species of the genus <i>Cuscuta</i> (<i>Cuscuta</i> L.) growing in Ukraine
Маренич М. М., Овсяник О. О. Особливості контролю сеgetальної рослинності в посівах конопель посівних (<i>Cannabis sativa</i> L.)	18	Marenych M., Ovsianyk, O. The peculiarities of segetal vegetation control on hemp (<i>Cannabis sativa</i> L.) sown areas
Матюха В. Л., Цилюрик О. І., Семенов С. С. Ефективність системи захисту кукурудзи від шкідників в умовах степу України	23	Matiukha V., Tsyliuryk O., Semenov S. Effectiveness of corn pest control systems under the conditions of the Ukrainian Steppe
Писаренко В. М., Шерешило О. О. Цифрові технології в управлінні фітосанітарними ризиками аграрного виробництва.	31	Pysarenko V., Shereshylo O. Digital technologies in the management of phytosanitary risks in agricultural production
Сєвідов В. П., Алфьоров О. І. Формування врожаю помідора в захищеному ґрунті залежно від застосування біостимуляторів	37	Sievidov V., Alferov O. Formation of the tomato harvest depends on the application of bio-stimulators
Шевніков М. Я., Власенко Д. В. Рационалізація процесів у технології вирощування гібридів кукурудзи: управлінський аспект	44	Shevnikov M., Vlasenko D. Optimization of processes in hybrid maize cultivation technology: a managerial perspective
Туренко В. П., Олейніков Є. С. Особливості поширення та розвитку грибних хвороб люцерни в умовах Східного Лісостепу України	51	Turenko V., Oleynikov Ye. Features of enhancement and development of mushroom diseases of alfalfa in the minds of the Eastern Forest-Steppe of Ukraine
Шульченко В. А. Хвороби нуту в Лісостепу України в умовах кліматичних змін	57	Shuleshchenko V. Chickpea diseases in the Forest-Steppe Zone of Ukraine under climate change conditions
Маренич М. М., Куряча К. О. Формування урожайності кукурудзи залежно від підбору гібридів в умовах нестійкого зволоження	63	Marenych M., Kuriacha K. The formation of corn yield capacity depending on hybrids' choice under the conditions of unstable moistening
Ольховський А. С. Інноваційні технології у вирощуванні та зберіганні сільськогосподарських культур	68	Olkhovskiy A. Innovative technologies in growing and storing agricultural crops
Муха Б. Г. Вплив кліматичних змін на хвороби овочевих культур в умовах Лівобережного Лісостепу України	75	Mukha B. Impact of climate change on vegetable crop diseases in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine
Каламбет В. В. Формування продуктивності соняшнику (<i>Helianthus annuus</i> L.) залежно від агротехнічних прийомів	81	Kalambet V. Formation of sunflower productivity (<i>Helianthus annuus</i> L.) depending on agrotechnical methods
Писаренко Н. В., Фурдига М. М., Захарчук Н. А., Гордієнко В. В. Статус стійкості сортів картоплі до альтернаріозу в умовах змінного клімату Полісся України	87	Pysarenko N., Furdyha M., Zakharchuk N., Hordiienko V. Resistance status of potato varieties to early blight under changing climate conditions in Polissia, Ukraine
Муха Б. Г. Оптимізація норм висіву та мінерального живлення при вирощуванні ячменю озимого за умов кліматичних ризиків в умовах Лівобережного Лісостепу України	96	Mukha B. Optimization of sowing rates and mineral nutrition in winter barley cultivation under climatic risks in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine
Недоборенко Ю. А., Сахно Т. В. Ефективність видів праймінгу на насіння зернових колосових культур	103	Nedoborenko Yu., Sakhno T. Effectiveness of seed priming techniques for small grain cereals
Шевчук В. М. Гречка як стратегічна культура в умовах зміни клімату, агроєкологічної сталості та продовольчої безпеки	112	Shevchuk V. Buckwheat as a strategic crop in the context of climate change, agroecological sustainability, and food security
Волченко Н. В., Захарченко Е. А., Пономаренко М. О. Чи може покращення здоров'я ґрунту підвищити сталий розвиток сільського господарства та стійкість до зміни клімату?	120	Volchenko N., Zakharchenko E., Ponomarenko M. Can improving soil health enhance agricultural sustainability and resilience to climate change?
<i>Біотехнології та біоінженерія</i>	126	<i>Biotechnology and Bioengineering</i>
Іншина Н. М. Інноваційні технології синтезу фармацевтичних сполук у трансгенних рослинах	126	Inshyna N. Innovative technologies for the synthesis of pharmaceuticals in transgenic plants
<i>Сільське господарство. Тваринництво</i>	131	<i>Agriculture. Animal breeding</i>
Войтенко С. Л., Шаферівський Б. С., Сидоренко О. В., Коробка А. В. Господарські корисні ознаки телиць та корів української чорно-рябій молочної породи різного походження та належності до генеалогічного формування	131	Voitenko S., Shaferivskiy B., Sydorenko O., Korobka A. Economically useful traits of heifers and cows of the Ukrainian black-and-white dairy breed of different origins and belonging to the genealogical formation
<i>Ветеринарна медицина</i>	139	<i>Veterinary medicine</i>
Котелевич В. А., Гуральська С. В., Пінський О. В., Гончаренко В. В. Ветеринарно-санітарна оцінка ковбасних виробів за показниками якості і безпечності	139	Kotelevych V., Huralska S., Pinsky O., Honcharenko V. Veterinary and sanitary evaluation of sausage products based on quality and safety indicators
Латухін О. Є., Кручиненко О. В. Поширення гельмінтозів шлунково-кишкового каналу великої рогатої худоби у господарствах Полтавської області	147	Latukhin O., Kruchynenko O. The spreading of cattle gastro-intestinal tract helminthoses on farms of Poltava region

Кравченко С. О., Сугак А. О., Канівець Н. С., Дмитренко Н. І., Бурда Т. Л., Кулинич С. М., Рудяшко В. С. Застосування препарату Kombiflor Probiotic за дисбактеріозу кишечника у свійських собак та котів	152	Kravchenko S., Suhak A., Dmytrenko N., Kanivets N., Burda T., Kulynych S., Rudyashko V. Application of Combiflor Probiotic in the case of intestinal dysbiosis in domestic dogs and cats
Ільчишин М. М., Карповський В. І., Журенко О. В., Гришук І. А., Карповський П. В., Криворучко Д. І., Гришук А. В., Карповський В. В., Тодорюк В. Б., Мельничук В. В. Вплив сполук наноаквахелатів на активність ферментів крові у корів за різного тонуусу автономної нервової системи	158	Ilchyshyn M., Karpovskiy V. I., Zhurenko O. V., Hryshchuk I. A., Karpovskiy P., Kryvoruchko D., Hryshchuk A., Karpovskiy V., Todoruk V., Melnychuk V. Effect of nanoaquahelate compounds on the activity of blood enzymes in cows with different tone of the autonomic nervous system
Ягольник М. М. Особливості поширення та прояву хронічного субклінічного ендометриту у молочних корів	166	Yaholnyk M. The peculiarities of spread and onset of chronic subclinical endometritis in dairy cows
Мележик А. В., Плахотна Є. В., Корчан Л. М., Михайлютенко С. М., Замазій А. А. Ефективність лікувальних заходів за отодектозу, саркоптозу та демодекозу собак	171	Melezhyk A., Plakhotna Ye., Korchan L., Mykhailiutenko S., Zamazyi A. A. Effectiveness of treatment measures for otodectosis, sarcoptosis and demodectosis in dogs
Кіптенко А. В., Богач М. В. Поширення ектопаразитів серед собак різних популяцій у Харківському регіоні	176	Kiptenko A., Bogach M. V. Distribution of ectoparasites among dogs of different populations in the Kharkiv region
Передера О. О., Передера Р. В., Лаврінченко І. В., Петренко М. О. Ефективність використання зовнішніх лікувальних засобів за дерматитів собак, викликаних грибами роду <i>Trichophyton</i>	181	Peredera O., Peredera R., Lavrinenko I., Petrenko M. The effectiveness of using external therapeutic means for dog dermatitis caused by fungi of the <i>Trichophyton</i> genus
Білий Д. Д., Супруненко О. О. Діагностика лімфому у котів: короткий огляд проблеми	188	Bilyi D., Suprunenko O. O. Diagnosis of lymphoma in cats: a brief overview of the problem
Галатюк О. Є., Ткачівський С. П., Романишина Т. О., Лахман А. Р., Бегас В. Л. Клінічні, гематологічні та візуалізаційні маркери імунозапальної відповіді за коронавірусної інфекції у котів	193	Galatiuk O., Tkachyvskiy S., Romanishina T., Lakhman A., Behas V. Clinical, hematological, and imaging markers of immune-inflammatory response in Feline Coronavirus Infection
Дережа Ю. Ф. Лікування свійських котів за панкреатиту	201	Dereza Yu. Treatment of domestic cats with pancreatitis
Камбур М. Д., Лівощенко Є. М. Вплив зміни процесів дихання на еритропоез у молодняка жуйних тварин	207	Kambur M., Livoshchenko Ye. Influence of changes in respiratory processes on erythropoiesis in young ruminants
Климась А. Р., Сими́тко О. А. Діагностика хвороб копитець у корів	212	Klymas A., Simitko O. A. Cow hoof diseases' diagnostics
Криворученко Д. О., Євстаф'єва В. О. Вплив збудників гельмінтозів травного тракту на біохімічні показники сироватки собак за моно- та мікстинвазій	219	Kryvoruchenko D., Yevstafiev V. Influence of causatives of germintoses of the digestive tract on biochemical indicators of serum of dogs with mono- and myxed invasions
Волобоєва У. І., Білий Д. Д. Клінічна оцінка ефективності пломбування зубів у собак	224	Voloboieva U., Bilyi D. Clinical evaluation of the effectiveness of dental fillings in dogs
Булавина В. С., Яценко І. В., Руднева К. Є., Нікіфорова О. В., Мазанний О. В., Колобнєв Р. С., Козакова Н. О., Єфімов В. В. Алгоритм проведення комплексної судової ветеринарної із дослідження сильнодіючих та отруйних речовин експертизи за отруєння тварин ізоніазидом	231	Bulavina V., Yatsenko I., Rudnieva K., Nikiforova O., Mazanniy O., Kolobniev R., Kozakova N., Yefimov V. Algorithm for conducting a comprehensive forensic veterinary examination with the study of potential and toxic substances for isoniazid poisoning in animals
Година В. П., Михайлютенко С. М. Особливості сезонної динаміки еймеріозу курей	236	Hodyna V., Mykhailiutenko S. Features of seasonal dynamics of eimeriosis in chickens
Ковальчук Ю. В., Гуральська С. В., Кот Т. Ф., Гришук Г. П., Євтух Л. Г. Історія розвитку хірургічних інструментів: з доісторичних часів до сьогодення	242	Kovalchuk Y., Hural'ska S., Kot T., Hryshchuk H., Yevtukh L. History of the development of surgical instruments: from prehistoric times to the present day
Первий А. О. Особливості копроовоскопічної лабораторної діагностики токсакарозу котів	249	Perviy A. Features of coproovoscopic laboratory diagnostics of toxocarosis in cats
Климась І. І. Поширення піодермій у собак у місті Полтава	255	Klymas I. Prevalence of pyoderma in dogs in the city of Poltava
Полях Л. В., Замазій А. А., Камбур М. Д., Мельничук В. В. Поширення патологій ока у собак породи сибірський хаскі та характеристика окремих показників кровоносного русла за наявності новоутворень в ділянці зорового аналізатора	261	Polyakh L., Zamazyi A. A., Kambur M., Melnychuk V. Prevalence of eye pathologies in Siberian Husky dogs and characteristics of individual blood vessel parameters in the presence of neoplasms in the visual analyzer area
Технічні науки	266	Technical sciences
Арендаренко В. М., Харак Р. М., Семенов А. О., Самойленко Т. В. Про ударну взаємодію падаючої зернівки кукурудзи на бетонне дно силосу	266	Arendarenko V., Kharak R., Semenov A., Samoilenko T. On the impact interaction of a falling corn kernel on the concrete bottom of a silo
Лапенко Г. О., Горбенко О. В., Лапенко Т. Г., Колотій С. Ю. Розробка біопаливного котла для сушіння зерна за використанням біомаси	271	Lapenko H., Gorbenko O., Lapenko T., Kolotii S. Development of a biomass-fueled boiler for grain drying applications
Падалка В. В., Горбенко О. В., Чумак М. В. Обґрунтування методики технічних вимірювань з елементами мехатроніки в біологічних процесах	277	Padalka V., Gorbenko O., Chumak M. Justification of the methodology of technical measurements with elements of mechatronics in biological processes

Development of a biomass-fueled boiler for grain drying applications

H. Lapenko | O. Gorbenko✉ | T. Lapenko | S. Kolotii

Article info

Correspondence Author

O. Gorbenko

E-mail:

oleksandr.gorbenko@pdau.edu.ua

Poltava State Agrarian

University,

Skovoroda Str., 1/3,

Poltava, 36000, Ukraine

Citation: Lapenko, H., Gorbenko, O., Lapenko, T., & Kolotii, S. (2025). Development of a biomass-fueled boiler for grain drying applications. *Scientific Progress & Innovations*, 28 (2), 271–276. doi: 10.31210/spi2025.28.02.43

The article presents the results of research and development of an energy-efficient biomass-fired boiler designed for grain drying using locally available types of biomass as an alternative energy source. The relevance of implementing bioenergy technologies in agricultural production is substantiated, taking into account the rising cost of fossil fuels and the growing need for environmental sustainability in the agrarian sector. A comparative analysis of modern grain dryers has been conducted, highlighting their design features, advantages, and limitations in the context of biomass utilization. A boiler design has been developed, incorporating a two-section tubular recuperative heat exchanger, an automated fuel feeding system, and a multi-stage fan-driven air circulation mechanism. A distinctive feature of the proposed model is the use of high-temperature-resistant AISI 310S stainless steel in the combustion chamber, which ensures increased resistance to thermal stress, slag formation, and soot buildup. An air recirculation system for the drying chamber is also proposed to enhance the overall energy efficiency. Based on the proposed design, experimental thermal modeling was carried out. The results were generalized as temperature dependencies under various biomass feed rates. The obtained graphs and tabulated data confirm the system's predictable response to parameter changes, which is critical for automated process control and achieving high-quality grain treatment. Mathematical modeling of thermal regimes confirmed a high degree of correlation ($R = 0.95$) between the biomass feed rate and the temperature of air supplied to the dryer, as well as operational stability across a wide load range. The findings indicate that implementing such a boiler in agricultural practice can significantly reduce energy consumption, lower harmful emissions, and improve the autonomy of farming enterprises. The proposed technical solution offers a promising direction for modernizing grain drying equipment under current agricultural production conditions.

Keywords: biomass boiler, grain drying, biomass, grain dryer, energy efficiency.

Розробка біопаливного котла для сушіння зерна з використанням біомаси

Г. О. Лапенко | О. В. Горбенко | Т. Г. Лапенко | С. Ю. Колотій

Полтавський державний
аграрний університет,
м. Полтава, Україна

У статті представлено результати дослідження та розробки енергоефективного біопаливного котла, призначеного для сушіння зерна із застосуванням місцевих видів біомаси, як альтернативного джерела енергії. Обґрунтовано актуальність впровадження біоенергетичних технологій у сільськогосподарське виробництво з огляду на зростання цін на викопні енергоносії та потребу в екологізації аграрної сфери. Проведено порівняльний аналіз сучасних зерносушильних установок, визначено їх конструктивні особливості, переваги та обмеження при використанні біопалива. Розроблено конструкцію біопаливного котла з двосекційним трубчастим рекуперативним теплообмінником, системою автоматизованої подачі палива та багатоступеневим вентиляторним забезпеченням циркуляції повітря. Особливістю запропонованої моделі є використання жароміцної нержавіючої сталі AISI 310S у топковому відділенні, що забезпечує підвищену стійкість до теплових навантажень, шлакоутворення та сажових відкладень. Запропоновано схему з рециркуляцією сушильного повітря для підвищення енергоефективності процесу. На базі розробленої системи було виконано експериментальне моделювання теплових режимів, результати якого узагальнено у вигляді температурних залежностей для різних режимів подачі біопалива. Графіки та табличні дані свідчать про передбачувану реакцію системи на зміну параметрів, що є критично важливим для автоматизованого управління сушильним процесом та досягнення високої якості обробки зерна. Математичне моделювання температурних режимів підтвердило високий ступінь кореляції між кількістю поданого біопалива та температурою повітря, що надходить до сушильної установки ($R = 0.95$), а також стабільність роботи системи в широкому діапазоні навантажень. Результати аналізу демонструють, що впровадження такого котла у виробничу практику дозволяє знизити енергоспоживання, зменшити шкідливі викиди в атмосферу та підвищити рівень автономності аграрного підприємства. Запропоноване технічне рішення є перспективним напрямом модернізації зерносушильного обладнання в умовах сучасного агропробудництва.

Ключові слова: біопаливний котел, сушіння зерна, біомаса, зерносушарка, енергоефективність.

Бібліографічний опис для цитування: Лапенко Г. О., Горбенко О. В., Лапенко Т. Г., Колотій С. Ю. Розробка біопаливного котла для сушіння зерна з використанням біомаси. *Scientific Progress & Innovations*. 2025. № 28 (2). С. 271–276.

Introduction

In the current context of a global energy crisis and increasing environmental pressure, the use of renewable energy sources, particularly biomass, is gaining special relevance. Biomass is considered one of the most promising types of environmentally friendly fuel [1, 2], enabling a reduction in dependence on fossil energy sources and a significant decrease in greenhouse gas emissions. The use of biofuels in the agricultural sector, especially for grain drying [3–5], creates opportunities to improve the energy efficiency of agricultural production.

The issue of developing effective biomass-based energy systems for agricultural needs is actively explored in global scientific literature. Researchers from the EU, USA, China, and India are devoting considerable attention to the creation of high-efficiency biomass boilers adapted to local raw materials and capable of providing stable thermal and energy support for agricultural processes.

In works [6, 7], the author considers biomass as a universal energy source, paying particular attention to its thermochemical properties, availability, and potential to replace fossil fuels. The study systematizes data on various types of biomass, including agricultural residues, wood, and energy crops, analyzing their calorific value, moisture content, and other parameters that influence combustion efficiency. The importance of adapting combustion technologies to specific types of biomass is also emphasized, taking into account their physicochemical characteristics. This analysis supports the conclusion that effective biomass utilization requires the development of specialized boilers capable of providing stable combustion with minimal emissions. In the context of grain drying, these findings are highly relevant, as they offer a theoretical foundation for selecting appropriate biomass types and determining optimal conditions for their application in energy systems.

A series of scientific works [8, 9] provides a detailed analysis of various biomass-to-energy conversion methods, including thermochemical and biochemical processes. The author explores the advantages and limitations of each approach, as well as their suitability for different biomass types. Special emphasis is placed on the importance of biomass pretreatment, such as drying and grinding, to ensure efficient combustion. The necessity of developing systems that can adapt to the variable properties of biomass is also highlighted, which is particularly relevant for agricultural residues.

In work [10], the operating principle and design features of circulating fluidized bed (CFB) boilers are described in detail. These boilers are characterized by high combustion efficiency and the ability to operate with various types of fuel, including biomass. This technology enables a uniform temperature distribution within the combustion zone, promoting complete fuel combustion and reducing harmful emissions. The author also notes that CFB boilers offer high flexibility in fuel selection, which is a significant advantage when utilizing diverse types of biomass. Consequently, this can ensure a stable and efficient heat supply by using locally available agricultural residues as fuel.

One of the key technical challenges associated with biomass combustion in boilers is slagging, the formation and accumulation of solid deposits on combustion and heat exchange surfaces. This phenomenon is caused by the high content of ash, potassium, chlorine, and silicon in many types of biomass, particularly in agricultural residues such as straw, husks, or branches. At high temperatures, these elements react to form molten and agglomerated ash particles, which result in slag build-up.

Studies [11–13] emphasize that slagging not only reduces the thermal efficiency of boilers but also leads to equipment damage, shorter maintenance intervals, and increased operational costs. These works examine the mineralogical composition of biomass ash and demonstrate that the ash melting temperature is a critical parameter for assessing slagging risks.

Modern approaches to addressing the problem include optimizing the design of the furnace section, applying additives that increase ash melting temperatures, and pre-treating biomass to reduce the content of aggressive elements. The issue of slag formation is especially relevant for small-scale boilers used in agriculture, as they often have limited capabilities for automatic cleaning of heat exchange surfaces.

Currently, the domestic agricultural sector, especially under conditions of constantly rising energy prices and the decentralization of energy supply, requires the implementation of innovative solutions to ensure the energy independence of farming enterprises. Grain drying is a critical stage of post-harvest processing that requires significant energy input. The development of a biomass-fired boiler that efficiently utilizes locally available biomass can not only reduce energy costs but also create a closed-loop energy system within the farm.

Thus, the relevance of this study is driven by the need for energy-efficient, environmentally friendly, and economically viable technologies in the agricultural sector.

The aim of the study

The aim of this research is to design and justify the construction of a biomass boiler optimized for grain drying using accessible biomass as a fuel source.

Materials and methods

As part of this study, the authors conducted a comprehensive analysis of existing grain dryer designs, both domestic and international. The main focus was placed on techno-economic efficiency, energy consumption, and the potential for integrating alternative energy sources, particularly biomass. Based on the obtained data, the optimal type of drying equipment was selected to suit the conditions of the enterprise LLC “Agrotechservice” (Reshetylivka, Ukraine).

The outcome of the research was the development of a biomass boiler design adapted for efficient grain drying. The technical configuration of the boiler includes a combustion chamber with a grate made of heat-resistant AISI 310S steel, a system of screw conveyors for biomass feeding, a two-section recuperative tubular heat exchanger, forced-draft and air supply fans, a hot air

recirculation system, and sensor-based control of thermal process parameters. The methodology involved experimental testing of the boiler under real agricultural production conditions using various biomass mixtures. The analysis of thermal performance made it possible to assess the impact of temperature fluctuations on heat transfer, slagging behavior, and the durability of the boiler's key structural components.

Results and discussion

According to the analysis [14–17], the core principle of grain drying involves heat supply, moisture migration from the inner layers of the grain to its surface, and subsequent removal of that moisture. Modular grain dryers that utilize the convective drying method have proven to be the most suitable for integration with biomass heat generators. In such systems, hot air or flue gases penetrate the intergranular space, intensifying the drying process.

Based on the technical assessment of existing equipment, an original biomass boiler design [18] was proposed to meet the needs of LLC “Agrotechservice” (Reshetylivka, Ukraine). A key factor in the system's efficiency is its ability to regulate the temperature of the flue gases and air supplied to the dryer in accordance with changes in biomass feed rate.

The proposed biomass boiler design (*Fig. 1*), intended for grain drying, implements a modern approach to the use of renewable energy sources. At its core is a combustion chamber (item 15), equipped with a grate containing air channels (item 14) and a frame made of heat-resistant austenitic stainless steel AISI 310S, which ensures long-term operation and resistance to high-temperature loads.

The biomass is fed from the hopper (item 11) using two screw conveyors (item 12), which transport the fuel directly into the combustion chamber. There, it is activated by air streams generated by fans (item 13) passing through the perforated base, ensuring uniform combustion.

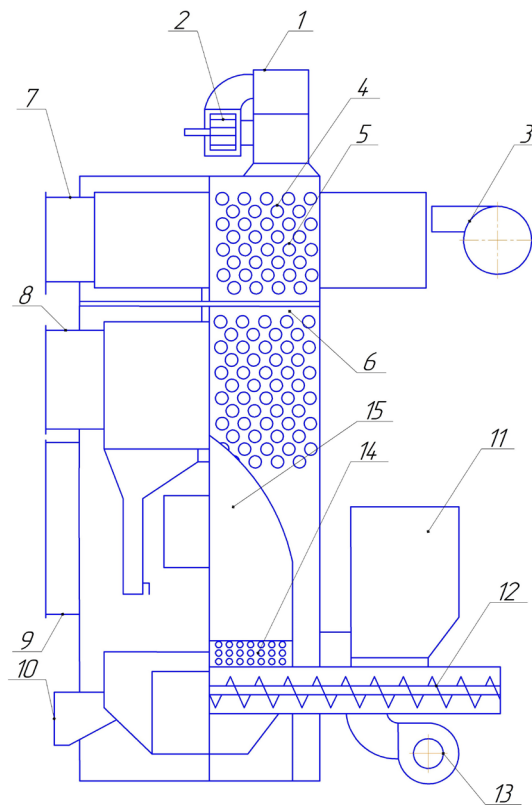


Fig. 1. Design of a biomass-fired boiler for grain drying

Above the combustion chamber, two heat exchange units are positioned – the upper section (item 4) and the lower section (item 6) – which together form a tubular recuperative system. Both sections consist of sets of seamless tubes (item 5) arranged in a staggered pattern to maximize heat transfer. The sections are connected in series via an air duct, enabling efficient thermal energy transfer from the flue gases.

To minimize heat losses, the outer surfaces of the heat exchanger are covered with thermal insulation. Exhaust gases are discharged through a flue (item 1) equipped with an extraction fan (item 2), which ensures stable gas removal.

The heat exchange system is enhanced by a bypass fan (item 3), which forces air into the inter-tubular space, where it is heated by the external tube surfaces and then delivered to the drying chamber via an air duct (item 7). The lower section of the heat exchanger also receives air from the recirculation channel (item 9), which originates from the dryer. This reduces the boiler load due to the preheated air.

For maintenance, the combustion chamber is equipped with convenient hinged doors (item 10) that provide access for cleaning and ash removal. Temperature control and heat exchange management are carried out

using a modern sensor-based system and programmable electromechanical devices.

The biomass-fired boiler for grain drying operates in automatic mode, ensuring stable heat generation through regulated fuel and air supply. At the initial stage, an ignition mass of fuel is manually placed into the combustion chamber (item 15) to initiate the combustion process. Once stable combustion is achieved, the screw conveyors (item 12) and fans (item 13) are activated, continuously delivering biomass from the hopper (item 11) into the combustion zone.

Once inside the combustion chamber, the biomass is activated by air flows through the grates (item 14), where it undergoes phased combustion, generating thermal energy and flue gases. The combustion intensity and gas temperature are controlled by adjusting the amount of fuel and air supplied, allowing the thermal output to be tailored to the requirements of the drying process.

Temperature fluctuations caused by variations in biomass quality can create thermal stress on furnace components [19, 20]. However, the use of AISI 310S steel provides high heat resistance, resistance to soot deposition, and ensures the durability of the boiler structure.

Studies on structural steels, including domestic heat-resistant grades 10Kh23N18 and 20Kh23N18, as well as the low-carbon high-alloy chromium-nickel steel AISI 310S, have led to the following conclusions:

1. For the production of combustion chamber components in biomass-fired boilers operating under conditions of anticipated corrosion, it is advisable to use AISI 310S steel. According to ASTM A240, this steel contains approximately 26 % chromium, up to 22 % nickel, and no more than 0.03 % sulfur, which ensures the retention of mechanical strength at elevated temperatures.

Additionally, this steel offers good weldability, and its recommended working temperature is up to 1000°C.

2. Compared to domestic steel grades, AISI 310S provides a longer service life and improved reliability of boiler components used for biomass combustion.

3. The conducted analysis of boiler elements confirmed the appropriateness of the selected material, while also minimizing the formation of carbon deposits on wall openings during operation.

Under the influence of forced airflow, the flue gases are directed through the flue channel to the lower section of the heat exchanger (item 6), where heat transfer occurs via contact with the inner walls of the tubes (item 5). The cooled gases are then directed to the upper section (item 4), which provides additional heat extraction.

Due to increased resistance within the heat exchange system, the velocity of gas flow decreases. To prevent stagnation zones, the extraction fan (item 2) is activated to discharge the gases through the chimney (item 1).

Simultaneously, air is forced into the inter-tubular space of the heat exchanger by fans (items 3 and 9), ensuring efficient heat transfer from the outer surfaces of the tubes and the furnace structure. The resulting hot air is delivered to the drying chamber through air ducts (items 7 and 8). After passing through the dryer, part of the heated air is returned via the recirculation channel (item 9) to the heat exchanger, reducing fuel consumption by reusing thermal energy.

Upon completion of the drying cycle, fuel supply is stopped, the fans are gradually shut down, and remaining fuel residues and ash deposits are removed via the access doors (item 10). If necessary, the grate is cleaned of soot to maintain high equipment efficiency.

Fig. 2 presents the results of temperature modeling during biomass combustion in the proposed boiler.

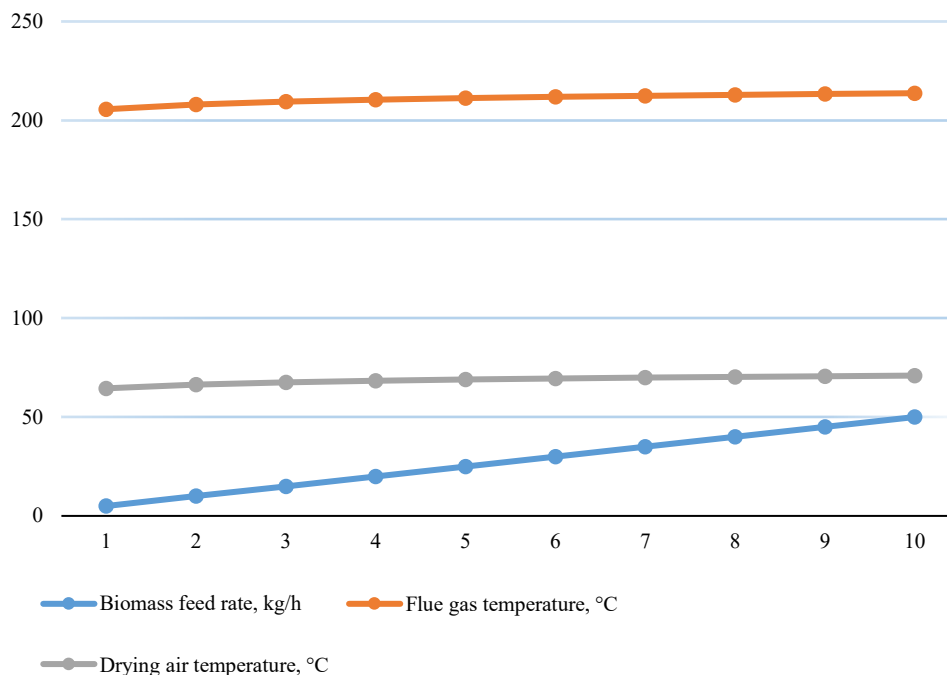


Fig. 2. Simulation results of temperatures during biomass combustion in the proposed boiler

To evaluate the performance efficiency of the biomass-fired boiler for grain drying, a mathematical

analysis was conducted to determine the relationship between the temperature of the air supplied to the drying

chamber and the intensity of biomass feed. The simulation results showed a clear upward trend in air temperature as the fuel feed rate increased. The average air temperature was 68,74 °C, and the median was 69,27 °C, indicating an approximately symmetrical distribution of temperature values. Temperature fluctuations ranged from 64,51 °C to 70,95 °C, demonstrating stable system operation with limited variability (standard deviation of only 2,05 °C).

The constructed linear regression model revealed a strong correlation between the variables: the correlation coefficient R was 0.95, indicating a very strong linear relationship between fuel feed rate and air temperature. A low p-value ($2,3 \times 10^{-5}$) confirms the statistical significance of this correlation. These findings demonstrate the reliability and predictability of the boiler's thermal performance, allowing precise control of the drying process and optimized fuel consumption according to technological requirements.

Conclusions

1. The study substantiates the feasibility of using biomass as an alternative energy source for grain drying equipment, significantly reducing the energy dependence of agricultural enterprises on traditional fossil fuels.

2. Based on a technical analysis of existing grain dryers, an innovative biomass boiler design with a tubular recuperative heat exchanger was developed. This design ensures efficient utilization of combustion heat and enables air recirculation.

3. The proposed system features automatic regulation of biomass and air supply, taking into account the temperature and humidity of the grain and the air environment, which ensures stable heat generation and adaptability of the drying process to changing conditions.

4. Mathematical modeling revealed a strong linear correlation ($R = 0.95$) between biomass feed rate and drying air temperature, confirming the effectiveness of thermal control in the system.

5. The use of heat-resistant steel (AISI 310S) in the design of the combustion chamber improves thermal stability, reduces the risk of deformation, and contributes to the long-term safe operation of the equipment.

6. The developed biomass boiler can be implemented in domestic agricultural practice as an effective, environmentally friendly, and economically viable solution for energy-efficient grain drying.

Prospects for further research include optimizing the geometric parameters of the heat exchanger to improve heat recovery efficiency. Future studies will also focus on slag formation processes for different biomass types to develop furnace designs resistant to aggressive environments. Additionally, the implementation of an intelligent control system based on real-time thermodynamic parameter forecasting is considered advisable.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

References

- Lyashenko, S., Gorbenko, O., Kelemesh, A., Kalinichenko, A., Stebila, J., & Patyka, V. (2022). Non-Waste Technology for Utilization of Tree Branches. *Applied Sciences*, 12 (17), 8871. <https://doi.org/10.3390/app12178871>
- Castro, L. E. N., Sganzerla, W. G., Matheus, L. R., Mançano, R. R., Ferreira, V. C., Barroso, T. L. C. T., da Rosa, R. G., & Colpini, L. M. S. (2023). Application of brewers' spent grains as an alternative biomass for renewable energy generation in a boiler combustion process. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 4, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.scsenv.2023.100039>
- Gorbenko, O., Lapenko, H., Lapenko, T., & Kolotii, S. (2025). Determination on energy efficiency in corn grain drying. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (1(82)), 45–49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326080>
- Heletukha, H. H., Zheliezna, T. A., & Drozdova, O. I. (2014). *Enerhetychnyi ta ekolohichniy analiz tekhnolohii vyrobnytstva enerhii z biomasy: Analitichna zapyska BAU № 8*. Kyiv: Bioenerhetychna asotsiatsiia Ukrainy. Retrieved from: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-8-ua.pdf> [in Ukrainian]
- Jafarsalehi, M., Mashayekh, M., Miranzadeh, M. bagher, Mirzaei, N., & Ebrahimi, M. (2025). Primary measures for cleaner biomass combustion to reduce NOx: A narrative review on solid biomass fuels, NOx sources, small-scale boilers, axillary equipment, fuel management and fuel quality improvement. *Fuel*, 396, 134891. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134891>
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42 (11), 1357–1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)
- Demirbaş, A. (2017). The social, economic, and environmental importance of biofuels in the future. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 12 (1), 47–55. <https://doi.org/10.1080/15567249.2014.966926>
- McKendry, P. (2002a). Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83 (1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- McKendry, P. (2002b). Energy production from biomass (Part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83 (1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)
- Basu, P. (2013). *Circulating fluidized bed boilers: Design and operations*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5375-0>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27 (6), 653–669. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>
- Qiu, T., Yu, W., Zhu, Y., Wang, X., & Yang, T. (2025). Initial layer-induced slagging characteristics of a biomass-fired grate boiler: A combined experimental and simulation study. *Journal of the Energy Institute*, 120, 102094. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.102094>
- Sekyere, C. K. K., Opoku, R., Asaaga, B., Baah, B., Andoh, P. Y., Obeng, G. Y., & Agbogla, J. (2025). Techno-environmental assessment of the fuel properties of a variety of briquettes for biomass boiler applications. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100185. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100185>
- Kravchuk, V., Zanko, M., & Lisak, O. (2018). Modular zemosuskarki on the market of Ukraine. *Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine*, 22 (36), 73–83. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2018-1-22\(36\)-73-83](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2018-1-22(36)-73-83)
- Paziuk V. (2021). Modern approaches to the solution of the problem of increasing the energy efficiency of seed grain drying. *Vidnovluyana Energetika*, 4 (67), 90–99. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).90-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).90-99)
- Mondal, M. H. T., & Sarker, M. S. H. (2024). Comprehensive energy analysis and environmental sustainability of industrial grain drying. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114442. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114442>

17. Wang, G., Wu, W., Xu, W., Xu, Y., Zhang, Y., & Fu, D. (2022). Exergy analysis of an electric grain drying system with internal circulation of the drying medium of corn. *International Journal of Exergy*, 37 (1), 102. <https://doi.org/10.1504/ijex.2022.120127>
18. Kolotii, V. I., Kolotii, Yu. V., Kolotii, S. Yu., Horbenko, O. V., Lapenko, H. O., & Lapenko, T. H. (2024). Patent № 157019 UA. *Biopalyvnyi kotel dlia sushinnia zerna*. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1816091/> [in Ukrainian]
19. Vainio, E., Ruozzi, A., Kinnunen, H., Laurén, T., & Hupa, L. (2024). Low-temperature corrosion in a BFB boiler firing biomass and waste streams – Online measurement technique for monitoring deposit corrosivity. *Fuel*, 371, 131864. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131864>
20. Wei, L., Wang, S., Liu, G., Hao, W., Liang, K., Yang, X., & Diao, W. (2022). Corrosion Behavior of High-Cr–Ni Materials in Biomass Incineration Atmospheres. *ACS Omega*, 7(25), 21546–21553. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01223>

ORCID

H. Lapenko 	https://orcid.org/0000-0003-1435-5307
O. Gorbenko 	https://orcid.org/0000-0003-2473-0801
T. Lapenko 	https://orcid.org/0000-0001-8055-6698
S. Kolotii 	https://orcid.org/0009-0002-1768-3111



2025 Lapenko H. et al. This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.