

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.74>

УДК 536.24:536.423

CFD-моделювання сепарації пари в барабан-сепараторі котла типу ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ)

Баранюк Олександр Володимирович^{1,2)}

Канд. техніч. наук, доцент каф. Теплової та Альтернативної енергетики

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>; olexandr.baranyuk@gmail.com. Scopus Author ID: 57201024575

Черноусенко Ольга Юрійвна¹⁾

Д-р техніч. наук, професор, завідувач каф. Теплової та Альтернативної енергетики

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>; chernousenko20a@gmail.com. Scopus Author ID: 57222080457

Рачинський Артур Юрійович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент каф. Теплової та Альтернативної енергетики

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>; arturrachinskiy@gmail.com. Scopus Author ID: 57190884322

¹⁾ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Берестейській, 37. Київ, 03056, Україна

²⁾ Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України вул. Андріївська, 19

Київ, 04070, Україна

АНОТАЦІЯ

Процеси, що супроводжують випаровування, мають складну фізичну природу. Їх характеризує сильна нелінійність як у динаміці, так і у взаємозв'язках термофізичних властивостей робочого середовища. Ключові параметри, такі як ступінь перегріву чи локальна швидкість пароутворення, є важкими для точного вимірювання та прогнозування. Ці складності обумовлюють високі вимоги до точності чисельного моделювання та обґрунтованого вибору математичних моделей, які здатні відтворити основні фізичні механізми пароутворення в умовах природної циркуляції. В роботі представлені результати дослідження процесу сепарації водяної пари в просторі комп'ютерної моделі барабан-сепаратора котельного агрегату ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ), що виконана за допомогою програми ANSYS Student, що є безкоштовною (з 2015 року) і призначеною для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі. В якості граничних умов задавалися значення швидкості руху пароводяної суміші, що надходить з екранних труб котла типу ГМ-50-1. Об'єкт дослідження – це процеси теплообміну і гідродинаміки, що мають місце при випаровуванні пароводяної суміші в трубах, що екранують стінки паливни котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) і при її сепарації в барабан-сепараторі цього котла. Предметом дослідження є термодинамічні параметри пароводяної суміші в контурі природної циркуляції котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Моделювання дозволило визначити витрата робочого тіла в кип'ятільних трубах котла і розташування «дзеркала випаровування» в його барабан-сепараторі, що є критичним для його функціонування. Оскільки експериментальних даних щодо значень паровмісту немає для оцінки адекватності моделі керувались вимогами експлуатації таких барабанів.

Результати верифікації свідчать, що значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємному паровмісту, що визначений за аналітичною методикою знаходяться в межах від 9 до 18 %. Такий результат викликаний як припущеннями аналітичної методики так і обмеженнями студентської версії ANSYS. В будь-якому випадку моделювання дозволило проаналізувати динаміки генерації пари кип'ятільних трубах контуру природної циркуляції котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) в умовах нерівномірності поля температур на бічних стінках котла і визначити параметри пароводяної суміші на виході з кип'ятільних труб.

Ключові слова: випаровування; природна циркуляція; конвективне кипіння; паливня; котел

Актуальність. Відомо, що ефективність роботи котлоагрегату загалом визначається якістю водяної пари, яку він генерує. Ключовим чинником, що впливає на ці показники, є теплообмін у паливни котла, який визначає умови пароутворення у водяному контурі. Важливість цього функціонального зв'язку підтверджується численними науковими та технічними джерелами, що підкреслює його доцільність і практичну значущість для забезпечення стабільної та ефективної роботи котлоагрегату.

Аналіз літературних джерел [1–7] свідчить, що ключовим фактором процесу випаровування є температура поверхні теплообміну, яка визначає величину теплового потоку від рідкої до парової фази. Під дією сили Архімеда гарячі шари рідини або пари піднімаються вгору, тоді як холодні шари опускаються донизу, формуючи стійкий вільно-конвективний потік. Такий механізм забезпечує ефективне відведення тепла та підтримання процесу випаровування, що особливо важливо для систем з природною циркуляцією теплоносія, зокрема котлоагрегатів із барабан-сепаратором.

На основі праць [1–7] сформульовано методичні рекомендації щодо моделювання процесів випаровування при вільно-конвективному русі рідини. Це дозволяє сформулювати

підхід до вирішення складної інженерної задачі – CFD-моделювання природної циркуляції в контурі котла типу ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) із використанням студентської версії ANSYS Fluent. У наявній літературі подібні розрахунки практично не представлені, що зумовлює актуальність та новизну даної роботи.

Метою дослідження є визначення параметрів пароводяної суміші яка з труб, що екранують стінки паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ), потрапляє в його барабан-сепаратор для подальшого визначення висоти розташування дзеркала випаровування в барабані -сепараторі котла ГМ-50-1 оскільки від цього залежить сольовий баланс в котлоагрегаті.

Енергетика відіграє ключову роль у забезпеченні стабільного розвитку України. Основу промислового енергетичного комплексу складають теплові електростанції, об'єднані у великі енергосистеми. Більшість із них – це паротурбінні установки, що працюють на водяній парі, яка утворюється в потужних парових котлах шляхом спалювання органічного палива.

На теплових електростанціях України широко застосовуються водогрійні котли пікового навантаження, серед яких поширеними є парові котли з природною циркуляцією, паропродуктивністю 48 т/год, температурою та тиском перегрітої пари відповідно 435 °С і 4,1 МПа без проміжного перегріву. Прикладом такого обладнання є котел типу Е-50-4-435Г (ГМ-50-1). Ці котли значною мірою відпрацювали свій ресурс, тому виникає необхідність обґрунтованого продовження їх експлуатації. Для цього важливо визначити найбільш навантажені та критичні елементи конструкції, що мають першочергове значення для забезпечення надійності й безпеки експлуатації.

Котел Е-50-4-435Г призначений для генерації пари з параметрами: тиск – 4,1 МПа, температура перегрітої пари – 435 °С, паропродуктивність – 48 кг/с. Живильна вода з температурою 160 °С подається у водяний економайзер, де нагрівається до температури насичення (254,5 °С) шляхом утилізації теплоти відхідних газів. Економайзер виконано у вигляді змієвикової поверхні нагріву, розміщеної у конвективній шахті. Шахове компонування труб з газового боку сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі, що дозволяє зменшити площу поверхні нагріву.

Підігріта до температури насичення вода надходить у барабан, до якого під'єднані опускні та підйомні (екранні) труби. У барабан-сепараторі відбувається розділення парової та рідкої фаз. Рідина рухається по опускних трубах до нижнього колектору, а потім по підйомних екранних трубах знову надходить до барабан-сепаратора. Така циркуляція відбувається завдяки різниці густин у підйомних і опускних трубах: у підйомних трубах середовище нагрівається димовими газами, тому має меншу густину порівняно з холоднішим середовищем в опускних трубах. Внаслідок цього виникає циркуляційний напір, який забезпечує природний рух теплоносія.

Контроль за солемістом робочого тіла здійснюється за схемою двоступеневого випаровування із застосуванням виносного циклону. Отримана насичена пара з барабан-сепаратора надходить у пароперегрівач, де перегрівается до 435 °С. Пароперегрівач складається з двох пучків – холодного та гарячого, між якими розміщено пароохолоджувач. Останній дозволяє регулювати температуру перегрітої пари шляхом охолодження живильною водою.

З огляду на викладене, барабан-сепаратор є найбільш навантаженим і критичним елементом котлоагрегату. Він виконує ключові функції в процесі випаровування, містить значний об'єм робочого тіла, формує зону дзеркала кипіння з високими параметрами, а також є найдорожчим елементом конструкції. Вихід барабана-сепаратора з ладу неминуче призводить до зупинки всього котла, що обґрунтовує необхідність його поглибленого аналізу при оцінці технічного стану та подовженні ресурсу котлоагрегату.

Для вирішення поставленої задачі в середовищі ANSYS застосовано гібридну сітку, яка поєднує структуровану та неструктуровану частини. Структурована сітка сформована в області примезового шару, що утворюється на межі «тверде тіло – рідина». З цією метою

використано не менше 20 шарів скінчених елементів, причому кожен наступний шар має товщину, на 10 % більшу за попередній. Така градація забезпечує коректне моделювання градієнтів швидкості та температури поблизу твердих поверхонь.

Поza межами примежового шару розрахункова область апроксимується неструктурованою сіткою, щільність якої регулюється параметром Relevance Fine. Розмір елементів сітки становить $1 \cdot 10^{-3}$ м. Для об'єднання структурованої та неструктурованої сіток використано метод MultiZone, що дозволяє зберегти якість сітки при складній геометрії.

Для моделювання поведінки вологи у вигляді крапель у паровому потоці використовується модель дискретної фази (DPM — Discrete Phase Model). Краплі моделюються як сферичні частинки, розсіяні в безперервному середовищі (пара). Система ANSYS-CFX [8] дозволяє розрахувати траєкторії руху цих частинок, а також тепло- та масообмін між фазами.

Визначальними граничними умовами в даній задачі є значення витрати паро-водяної суміші, що поступає в барабан-сепаратор з труб, що екранують паливню котла, а також значення об'ємного паровмісту цієї пароводяної суміші. З-зовні корпус барабан-сепаратора теплоізолюваний, тому на його поверхні задавались адіабатичні граничні умови.

Моделі труб досліджувались послідовно, по одній, оскільки безкоштовна версія ANSYS Student для апроксимації розрахункової області дозволяє використовувати тільки 5000 чарунок. Для моделювання в середовищі ANSYS CFX теж використана гібридна сіткою, яка поєднує структуровану й неструктуровану частини. Такий підхід забезпечує точне відтворення складної геометрії та якісне моделювання примежових шарів. В цій частині задачі визначальними є наступні граничні умови: температурне поле на стінках труб, що визначає процес пароутворення води, та швидкість циркуляції в контурі котла.

Для визначення швидкості в контурі циркуляції автори задавались середніми швидкостями води на вході в труби панелі і за допомогою Нормативного методу [9] визначили залежність опору опускної частини контуру і корисного напору в підйомній ланці від витрати води на вході в опускні труби. Звідки визначена дійсна витрата робочого тіла в екранних трубах і швидкість, що в якості граничних умов на вході потоку в нижній роздатковий колектор задавалась у CFD-моделі. Таким чином, дійсна швидкість циркуляції в контурі становить 0,485 м/с.

Для визначення теплових граничних умов, автори враховували, що температурне поле стінки топки котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) значною мірою залежить від особливостей теплообміну в її об'ємі [10]. У доступній літературі відсутні достовірні експериментальні дані щодо розподілу паровмісту, швидкості та температури пароводяної суміші на виході з труб, які екранують паливню. Тому для верифікації CFD-моделі було використано аналітичний метод на основі «Норм теплового розрахунку котлів» [9]. Розподіл температур на поверхні труб обрано на основі попередніх розрахунків, наведених у роботі [10].

В якості основних результатів при розрахунках за допомогою CFD-моделі є середній об'ємний паровміст (Volume fraction) і середня швидкість пароводяної суміші (Volume Velocity). Ці дані будуть використовуватись в подальших розрахунках термонапруженого стану барабана котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Розподіл об'ємного паровмісту і швидкості пароводяної суміші вздовж труб представлено на рис. 1. Як свідчить рис. 1, об'ємний паровміст в трубах постійно зростає і на виході з труби становить 0,861. Швидкість пароводяної суміші навпаки, є майже незмінною, оскільки вода в процесі руху вздовж екранних труб випаровується і її швидкість зменшується, а пара генерується і її швидкість збільшується.

Коректність отриманих при обчислювальному експерименті даних контролювалась аналітичним розрахунком, що виконувався за допомогою Нормативного методу [9]. Це реалізована в роботі процедура верифікації моделі. Цифрами на рис. 1 позначено номери окремих ділянок труб, на яких аналітично обчислено середній об'ємний паровміст.

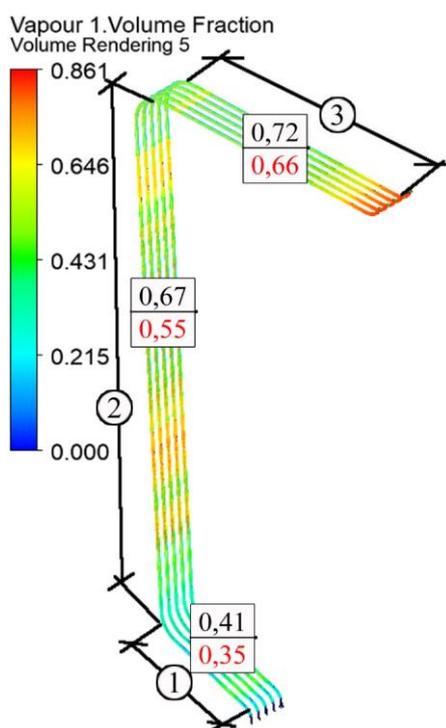


Рис. 1. Середній об'ємний паровміст в моделі труб, що екранують паливню

Числові значення середнього об'ємного паровмісту приведені на рис.1 у рамках поблизу позначення номеру ділянки чорним кольором. Червоним кольором приведені осереднені по об'єму кожної ділянки значення Vapour. Volume fraction які відповідають об'ємному паровмісту з CFD-моделі. Як свідчить рис. 1 свідчить, значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємного паровмісту, що визначений аналітично за [9] знаходяться в межах від 9 до 18 %.

Аналіз рис. 1 також свідчить, що розподіл парових пухирів по висоті кип'ятильних труб не є постійним – в області активного горіння створюються умови погіршеного теплообміну, відбувається інтенсивне випаровування води і заповнення труб паром. В області розташування циркуляційних зон димових газів з меншою температурою (в верхніх кутах паливні) створюються умови поверхневої конденсації води і ступінь сухості пари зменшується. Такі дані можна отримати тільки за допомогою комп'ютерного моделювання.

Моделювання засобами ANSYS-CFX дозволяє визначити візуально межі, де саме відбувається фазовий перехід. Результати розрахунку представити у вигляді розподілу об'ємної долі компоненту двофазної суміші внутрішньому об'ємі барабан-сепаратора. Аналіз даних рис. 2 свідчить, що нижче екватору барабана знаходиться рідина, яка по опускним трубам направляє в нижній роздатковий (роздавальний) колектор котельного агрегату. А пара, внаслідок суттєвої різниці в густині «збирається» поблизу верхніх патрубків, звідки прямує в пароперегрівач.

В нижній частині барабану скупчується рідина. З-за того, що пароводяну суміш потоком направляє в об'єм барабана (рис. 2) форма дзеркала випаровування має складну хвилясту поверхню і змінюється з часом. Як свідчить рис. 2 барабан наповнюється рідиною до свого «екватора», но (але) рівень води в ньому постійно коливається.

Таким чином, якщо пароводяна суміш подається на дзеркало випаровування як в даній задачі, то струмені двофазної суміші, яка направляє з екранних труб, створюють умови значного хвилювання поверхні, що інтенсифікує процес випаровування і знижує загальну висоту дзеркала випаровування. А як відомо, створення хвиль на поверхні дзеркала випаровування сприяє потраплянню забруднюючих частинок, які розчинені в котловій воді в пароперегрівач, а потім і в проточну частину турбіни.

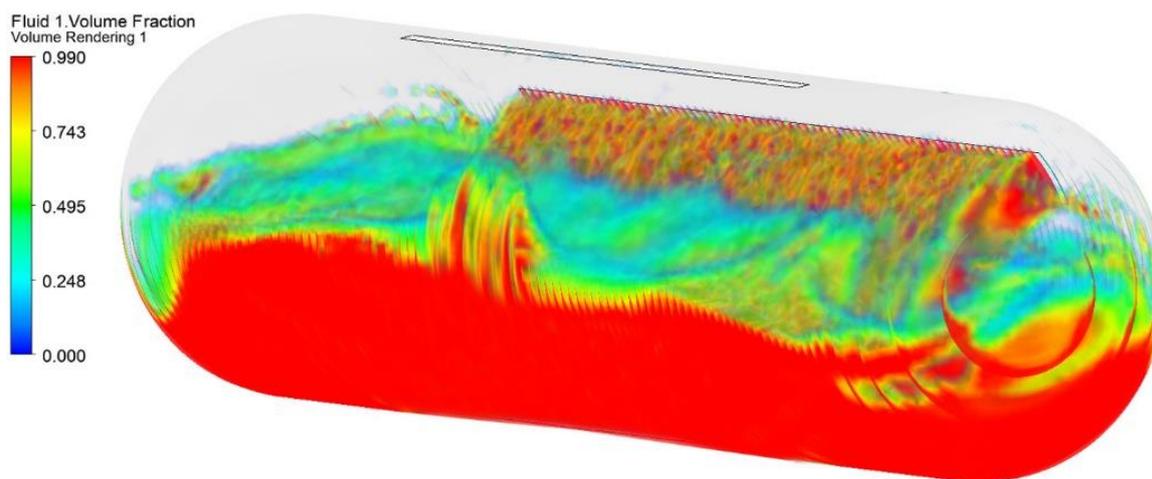


Рис. 2. Розподіл води в об'ємі барабана

Щоб цьому запобігти, в сучасних барабанах -сепараторах розташовуються дірчасті листи, під які і подається двофазна суміш з екранних труб. Ці дірчасті листи поглинають основну долю кінетичної енергії струменів і хвилювання на поверхні дзеркала випаровування не спостерігається. Створення такої моделі планується в наступних роботах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tawfeic S. R. "Boiler Drum-Level Modeling". *Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Faculty of Engineering*. 2013; 41 (5): 1812–1829. DOI: <https://doi.org/10.21608/jesaun.2013.114911>
2. Tan W., Marquez H. J., Chen T., Liu J. "Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit". *Journal of process control*. 2005; 15: 883–891. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2005.03.007>.
3. Zhang M. H., Chu K. W., Wei F., Yu A. B. "A CFD–DEM study of the cluster behavior in riser and downer reactors". *Powder Technology*. 2008; 184 (2): 151–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.036>.
4. Emara-Shabaik H.E., Habib M.A., Al-Zaharna I. "Prediction of risers tubes temperature in water tube boiler". *Applied Mathematical Modeling*. 2008; 33 (3): 1323–1336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.01.015>.
5. Нікуліна О. М., Северин В. П., Бубнов А. І., Кондратов О. М. «Розробка нелінійної моделі парогенератора АЕС для інформаційної технології оптимізації управління». *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. 2022; 1 (7): 21–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.01.04>
6. Eborn J., Åström K. J. "Modeling of a Boiler Pipe with Two-Phase Flow Instabilities". *Modelica Workshop 2000 Proceedings*. 2000. p. 79–88.
7. Tummescheit H., Eborn J., Wagner F. "Development of a Modelica base library for modeling of thermo-hydraulic systems". *Modelica 2000 Workshop Proceedings*. 2000. p. 1–13.
8. "ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide". *New-York, USA: ANSYS Inc*. 2012.
9. Кузнецов Н. В. «Тепловий розрахунок котельних агрегатів: Нормативний метод». – *Енергія*. 1973.
10. Черноусенко О. Ю., Рачинський А. Ю., Баранюк О. В. «CFD моделювання паливної котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ)». *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024; 79 (2): 138–149. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.10>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.74>

UDC 536.24:536.423

CFD-modeling of steam separation in the drum-separator of a GM-50 boiler (E-50-3.9-440GM)

Oleksandr V. Baraniuk^{1,2)}

PhD, Associate Professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>; olexandr.baranyuk@gmail.com

Olga Yu. Chernousenko¹⁾

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Heat and Alternative Power Engineering

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>; chernousenko20a@gmail.com

Arthur Yu. Rachynskiy¹⁾

PhD, Associate Professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>; arturrachynskiy@gmail.com

1) National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37, Beresteyskiy Ave. Kyiv, 03056, Ukraine

2) Institute of Thermal Energy Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 19, Andriivska Str. Kyiv, 04070, Ukraine

ABSTRACT

The processes accompanying evaporation have a complex physical nature. They are characterized by strong nonlinearity both in the dynamics and in the relationships of the thermophysical properties of the working medium. Key parameters, such as the degree of overheating or the local rate of vaporization, are difficult to accurately measure and predict. These difficulties determine the high requirements for the accuracy of numerical modeling and the justified choice of mathematical models that are able to reproduce the main physical mechanisms of vaporization under natural circulation conditions. The paper presents the results of a study of the process of water vapor separation in the space of a computer model of the drum-separator of the GM-50 boiler unit (E-50-3.9-440GM), which was performed using the ANSYS Student program, which is free (since 2015) and is intended for solving introductory and educational tasks in an academic environment. The boundary conditions were set to the values of the speed of the steam-water mixture coming from the screen tubes of the GM-50 boiler. The object of the study is the processes of heat exchange and hydrodynamics that occur during the evaporation of the steam-water mixture in the tubes that screen the walls of the GM-50 (E-50-3.9-440GM) fuel boiler and during its separation in the drum-separator of this boiler. The subject of the study is the thermodynamic parameters of the steam-water mixture in the natural circulation circuit of the GM-50 (E-50-3.9-440GM) boiler. The modeling allowed us to determine the flow rate of the working fluid in the boiler tubes and the location of the “evaporation mirror” in its drum-separator, which is critical for its functioning. Since there is no experimental data on the values of the steam content, the requirements for the operation of such drums were used to assess the adequacy of the model.

The verification results show that the deviation values of the CFD model calculations from the values of the average volumetric steam content determined by the analytical method are in the range from 9 to 18%. This result is caused by both the assumptions of the analytical method and the limitations of the student version of ANSYS. In any case, the modeling allowed us to analyze the dynamics of steam generation in the boiler tubes of the natural circulation circuit of the GM-50 boiler (E-50-3.9-440GM) in conditions of uneven temperature field on the side walls of the boiler and to determine the parameters of the steam-water mixture at the outlet of the boiler tubes.

Keywords: Evaporation; natural circulation; convective boiling; fuel plant; boiler