

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 536.24:533.6.011

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/16>

Баранюк О.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ І ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ В КОНТУРІ ПРИРОДНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ КОТЛА ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ)

У статті розглянуто проблему продовження ресурсу парових котлів теплових електростанцій, які становлять основу промислового енергетичного комплексу України. Об'єктом дослідження є котельний агрегат ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ), зокрема його барабан-сепаратор, що є найбільш технологічно складним і вартісним елементом конструкції. Представлено результати CFD-моделювання процесів генерації пари у кип'ятильних трубах та сепарації водяної пари в просторі барабана, виконаного у безкоштовній студентській версії ANSYS Student. Метою дослідження є визначення об'ємного паровмісту та швидкості пароводяної суміші на виході з екранних труб, а також висоти дзеркала випаровування в барабані, від якої залежить сольовий баланс котлоагрегату. Для верифікації CFD-моделі використано Нормативний метод розрахунку середнього об'ємного паровмісту в контурах природної циркуляції. Відхилення між результатами CFD та аналітичних розрахунків становить 9–18%, що пояснюється як спрощеннями аналітичної методики, так і обмеженнями студентської версії програмного комплексу. CFD-моделювання також дозволило візуально визначити зони фазового переходу та положення дзеркала випаровування, що є критично важливим для забезпечення надійної роботи барабан-сепаратора. Результати верифікації свідчать, що значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємного 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. Визначено, що подача пароводяної суміші на дзеркало випаровування як в даній задачі, призводить до значного хвилювання поверхні. З метою запобігання утворення хвиль на поверхні дзеркала випаровування рекомендується двофазну пароводяну суміш подавати під спеціальні конструктивні елементи барабан-сепаратора, дірчасті листи.

Ключові слова: випаровування, природна циркуляція, конвективне кипіння, паливня, котел.

Постановка проблеми. В Україні, досі працюють парові котли радянської доби які давно відпрацювали свій ресурс, але ще здатні виконувати ті задачі для яких вони були спроектовані, тому є необхідність аргументовано подовжити їх ресурс. Котел Е-50-4-435 Г або ГМ-50-1 (з природною циркуляцією паропродуктивністю 48 т/год температурою та тиском перегрітої пари відповідно 435 °С та 4,1 МПа без проміжного перегріву) є одним з таких котлів. Найбільш термонапруженою частиною котельного агрегату, яка має критичне значення для функціонування котла є його барабан-сепаратор. На термонапружений стан цієї конструкції мають суттєвий вплив процеси що в ньому відбуваються. Представлена робота при-

свячена моделюванню параметрів пароводяної суміші, що рухається в контурі циркуляції котельного агрегату ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Барабанні котли працюють за принципом природної циркуляції води, коли різниця густини води та пароводяної суміші зумовлює рух теплоносія між барабаном та нижніми розподільними колекторами через екранні труби, що охолоджують стінки топкової камери. Радіаційний теплообмін між факелом розжарених газів у паливні котла та водою в екранних трубах призводить до інтенсивного утворення бульбашок пари. Ці бульбашки, піднімаючись вгору, потрапляють у барабан, де відбувається їх відокремлення від води в умо-

© Баранюк О.В., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

вах насичення. Процеси випаровування є вкрай складними, оскільки характеризуються нелінійними зв'язками між властивостями рідини та динамікою теплообміну. До того ж ключові параметри, такі як температура перегріву чи момент висихання поверхні нагріву, важко піддаються прямому вимірюванню. Значна кількість чинників ускладнює контроль цих процесів. Зокрема, у циркуляційних контурах можуть виникати різні типи нестійкостей і коливань потоку, що негативно впливають на ефективність та безпеку роботи котлоагрегату. [2].

Розробка математичної моделі для котлів барабанного типу вимагає комбінації нелінійних рівнянь для опису випаровування у вертикальних трубах та розділення фаз у паровому барабані, як показано в [3]. Ці автори досліджували двофазний потік в середині вертикальних труб, тоді як автори [4] представили модель для прогнозування температури вертикальних труб. В роботі [5] автори якої розробили спрощену числову модель процесів випаровування всередині вертикальних труб, враховані такі двофазні режими потоку як однофазна рідина, бульбашковий потік, снірядний потік, кільцевий потік, кільцевий потік із захопленням, крапельний потік та однофазний потік пари. Проте, в моделі [5] визначаються лише температурні поля в рідинній області (рідина або двофазна суміш) та твердій області (стінка труби). У цій моделі використовуються аналітичні формули, які дозволяють розрахувати перепад тиску та розподіл коефіцієнта теплопередачі уздовж довжини труби.

У процесі теплообміну в екранних трубах барабанного котла відбувається інтенсивне утворення парових бульбашок. Їх зародження зумовлене локальним перегрівом рідини на стінках труб, після чого бульбашки, завдяки меншій густині, відриваються й підіймаються разом із потоком води. При цьому формується пароводяна суміш із широким діапазоном розмірів бульбашок. Частина дрібних бульбашок транспортується потоком угору безпосередньо в барабан, тоді як більші бульбашки схильні до коалесценції та швидшого відокремлення від рідини.

У барабані відбувається складний процес сепарації пари від води. Завдяки гравітаційному осіданню важча рідина повертається до нижньої частини барабана і далі спрямовується у циркуляційний контур, тоді як легша фракція у вигляді насиченої пари прямує до верхньої частини [5-6]. Додатково процес підсилюється завихрювачами та сепараційними елементами, що збільшують

ефективність відділення вологи. Наприклад, вертикальні циклони, що розміщені всередині барабана рядами вздовж його довжини (рис. 1). Рис. 1 свідчить, що пароводяна суміш подається тангенціально, перенаправлення пароводяної суміші здійснюється перегородками. У цьому внутрішньому розташуванні барабана очищена вода залишає вертикальні циклони вниз до низхідних труб. Пара тече вгору від циклонів до першого, а потім до другого скрубера та виводиться через вихідне сопло парового барабана.

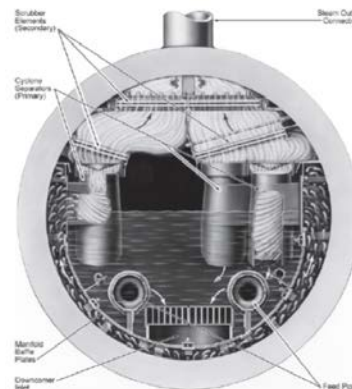


Рис. 1. Внутрішньо-корпусні пристрої парового барабана з трьома рядами циклонних сепараторів [5]

Проте створити комп'ютерну модель зображеного на рис. 1 процесу дуже складно, тому слід вдатись до аргументованого спрощення розрахункової області.

Також важливо зазначити, що швидкість потоку, розподіл температури та інтенсивність кипіння суттєво впливають на ефективність сепарації. За надмірного пароутворення можливе винесення краплин рідини разом із паром, що знижує якість пари й може призвести до гідрударів у паропроводах. Тому дослідження закономірностей руху парових бульбашок і процесів їх відокремлення в барабані є ключовим для підвищення надійності та ефективності роботи котлоагрегату. Таким чином, в даній роботі зроблена спроба моделювання контуру природної циркуляції в котлі типу ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) за допомогою студентської версії ANSYS-Fluent. В доступній літературі рішення такого роду задач не спостерігається.

Метою статті є визначення об'ємного паровмісту і швидкості пароводяної суміші на виході з труб, що екранують паливню котла ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ) та висоти розташування дзеркала випаровування в його барабан-сепараторі оскільки від цього залежить сольовий баланс в котлоагрегаті.

Метод дослідження – комп'ютерне моделювання теплових потоків спрямованих від факелу розжарених газів в паливні котельного агрегату котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) до води, що рухається і поступово випаровується в екранних трубах згаданого котельного агрегату, яка потім потрапляє у вигляді струменів пароводяної суміші в об'єм барабан-сепаратора, де відбувається відокремлення рідкої фази від газоподібної. Комп'ютерне моделювання виконувалося в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, що є абсолютно безкоштовним (з 2015 року) і призначеним для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об'єкт дослідження – це процеси теплообміну і гідродинаміки, що мають місце при вільно-конвективному русі рідини в трубах, що екранують стінки паливних котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) під час її випаровування і процеси сепарації пари від води внаслідок різниці густин всередині об'єму барабан-сепаратора котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Предмет дослідження – є термодинамічні параметри пароводяної суміші як на виході з кип'ятильних труб так і в середині барабан-сепаратора котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Розроблена модель в свою чергу дозволить отримати візуалізацію траєкторій крапель вологи в залежності від їх діаметру, що визначають деякі особливості течії пари в паровому об'ємі барабан-сепаратора, яку неможливо отримати наявними способами експериментального дослідження на працюючому обладнанні.

Виклад основного матеріалу. В якості розрахункової області вибрано три поряд розташовані труби, що екранують паливну котла ГМ-50 (рис. 2а) та фрагмент барабан сепаратора (рис. 2б), в який подають пароводяну суміш ці труби. Таку розрахункову область вибрано з врахування обмежень які діють для студентської версії ANSYS-CFX.

Чисельне моделювання теплогідродинамічних процесів у топковому просторі котла виконувалося з використанням програмного комплексу ANSYS CFX. Основну увагу було приділено відтворенню структури потоку, особливостей змішування газоповітряних струменів, формування температурного поля та зон утворення оксидів азоту.

Для апроксимації розрахункової області застосовано гібридну сітку, яка поєднує структуровані та неструктуровані елементи.

Структурована сітка використовувалася для моделювання течії у примежовому шарі, що формується на межі «тверда поверхня – робоче середо-

вище». Для коректного опису градієнтів швидкості та температури у цій зоні було сформовано не менше 20 шарів скінченних елементів, причому кожен наступний шар збільшувався на 10% відносно попереднього.

Між примежовими шарами область заповнювалася неструктурованою сіткою, густина якої регулювалася параметром Relevance Fine. Середній розмір елемента становив близько 1 мм. Для забезпечення плавного переходу між структурованою та неструктурованою зонами застосовувався метод MultiZone, що дозволяє узгодити різні топології сітки та зберегти високу якість розрахункової області.

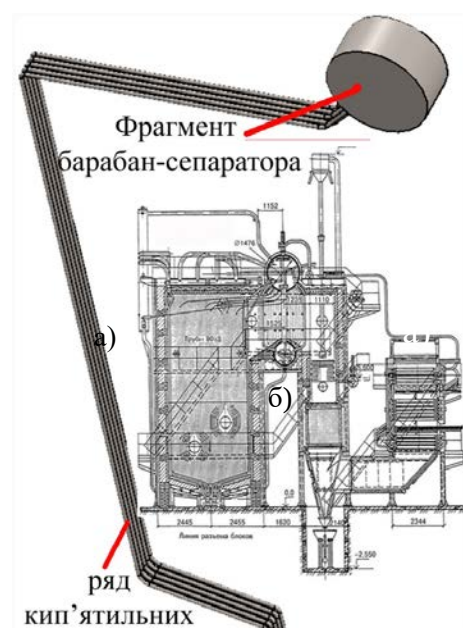


Рис. 2. Поздовжній переріз котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) (а) та розрахункова область задачі (б)

В якості керуючих рівнянь використовується система рівнянь Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями. Математичний апарат та повний опис згаданих рівнянь подані у спеціалізованій довідковій літературі [7-9] і є загальновідомими, тому в даній роботі вони не наводяться, оскільки автори статті не є їх розробниками. Турбулентний рух газоповітряної суміші описувався за допомогою моделі k-ε Realizable, яка добре зарекомендувала себе для задач з інтенсивним змішуванням та згорянням.

Процеси горіння природного газу моделювалися за допомогою моделі змішування та згоряння (Non-Premixed Combustion) із застосуванням бібліотек хімічних реакцій та врахуванням впливу температури на кінетику утворення оксидів азоту.

Формування NO_x враховувалося за термічним механізмом Зельдовича.

Моделювання руху крапель вологи виконувалося у вигляді дискретної фази сферичних частинок, розсіяних у безперервному середовищі (паровому потоці), з використанням підходу DPM (Discrete Phase Model). ANSYS CFX дозволяє відслідковувати траєкторії руху частинок та процеси тепломасообміну з навколишнім середовищем.

В якості гідродинамічних граничних умов на перерізах труб поблизу нижнього роздаткового колектору задавалась швидкості в контурі циркуляції. Для визначення цих швидкостей, використано методику Нормативного методу [10] і визначено залежність опору опускної частини контуру і корисного напору в підйомній ланці від витрати води на вході в опускні труби. Далі, графічним способом (рис. 3) на перетині функціональних кривих визначено дійсна витрата пароводяної суміші в екранних трубах, а через неї і її 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 пальників задавалась витрата природного газу, температура та швидкість виходу з сопел. Повітря подавалося з коефіцієнтами надлишку, необхідними для забезпечення стехіометричних умов горіння.

На виході з паливни застосовувалася умова Pressure Outlet, що забезпечувала вільний вихід продуктів згоряння при фіксованому надлишковому тиску. Стіни моделювалися як *adiabatic walls*, без урахування теплопередачі через огорожувальні конструкції.

Теплові граничні умови на стінках труб вибирались згідно роботи [11].

Барабан-сепаратор котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) розташований окремо від паливни, тому на зовнішні поверхнях нього задавались умови ізоляції. При розробці моделі барабан-сепаратора, бралось до уваги, що пара сепарується від рідини внаслідок різниці густин всередині об'єму барабану і під дією підйомної архімедової сили рухається до верхньої частини барабану де полишає барабан через три отвори для відведення сухої насиченої пари до пароперегрівача (позначено «витік пари» на рис. 4). У нижній частині барабана знаходяться три отвори для опускних труб, по яким з барабана рухається вода в нижні роздаткові колектори (рис. 4).

Слід зазначити, що надійних експериментальних даних по паровмісту, швидкості і температурі пароводяної суміші на виході з труб, що екранують паливню в доступній літературі немає. Тому для верифікації моделі використаний аналітичний метод на основі Норм теплового розрахунку [10].

Обговорення отриманих результатів. Основними результатами при розрахунках за допомогою CFD-моделі є середній об'ємний паровміст (Vapour. Volume fraction) і середня швидкість пароводяної суміші (Vapour. Velocity) як в середині труб так і в об'ємі барабану.

Середній об'ємний паровміст на кожній ділянці обчислювався за формулою:

$$\beta = \left(1 + \frac{1-\bar{x}}{\bar{x}} \frac{\rho''}{\rho'}\right)^{-1}, \quad (1)$$

де ρ'' і ρ' – густина води і пари відповідно, що визначаються в залежності від тиску в барабані; $\bar{x}$ – середній масовий паровміст:

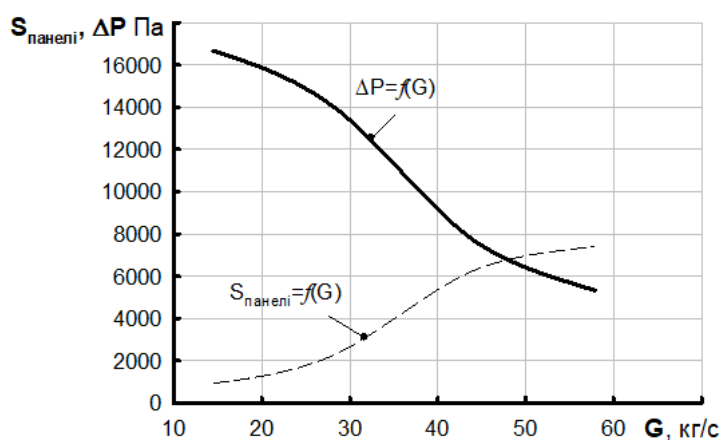


Рис. 3. Залежність опору опускної частини контуру ΔP і корисного напору $S_{\text{панелі}}$ підйомної ланки труби від швидкості води на вході в опускні труби

$$\bar{x} = \frac{Q}{rG}, \quad (2)$$

де r – питома теплота пароутворення, Q – теплове навантаження на ділянці труб, що залежить від середнього питомого теплове навантаження радіаційних поверхонь паливни, яке в свою чергу визначено за допомогою Нормативного методу [10] і G – витрата води в панелі труб, що екранують паливню. Визначається за допомогою значення дійсної швидкості циркуляції в контурі (рис. 3).

Розподіл об'ємного паровмісту пароводяної суміші вздовж труб представлено на рис. 4а, б. Для верифікації результатів моделювання використовувався аналітичний розрахунок, що виконувався за допомогою Нормативного методу [10]. Це реалізовано в роботі процедура верифікації моделі. Цифрами на рис. 4 позначено номери окремих ділянок труб, на яких аналітично обчислено середній об'ємний паровміст. Числові значення середнього об'ємного паровмісту приведені на рис. 4а у рамках поблизу позначення номеру ділянки чорним кольором. Червоним кольором приведені осереднені по об'єму кожної ділянки значення Vapour. Volume fraction які відповіда-

ють об'ємному паровмісту з CFD-моделі. Як свідчить рис. 4а, значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємного паровмісту, що визначений аналітично за [10] знаходяться в межах від 9 до 18%.

Аналіз рис. 4а також свідчить, що розподіл парових пазирів по висоті кип'ятильних труб не є постійним – як свідчить робота [11] 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 паливни) створюються умови поверхневої конденсації води і ступінь сухості пари зменшується. Також, з рис. 4а видно, що об'ємний паровміст в трубах на виході з труби становить 0,861. Пароводяна суміш з такими параметрами поступає в барабан-сепаратор і формує дзеркало випаровування.

Розподіл об'ємної долі пари в пароводяній суміші, що поступає в об'єм барабану в збільшеному вигляді представлено на рис. 4б. Як свідчить рис. 7 барабан наповнюється рідиною до свого «екватора» но рівень води в ньому постійно коли-

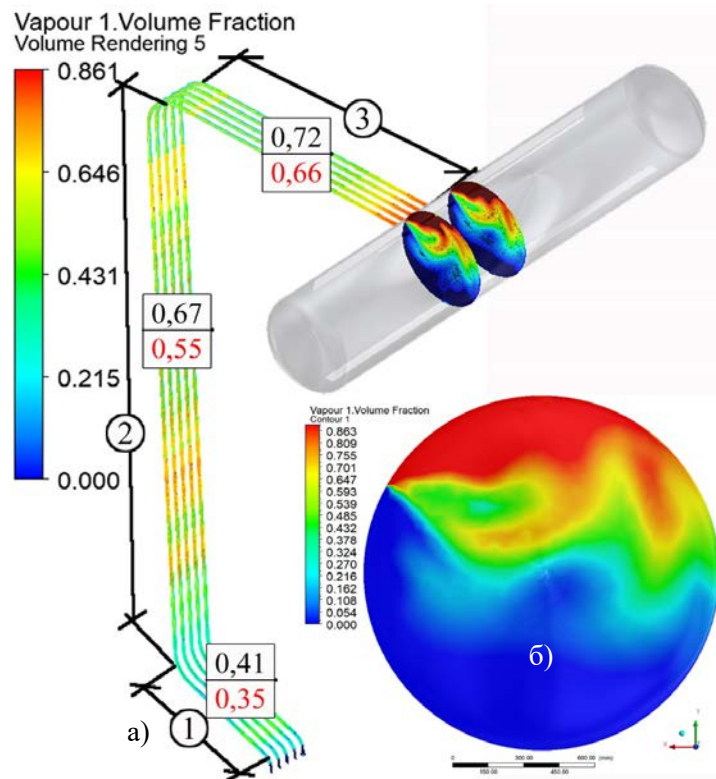


Рис. 4. Середній об'ємний паровміст у контурі природної циркуляції котла ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ) (а), збільшений переріз барабану для візуалізації розподілу пари в об'ємі барабан-сепаратора (б)

вається. Аналіз даних рис. 4б також свідчить, що нижче екватору барабана знаходиться рідина, яка по опускним трубам має направлятися в нижній роздатковий колектор котельного агрегату. А пара, внаслідок суттєвої різниці в густині накопичується поблизу верхніх патрубків, звідки прямує в пароперегрівач. На рис. 4б, з метою верифікації отриманих результатів, приведена схема потоку в паровому барабані з природним розділенням пари/води з роботи [5]. Як свідчить рис. 5, в представлений роботі вода накопичується ≈ 150 мм нижче «екватора» барабан сепаратора як і в верифікований роботі [6].

Поверхня дзеркала випаровування має складну хвилясту поверхню яка знаходиться в постійному русі.

Висновки. Проведені розрахунки дозволяють зробити наступні висновки:

– визначена дійсна витрата робочого тіла в екранних трубах і швидкість, що в якості граничних умов використана в наступних роботах по

моделюванню процесів сепарації пари в барабан-сепараторі котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) та при моделюванні його термонапруженого стану;

– результати верифікації свідчить, 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;

– оскільки, пароводяна суміш подається на дзеркало випаровування як в даній задачі, то струмені двофазної суміші, яка направляється з кип'ятильних труб створюють умови значного хвилювання поверхні. З метою запобігання утворення хвиль на поверхні дзеркала випаровування рекомендується двофазну пароводяну суміш подавати під спеціальні конструктивні елементи барабан-сепаратора, дірчасті листи. Створення такої моделі планується в наступних роботах.

Список літератури:

1. Wen Tan, Horacio J. Marquez, Tongwen Chen, Jizhen Liu. Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit. *Journal of process control*. 2005. Vol. 15. P. 883–891 DOI:10.1016/j.jprocont.2005.03.007.
2. 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. Vol. 184. Issue 2. P. 151–165 DOI:10.1016/j.powtec.2007.11.036.
3. Emara–Shabaik H.E., Habib M.A., Al-Zaharna I. Prediction of risers tubes temperature in water tube boiler. *Applied mathematical modeling*. 2008. Vol. 33. Issue 3. P. 1323–1336 DOI:10.1016/j.apm.2008.01.015.
4. Paweł Ocioń, Marzena Nowak, Stanisław Łopata. Simplified Numerical Study of Evaporation Processes Inside Vertical Tubes. *Journal of Thermal Science*. 2014. Vol.23, No.2, P. 177–186 DOI: 10.1007/s11630-014-0693-7.
5. Mario Nowitzki. Development and validation of a gas-liquid two-phase model for industrial computational fluid dynamics applications. Thesis for: Doctoral / Technical University of Applied Sciences Wildau. Deutschland. 2020. 228 p. DOI: 10.26127/BTUOpen-5413.
6. Kitto John B., Stultz eds. Steam: Its generation and use. 41. ed., 1. print. Barberton, Ohio: Babcock & Wilcox. 2005. ISBN: 0963457012.
7. Ansys Fluent 14.5 Theory Guide. New-York, USA: ANSYS Inc, 2012.
8. Versteeg Henk K., Weeraratne Malalasekera. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. 2. ed., [Nachdr.] 2007. Harlow: Pearson/Prentice Hall. ISBN: 9780131274983
9. CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу: монографія / О.В. Баранюк, М.В. Воробйов, А.Ю. Рачинський. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. 164 стр.
10. Тепловий розрахунок котельних агрегатів. Нормативний метод. Москва / за ред. Кузнєцова Н.В. Москва. Енергія, 1973. 296 с.
11. Черноусенко О.Ю., Рачинський А.Ю., Баранюк О.В. CFD моделювання паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. Том 79 №2. С. 138–149. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.10>

Baranyuk O.V. MODELING OF FLOW AND PHASE TRANSITION IN THE NATURAL CIRCULATION CIRCUIT OF THE GM-50-1 BOILER (N-50-3.9-440GM)

The article considers the problem of extending the service life of steam boilers of thermal power plants, which form the basis of the industrial energy complex of Ukraine. The object of the study is the GM-50-1 boiler unit (E-50-3.9-440GM), in particular its drum-separator, which is the most technologically complex and costly structural element. The results of CFD modeling of the processes of steam generation in boiler tubes and water vapor separation in the drum space, performed in the free student version of ANSYS Student, are presented. The purpose of the study is to determine the volumetric steam content and the velocity of the steam-water

mixture at the outlet of the screen tubes, as well as the height of the evaporation mirror in the drum, on which the salt balance of the boiler unit depends. The Normative method for calculating the average volumetric steam content in natural circulation circuits was used to verify the CFD model. The deviation between the results of CFD and analytical calculations is 9–18%, which is explained both by the simplifications of the analytical method and the limitations of the student version of the software package. CFD modeling also made it possible to visually determine the phase transition zones and the position of the evaporation mirror, which is critically important for ensuring reliable operation of the drum-separator. The verification results show that the deviation values of the CFD model calculation results from the values of the average volumetric vapor 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. It was determined that the supply of a water-vapor mixture to the evaporation mirror as in this problem leads to significant surface turbulence. In order to prevent the formation of waves on the surface of the evaporation mirror, it is recommended to supply the two-phase water-vapor mixture under special structural elements of the drum-separator, perforated sheets.

Key words: *evaporation, natural circulation, convective boiling, fuel station, boiler.*

Дата надходження статті: 20.09.2025

Дата прийняття статті: 11.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025