

Баранюк О.В.

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

Черноусенко О.Ю.

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

Рачинський А.Ю.

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

Пікенін О.О.

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

МОДЕЛЮВАННЯ КОНТУРУ ПРИРОДНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ В КОТЛІ ТИПУ ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ)

Стаття присвячена CFD-моделюванню процесів, що мають місце при генерації пари в контурі природної циркуляції котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Процеси генерації пари в паливні котельного агрегату впливають на стабільну та ефективну роботу котлоагрегату в цілому, а моделювання їх з метою мінімізації витрат на дослідження є актуальним і мають велику практичну значущість. Метою роботи є визначення об'ємного паровмісту і швидкості пароводяної суміші на виході з труб, що екранують паливню котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Для досягнення поставленої мети розраховано теплове навантаження на бічні стінки паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) при спалюванні природного газу в чотирьох штатних пальниках ГМГ-5 методами CFD-моделювання в безкоштовній студентській версії ANSYS Student і аналітично, за допомогою Нормативного методу. 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. За допомогою того ж аналітичного методу визначено середній об'ємний паровміст на окремих ділянках труб контуру природної циркуляції. Ці дані використані з метою верифікації результатів числового експерименту. Оскільки надійних експериментальних даних в доступній літературі немає, а CFD-моделювання після верифікації дозволить отримати локальні дані по всім необхідним термодинамічним параметрам пароводяної суміші.

Результати верифікації свідчить, 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. Моделювання дозволило проаналізувати динаміки генерації пари кип'ятильних 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'ятильних труб. Ці дані будуть використані 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.

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

Постановка проблеми. Представлена робота присвячена моделюванню параметрів пароводяної суміші, що рухається в екранних трубах котельного агрегату ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз робіт [1] свідчить, що висловив припущення, що електростанції, які працюють на вкопному паливі, з потужними котлоагрегатами

можуть замінити в майбутньому атомні електро-станції. Сильна тенденція до цього переходу спостерігається в промислово розвинених країнах, особливо після нещодавньої ядерної кризи на Фукусімі.

Барабанні котли використовують принцип природної циркуляції води, де різниця в густині викликає циркуляцію води, що екранують стінки паливні котла і з'єднують його барабан з нижніми роздатковими колекторами. Радіаційний теплообмін між факелом розжарених газів в паливні котла і водою в трубах, що екранують стінки паливні призводить до утворення бульбашок пари в заповнених водою екранних трубах, які природним чином відокремлюються від води в стані насичення в барабані. Фізичні явища під час випаровування досить складні. Як динаміка, так і зв'язки між властивостями рідини є дуже нелінійними, а ключові величини, такі як точка висихання або величина перегріву, важко виміряти. Багато факторів сприяють тому, що ці процеси важко контролювати. Наприклад, було помічено, що можуть виникати різні типи нестабільностей/коливань потоку [2].

Важливо розуміти, що барабанний котел є дуже нелінійною складною системою, тому глибоке розуміння цього процесу є важливим для проектування системи керування котлом. Моделювання динаміки барабанного котла розглядалося багатьма дослідниками протягом багатьох років. Багато досліджень було присвячено управлінню на основі моделей. 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.

Теплові процеси, що пов'язані з підведенням до парогенератора сучасних енергоблоків атомних електричних станцій живильної води від системи водної підготовки та теплоносія від ядерного реактора, а також з відведенням пари з парогенератора до головного парового колектору є ключовими в системі безпечної експлуатації парогенератора ПГВ-1000 енергоблоку з ядерним реактором ВВЕР-1000. Автори [5] побудували математичну модель парогенератора як об'єкта управління у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь десятого порядку у відносних змінних і розробили формули для обчислення значень

постійних параметрів. Розроблена програма для моделі парогенератора ПГВ-1000, включена до інформаційної технології оптимізації управління.

В рамках європейської співпраці була розроблена нова мова моделювання під назвою Modelica [6]. Modelica базується на досвіді членів дизайнерської групи Modelica та прагне стати стандартом для моделювання в неперервному часі та гібридного моделювання на основі рівнянь. В рамках цих зусиль було розроблено кілька базових бібліотек Modelica для застосувань у різних областях, серед яких термогідравлічна базова бібліотека [7]. Ця бібліотека використовується тут для побудови дискретизованої моделі киплячої трубки.

Спочатку на основі перших принципів виводиться проста аналітична модель низького порядку. Проста модель здатна фіксувати коливання, які спостерігалися експериментально. Вона також може дати уявлення про механізми, що генерують коливання. Потім за допомогою термогідравлічної базової бібліотеки Modelica будується більш складна модель. Моделювання складної моделі показує, що вона дає результати, порівнянні зі спрощеною моделлю, а також близькі до експериментальних даних.

Авторами [6] отримано спрощену модель котлової труби, яка дає уявлення про те, як виникає відоме явище нестабільності, коливання перепаду тиску. Спрощена модель також дає результати, близькі до вимірювань у [8]. Спрощену модель також порівнювали з двома різними дискретизованими моделями, розробленими в Modelica. Однопотокowa модель зі зосередженим балансом маси та дискретизованим балансом енергії, а також повністю дискретизована модель. Показано, що однопотокowa модель дає більш реалістичні коливання, ніж спрощена модель. Однак повністю дискретизована модель дає високочастотні коливання через ефекти дискретизації та не є надійною для дослідження коливань перепаду тиску.

Проте, моделювання з використанням термогідравлічної базової бібліотеки в Modelica, не є достатньо поширеним явищем серед інженерів на теренах України. Найбільш реальним варіантом вирішення подібних задач є використання CFD-коду з високою дискретизацією.

Найближчою до тематики статті є робота [9] автори якої розробили спрощену числову модель процесів випаровування всередині вертикальних труб, враховані такі двофазні режими потоку (рис. 1) як однофазна рідина, бульбашковий потік, снарядний потік, кільцевий потік, кільцевий потік

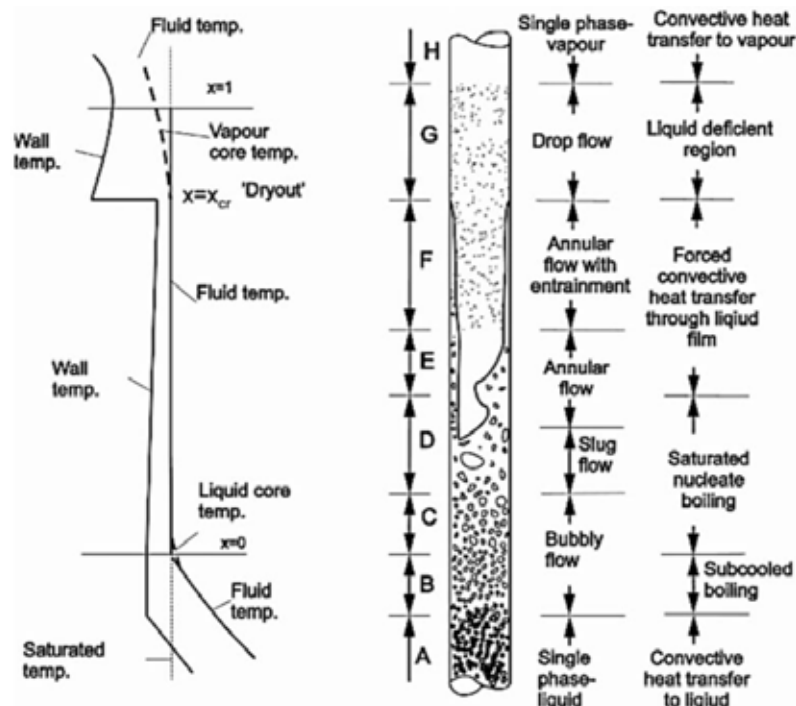


Рис. 1. Області теплопередачі та схеми потоків під час конвективного кипіння [9]

із захопленням, крапельний потік та однофазний потік пари.

Проте, в моделі [9] 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. Енергетичне рівняння для рідинної області розв'язується методом контрольованого об'єму, а для твердої області – методом скінченних елементів, щоб визначити температурне поле для рідинної та твердої областей.

Аналіз літературних джерел [1–17] свідчить, що в умовах вільної конвекції, теплообмін у рідині, яка випаровується, відбувається завдяки природним конвективним потокам, які виникають внаслідок різниці густини рідини. При цьому в зоні випаровування утворюється тонкий граничний шар, де відбувається найбільш інтенсивний теплообмін. Ключовим фактором є температура поверхні випаровування: вона визначає тепловий потік, спрямований від рідини до парової фази. Під дією сили Архімеда легша гаряча рідина або пара піднімається вгору, а більш холодна рідина заповнює простір біля поверхні нагріву. У результаті формується стійкий вільно-конвективний потік, який забезпечує відведення тепла і підтримання процесу випаровування. Цей механізм особливо важливий для систем з природною циркуляцією

теплоносія, а саме котельних агрегатах з барабан-сепаратором. На основі робіт [1–17] можна вибрати рекомендації щодо моделювання процесу випаровування рідини при її вільно-конвективному русі. На основі цих рекомендацій можна вирішити складну інженерну задачу 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.

Постановка завдання. Метою статті є визначення параметрів пароводяної суміші яка з труб, що екранують стінки паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ), потрапляє в його барабан.

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 рідини, що рухається і поступово випаровується в екранних трубах згаданого котельного агрегату. Комп'ютерне моделювання виконувалось 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 паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) під час її випаровування.

Предмет дослідження – є термодинамічні параметри пароводяної суміші на виході з труб, що екранують стінки паливни котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Виклад основного матеріалу. При моделюванні течії в контурі природної циркуляції автори спирались на відоме твердження, що при течії рідини через нагріту трубку, вона спочатку нагрівається до температури кипіння, коли відбувається кипіння, утворюється суміш рідини та газу, і, нарешті, нагрівається лише газ. Це схематично показано на рис. 2. Зона нагрівання знаходиться від 0 до Q_1 , зона кипіння – від Q_1 до $Q_1 + Q_2$, і після цієї точки в трубці рідини не залишається. Якщо потік достатньо швидкий, рідина не проводить достатньо часу в трубці, щоб вся рідина випарувалася, і тоді залишається лише дві зони. Якщо швидкість потоку ще вища, кипіння може навіть не розпочатися.

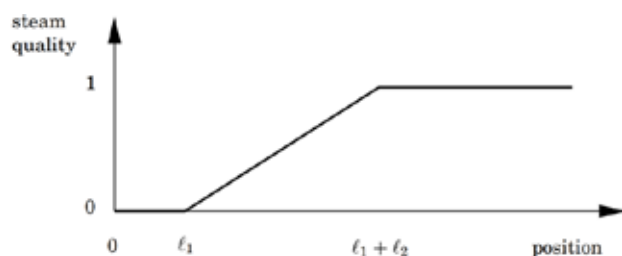


Рис. 2. Розподіл пари вздовж нагрітої трубки [6]

Як свідчить робота [10] температурне поле стінки паливни котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) залежить від теплообміну в її об'ємі. Теплообмін паливни залежить від кількох ключових факторів таких як температурний градієнт (чим більша різниця температур між розжареними газами

(факелами полум'я) і поверхнею нагріву (екранні труби, стінки топки), тим інтенсивніше передається теплота) і гідродинамічна взаємодія факелів розжарених газів від пальників (розташування та інтенсивність факелів, а також рух газоподібного середовища (турбулентність, напрямок і швидкість потоків) суттєво впливають на конвективний теплообмін). А також оптичні властивості факела і поверхонь (ступінь чорності, відображення) також мають велике значення.

Надійшли 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 [11]. Невідомі значення розподілу температур на ділянках труб вибирались з попередньої роботи авторів [10].

В якості розрахункової області вибрано три поряд розташовані труби, що екранують паливню котла ГМ-50 (рис. 3). Для розрахунків у середовищі ANSYS-CFX розрахункова область апроксимована за допомогою гібридної сітки, що поєднує структуровану і неструктуровану сітки для точного моделювання приміжових шарів та зручності опису складної геометрії області.

При чому, структурована сітка використовується для моделювання приміжового шару, який розвивається на межі «тверда поверхня – рідина». Для створення такої сітки застосовано не менше 20 шарів елементів. Кожен наступний шар має товщину, що на 10% більша за попередній, що забезпечує плавне збільшення розміру елементів у напрямку від стінки. Така сітка дозволяє адекватно врахувати градієнти швидко-

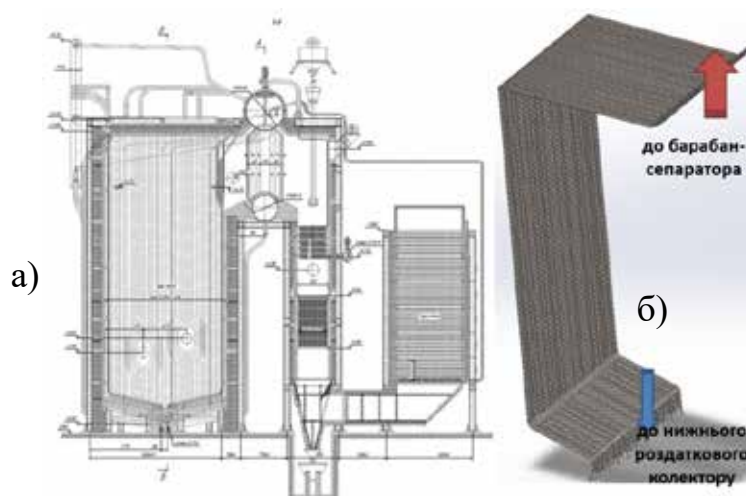


Рис. 3. Поздовжній переріз котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) (а) та труби бічного екрану (б)

стей та температури, характерні для примежової області. Простір між структурованими шарами заповнений неструктурованою тетраедричною сіткою. Розмір елементів у цій області становить 1×10^{-3} м, а їх густина контролюється параметром Relevance Fine. Це дозволяє забезпечити достатню точність розрахунків у центральних зонах потоку.

Для поєднання структурованої та неструктурованої частин сітки застосовується метод MultiZone. Він гарантує якісне узгодження елементів у зоні переходу та підвищує загальну стійкість розрахункової моделі.

Краплі вологи (у вигляді сферичних частинок) моделюються як дискретна фаза за допомогою DPM (Discrete Phase Model). Це дозволяє ANSYS-CFX обчислити траєкторії руху частинок та їхній тепломасообмін з газовою фазою.

Зовнішній вигляд скінченно-елементної сітки показаний на рис. 4. Моделі труб досліджувались послідовно, по одній, оскільки безкоштовна версія ANSYS Student для апроксимації розрахункової області дозволяє використовувати тільки 5000 чарунок. Але для повноти інформації, засобами ANSYS-CFX результати розрахунку по окремим моделям труб зображені на одному листі.

В якості керуючих рівнянь використовується система рівнянь Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями [12]:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + S_m. \quad (1)$$

S_m – рівнодіюча масових сил; μ_{eff} – ефективна в'язкість, що представляє собою суму молекулярної і турбулентної в'язкості; p' – модифікований тиск, як визначено наступним чином:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_i}. \quad (2)$$

Доданки лівої частини системи рівнянь визначають зміну властивостей потоку рідини (пари) у часі та кількості руху молекул рідини. Доданки правої частини рівнянь визначають дію масових сил, сил тиску та сил в'язкості. Таким чином, рівняння розглядаються як баланс сил інерції (ліва частина), масових сил, сил тиску та в'язкості (права частина), що діють на частинку рідини.

Осереднені по Рейнольдсу рівняння енергії:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot} u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h_{tot}}{\partial x_j} \right] + \partial x_i \left[u_i (\tau_{ij} - \rho u_i u_j) \right]. \quad (3)$$

Можливо, перетворення молекулярного дифузійного члена може бути неточним, якщо ентальпія h_{tot} залежить від інших параметрів, не тільки від температури, останнє рівняння записане через турбулентну дифузію є правильним, за умови дотримання гіпотези про вихородифузійність. Більше того, оскільки турбулентна дифузія зазвичай набагато більша, ніж молекулярна, тому невеликі похибки в останній можна ігнорувати.

Разом з рівнянням нерозривності рівняння Нав'є-Стокса і енергії утворюють замкнуту систему:

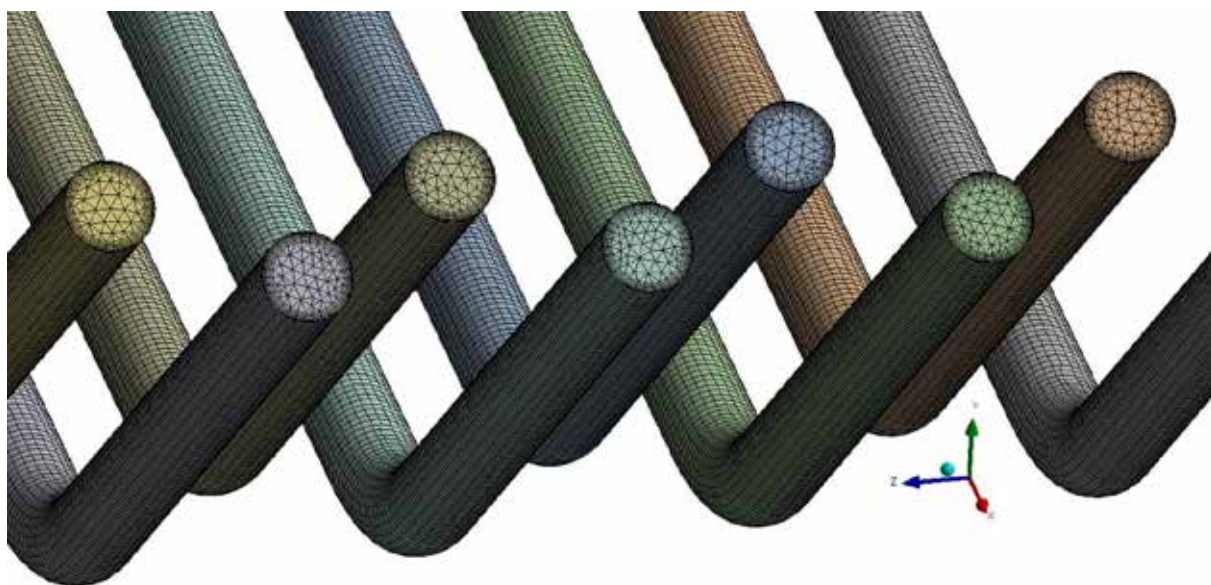


Рис. 4. Вид розрахункової сітки кип'ятильних труб котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) поблизу входу в барабан-сепаратор

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0. \quad (4)$$

Для моделювання турбулентного руху рідини, записані в формі Рейнольдса рівняння Нав'є-Стокса замикаються за допомогою k - ε моделі турбулентності:

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = C_{\varepsilon_1} \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho C_{\varepsilon_2} \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right), \quad (6)$$

де $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ – кінетична енергія турбулентних пульсацій;

$$\varepsilon = \nu_t \overline{\frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)} - \text{швидкість розсіювання}$$

турбулентної кінетичної енергії;

В роботі використані так звані масштабовані пристінні функції (Scalable Wall Function). Використання таких функцій ставить за мету подолання одного з основних недоліків підходу до стандартних функцій стінки. Основна ідея підходу масштабованих функцій стінки полягає в тому, щоб обмежити значення y^* , що використовується в логарифмічному законі течії в приміжовому шарі, мінімальним значенням, що знаходиться на перетині між логарифмічним і лінійним профілем біля стіни [13]. Тому всі точки сітки, які знаходяться за межами в'язкого підшару, і всі невідповідності дрібної сітки відсіюються.

Залежність для розрахунку турбулентної в'язкості має вигляд:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (7)$$

де C_μ – константа, а k і ε – кінетична енергія турбулентних пульсацій і швидкість їх дисипації відповідно.

Розрахунок дискретної фазової траєкторії здійснюється в Лагранжевому формулюванні, що включає дискретну фазову інерцію, гідродинамічний опір і силу тяжіння як для стаціонарних, так і для нестаціонарних течій. Лагранжева дискретна фазова модель в ANSYS-CFX слідує підходу Ейлера-Лагранжа. Пара розглядається як суцільне середовище шляхом вирішення рівнянь Нав'є-Стокса, тоді як дисперсна фаза вирішується шляхом відстеження великої кількості крапель через розрахункове поле потоку.

Для подальшої роботи ANSYS-CFX потрібно задатися відривним діаметром бульбашки пари, який можна обчислити з емпіричної залежності:

$$R \approx \frac{\sigma \sin \theta}{\rho' w'^2}, \quad (8)$$

де σ – сила поверхневого натягу рідини, Н/м; θ – кут змочування, рад; ρ' – густина рідини на лінії насичення, кг/м³; w' – швидкість спливання бульбашок, м/с.

Граничні умови. В якості граничних умов на стінках труб задавалась осереднена температура стінок паливни (рис. 5а), оскільки з-за обмежень ANSYS Student не є можливим задати густину теплового потоку на ділянках труб (рис. 5б).

Для визначення другої граничної умови, а саме швидкості в контурі циркуляції автори задавались середніми швидкостями води на вході в труби панелі і за допомогою Нормативного методу [11] визначили залежність опору опускної частини контуру і корисного напору в підйомній ланці від витрати води на вході в опускні труби (рис. 6). 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.

Обговорення отриманих результатів.

В якості основних результатів при розрахунках за допомогою CFD-моделі є середній об'ємний паровміст (Vapour. Volume fraction) і середня швидкість пароводяної суміші (Vapour. 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. 7а, б. Як свідчить рис. 7а, 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 [11]. Це реалізовано в роботі процедура верифікації моделі. Цифрами на рис. 7 позначено номери окремих ділянок труб, на яких аналітично обчислено середній об'ємний паровміст. Середній об'ємний паровміст на кожній ділянці обчислювався за формулою:

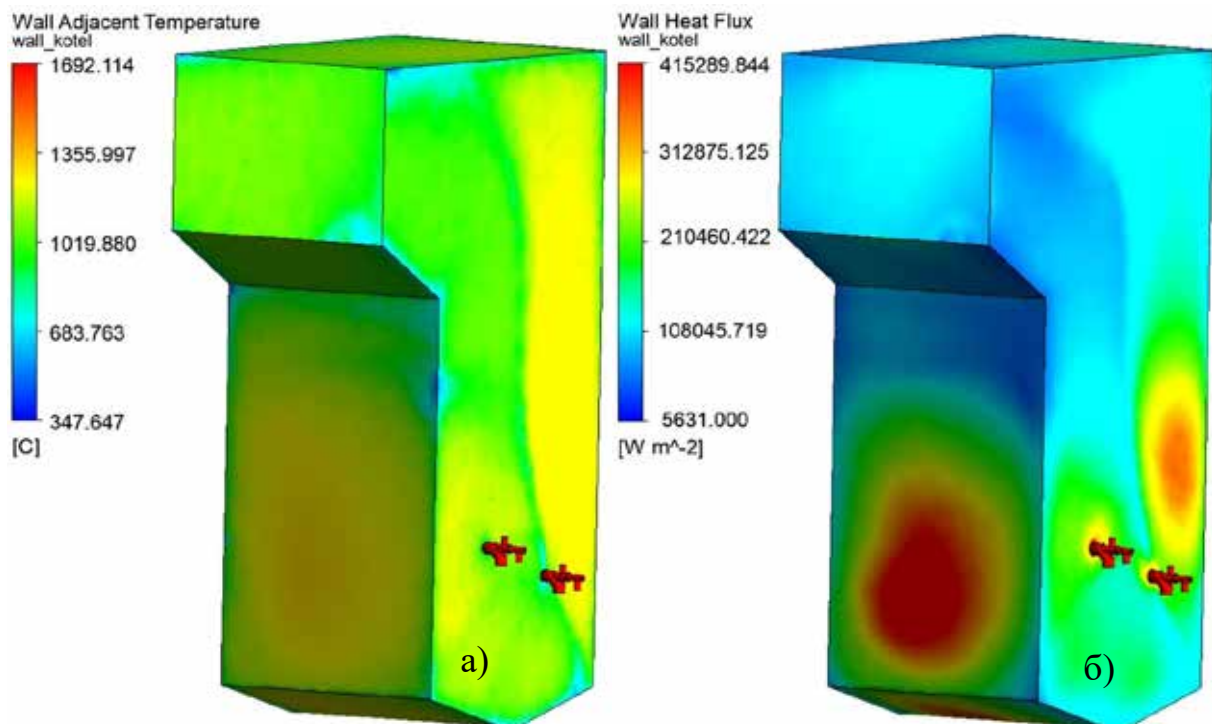


Рис. 5. Розподіл температур (а) та теплових потоків (б) на поверхні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ)

$$\beta = \left(1 + \frac{1 - \bar{x}}{\bar{x}} \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{-1}, \quad (9)$$

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

$$\bar{x} = \frac{Q}{rG}, \quad (10)$$

де r – питома теплота пароутворення, Q – теплове навантаження на ділянці труб, що залежить від середнього питомого теплове навантаження радіаційних поверхонь паливні, яке в свою чергу визначено за допомогою Нормативного методу [11] і G – витрата води в панелі труб, що екранують паливню. Визначається за допомогою значення дійсної швидкості циркуляції в контурі (рис. 6).

Числові значення середнього об'ємного паровмісту приведені на рис. 7а у рамках поблизу позначення номеру ділянки чорним кольором.

Червоним кольором приведені осереднені по об'єму кожної ділянки значення Vapor. Volume fraction які відповідають об'ємному паровмісту з CFD-моделі. Як свідчить рис. 6а свідчить, значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємного паровмісту, що визначений аналітично за [11] знаходяться в межах від 9 до 18%.

Аналіз рис. 6 також свідчить, що розподіл парових пузирів по висоті кип'ятильних труб не є постійним – в області активного горіння (рис. 4б) створюються умови погіршеного теплообміну, відбувається інтенсивне випаровування води і заповнення труб парою. 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.

Висновки. Проведені розрахунки дозволяють зробити наступні висновки:

- моделювання дозволило проаналізувати динаміку генерації пари кип'ятильних 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'ятильних труб;

- результати верифікації свідчить, 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;

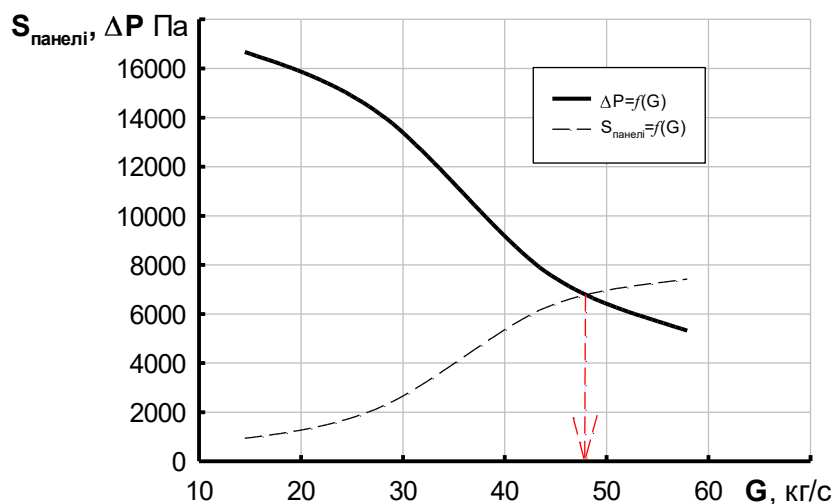


Рис. 6. Залежність опору опускної частини контуру ΔP і корисного напору $S_{\text{панелі}}$ підйомної ланки труби від швидкості води на вході в опускні труби

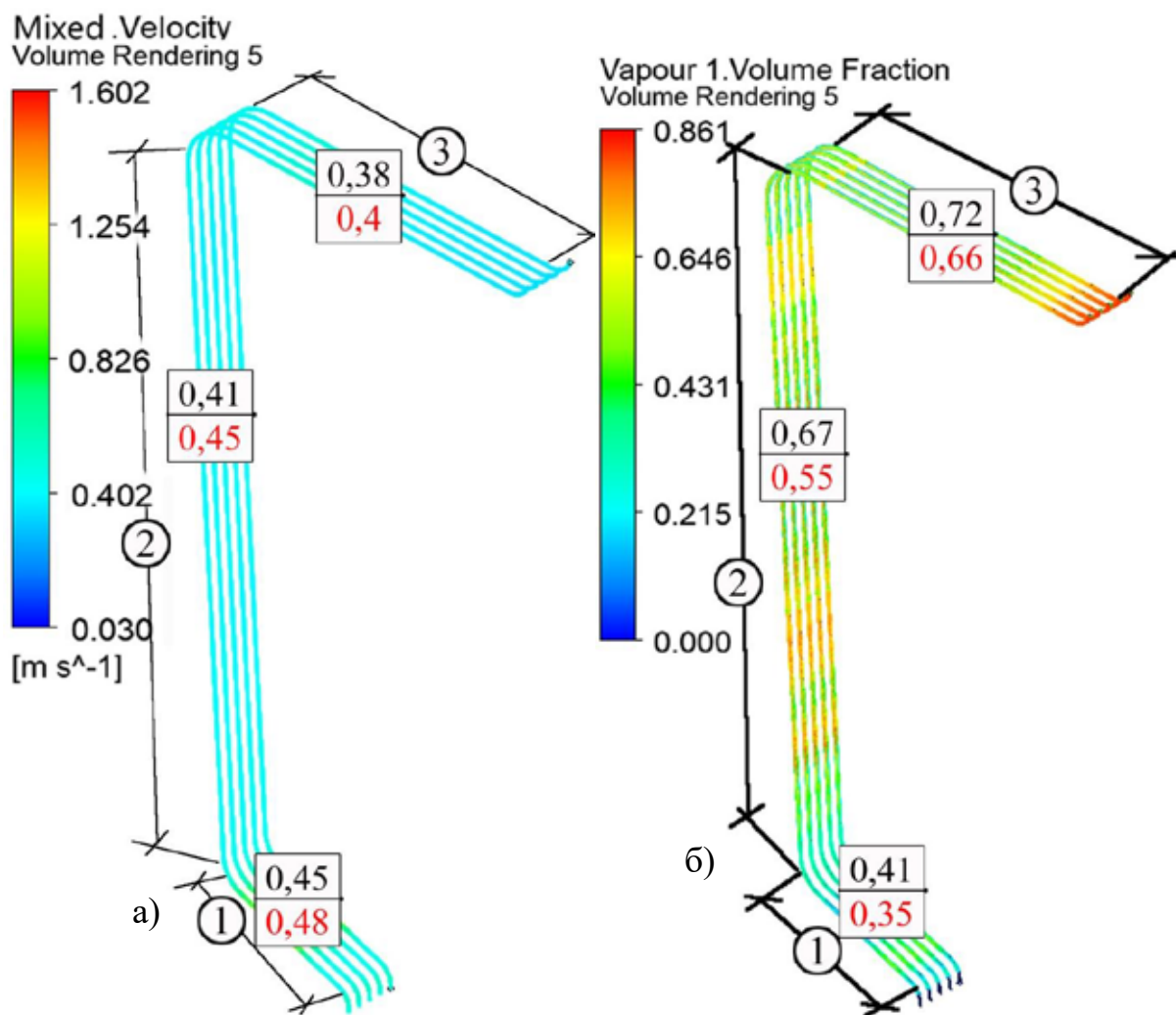


Рис. 7. Середній об'ємний паровміст (а) і середня швидкість пароводяної суміші (б) в моделі труб, що екранують паливню

– 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.

Вплив інших факторів, а саме тип і конструкція пальників, що формують різну структуру факела, що змінює умови тепловіддачі і геометрія паливни від якої залежить розподіл температур і руху газів будуть досліджені в подальших роботах.

Список літератури:

1. Tawfeic S.R. Boiler Drum-Level Modeling. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Faculty of Engineering*. 2013. Vol. 41. No. 5. P. 1812–1829 DOI: 10.21608/jesaun.2013.114911
2. 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.
3. M.H. Zhang, K.W. Chu, F. Wei, A.B. Yu. 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.
4. H.E. Emara-Shabaik, M.A. Habib, I. Al-Zaharna. 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.
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). С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.01.04>
6. Jonas Eborn, Karl Johan Åström. Modeling of a Boiler Pipe with Two-Phase Flow Instabilities. 2000. *Modelica Workshop 2000 Proceedings*. pp. 79–88.
7. H. Tummescheit, J. Eborn, F. Wagner. Development of a Modelica base library for modeling of thermo-hydraulic systems. 2000. *Modelica 2000 Workshop Proceedings*. pp. 1–13.
8. H. T. Liu, H. Koçak, S. Kakaç. Dynamical analysis of pressure-drop type oscillations with a planar model. *International Journal of Multiphase Flow*. 1995. Volume 21. Issue 5. P. 851–859 [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(95\)00012-M](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00012-M).
9. 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.
10. Черноусенко О.Ю., Рачинський А.Ю., Баранюк О.В. CFD моделювання паливни 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>
11. Тепловий розрахунок котельних агрегатів. Нормативний метод. Москва / за ред. Кузнецова Н.В. Москва. Энергия, 1973. 296 с.
12. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide. New-York, USA: ANSYS Inc, 2012.

Baranyuk O.V., Chernousenko O.Yu., Rachynskyi A.Yu., Pikenin O.O. MODELING OF THE NATURAL CIRCULATION CIRCUIT IN THE GM-50 BOILER (N-50-3.9-440GM)

The article is devoted to CFD-modeling of processes that occur during steam generation in the natural circulation circuit of the GM-50 boiler (N-50-3.9-440GM). The processes of steam generation in the boiler unit fuel affect the stable and efficient operation of the boiler unit as a whole, and their modeling in order to minimize research costs is relevant and has great practical significance. The purpose of the work is to determine the volumetric steam content and the velocity of the steam-water mixture at the outlet of the pipes shielding the GM-50 boiler fuel (N-50-3.9-440GM). To achieve the set goal, the thermal load on the side walls of the GM-50 boiler fuel (N-50-3.9-440GM) when burning natural gas in four standard GMG-5 burners was calculated using CFD-modeling methods in the free student version of ANSYS Student and analytically, using the Normative method. The actual flow rate of the working fluid in the screen tubes and the velocity, which was set as the boundary conditions at the flow inlet to the lower distribution manifold in the CFD model, were determined. Using the same analytical method, the average volumetric vapor content in individual sections of the natural circulation circuit tubes was determined. These data were used to verify the results of the numerical experiment. Since there is no reliable experimental data in the available literature, and CFD modeling after verification will allow obtaining local data on all the necessary thermodynamic parameters of the steam-water mixture. The verification results show that the deviation values of the CFD model calculations 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. The modeling allowed us to analyze the dynamics of steam generation in the boiler tubes

of the natural circulation circuit of the GM-50 (N-50-3.9-440GM) boiler under conditions of non-uniform 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. These data will be used in subsequent works on modeling the processes of steam separation in the drum-separator of the GM-50 (N-50-3.9-440GM) boiler and in modeling its thermally stressed state.

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

Дата надходження статті: 10.07.2025

Дата прийняття статті: 25.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025