

О. В. Баранюк^{1,2}
 А. Ю. Рачинський¹
 О. О. Пікенін¹
 А. І. Бордіян¹

МОДЕЛЮВАННЯ СЕПАРАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ В БАРАБАН-СЕПАРАТОРІ КОТЛА ГМ-50-1

¹ Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

² Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України, Київ

Подано результати числового дослідження процесів сепарації водяної пари в барабані-сепараторі котельного агрегату ГМ-50-1, виконаного із застосуванням CFD-пакета ANSYS CFX. Розрахункова модель враховує реальні гідродинамічні умови роботи барабана: подачу пароводяної суміші з екранних труб, теплоізолюваний стан його металевого корпусу, а також організований відбір насиченої пари з верхньої частини та води — з нижньої. Для опису турбулентності застосовано модель Realizable $k-\epsilon$.

Дисперсна фаза вологи моделювалася як сукупність сферичних частинок у рамках DPM-підходу, з розрахунком траєкторій у лагранжевій постановці з урахуванням інерції частинок, гідродинамічного опору та гравітаційної дії. Основний паровий потік описувався рівняннями Нав'є–Стокса для суцільного середовища. Взаємодія крапель між собою не враховувалась. Гідродинамічні та теплообмінні процеси моделювалися відповідно до моделей Shiller–Nauman та Ranz–Marshall.

Застосування ANSYS CFX дало змогу визначити положення зони фазового переходу та просторове розташування дзеркала випаровування в барабані, що має ключове значення для забезпечення стійкої роботи котлоагрегату. За відсутності експериментальних даних щодо локального паровмісту оцінювання коректності моделі здійснювалося на основі технологічних вимог до експлуатації барабанів цього типу.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструктивних рішень, режимних параметрів та оцінювання працездатності барабанів енергетичних котлів.

Ключові слова: теплообмін, числове моделювання, генерація пари, фазовий перехід, випаровування.

Вступ

Енергетика має велике значення для нашої держави. Основною складовою промислового енергетичного комплексу є теплові електростанції, об'єднані у великі енергосистеми [1]. Складовими теплових електростанцій є паротурбінні установки, що працюють на парі, отриманій в потужних парових котлах, які спалюють органічне паливо.

На теплових електричних станціях України як пікові водогрійні котли достатньо поширені парові котли з природною циркуляцією і паропродуктивністю 48 т/год, температурою та тиском перегрітої пари відповідно 435 °С та 4,1 МПа без проміжного перегріву (власне паровий котел Е-50-4-435 Г (ГМ-50-1) (рис. 1)) [2]—[4]. Правомірність використання парових котлів у водогрійному режимі (наприклад, для покриття пікових теплових навантажень) ґрунтується на Правилах будови і безпечної експлуатації парових та водогрійних котлів (НПАОП 0.00-1.08-94) та інженерних рішеннях, ухвалених за результатами експертного обстеження згідно з СОУ-Н ЕЕ 25.302:2007 (Положення про технічне діагностування).

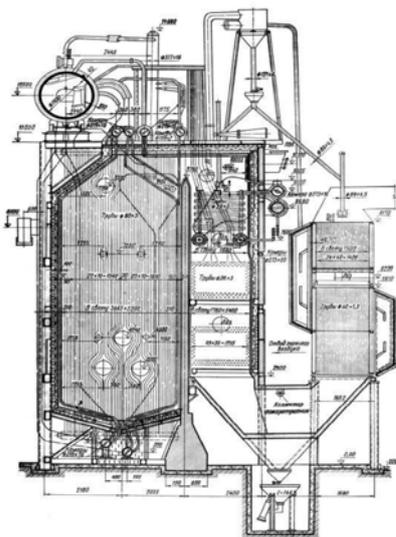


Рис. 1. Котел ГМ-50-1

Такі котли давно відпрацювали свій ресурс. Тому є необхідність його аргументовано подовжити. Через це в конструкції котла варто виділити ті частини, які мають критичне значення для його функціонування. Для визначення такої частини, розглянемо конструкцію і принцип роботи котла. Цей котельний агрегат Е-50-4-435 Г призначений для генерації пари з такими характеристиками: тиск пари $P_{\text{пн}} = 4,1$ МПа; температура перегрітої пари $t_{\text{п}} = 435$ °С, паропроодуктивність $D_{\text{пп}} = 48$ т/год. Живильна вода надходить у водяний економайзер з температурою $t_{\text{жв}} = 160$ °С, і нагрівається до температури насичення $t = 254,5$ °С, за рахунок утилізації теплоти відхідних газів. Водяний економайзер — це змієвикова поверхня нагріву, яка розміщена в конвективній опускній шахті [2]. Труби водяного економайзера компонується таким чином, щоб по газовій стороні отримати шаховий пучок, оскільки тоді збільшується коефіцієнт тепловіддачі, і відповідно зменшується поверхня нагріву. Вода, нагріта до температури насичення після економайзера, подається по трубах у барабан-сепаратор, до якого також під'єднані підйомні екранні і опускні труби. Барабан-сепаратор — це циліндрична ємність, у якій відбувається відділення парової фази від рідкої. Рідка фаза рухається по опускних трубах у нижній колектор, а потім по екранних підйомних трубах піднімається знову в барабан-сепаратор. Тут рух середовища оснований на принципі природної циркуляції, яка виникає за рахунок різниці густин у підйомних і опускних трубах. Різниця густин в підйомних і опускних трубах виникає за рахунок того, що підйомні екранні труби обігрівуються димовими газами, за рахунок чого густина робочого тіла в них менше ніж в опускних трубах [4]. За рахунок цієї різниці густин виникає рухомий напір, під дією якого і проходить рух рідини, тобто здійснюється циркуляція. Солеміст робочого тіла контролюють за допомогою схеми двоступеневого випаровування з використанням виносного циклону. Пара з барабану-сепаратора відводиться по паровідвідних трубах в пароперегрівач, у якому відбувається перегрів пари відносно температури насичення до величини $t_{\text{пп}} = 435$ °С. Пароперегрівач — це два пакета труб (холодний і гарячий), які складаються зі змієвикових труб. Між холодним і гарячим пучком розміщений пароохолоджувач, який призначений для регулювання температури перегріву за рахунок відбору теплоти від пари шляхом її охолодження живильною водою [2].

Тому, з урахуванням зазначеного, барабан-сепаратор є найбільш термонапруженою частиною котельного агрегату, містить значну частину робочого тіла, зосереджує процеси випаровування та має дзеркало випаровування високих параметрів, а також є самою дороговартісною частиною котельного агрегата. Якщо він вийде з ладу, то зупиниться робота всього котла.

Про актуальність вибраної тематики свідчить кількість і рівень публікацій учених з усього світу. Автор [6] запропонував основні ідеї та рівняння для динамічного моделювання барабана котла теплових електростанцій. Рівняння базуються на фундаментальних законах збереження маси та енергії, що застосовуються одночасно до пари та води [3]. Модель застосовується для унітарної ступінчастої зміни температури, рівня, тиску в барабані парового котла з природною циркуляцією 420 т/год. (рис. 2). Проте, в роботі [3] не розглядалися системи розділення пароводяної суміші, і зображено лише один тип труб. Фізичними процесами, що описують функціонування барабана, є процеси випаровування або конденсації. Фізична модель барабана показана на рис. 2.

Підтримка стабільного і плавного тиску пари є необхідною умовою для високоякісного регулювання температури пари та турбіни [7]. Відповідно регулювання тиску пари має забезпечувати низькі коливання тиску, що дозволяє таким чином підтримувати тиск близьким до безпечної межі та не перевищувати її. Це непросте завдання в пилувугільних парових котлах, оскільки вони мають значні збої, спричинені змінною калорійністю вугілля. Автори [8], [9] розробили низку математичних моделей для опису динаміки тиску в паровому котлі з метою розробки контролера тиску пари. Проте деякі невідомі параметри (наприклад, коефіцієнти конвекції) не дозволили отримати задовільне наближення динаміки

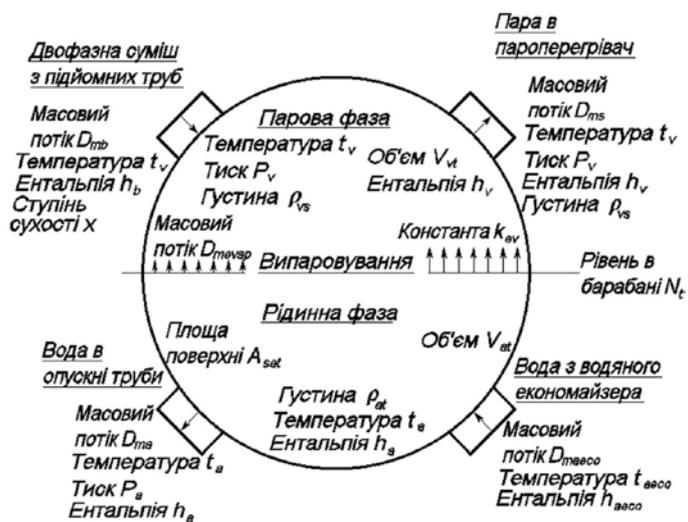


Рис. 2. Фізична модель барабана котла теплових електростанцій [6]

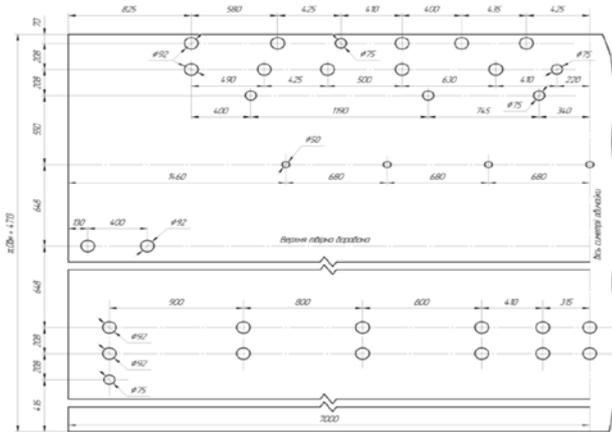
установки, використовуючи лише фізичні та геометричні параметри котла. Автор [7] на основі наявних даних отримав адекватну лінійну динамічну модель барабанного котла, яку можна використовувати для розробки високопродуктивної системи регулювання тиску пари. Ним розроблено лінійну модель барабанного котла з неперервним циклом редукованого порядку. Модель базується на спрощеному представленні основних процесів у вугільному млині, печі та випарнику. Як продемонстровано на реальній електростанції, отримана модель є досить точним представленням динаміки процесу за невеликих відхилень від заданого значення. Оскільки імпульсна характеристика запропонованої моделі дуже близька до тієї, що оцінюється за даними установки та використовується для проектування та налаштування контролера, очевидно, що запропоновану модель можна використовувати надалі для аналізу, проектування та налаштування регулятора тиску. Наприклад, в роботі [9] математичну модель використано для опису динаміки барабанного рівня котла з природною циркуляцією. Котел-барабан розділений на дві частини; верхня частина містить насичену пару, тоді як нижня частина містить суміш пара/вода. Співвідношення пари в цій суміші визначається в цій роботі як об'ємне співвідношення пари. З іншого боку, рівняння балансу застосовуються до барабана. Отримані рівняння використовуються для моделювання барабанного рівня. Важливість отриманої моделі походить від прямого моделювання рівня барабана, який зазвичай визначається в автономному режимі за допомогою емпіричних формул і припущень. Результати [10] показують, що ідеальний регулятор рівня, неможливо спроектувати без відповідного моделювання, а від нього залежить безпечна робота котлів. У роботі [11] представлено застосування методів нелінійного моделювання для оцінки динаміки барабана котла в термінах нелінійної моделі, яка є однією з важливих вимог для розробки схем контролю рівня води в барабані. Дослідження проводились для котла потужністю 210 МВт.

Математичні моделі, що відображають динамічну поведінку котлів електростанції в широкому діапазоні операційних сценаріїв, таких як пуски та зміни навантаження, необхідні для таких досліджень працездатності та керування. Однак моделі котлів, придатні для таких досліджень, є рідкісними в літературі. У роботі авторів [12] подана змішана стандартна зосереджена модель, що відображає динаміку барабана котла, та одновимірна розподілена модель, заснована на двофазному коді теплогідралічної стійкості, для представлення динаміки підсистеми випарника. Модель валідовано з використанням широкодіапазонних операційних даних установки, зібраних з котельного агрегата електростанції комбінованого циклу. До того ж, продуктивність запропонованої моделі порівнюється з двома іншими відомими моделями, заснованими на перших принципах. Автори зазначають, що запропонована ними модель перевершує наявні моделі, особливо для широкодіапазонного динамічного операційного сценарію, проте у відкритому доступі цих даних немає.

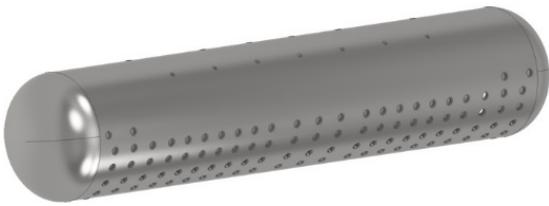
Автори [13] розробили модель динаміки рівня води в контурі барабан-стояк-спускний труба барабанного котла з природною циркуляцією. Їхня модель базується на основних правилах збереження маси, імпульсу та енергії, а також на добре відомих рівняннях конституції. Пароводяна суміш у барабані поділяється на три підоб'єми: вода, пара над рівнем води та під ним, і до кожного підоб'єму застосовується співвідношення балансу маси. Кількість пари під рівнем води прогнозується за допомогою двох рівнянь конституції для швидкості конденсації та швидкості підйому пари. Рівняння містять невизначені значення, такі як поверхнева швидкість води та середній розмір бульбашок пари в барабані. Поверхнева швидкість води вважається нульовою, а її вплив компенсується механістичною моделлю руху рівня води. Середній розмір бульбашок пари вважається довільним, а його вплив на динаміку досліджується за допомогою аналізу чутливості моделі.

В зарубіжній літературі достатньо мало інформації щодо подовження ресурсу котельного обладнання радянської доби. Тому, найближче до цієї роботи є робота авторів [14], [15], в якій розроблено методику дослідження можливості подальшої експлуатації барабанів котелень теплових електростанцій після вичерпання їхнього паркового ресурсу. Авторами на основі методу розрахунку просторово-тривимірних коефіцієнтів термодружності за допомогою скінчено-елементного аналізу запропоновано методику комп'ютерного моделювання процесів деформування барабана котла високого тиску за різних режимів його роботи. Запропонована методика моделювання дозволить встановити залишковий ресурс роботи барабанів котлоагрегатів теплових електростанцій та визначити шляхи їх економічнішої експлуатації. Автори [14], [15] досліджували барабан котла високого тиску системи ТП-100 Бурштинської ТЕС.

Метою роботи є визначення висоти розташування дзеркала випаровування в барабан-сепараторі котла ГМ-50-1 (рис. 3) [1] оскільки від цього залежить сольовий баланс в котлоагрегаті.



a)



б)

Рис. 3. Розгортка (а) і геометрична 3D-модель барабана котла ГМ-50-1 (б)

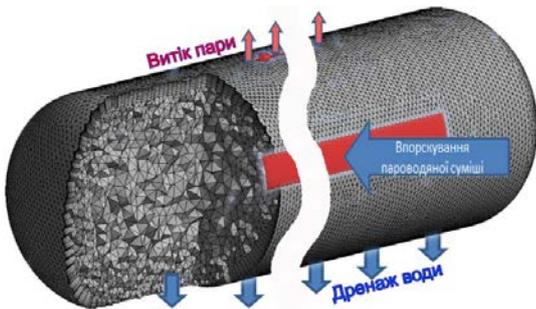


Рис. 4. Скінчено-елементна модель барабан-сепаратора котла ГМ-50-1

баран-сепаратора, становить 200 шт., побудувати 3D-модель на таку кількість труб поки не вистачає комп'ютерних ресурсів. Оскільки завдання граничних умов орієнтоване на незмінності витрати двофазної суміші [3], що потрапляє в об'єм барабан-сепаратора то подача двофазної суміші здійснюється крізь площину, що по площі дорівнює сумі площ 200 отворів під подачу двофазної суміші (рис. 3б, 4). За допомогою нормативного методу аналітично розраховано швидкість і температуру двофазної суміші, що надходить з екранних труб котельного агрегата [2]. Всі інші термодинамічні параметри потрібно визначити за допомогою методів CFD-моделювання. В моделі, пара сепарується від рідини внаслідок різниці густин всередині об'єму барабана і під дією підйомної Архімедової сили рухається до верхньої частини барабан-сепаратора де з площини, яка за площею дорівнює сумі площ 14 отворів під подачу сухої насиченої пари до пароперегрівача (позначено «витік пари» на рис. 4). У нижній частині барабан-сепаратора зроблено площину, що за площею дорівнює сумі площ 8 отворів для опускних труб, по яких з барабан-сепаратора рухається вода в нижні роздаткові колектори (рис. 3б, 4).

Корпус барабан-сепаратора теплоізолюваний, тому на його поверхні задавались адіабатичні граничні умови [2], [4].

Як керувальні рівняння використовується система рівнянь Нав'є–Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями [11], [12]

Розроблена модель також дозволить отримати візуалізацію траєкторій крапель вологи [3] в залежності від їхнього діаметра, що визначають деякі особливості течії пари в паровому об'ємі барабана, яку неможливо отримати наявними способами експериментального дослідження на обладнанні, що працює.

Методика дослідження

Для розв'язання поставленої задачі в середовищі ANSYS необхідно апроксимувати розрахункову область мережею скінчених елементів (рис. 4). В цій роботі використана гібридна сітка — комбінація структурованої і неструктурованої скінченно-елементної сітки. Структурована розрахункова сітка призначена для моделювання течії в примежовому шарі, що розвивається на межі твердотільна поверхня–рідина. Використано не менше 20-ти шарів скінчених елементів (рис. 4) при чому кожен наступний елемент більше попереднього на 10 %. Область між «примежовими шарами» апроксимується неструктурованою розрахунковою сіткою, відстань між вузлами якої можна регулювати параметром *Relevance Fine*. Розмір елементів сітки $1 \cdot 10^{-3}$ м. Для поєднання структурованої і неструктурованої розрахункових скінченно-елементних сіток використовувався метод *MultiZone*. Краплі вологи моделюються як дискретна фаза у вигляді сферичних частинок, розсіяних у безперервній фазі (паровий потік), за допомогою *DPM (Dispersed Fluid)*. ANSYS-CFX [16] здатен визначити траєкторії цих дискретних фазових об'єктів, а також тепломасообмін в них або із них.

Загальна кількість екранних труб, по яких подається двофазна суміш у внутрішній об'єм ба-

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

де S_m — рівнодійна масових сил; μ_{eff} — ефективна в'язкість, що є сумою молекулярної і турбулентної в'язкості; p' — модифікований тиск, який визначено так:

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

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

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial \tau} - \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + \partial x_i \left[u_i (\tau_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j}) \right]. \quad (3)$$

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

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

Залежність для розрахунку турбулентної в'язкості має такий вигляд:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

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 розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса, тоді як дисперсна фаза розв'язується шляхом відстеження великої кількості крапель через розрахункове поле потоку. Дисперсна фаза може обмінюватися імпульсом, масою та енергією з рідкою фазою. Цей підхід значно спрощується, коли взаємодією крапель дискретної фази між собою можна знехтувати. ANSYS-CFX прогнозує траєкторію дискретної фазової частинки (або краплі) шляхом інтегрування балансу сил на частинці, який записується в Лагранжевій системі відліку. Цей баланс сил прирівнює інерцію частинки до сил, що діють на частинку, і може бути записаний як

$$m_p \frac{d\vec{u}}{d\tau} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{d\tau_p} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}, \quad (6)$$

m_p — маса частинки (краплі); u — швидкість газової фази; u_p — швидкість краплі; ρ , ρ_p — щільність газу та крапель відповідно; F — додаткові сили; τ_p — час релаксації краплі.

Час релаксації визначається так:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_D Re'}, \quad (7)$$

де μ — молекулярна в'язкість рідини; d_p — діаметр краплі; Re' — число Рейнольдса; C_D — коефіцієнт опору.

Число Рейнольдса визначається так:

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p \left| \overline{u_p} - \bar{u} \right|}{\mu} \quad (8)$$

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

$$R \approx \frac{\sigma \sin \theta}{\rho' w'^2}, \quad (9)$$

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.

В [17] подано наближене співвідношення для розрахунку швидкості спливання бульбашки

$$w' = \frac{4kg\sigma(\rho' - \rho'')}{c''\rho'^2}, \quad (10)$$

Залежність (10) свідчить про те, що швидкість спливання бульбашок другої категорії в основному визначається фізичними параметрами системи ρ' , ρ'' , σ і формою бульбашки k , c'' . Лінійні розміри бульбашок практично не впливають на швидкість спливання, оскільки вони є критичними, обумовленими тим, що зі збільшенням розміру бульбашки рушійна підйомна сила зростає, зростає швидкість спливання, що призводить до збільшення опору. Наслідком зростання швидкості спливання та опору є деформація бульбашок та їх подрібнення. Таким чином, розміри парових бульбашок, які рухаються, обумовлені критичним станом, що характеризується взаємодією сил поверхневого натягу, виштовхування і опору.

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

$$\underbrace{\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i}}_{\text{Convection}} = \underbrace{\mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}}_{\text{Generation}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]}_{\text{Diffusion}} - \underbrace{\rho \varepsilon}_{\text{Destruction}}; \quad (11)$$

$$\underbrace{\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i}}_{\text{Convection}} = \underbrace{C_{\varepsilon 1} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}}_{\text{Generation}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]}_{\text{Diffusion}} - \underbrace{\rho C_{\varepsilon 2} \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right)}_{\text{Destruction}}, \quad (12)$$

де $k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$ — кінетична енергія турбулентних пульсацій; $\varepsilon = \nu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$ — швидкість ро-

зсіювання 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 прилеглому шарі, мінімальним значенням, що знаходиться на перетині між логарифмічним і лінійним профілем біля стіни [18]. Тому всі точки сітки, які знаходяться за межами в'язкого підшару, і всі невідповідності дрібної сітки відсіюються.

У разі використання таких функцій швидкість тертя визначається так:

$$U^* = C_{\mu}^{1/4} k^{1/2}. \quad (13)$$

Ця залежність має таку корисну властивість, що вона не зближається до нуля, якщо U_{τ} дорівнює нулю. На основі цього визначення можна отримати таке явне рівняння:

$$U_{\tau} = \frac{u^*}{\frac{1}{\kappa} \ln(y^*) + C}. \quad (14)$$

Абсолютне значення напруги зсуву біля стінки τ_w отримують з рівняння

$$\tau_w = \rho u^* U_\tau, \quad (15)$$

де

$$y^* = (\rho u^* \Delta y) / \mu; \quad (16)$$

$$u^* = \sqrt{\tau_w / \rho}. \quad (17)$$

Scalable Wall Function можна застосовувати до довільно дрібних сіток і дозволяє виконувати послідовне уточнення сітки незалежно від числа Рейнольдса.

Швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій в цьому випадку задається таким співвідношенням, яке справедливо в логарифмічній області:

$$\varepsilon = \frac{\rho u}{y^* \mu} \frac{C_\mu^{3/4}}{\kappa} k^{3/2}, \quad (18)$$

де κ — константа фон Кармана [16].

В цій роботі взаємозв'язок між рухомими середовищами моделювався з урахуванням того факту, що в потоках з дисперсною фазою великі частинки в дисперсній фазі мають тенденцію до збільшення турбулентності в безперервній фазі через наявність слідів за частинками. Це відомо як турбулентність, індукована рухомими краплями. Для моделювання цього ефекту в ANSYS-CFX застосовується модель Sato Enhanced Eddy Viscosity. Сила тертя між шарами рухомої рідини визначалась за моделлю Shiller–Nauman. Для моделювання теплообміну у разі турбулентного режиму течії двофазного потоку використано модель Ranz–Marshall, яка використовує кореляцію Ренца–Маршалла [19] на стороні безперервної фази інтерфейсу і нульовий опір на стороні фази частинок фазового розділу. Можна встановити рівноважний коефіцієнт масової частки. Цей параметр використовується для моделювання випаровування рідини в частинках до відповідних видів газової фази в безперервній фазі.

Результати дослідження

Моделювання засобами ANSYS-CFX дозволяє визначити візуально межі, де саме відбувається фазовий перехід. Результати розрахунку подані у вигляді розподілу об'ємної долі компоненту двофазної суміші (Volume Fraction рис. 5а, б) в поперечному перерізі барабан-сепаратора.

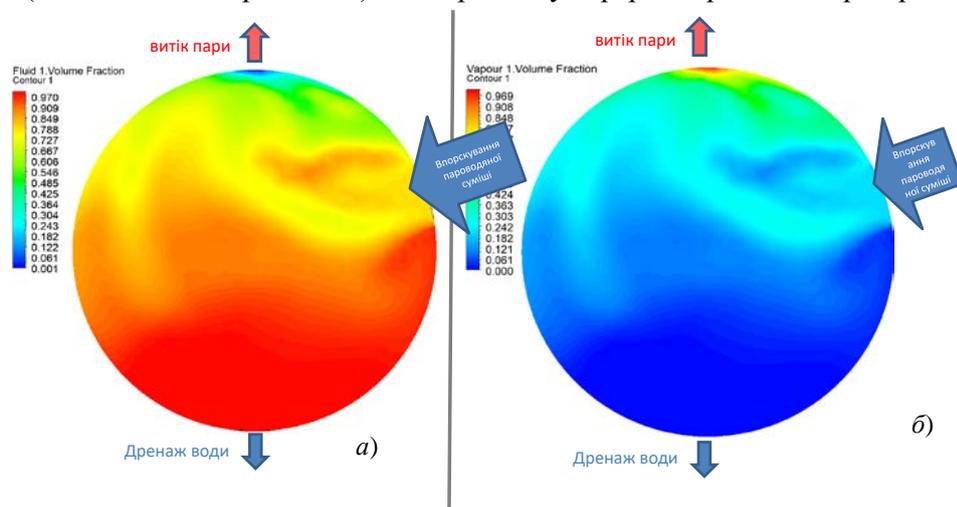


Рис. 5. Розподіл рідкої (а) і парової (б) фаз води в центральному поперечному перерізі по центру барабан-сепаратора

Аналіз даних рис. 6 свідчить, що нижче екватора барабан-сепаратора знаходиться рідина, яка по опускних трубах направляється в нижній роздавальний колектор котельного агрегата. А пара, внаслідок суттєвої різниці в густині «збирається» поблизу верхніх патрубків, звідки прямує в пароперегрівач.

В нижній частині барабана (рис. 5б) скупчується рідина. Через те, що пароводяна суміш потоком спрямовується в об'єм барабан-сепаратора (рис. 6), форма дзеркала випаровування має складну хвилясту поверхню і змінюється з часом. Як впливає з рис. 6, барабан-сепаратор наповнюється рідиною до свого «екватора», але рівень води в ньому постійно коливається.

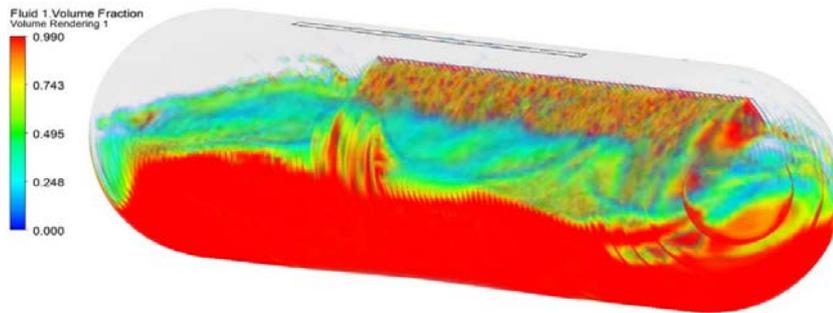


Рис. 6. Розподіл води в об'ємі барабан-сепаратора

Визначивши розподіл ентальпії двофазної суміші по висоті моделі барабана є можливість аналітично оцінити паровміст в його об'ємі. Наразі існує багато інших залежностей для визначення істинного паровмісту ϕ_1 при висхідному пароводяному адиабатному потоці. До таких залежностей варто віднести насамперед залежності, подані в [17], отримані на основі визначення коефіцієнта ковзання w , що є відношенням істинної швидкості пари w'' до істинної швидкості рідини w' ($\omega = w''/w'$). Наприклад,

$$\phi_1 = \left[1 + \omega(\rho'/\rho'')(1-x)/x \right] - 1, \quad (19)$$

де x — відносна ентальпія потоку.

Висоту розташування дзеркала випаровування можна оцінити, виділивши ізоповірхню значення паровмісту (рис. 7).

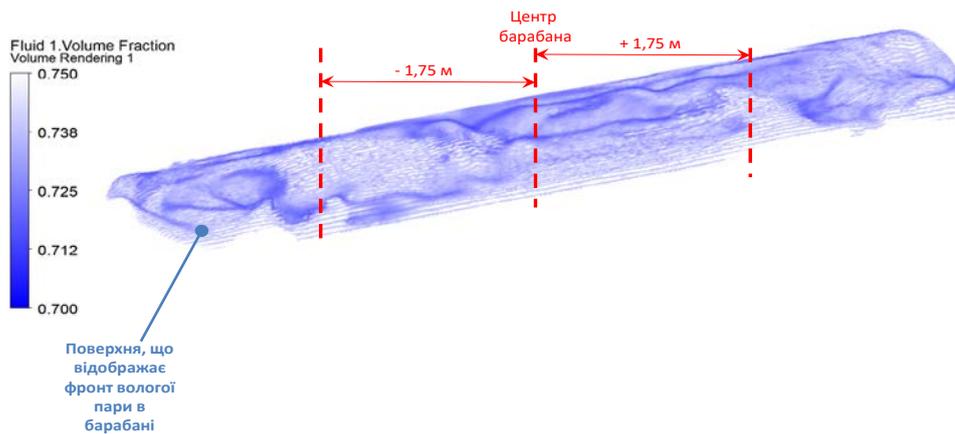


Рис. 7. Розподіл рідкої (а) і парової (б) фаз води в поперечному перерізі по центру барабана

Як відомо, за температури і тиску насичення над поверхнею води утворюється шар, в якому кількість молекул води, що покидають рідину дорівнює кількості молекул, які в ній повертаються. Тому дзеркалом випаровування в барабан-сепараторі слугує геометричне місце крапель вологи, які створюють суцільну поверхню. Якщо провести перпендикуляр від верхньої до нижньої точки на циліндричній поверхні барабану, можна побудувати залежність об'ємного паровмісту (Volume fraction) від висоти (рис. 7). Якщо паровміст становить 1, це відповідає парі, а значення паровмісту 0 — відповідає воді. З рис. 7 випливає, що рідина зосереджена на 10 см нижче екваторіального перерізу барабану, тоді як пара без домішок вологи (параметр Volume fraction дорівнює одиниці) займає вузьку область (висотою 20 см) в верхній частині барабану. Достатньо великий прошарок (30 см) займає волога пара різного ступеня сухості. Отже, в цій постановці задачі, порушуються рекомендації, які вимагають заповнення барабану рідиною на три чверті його висоти — тільки в цьому випадку підтримуються необхідний сольовий баланс в барабані.

Таким чином, якщо пароводяна суміш подається на дзеркало випаровування, як у цій задачі [1], то струмені двофазної суміші, яка направляється 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 забруднювальних частинок, розчинених в котловій воді, в пароперегрівач, а потім — і в проточну

частину турбіни [2]. Щоб цьому запобігти, в сучасних барабанах 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 подальших роботах.

Висновки

Проведена робота дозволяє зробити такі висновки:

- рідина зосереджена на 10 см нижче екваторіального перерізу барабан-сепаратора, тоді як пара без домішок вологи (параметр Volume fraction дорівнює одиниці) займає вузьку область (висотою 20 см) у верхній частині барабану. Достатньо великий прошарок (30 см) займає волога пара різного ступеня сухості;
- визначено розподіл ентальпії двофазної суміші по висоті моделі сепаратора, що в свою чергу дало можливість аналітично оцінити паровміст в міжтрубному просторі;
- отримано візуальне зображення меж, де саме відбувається фазовий перехід, що досить складно отримати на реальному обладнанні, що працює;
- оскільки, пароводяна суміш подається на дзеркало випаровування як в цій задачі, то струмені двофазної суміші, яка направляється з екранних труб створюють умови значного хвилювання поверхні, що інтенсифікує процес випаровування і знижує загальну висоту дзеркала випаровування. Отже в такій постановці задачі, порушуються рекомендації які вимагають заповнення барабана рідиною на три чверті його висоти — тільки в цьому випадку підтримується необхідний сольовий баланс в барабані;
- для того щоб запобігти утворенню хвиль на поверхні дзеркала випаровування рекомендується двофазну пароводяну суміш подавати під спеціальні конструктивні елементи барабану, дірчасті листи. Створення такої моделі планується в подальших роботах.

Загалом, підсумовуючи викладене, результати моделювання процесу сепарації водяної пари в внутрішньому просторі в комп'ютерній моделі барабана котла ГМ-50, що виконані за допомогою програми ANSYS CFX можна цінити як досить адекватні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. В. Баранюк, О. Ю. Черноусенко, А. Ю. Рачинський, і О. О. Пікенін, «Моделювання контуру природної циркуляції в котлі типу ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ),» *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 36 (75), № 4, с. 124-133, 2025. <http://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/16>.
- [2] N. V. Kuznetsov, Ed., *Тепловоу расchet kotel'nykh agregatov (Normativnyy metod)*. М.: Energiya, 1973.
- [3] О. В. Баранюк, М. В. Воробйов, і А. Ю. Рачинський, *CFD-моделювання процесу генерації пари в моделі прямооточного парогенератора реактора ВВЕР-1000*, навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://osvita.kpi.ua/>.
- [4] О. В. Баранюк, і А. Ю. Рачинський, «Моделювання генерації водяної пари при поздовжньому омиванні пучків труб,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 99-108, 2023. <http://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-25-33>.
- [5] O. Chernousenko, A. Rachynskiy, and O. Baranyuk, "CFD modeling of the gm-50 (e-50-3.9-440gm) boiler furnace," *Energy Technologies & Resource Saving*, vol. 79, no. 2, pp. 138-149, 2024. <http://doi.org/10.33070/etars.2.2024.10>.
- [6] G. Lazaroiu, "Dynamic modelling of steam boiler drum," *Revue Roumaine des Sciences Techniques «Politehnica» University of Bucharest*, no. 44 (1), pp. 101-109, 1999.
- [7] A. I. Ribic, "The development of a new industrial controller: structure, models, tuning and realization with application on thermal power plants." Ph. D. dissertation, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, 2010.
- [8] F. P. de Mello, "Boiler Models for System Dynamic Performance Studies," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 66-74, 1999.
- [9] S. R. Tawfeic, "Boiler Drum-Level Modeling," *J. Eng. Sci., Assiut Univ., Fac. Eng.*, vol. 41, no. 5, pp. 1812-1829, 2013.
- [10] A. Sumalatha, K. R. Sudha, and Ch. Jayalakshmi, "Dynamic modeling of Boiler drum using nonlinear system identification approach," *Measurement Sensors*, vol. 28, no. 9, pp. 100845, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100845>.
- [11] M. A. Hossain, "Computational Study of Methane-air Combustion Using the Species Transport Model," in *AIAA SciTech Forum*, San Diego, CA, USA, 2022. <http://doi.org/10.2514/6.2022-1102>.
- [12] P. U. Sunil, J. Barve, and P. S. V. Natara, "Mathematical modeling, simulation and validation of a boiler drum: Some investigations," *Energy*, vol. 126, pp. 312-325, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.140>.
- [13] H. Kim, and S. Choi, "A model on water level dynamics in natural circulation drum-type boilers," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 32, no. 6, pp. 786-796, 2005. <http://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.010>.
- [14] Б. Дробенко, С. Будз, І. Кузьо, Ю. Шоловій, і І. Будз, «Вплив накопичуваної пошкоджуваності на експлуатаційний ресурс барабана котлоагрегата теплоелектростанції,» *ISTCIPA*, № 56, с. 19-26, 2022. <http://doi.org/10.23939/istcipa2022.56.019>.
- [15] С. Будз, і І. Будз, «Оцінка експлуатаційного ресурсу барабана котлоагрегату енергоблоку ТЕС, пошкодженого при його експлуатації,» *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*, № 38, с. 5-10, 2023. <http://doi.org/10.15407/fmmit2023.38.005>.
- [16] *ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide*. New York, USA: ANSYS Inc., 2012.
- [17] L. F. Fedorov and N. G. Rassokhin, *Processes of Steam Generation at Nuclear Power Plants*. М.: Énergoatomizdat, 1985.
- [18] S. J. Green, and G. Hetsroni, "PWR steam generators," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 21, pp. 1-97, 1995.

[http://doi.org/10.1016/0301-9322\(95\)00016-Q](http://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00016-Q).

[19] X. Yang, C. Zhu, Q. Zhou, J. Chen, and J. Mou, “Study on Performance and Operation Mechanism of a Separation Equipment for a PWR Steam Generator,” *Atmosphere*, vol. 14, no. 3, pp. 1-113, 2023. <http://doi.org/10.3390/atmos14030451>.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.11.2025

Баранюк Олександр Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики; науковий співробітник Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України, e-mail: AleksandrW@i.ua ;

Рачинський Артур Юрійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: arturrachinskiy@gmail.com ;

Пікенін Олексій Олександрович — старший викладач кафедри космічної інженерії, Навчально-наукового інституту аерокосмічних технологій, e-mail: pikenin.work@gmail.com ;

Бордіян Артем Ігорович — аспірант кафедри цифрових технологій в енергетиці, e-mail: bordyanartem@gmail.com .

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

A. V. Baranyuk^{1,2}
A. Yu. Rachynskiy¹
O. O. Pikenin¹
A. I. Bordiian¹

Modeling of Water Steam Separation in the Gm-50-1 Boiler Drum Separator

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”;

²Institute of Thermal Energy Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

The paper presents the results of a numerical study of the processes of water vapor separation in the drum-separator of the GM-50-1 boiler unit, performed using the ANSYS CFX CFD package. The computational model takes into account the real hydrodynamic conditions of the drum: the supply of a steam-water mixture from the screen tubes, thermally insulated state of its metal casing, as well as organized selection of saturated steam from the upper part and water from the lower part. The Realizable $k-\epsilon$ model was used to describe turbulence.

The dispersed moisture phase was modeled as a set of spherical particles within the DPM approach, with the calculation of trajectories in the Lagrangian formulation taking into account the inertia of particles, hydrodynamic resistance and gravitational action. The main steam flow was described by the Navier–Stokes equations for a continuous medium. The interaction of droplets with each other was not taken into account. Hydrodynamic and heat exchange processes were modeled according to the Shiller–Nauman and Ranz–Marshall models.

The use of ANSYS CFX made it possible to determine the position of the phase transition zone and the spatial location of the evaporation mirror in the drum, which is of key importance for ensuring stable operation of the boiler unit. In the absence of experimental data regarding local vapor content, the assessment of the model correctness was carried out on the basis of technological requirements for the operation of drums of this type.

The results obtained can be used to optimize design solutions, operating parameters and assess the performance of power boiler drums.

Keywords: heat transfer, numerical modeling, steam generation, phase transition, evaporation.

Baranyuk Oлександр V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Heat and Alternative Power Engineering; Researcher of the Institute of Thermal Power Technologies of the NAS of Ukraine, e-mail: AleksandrW@i.ua ;

Rachynskiy Artur Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Heat and Alternative Power Engineering, e-mail: arturrachinskiy@gmail.com ;

Pikenin Oleksii O. — Senior Lecturer, of the Chair of Space Engineering, Educational and Research Institute of Aerospace Technologies, e-mail: pikenin.work@gmail.com ;

Bordiian Artem I. — Post-Graduate Student of the Chair of Digital Technologies in Energy, e-mail: bordyanartem@gmail.com