

Рачинський А.Ю.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ У ВЕРХНЬОМУ БАРАБАНІ КОТЛА ДКВР 10-13

У статті представлено результати чисельного дослідження процесу сепарації водяної пари в барабані котельного агрегату типу ДКВР 10-13, виконаного з використанням CFD-моделювання у безкоштовній студентській версії програмного комплексу ANSYS Student. Через обмеження версії моделюванню підлягала частина циліндричної оболонки барабана, що містить патрубки підведення пароводяної суміші з екранних труб та відведення сухої насиченої пари. Як граничні умови задано характеристики потоку пароводяної суміші, що надходить з екранних труб. Моделювання турбулентності здійснювалося за k - ϵ моделлю в модифікації Realizable. Дисперсна фаза представлена у вигляді сферичних крапель, що описуються методом DPM (Discrete Phase Model) у лагранжевому формулюванні з урахуванням інерції, гідродинамічного опору та сили тяжіння. Безперервна фаза (пара) моделювалася на основі рівнянь Нав'є–Стокса. Для опису взаємодії між фазами застосовано модель тертя Schiller–Naumann та теплообміну Ranz–Marshall. За результатами моделювання отримано нові дані про динамічні процеси взаємодії потоків води та пари в замкнутому об'ємі барабана в умовах впливу високих температур у нижній його частині. Визначено розподіл об'ємного паровмісту по висоті барабана, що дало змогу встановити положення дзеркала випаровування – важливий параметр для оцінки сольового балансу котлоагрегату. Через відсутність експериментальних даних адекватність моделі оцінювалася на основі вимог експлуатації барабанів даного типу. Визначено, що взаємодія струменів пароводяної суміші, яка направляється з екранних труб і рух пари від нижньої частини барабану створює умови порушення сольового балансу в барабані, що в свою чергу сприяє потраплянню забруднюючих частинок, які розчинені в котловій воді в пароперегрівач, а потім і в проточну частину турбіни.

Ключові слова: теплообмін, моделювання, пара, фазовий перехід, дзеркало випаровування.

Постановка проблеми. Представлена робота присвячена моделюванню параметрів пароводяної суміші, що поступає в об'єм барабана котла типу ДКВР 10-13 і знаходиться в умовах впливу високих температур розжарених газів в нижній частині барабану. Такі умови характерні для котла ДКВР 10-13.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність обраної тематики підтверджується значною кількістю публікацій та високим рівнем наукових досліджень, виконаних ученими з усього світу. У роботі [1] автор запропонував основні ідеї та рівняння для динамічного моделювання барабана котла теплових електростанцій. Модель ґрунтується на фундаментальних законах збереження маси та енергії, застосованих одночасно до фаз пари та води. Підхід до моделювання, заснований на фізичних рівняннях, природним чином приводить до опису процесів у просторі станів, що є зручним для подальшого чисельного аналізу та інтеграції в системи CFD-моделювання.

Однією з ключових проблем експлуатації барабанних котлів є складність точного опису та контролю процесів пароутворення. Через нелінійний характер динаміки тепло- та масообміну, а також складні зв'язки між термодинамічними властивостями рідини та пари, прогнозування поведінки системи потребує застосування детальних математичних моделей. Процеси, що відбуваються під час випаровування, є складними й характеризуються нелінійними залежностями між параметрами тепло- та масообміну. Важливі технологічні характеристики, такі як точка висихання або ступінь перегріву, є важковимірюваними, що ускладнює побудову ефективних систем керування. Результати експериментальних і чисельних досліджень [2] показують, що у таких системах можуть виникати різні типи нестабільностей та коливань потоку, що вимагає врахування під час моделювання та експлуатації котлоагрегатів.

Крім того, на стабільність роботи циркуляційного контуру впливають такі фактори, як зміни теплового навантаження, нерівномірність нагріву, коливання тиску та витрати теплоносія. Це зумовлює виникнення гідродинамічних нестійкостей, включаючи коливання витрати в циркуляційних трубах, що може призводити до зниження ефективності теплообміну та навіть аварійних ситуацій.

В доступній літературі автори надають значну увагу розробці законів керування рівнем в барабані котла. Наприклад, автори [3] розробили модель котла цукрового заводу Proserpine Mill компанії Wilmar Sugar, що працює в умовах дуже змінних навантажень. Параметри моделі можна отримати безпосередньо з фізичних характеристик будь-якого котла. Авторами описано наслідки моделі для керування котлом з особливим акцентом на зменшення коливань рівня води в барабані при великих та швидких змінах потоку пари. Експериментальні результати котла на цукровому заводі Proserpine Mill компанії Wilmar Sugar підтвердили покращення коливань рівня води в барабані, досягнуті завдяки оновленому закону керування.

В доступній літературі є велика кількість робіт присвячених, як і вище згадані, моделюванню динаміки барабанного котла. Також відомо про достатню кількість досліджень присвячених управлінню рівнем в барабані [4, 5]. Наявність таких робіт свідчить про актуальність тематики представленої статті і є наступним кроком після визначення структури потоків в барабані котла типу ДКВР і форми та розташування дзеркала випаровування в ньому.

Роботи, що присвячені розробці математичних моделей для котлів барабанного типу теж представлені в значній кількості [6-8]. Хоча предметом дослідження в них не барабан котла типу ДКВР, але основні наукові результати можна використати і в цій статті в якості верифікації. Наприклад

роботу [9], в якій автор виконав моделювання розподілу води в паровому барабані та системі подавальних труб, а також перенесення крапель у газову фазу в турбулентній області розділення барабана. Його моделювання свідчить, що точність моделі розподілу частинок у взаємодії з силами опору та неопірними силами здатна відтворювати горизонтальні та вертикальні картини потоку, що отримані авторами експериментальної роботи [10]. Згадані дані візуалізації можна спиратись в даній статті для верифікації результатів моделювання.

Метою статті є отримання нових даних щодо динамічних процесів взаємодії потоків води і її пари в замкнутому об'ємі барабана котла типу ДКВР 10-13 в умовах впливу високих температур розжарених газів в нижній частині барабану, що обумовлено конструктивними особливостями ДКВР 10-13.

Метод дослідження – комп'ютерне моделювання руху фронтів води і її пари, що потрапляють в об'єм верхнього барабану котла ДКВР 10-13, що розташований над паливною котла. 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 в барабані котла типу ДКВР 10-13 в умовах впливу високих температур розжарених газів в нижній циліндричній частині барабану.

Предмет дослідження – є термодинамічні параметри пароводяної суміші в середині барабану котла ДКВР 10-13.

Виклад основного матеріалу. Двофазні режими потоку використовуються в енергетичних системах, системах теплопередачі, в теплових

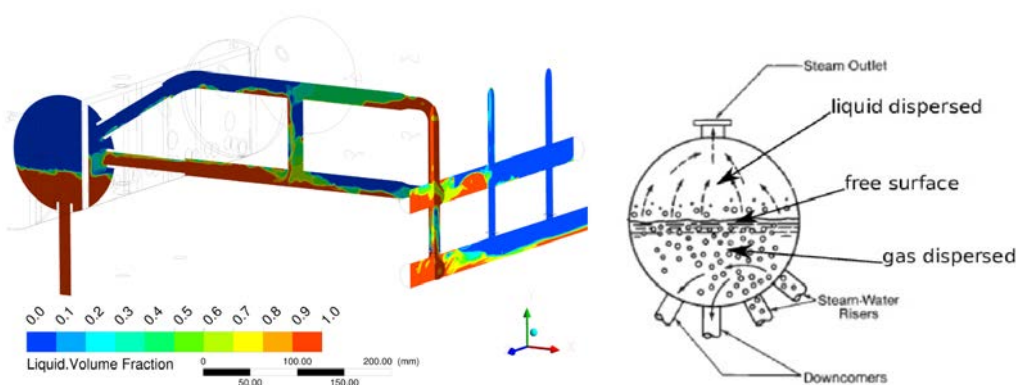


Рис. 1. Візуалізація розподілу пара/вода [10] (а) та схема потоку в паровому барабані з природним розділенням пари/води [9] (б)

мережах і при дослідженні геометеорологічних явищ. Отже, багатофазний потік має величезне значення для проектування парових котлів, оскільки він дозволяє прогнозувати експлуатаційні межі, стабільність процесу і запобігання пошкодженням обладнання котельного агрегату.

Динаміка рідини у всіх вищезазначених випадках по суті регулюється подібними фізичними законами, тобто рівняннями балансу імпульсу та маси. Ці рівняння балансу можна розв'язати за допомогою ресурсоемких числових алгоритмів [9].

Для створення моделі пароводяного потоку середині об'єму барабану котла використана студентська версія ANSYS CFX. ANSYS CFX – це програмне забезпечення для CFD, яке базується на нестационарних рівняннях Нав'є-Стокса в їхній консервативній формі. Окрім рівнянь Нав'є-Стокса, для розв'язання системи рівнянь потрібні рівняння стану. Для моделювання, що включає багатокомпонентний потік, багатофазний потік або рідину зі змінною щільністю, активована модель плавучості. Математичний опис згаданих рівнянь приводиться в довідковій літературі [11, 12] є достатньо взнаваним і не приводиться в тексті даної статті оскільки її авторами не є їх розробниками.

Рівняння Нав'є-Стокса є зв'язаними нелінійними диференціальними рівняннями з частинними похідними, які необхідно дискретизувати числовими методами для розв'язання за допомогою комп'ютерів [9]. Тому моделі передусє геометрична модель, що побудована на основі креслень барабану котла ДКВР 10-13 [13], які розміщені в відкритому доступі (рис. 2). Розрахунковою областю є континуум всередині барабану. Входи/виходи з барабану пароводяної суміші, води і її

пари виконані у вигляді циліндричних виступів (рис. 2), що відповідають внутрішнім діаметрам відповідних отворів, що приведені на робочих кресленнях [13].

Оскільки з-за обмежень ресурсу персональних комп'ютерів і власне ANSYS Student не є можливим виконання обчислень на повній копії комп'ютерній барабану, тому автори обмежились його ділянкою, встановивши на бічних площинах розрізу симетричні граничні умови (рис. 3).

При завданні граничних умов за допомогою Нормативного методу аналітично розраховано швидкість і температуру двофазної суміші, що надходить з труб, що екранують паливну котла ДКВР 10-13 (позначено синіми стрілками на рис. 3б). Прогнозується, що в моделі, пара сепарується від рідини за рахунок різниці густин всередині об'єму барабану і під дією підйомної архімедової сили рухається до верхньої частини барабану де з площини (позначено оранжевою стрілкою на рис. 3б). В роботі [14] визначено температурне поле частини барабану, яка контактує з розжареними газами в паливні. Значення температур на цьому відрізку циліндричного днища барабану осередненні по поверхні і використані у вигляді температурних граничних умов (позначено червоними стрілками на рис. 3б).

З-зовні корпус барабану теплоізолюований, тому на його поверхні задавались адіабатичні граничні умови.

Відомо, що ANSYS CFX зберігає всі невідомі у вузлах, а не в центральних точках. Ця процедура призводить до контрольного об'єму, який має більше балансових граней, ніж комірка геометричної сітки, і виглядає як багатогранник. Завдяки більшій кількості балансових граней та

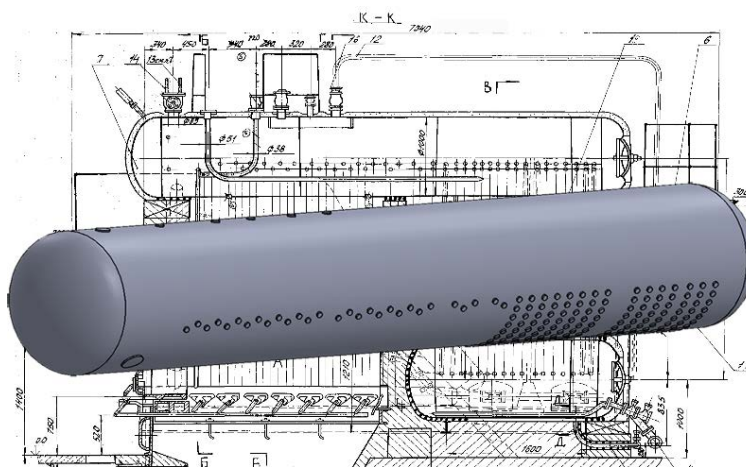


Рис. 2. Вид розрахункової області для барабану котла ДКВР 10-13

сусідніх комірок апроксимація градієнтів набагато краща. Отже, градієнти, що мають місце на межі розділу, розв'язуються з більшою точністю та стабілізують процес числового розв'язання. Цей останній факт є перевагою ANSYS CFX для моделювання багатофазних потоків.

Обговорення отриманих результатів. Згідно попередніх аналітичних розрахунків, що виконані за допомогою Нормативного методу, з екранних труб подається в об'єм барабана котла пароводяної суміші зі швидкістю 0,5 м/с і температурою 70°C. Процес відокремлення води від пари наглядно демонструється розподілом об'ємної долі компоненту двофазної суміші (Volume

Fraction рис. 4а і б) в поперечному перерізі барабану. Площина поперечного перерізу вибрана так, щоб проходила крізь отвір для виходу пари так і крізь отвори для впорскування пароводяної суміші.

Аналіз даних рис. 4 свідчить, що фракція води знаходиться тільки в струменях потоку, що направляється з екранних труб. Також в нижній циліндричній частині барабану спостерігається прошарок води, яка стікає по стінкам барабана з розжареною газами стінкою – вода майже миттєво випаровується, тому така тонка область з водою. Вода наявна тільки в струменях, що направляються з екранних труб і в тонкій області

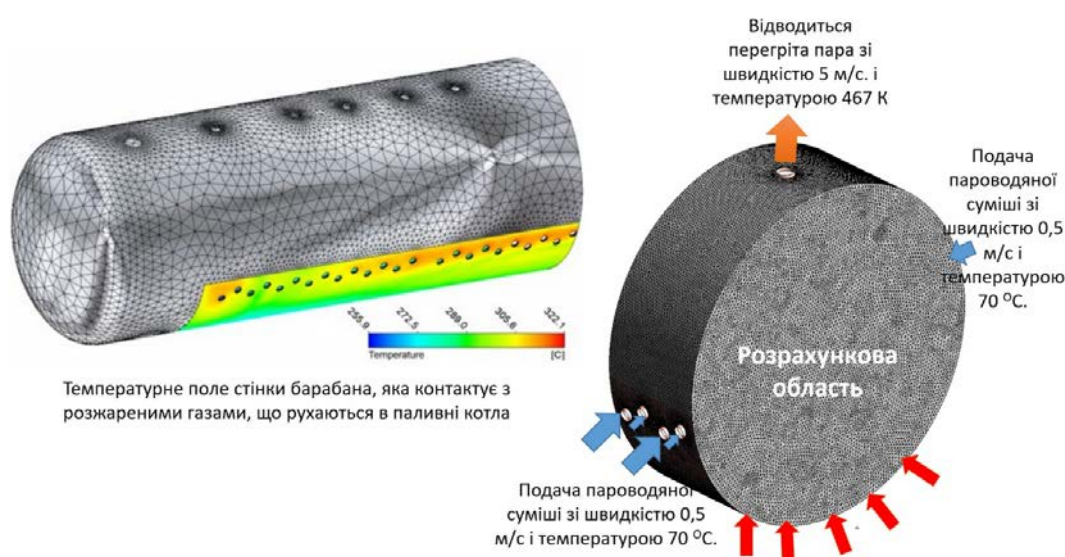


Рис. 3. Розрахункове поле температур у нижній частині барабану котла ДКВР 10-13 (а) [14] та розрахункова область моделі з граничними умовами (б)

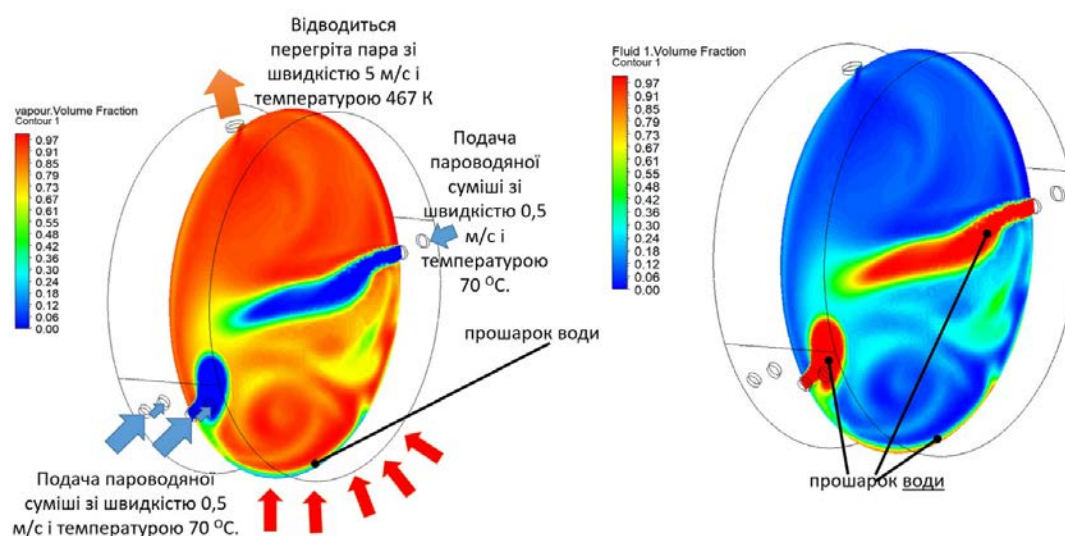


Рис. 4. Розподіл парової (а) і рідкої (б) фаз води в поперечному перерізі по центру барабана

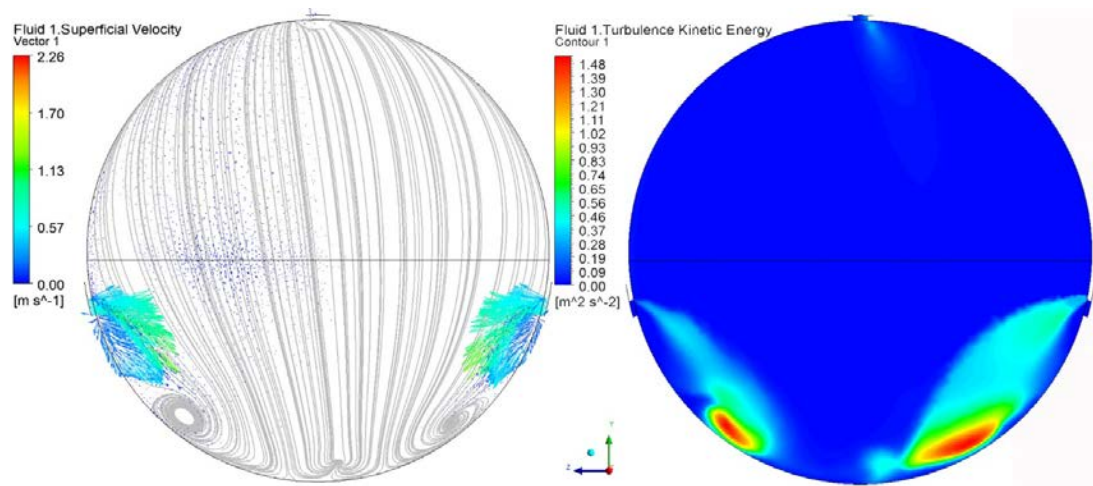


Рис. 5. Розподіл траєкторій руху води (а) і кінетичної енергії турбулентних пульсацій частинок води (б) в центральному поперечному перерізі барабану

в нижній частині барабану, куди вона стікає під дією сили тяжіння. Отже, пароводяна суміш, що потрапляє в барабан з труб бічних екранів охолоджує стінки верхнього барабану і захищає метал від дії розжарених газів в паливні котла.

Власне рух води, після сепарації її з пароводяної суміші ілюструє рис. 5а. Де показано як краплі води, що мають достатньо високу кінетичну енергію (до $0,5 \text{ м}^2/\text{с}^2$ рис. 5б) осідають на нижній циліндричній частині барабану, звідки під дією високих температур ($\approx 300^\circ\text{C}$ рис. 3а) випаровуються і рухаються в сторону патрубка виходу пари, що розміщений в верхній частині барабану.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що в даній задачі досить складно в визначити висоту розташування дзеркала випаровування (геометричного місця крапель вологи які створюють суцільну поверхню). В даній постановці задачі фронт рідини постійно змивається струменями пари які сепаруються з потоку пароводяної суміші, що поступає з бічних екранів і потоками

пари, яка підіймається від нижньої циліндричної частини барабана.

Висновки. Моделювання течії і теплообміну в секції верхнього барабану котла ДКВР 10-13 дозволяє зробити наступні висновки:

- внаслідок контакту нижньої частини барабану котла з розжареними газами паливні (конструктивні особливості котла ДКВР) призводить до закипання води і вторинної генерації пари;

- взаємодія струменів пароводяної суміші, яка направляється з екранних труб і рух пари від нижньої частини барабану створює умови порушення сольового балансу в барабані, що в свою чергу сприяє потраплянню забруднюючих частинок, які розчинені в котловій воді в пароперегрівач, а потім і в проточну частину турбіни.

Після подолання обмежень від студентської версії ANSYS автор планує покращити модель, шляхом моделювання течії в двоступеневій системі випаровування з установкою в другому ступені виносних циклонів.

Список літератури:

1. Lazaroiu Gheorghe. Dynamic modelling of steam boiler drum. *Revue Roumaine des Sciences Techniques «Politehnica» University of Bucharest*. 1999. No. 44(1). pp. 101–109.
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. Carrasco D.S., Goodwin G.C., Peirce R.D. Novel modelling for a steam boiler under fast load dynamics with implications to control. *Automatica*. 2023. Vol 156. P. 1–7 <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2023.111184>
4. Tawfeic S. R., Boiler Drum-Level Modeling. *JES Journal of Engineering Sciences*. Vol. 41(No. 5), pp. 1812–1829. DOI: 10.21608/jesaun.2013.114911.
5. Sumalatha A., K Sudha Rani, Jayalakshmi Ch. Dynamic modeling of Boiler drum using nonlinear system identification approach. *Measurement Sensors*. 28(9). 100845 DOI: 10.1016/j.measen.2023.100845
6. 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.
7. Deghal Cheridi A.L., Dadda A., Bouam A., Dahia A. Transient Simulation of an Industrial Steam Boiler. *Algerian Journal of Signals and Systems*. 2022. 7, 2 (Jun. 2022), 77–83. DOI: <https://doi.org/10.51485/ajss.v7i2.164>.

8. Liu H. T., Koçak H., Kakaç S. Dynamical analysis of pressure-drop type oscillations with a planar model. *International Journal of Multiphase Flow*. 1995. Vol. 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. Nowitzki M. 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.
10. Kitto John B., Stultz eds. *Steam: Its generation and use*. 41. ed., 1. print. Barberton, Ohio: Babcock & Wilcox. 2005. ISBN: 0963457012.
11. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide. New-York, USA: ANSYS Inc, 2012.
12. Versteeg Henk K., Weeratunge Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. 2. ed., [Nachdr.] Harlow: Pearson/Prentice Hall. 2007. ISBN: 9780131274983
13. Energetik. Steam boilers: boilers series DKVr with a pressure up to 1,3 MPa (gas, liquid, coal) DKVR-4-13, DKVR-6,5-13, DKVR-10-13, DKVR-20-13. URL: https://energetik.ua/en/catalog/parovi_kotly/dkvr-1-3/ Accessed: 11.12.2024 p.
14. Рачинський А. Ю. Баранюк О. В., Черноусенко О. Ю. (2025). Термонапружений стан барабану котла ДКВР-10-13 у разі заміни штатного пальника на струменеві-нішевий. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 1(178). С. 137–144. DOI: 10.31649/1997-9266-2025-178-1-137-144,

Rachynskyi A. Yu. MODELING OF WATER STEAM SEPARATION PROCESSES IN THE UPPER DRUM OF THE DKVR 10-13 BOILER

The article presents the results of a numerical study of the process of water vapor separation in the drum of a boiler unit of the DKVR 10-13 type, performed using CFD modeling in the free student version of the ANSYS Student software package. Due to version limitations, the part of the cylindrical shell of the drum containing the branch pipes for supplying the steam-water mixture from the screen tubes and removing dry saturated steam was subject to modeling. The characteristics of the steam-water mixture flow coming from the screen tubes were set as boundary conditions. Turbulence modeling was carried out using the $k-\varepsilon$ model in the Realizable modification. The dispersed phase is represented in the form of spherical droplets, which are described by the DPM (Discrete Phase Model) method in the Lagrangian formulation taking into account inertia, hydrodynamic resistance and gravity. The continuous phase (vapor) was modeled based on the Navier-Stokes equations. The Schiller-Naumann friction model and Ranz-Marshall heat transfer model were used to describe the interaction between the phases. The modeling results obtained new data on the dynamic processes of interaction of water and steam flows in a closed volume of the drum under the influence of high temperatures in its lower part. The distribution of volumetric steam content along the height of the drum was determined, which made it possible to establish the position of the evaporation mirror – an important parameter for assessing the salt balance of the boiler unit. Due to the lack of experimental data, the adequacy of the model was assessed based on the requirements for the operation of drums of this type. It was determined that the interaction of jets of the steam-water mixture, which is directed from the screen tubes and the movement of steam from the lower part of the drum, creates conditions for disturbing the salt balance in the drum, which in turn contributes to the ingress of polluting particles dissolved in the boiler water into the superheater, and then into the flow part of the turbine.

Key words: heat transfer, modeling, steam, phase transition, evaporation mirror.

Дата надходження статті: 12.09.2025

Дата прийняття статті: 27.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025