

Д.О. Федоров, асп., асист., ORCID 0000-0003-3751-6986
 В.О Туз, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4691-4890
 С.В. Клевцов, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-1405-5048
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ КРИЗИ ТЕЧІЇ ДЛЯ ТЕПЛОНОСІЯ НАДКРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Зацікавленість до проблематики різних теплофізичних і гідродинамічних явищ в атомній галузі, визначено реальним застосуванням в області аналізу аварійних процесів, пов'язаних з втратою теплоносія при порушеннях герметичності контуру охолодження в ядерних енергетичних установках. У статті проведено аналітичний огляд існуючих підходів математичного представлення явища критичного витікання середовища та актуальних прогнозних моделей. Надано опис фізичної суті такого феномену. Виконано аналіз існуючих моделей процесу для однофазного і двофазного потоку з урахуванням їх теплофізичних властивостей та залучених припущень. Задача полягала у аналізі, оцінці і актуалізації даних використання моделей, що необхідно для отримання замикаючої характеристики процесу. Розглянуті фізичні аспекти та особливості зазначеного явища для теплоносія надкритичних параметрів. Сформульовані вимоги до універсальної моделі кризи течії з подальшим її використанням в системних теплогідравлічних кодах для оцінки проблем ядерної безпеки перспективних ядерних реакторів IV-го покоління.

Ключові слова: криза течії, критична витрата, надкритичні параметри, запірні характеристики, затискання потоку

Прийняті скорочення:

HEM	- homogeneous equilibrium model	НКП	- надкритичні параметри
LOCA	- loss of coolant accident	ЯР	- ядерний реактор
КТ	- криза течії		

Прийняті позначення:

G	критична витрата (кг/с)	x	паровміст (від. од.)
h	- питома ентальпія (Дж/кг)	α	- об'ємна частка фази (від. од.)
p	- тиск (Па)	k	- коефіцієнт проковзування (від. од.)
s	- питома ентропія (Дж/кг·К)	L	- довжина (м)
v	- питомий об'єм (м ³ /кг)	D	- внутрішній діаметр (м)

Прийняті нижні індекси:

i	початкове значення	fg	процес кипіння
g	парова фаза	c	критичне значення
f	- рідка фаза		

Вступ

На початку 2000х років, міжнародне агентство з атомної енергії, організувало спеціальну координаційну програму по визначенню актуальних проблем теплогідравлічних феноменів для ядерних реакторів на воді надкритичних параметрів [0,0]. Однією з актуальних задач є вивчення впливу затискаючих характеристик на витрату в вихідному перерізі умовного розриву при швидкій втраті тиску. Це має важливе практичне значення, оскільки підтримка тиску в контурі циркуляції під час аварії пов'язана з течєю першого контуру. Реалістичний прогноз втрати теплоносія при аваріях є принциповим при проведенні аналітичних робіт з обґрунтування безпеки ядерних реакторів, а також для вибору компонентів систем безпеки [0].

Рушійною силою в потоці середовища є градієнт тиску. Зменшення тиску на вихідній ділянці при незмінному на вхідному, приводить до збільшення швидкості витікання. Створене додаткове збурення передається по середовищу зі швидкістю поширення слабких хвиль всередину об'єму і приводить до перерозподілу тиску в бік збільшення його перепаду. В результаті чого, швидкість середовища в кожному

© Д.О. Федоров, В.О Туз, С.В. Клевцов, 2021

переризи трубопроводу збільшується. Однак, якщо швидкість у вхідному переризи досягла швидкості поширення самих слабких хвиль, то зменшення тиску внаслідок того, що воно поширюється з тією ж швидкістю, з якою витікає середовище, не буде більше передаватися в об'єм і викликати збільшення швидкості.

Тобто, існує кінцева величина швидкості поширення малих збурень, яка обумовлює неможливість безперервного переходу потоком через обмежуючу швидкість хвилі механічного коливання середовища, без додаткових гометричних і фізичних заходів. Іншими словами, подальше зменшення тиску у вихідному переризи більше не призводить до збільшення швидкості витікання, відбувається замикання величини витрати течії. Такий режим особливої умови витікання називають кризою течії, а характерну місцеву швидкість - критичною швидкістю течії [0]. Важливо також зазначити, що в умовах контурної течії, КТ настає через те, що немає додаткових факторів, що дозволяють отримати надзвуковий режим витоків середовища.

Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є ознайомлення з існуючими підходами математичного представлення явища критичного витікання середовища та актуальних прогнозних моделей. Виходячи з цього, сформулювати вимоги до універсальної моделі кризи течії. Для реалізації поставленої мети необхідно:

- провести літературний огляд основних існуючих підходів;
- виконати актуалізацію класифікації прогнозних моделей;
- за результатами оглядового дослідження зробити висновки;

Матеріал та результати досліджень

Класична гідрогазодинаміка використовує певний набір фізичних величин і понять, якими описується стан або процес. В даному випадку, коли потрібна оцінка масової витрати, необхідно враховувати і мати на увазі наступні початкові умови:

- вихідний термодинамічний стан середовища в об'ємі: повна ентальпія H_i , тиск P_i та маса m_i ;
- геометричні характеристики гідравлічної системи: довжина L та діаметр D .

В загальному випадку, для прогнозування КТ необхідно враховувати наступні аспекти:

- фазову термодинамічну нерівноважність;
- початкове прискорення середовища;
- історію зміни тиску в об'ємі;
- міжфазний обмін масою, енергією і імпульсом;
- ефекти, зумовлені багатомірністю задачі.

В літературі [0] представлена інформація про критичні моделі течії для однофазних і двофазних потоків. Деякі з них запропоновані без теоретичних викладок і представлені у вигляді напівемпіричних співвідношень, що зв'язують критичну витрату і термодинамічні параметри стану середовища. Для узгодження з відповідними експериментальними даними вводяться безрозмірні поправочні коефіцієнти.

Інші моделі, навпаки, отримують шляхом вирішення набору двох і більше балансових рівнянь, що описують фундаментальні закони збереження маси, імпульсу і енергії для кожної фази окремо або для представленої гомогенної суміші. Звичайно, ці підходи були розроблені в першу чергу для докритичного стану, тому питання їх прямого застосування для опису явища КТ при НКП не формулюється. Однак, вони взяті за основу в роботах по адаптації моделей, призначених для надкритичних умов.

З математичної точки зору, навіть найскладнішу теоретичну постановку, засновану на системі з семи диференціальних рівнянь збереження(маси), цілком допустимо вирішувати з коректними спрощувальними умовами. Більш того, багато теорій стають застосовними для інженерних оцінок, якщо вони дають прийнятне співпадіння з релевантним експериментом і / або заздалегідь заданими граничними умовами. Але, якщо спрощуючи припущення не витримуються, то результати можуть приймати велике відхилення, або зовсім ставати непридатними.

З даного короткого огляду можна зробити висновок про те, що існуючі моделі критичного витікання можуть істотно відрізнятися, в залежності від формулювання підходу і прийнятих припущень при постановці задачі. Проте, існуючі підходи для рішення задачі можна розділити на дві базові групи з внутрішніми умовами поділу фаз. Їх прийнято називати термодинамічно (температура) і механічно (тиск) рівноважні і нерівноважні, розуміючи під цим:

- тиск і температура рідкої і парової фаз рівні;
- параметри пов'язані кривою насичення h , s -діаграми води і водяної пари.

Двокомпонентні моделі, в свою чергу поділяють в залежності від прийнятих припущень:

- гомогенні моделі: фазові швидкості рівні;
- гетерогенні моделі: фазові швидкості різні;
- "заморожені" моделі, де передбачається відсутність міжфазового масообміну.

Також, допускається зміна об'ємних фазових частин уздовж осі потоку. Ця умова ідеалістична з точки зору фундаментальних понять термодинамічної теорії, оскільки явища конденсації і випаровування залежать від міжфазових градієнтів температури і тиску. Іншими словами, постульований фазовий перехід відбувається миттєво.

Першу модель [0], яка представляє класичний термодинамічний підхід, прийнято називати гомогенною рівноважною моделлю (homogeneous equilibrium model). Вона спочатку розглядалася для середовищ в посудинах під тиском при аналізі витікання через трубу, діаметр якої малий у порівнянні з лінійним розміром посудини. Це найбільш простий підхід для формулювання рівноважної постановки задачі, при якому виділяють наступні припущення:

- однорідність середовища (представляється однокомпонентною рідиною з усередненими по масовому вмісту теплофізичними властивостями);
- процес витікання середовища усталений і ізоентропійний.

Слід зазначити, що дана модель була розроблена для визначення критичної витрати двофазної суміші, припускаючи, що між фазами відсутнє проковзування. Сама ж величина критичної витрати визначається наступним чином:

$$G = \frac{2 \left[h_i(p_i) - h_g(p) - \frac{s_i(p_i) - s_f(p)}{s_{fg}(p)} h_{fg}(p) \right]^{\frac{1}{2}}}{v_f + \frac{s_i(p_i) - s_f(p)}{s_{fg}(p)} v_{fg}(p)} \quad (1)$$

З інформації відкритих літературних джерел [0], ця модель дає кращі результати при високому тиску гальмування (стагнації) потоку і паровмісту. Крім того, при великих довжинах каналу витікання, спостерігається підвищення точності прогнозу моделі, що добре співвідноситься з припущенням про термодинамічну рівновагу.

Друга модель [0] є теж гомогенна і рівноважна, але в основі побудована на гідродинамічному підході. Ця теорія включає опис поведінки двофазної суміші за допомогою шести незалежних рівнянь (три рівняння балансу, написані окремо для пари і рідини), при деяких припущеннях, які спрощують отримання аналітичного виразу. Для вирішення необхідне знання хоча б однієї термодинамічної змінної у вихідному перерізі.

У припущенні про невизначеність величини градієнта тиску в критичній області, ізоентропійному розширенні суміші і з увагою до рівнянь стану, величину критичної витрати визначають як:

$$G = \left[- \frac{1}{\left[\frac{dv_f}{dp} - \frac{v_{fg}}{s_{fg}} \frac{ds_f}{dp} + x \left(\frac{dv_{fg}}{dp} - \frac{v_{fg}}{s_{fg}} \frac{ds_{fg}}{dp} \right) \right]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

З останнього виразу можна зробити висновок, що кожній термодинамічній умові у вихідному перерізі, відповідає конкретна витрата, в результаті чого в певному діапазоні зміни тисків в системі, витрата не залежить від параметрів стану витікаючого об'єму.

Наступні моделі – гетерогенні, де в порівнянні з попередніми, вводиться поняття об'ємної частки фази, яка визначається як:

$$\alpha = \frac{1}{1 + k \left(\frac{1-x}{x} \right) \frac{v_f}{v_g}} \quad (3)$$

Серед моделей гетерогенної постановки загальними припущеннями є термодинамічна рівновага і адіабатичне витікання, в той же час оцінку величини коефіцієнта проковзування k кожна модель трактує на свій лад. Що фактично відрізняє різні нерівноважні моделі між собою (Рис 1).

Третя модель [0], з проковзуванням фаз, використовує в основі рівняння збереження енергії. Вона отримала широке впровадження в розрахункових кодах, застосовується в техніці і була прийнята як найбільш точний підхід при визначенні масової витрати для протяжних каналів (відношення довжини до діаметру значно більше одиниці, $\frac{L}{D} \gg 1$).

Тобто при заданих початкових умовах, витрата залежить від величин тиску і коефіцієнта проковзування. Автором [0] відзначається і той факт, що в силу дозвукових швидкостей фаз, на величину критичної витрати буде мати вплив також і зовнішній тиск за вихідним перерізом.

Четверта модель [0], враховує проковзування фаз, на основі рівняння збереження імпульсу. В основу цього підходу закладено базис моделі описаної раніше, але з наступною відмінністю в постановці задачі:

- не враховується тертя;
- неоднорідність суміші враховується коефіцієнтом ковзання k і задається кількісно.

Критична витрата визначається як:

$$G = \left[\frac{2 \left[h_i - h_f - \frac{h_{fg}}{s_{fg}} (s_i - s_f) \right]}{\left[\frac{k(s_g - s_i)}{s_{fg}} v_f + \frac{s_i - s_f}{s_{fg}} v_g \right]^2 \left[\frac{s_i - s_f}{s_{fg}} + \frac{s_g - s_i}{k^2 s_{fg}} \right]} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

При цьому, основна відмінність полягає в рішенні через рівняння збереження імпульсу замість енергії та визначенні інших математичних умов для визначення критичних значень параметрів. Вираз для визначення критичного витрати має вигляд:

$$G = \left(\frac{-k_c}{\left\{ (1-x+k_c x) x \frac{dv_g}{dp} + [v_g(1+2xk_c-2x) + v_f(2xk_c-2k_c-2xk_c^2+k_c^2)] \frac{dx}{dp} \right\}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Автором також пропонується розглядати величину приведенного тиску як функцію параметра відношення довжини до діаметру.

П'ята модель [0], вважається найбільш універсальною та використовує характеристичний метод для рішення системи диференціальних рівнянь збереження. Дана модель реалізована зі значними розширеннями в розрахунковому теплогідравлічному коді RELAP 5 [0].

Вираз для визначення масової витрати подається в неявному вигляді і, крім того, можна відзначити наступне:

- дозволяє обійти труднощі, пов'язані з оцінкою величини проковзування, які зустрічаються в інших моделях;
- враховує різницю в радіальній швидкості потоку, тому в певних межах може розглядатися як двомірний;
- не враховує передачу кількості руху між усталеними потоками фаз;
- при завданні дуже малої величини зміни тиску, процес безперервного розширення, можливо моделювати аналітично.

Допущенням представленої моделі є термодинамічна рівновага системи, проте автори [0] сформулювали додаток, який дозволяє використовувати її і в разі постулювання постійних значень об'ємних часток фаз в складі суміші під час течії потоку, тобто допущення про так зване «замерзання» потоку.

Наступною відокремленою групою стоять нерівноважні моделі, які дозволяють зняти допущення про рівність температур, тисків і швидкостей фаз. У них закладалися можливості урахування комплексних теплових і силових ефектів, такі як: нуклеація, метастабільність середовища, миттєве закипання, зростання парової фази. Разом з тим, такі моделі виявилися дуже чутливі для кожного конкретного явища, а тому їх складно застосовувати для прогнозування загального випадку процесу критичного витоку середовища.

Крім того, їх застосування дозволило виявити важливі чинники, які були використані для корекції результатів простих моделей. Згодом вони були класифіковані за прийнятими припущеннями щодо швидкостей кожної з фаз і величиною фазового складу впродовж усього тракту витікання- «зосереджені» і «розподілені» моделі.

Однією з перших масштабних робіт, пов'язаної з дослідженням феномена КТ при НКП, була робота [0], де перед авторами в ході проведення численної серії експериментів було поставлено два завдання.

Перше завдання полягало в отриманні даних необхідних для оцінки застосовності існуючих, вищеописаних моделей. Друга мета полягала в отриманні даних по теплопередачі для підтвердження деяких існуючих кореляцій конвективного теплообміну. Важливо відзначити, що для води при надкритичних умовах, були протестовані тільки НЕМ і отримано аналітичне рішення для критичного витрати, через рівняння Бернуллі.

Слід зазначити, що всі 283 серії експерименту проводилися шляхом підтримки робочого тиску в перерізі витоку при атмосферних умовах. Приймалося, що під час експериментів ця умова не змінювалась. Наявність такого великого перепаду тиску пов'язано з вказаними умовами.

Автори вперше запропонували кореляцію для оцінки псевдокритичної температури води за допомогою тиску гальмування потоку. В цілому при порівнянні моделей в докритичних умовах автори

виявили, що НЕМ модель прогнозує запірні характеристики потоку з достатньою точністю, в той час як інші моделі демонструють дещо кращі результати.

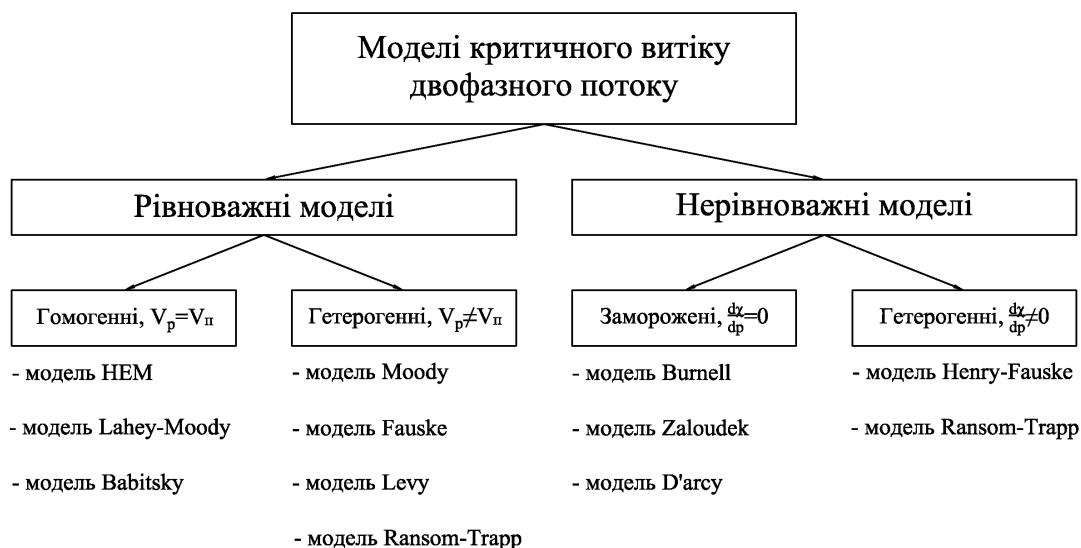


Рис. 1 Загальна класифікація моделей КТ

У фундаментальній праці [0,0] при використанні гомогенної рівноважної моделі була побудована діаграма режиму витікання при раптовій розгерметизації петлі з теплоносієм при НКП. Вдалося показати і визначити, що інтенсивність критичного витоку багато в чому, буде визначатися умовним співвідношенням геометричних розмірів системи і середовища з різним фізичним станом:

- критичне середовище (до точки 22,1 МПа по тракту падіння тиску з течії);
- перегріта пара (22,1 МПа і температура вище T_s);
- перегріта рідина з подальшим вибуховим скипанням (22,1 МПа, а температура нижче 647,3 К);
- двофазна суміш (тиск нижче 22,1 МПа, і температура T_s);

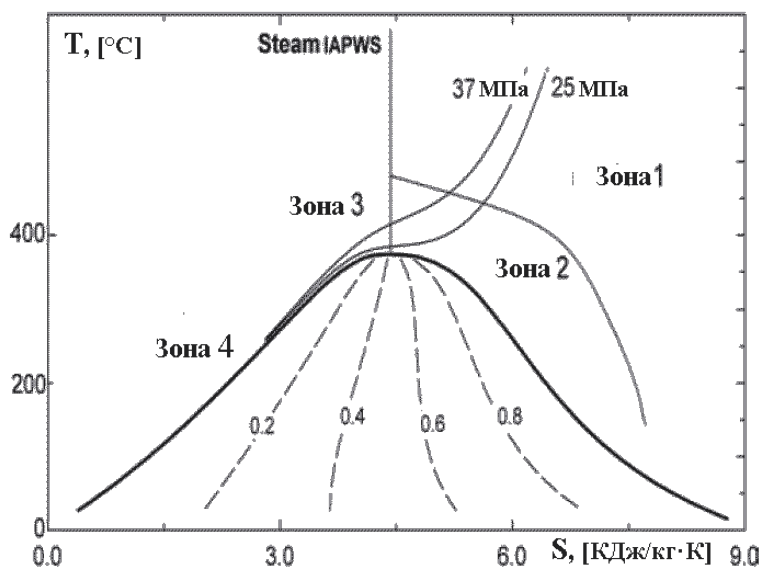


Рис. 2 Карта фізичних станів теплоносія при зниженні тиску у T-S діаграмі

Подальше застосування аналітичного підходу для вивчення явища КТ при НКП дозволило виявити невідповідність значень критичної витрати до 40% в порівнянні з отриманими експериментальними результатами. До того ж було визначено, що реальний час розгерметизації набагато більше, ніж може бути оцінений НЕМ, де процес розширення постулюється як ізоентропійний. Це можна пояснити тим, що домінуючі ефекти тертя, не враховуються моделлю.

У роботі [0], подібною до [0], автор використовував той самий підхід для подання експериментальних даних по масовій витраті. Було виявлено, що після певної величини температури ефект затискання потоку не відбувся. Важливо відзначити, що після виконання порівняння експериментальних даних з прогнозом за допомогою рівняння Бернуллі, НЕМ і моделлю коду RELAP 5, автори дійшли висновку, що у всіх випадках прогнозування процесу при НКП стикається з істотною похибкою.

Висновок

Таким чином, явище кризи течії при НКП характеризується послідовною зміною двох і більше термодинамічних станів середовища по тракту руху теплоносія. Цим пояснюється особливість кризи течії при НКП, оскільки процес переходу від НКП до будь-якого іншого стану є багатофакторним процесом і для якого цілісної моделі на теперішній час не існує. Крім того задача є принципово нелінійною з великою кількістю невизначеностей.

Вочевидь, при контурних течіях теплоносія ЯР при НКП виникає ситуація, коли термодинамічні параметри середовища невідомі, а спосіб опису процесу витікання вимагає з'ясування поточного стану середовища. Не менш значущою складністю є між фазні співвідношення в даному процесі в разі наявності фазових переходів по тракту.

Огляд літератури безумовно вказує на те, що феномен КТ середовища при НКП все ще потребує вивчення. Зокрема не існує універсального методу оцінки характеристик кризи течії при НКП в залежності від початкових параметрів середовища, а також впливу геометрії тракту на процес витікання.

Все це, підтверджує актуальність проблематики і доводить необхідність створення гнучкої моделі опису явища КТ при НКП. Слід зазначити що, запропонований розрахунковий метод може бути універсальним як з точки зору організації нестационарного режиму, так і спряженого аналізу на міцність. Особлива увага повинна бути приділена початковій стадії динаміки процесу при розгерметизації контуру. До того ж необхідно забезпечити ефективність розрахункової процедури незалежно від характерної довжини тракту течії і прийнятого кроку інтегрування розрахункової процедури. Обмежена доступність експериментальних даних з опису явища КТ при НКП, визначає необхідність використання в основі методу, для валідаційної процедури, переважно коректні фізичні співвідношення.

D. Fedorov, PhD student, TF, **ORCID** 0000-0003-3751-6986

V. Tuz, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0002-4691-4890

S. Klevtsov, Cand. Sc., Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-1405-5048

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

CRITICAL FLOW PREDICTION MODELS FOR THE COOLANT AT SUPERCRITICAL PARAMETERS

An interest of the problems of various thermophysical and hydrodynamic phenomena in the nuclear industry, determined by the real application in the field of analysis of the accident scenarios related to the loss of coolant accident. For the generic super critical water reactor the meaning of the problem at the initial stage of the critical flow process, is the existing of the uncertainty in the accepting boundary conditions to predict the flow characteristics. The article provides an analytical review of existing approaches for describing the critical flow phenomenon of the medium and to focus on the current predictive models. A description of the physical nature of such a phenomenon is provided. The scope of consideration includes information from the literature for single and two-phase flow, taking into account their physical basis and the assumptions made. The task of the work was to analyze the information found and to evaluate and update the data on the application of the models to obtain the critical characteristic. It was supposed to highlight the physical aspects and peculiarities of this phenomenon, as applied to the coolant at supercritical parameters. To formulate important requirements to the representative critical flow model for the possibility of its use in the system codes for evaluation of the nuclear safety problems of promising fourth generation nuclear reactors.

Keywords: *critical flow, critical flow rate, supercritical parameters, choking characteristics, flow choking.*

REFERENCES

Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation, JE Kelly - Progress in Nuclear Energy, Elsevier 2014

Heat Transfer Behaviour and Thermohydraulics Code Testing for Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs), TECDOC-1746, IAEA, 2014.

Y.Y. Bae, L.K.H. Leung, J.A. Lycklama À Nijeholt, M. Andreani, T. Schulenberg, J. Starflinger, Y. Ishiwatari, Y. Oka, H. Mori, and K. Ezato, "Status of ongoing research on SCWR thermal-hydraulics and safety", GIF Symposium, Paris, France, 2009

Fundamentals of Multiphase flow. Prof. M. L. Corradini. DEP, University of Wisconsin, USA, 1997

Critical flow models. State of art report on critical flow modeling. F. D'auria, P. Vigni, University of Pisa, Italy, 1980

Moody, Frederick J. Maximum discharge rate of liquid-vapor mixtures from vessels. USA, 1975

G. B. Wallis, "Critical two-phase flow," International Journal of Multiphase Flow, vol. 6, p. 97-112, 1980

Lahey K.T. Jr., Moody F.J., "The Thermal-hydraulics of a boiling water nuclear reactor", ANS Monograph, p. 467, USA, 1977

F. J. Moody, Maximum Flow Rate of a Single Component, Two-Phase Mixture, J. Heat Transfer., 87(1): 134-141, ASME, USA, 1965

Henry R. E, Fauske H.K. "The two phase critical flow of one component mixtures in nozzles, orifices and short tubes", J. Heat Transfer, 93, p179, ANL, USA, 1971

Ransom V.H., Trapp J.A., "The Relap 5 choked flow model and application to a large scale flow test", EG&G Idaho Inc., ASME, Saratoga, USA, 1980

Lee D H, Swinerton D. Evaluation of critical flow for supercritical steam-water. EPRI-NP-3086, Final report, USA, 1983

Mignot G, Anderson M, Corradini M. Initial Study of Supercritical Fluid Blowdown, Fusion Science and Technology, 47:3, 574-578, USA, 2007

Critical Flow Experiment And Analysis For Supercritical Fluid, Guillaume Mignot, Mark Anderson And Michael Corradini, Nuclear Engineering and Engineering Physics Department, University of Wisconsin, 1500 engineering Drive, Madison, WI, 53706 USA, 2007

Experimental study of critical flow of water at supercritical pressure, Y Chen, C Yang, S Zhang, M Zhao, K Du - Frontiers of Energy, 2009

The SCDAP/RELAP5-3D© Code Development Team. SCDAP/RELAP5-3D© code manual. INEEL/EXT-02/00589, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, May 2002 (<http://www.inel.gov/relap5>).

Надійшла 11.04.2021

Received 11.04.2021