

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.039.539

DOI 10.20535/1813-5420.4.2021.257268

В.В. Філонов^{1,2}, асп., ORCID 0000-0001-8123-026XС.М. Письменний¹, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596В.Г. Разумовський¹, канд. техн. наук., ORCID 0000-0002-7326-5056¹ Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

² ТОВ «ІПП-Центр»

АДАПТАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПРИСТІНКОВОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ НАДКРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРАХ ТЕПЛОНОСІЯ

У роботі обговорюється проблема адаптації існуючого універсального чи спеціалізованого інструментарію теплогідравлічного аналізу для нелінійних задач теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія при погіршенні тепловіддачі. Розглянуті складності прогнозу нелінійного теплообміну при надкритичних параметрах інженерними методами розрахункової гідродинаміки. Запропоновано простий спосіб адаптації двозонної температурної пристінкової функції Кадера на основі існуючих зондових досліджень для двоокису вуглецю. Обговорюється проблема імплементації в універсальні пакети обчислювальної гідродинаміки CFD, яка базується на способі вибору опорної координати пристінкової зони для визначення динамічної швидкості та безрозмірної температури. На прикладі ANSYS CFX показаний один із способів створення спеціальної користувальницької процедури, яка має покращену тенденцію щодо прогнозу аксіального профілю температури при погіршеному теплообміні. У роботі проведено калібрування та валідацію отриманих результатів на основі експериментальних досліджень для вертикальних труб та стержневих збірок імітаторів твел. Також в роботі обговорюються особливості запропонованої імплементації, та сформовані рекомендації для застосування та подальшого удосконалення інженерних підходів для прогнозування погіршення теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія.

Ключові слова: універсальні пристінкові функції, надкритичні параметри, CFD, погіршений теплообмін, перспективні реактори

Прийняті скорочення:

НКП	– Надкритичні параметри	EVT	– Eddy-Viscosity Turbulence
СПФ	– Спеціальна пристінкова функція	RANS	– Reynolds Averaged Navier Stokes
УПФ	– Універсальна пристінкова функція	Low-Re	– Низькорейнольдсівський
CFD	– Computational Fluid Dynamics	High-Re	– Високорейнольдсівський
DHT	– Deteriorated heat transfer		

Прийняті позначення:

C_p	– Питома теплоємність, (Дж/(кг·К))	T^+	– Безрозмірна температура (-)
f	– Функція спряження зон, (-)	U^+	– Безрозмірна швидкість (-)
h	– Питома ентальпія, (Дж/кг)	u_r	– Динамічна швидкість (м/с)
h^+	– Безрозмірна ентальпія (-)	y^+	– Безрозмірна відстань до стінки, (-)
Pr	– Число Прандтля (-)	μ	– Коефіцієнт динамічної в'язкості, (Па·с)
P	– Тиск, (Па)	ρ	– Густина, (кг/м ³)
q_w	– Питомий тепловий потік, (Вт/м ²)	τ	– Дотичні напруження (Па)
T	– Температура, (К)		

Індекси:

КЛ	«класичні»	t, turb	– Турбулентний
f	– В потікці	w	– На стінці
lam	– Ламінарний	τ	– Динамічний.
ref	– Опорний		

Вступ

Універсальні пристінкові функції (УПФ) є дуже потужним інструментом в інженерній практиці застосування методів CFD [1-3]. Фактично, це дає можливість досить просто «проекувати» значення граничних умов на стінці до найближчого по нормалі вузла розрахункової сітки [2]. Існує УПФ декількох типів, які можна умовно поділити на групи згідно з рівнянням переносу до якого застосовується пристінкова функція (силові – швидкість; теплові – температура/ентальпія; турбулентні – кінетична енергія турбулентності/дисипативна функція). Однією з основних переваг застосування УПФ є менш жорсткі умови для дискретизації розрахункової сітки біля стінки. До того ж, якщо застосовувати УПФ в області параметрів для якої вони власне конструювалися і калібрувалися, то здебільшого вдається отримати узгодження між розрахунком та експериментом з точки зору інтенсивності теплообміну/дисипації (як локально, так і усереднено). Одним з недоліків методу УПФ є те, що вони неявні, а отже потребують спеціальної імплементації в розрахункові пакети.

Сучасні пристінкові функції узагальнені на всю товщину прилеглої області, а також враховують неізотермічність течії (узагальнення Кадера [4]). Концепція нерівноважних пристінкових функцій [5] дає можливість враховувати позовжній градієнт тиску в прилеглому шарі.

Тим не менш, для «нелінійних» задач теплообміну, в яких є суттєва зміна теплофізичних властивостей, а також вплив природної конвекції УПФ фактично не працюють. Тобто прогнозний профіль температури стінки при граничних умовах другого роду і кількісно і якісно відрізняється від експериментальних даних, хоча з тією ж моделлю турбулентності при детальній дискретизації пристінкової області прогнозні проблеми відсутні (див. Рис. 1). Таким чином, застосування УПФ неможливе для режимів погіршеного теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія. Створення спеціальних пристінкових функцій (СПФ) потребує експериментальних досліджень структури потоку теплоносія при погіршенні теплообміну.

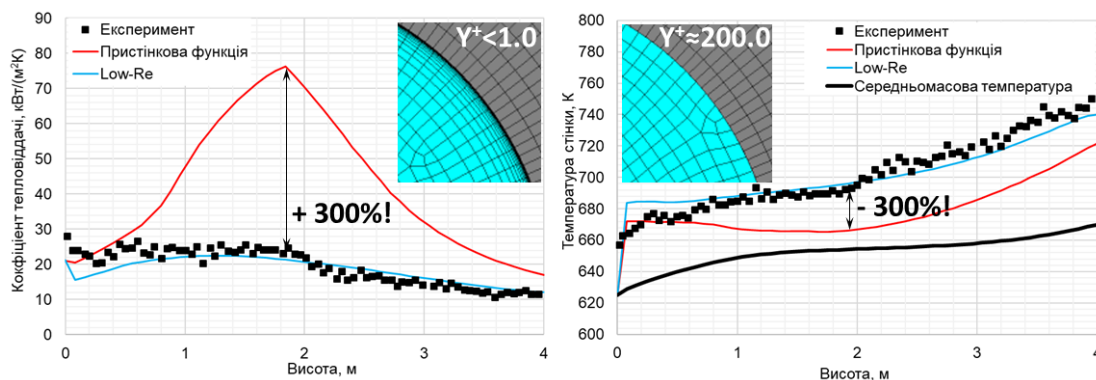


Рисунок 1 – Демонстрація проблеми застосування УПФ при розрахунку режиму теплообміну при надкритичних параметрів біля точки псевдофазового переходу

Мета та завдання дослідження

Основною метою даної є створення СПФ на основі УПФ, що дасть можливість поліпшити прогнозні властивості CFD для режимів теплообміну при надкритичних параметрів. Важливо зберегти застосовність пристінкових функцій, оскільки це дозволяє раціональним чином використовувати розрахункові потужності, що є суттєвим в інженерній практиці та дає можливість не обмежуватися розглядом лише елементарних каналів.

1. Адаптація «класичних» температурних пристінкових функцій

Першим етапом створення СПФ є адаптація існуючих УПФ температури на основі комплексних зондових досліджень надкритичного потоку CO_2 [6,7]. Унікальність цих експериментальних досліджень полягає у тому, що вони дають не тільки форму аксіального профілю при погіршеному теплообміні, але й структуру турбулентного потоку (Рис. 2).

Результати досліджень, а також узагальнень свідчать про те, що при суттєвому впливі плавучості та зміни теплофізичних властивостей профілі швидкості U^+ та h^+ подібні між собою не тільки при нормальному теплообміні (NORM, Рис. 3), але й при погіршеному (DHT, Рис. 3). Нормальний («лінійний») теплообмін характеризується незначним впливом термічного прискорення, оскільки відсутні значні градієнти теплофізичних властивостей, а отже і плавучості. В цьому випадку, тобто при використанні УПФ можна отримати задовільне узгодження результатів CFD з експериментом (без врахування low-Re ефектів).

Зважаючи на те, що при «лінійному» теплообміні профілі U^+ , h^+ та T^+ між собою подібні, а також на те, що в сучасних кодах застосовується комбінації U^+ - T^+ , була запропонована досить проста

модифікація пристінкової функції температури, яка може бути представлена у вигляді простого правила (1).

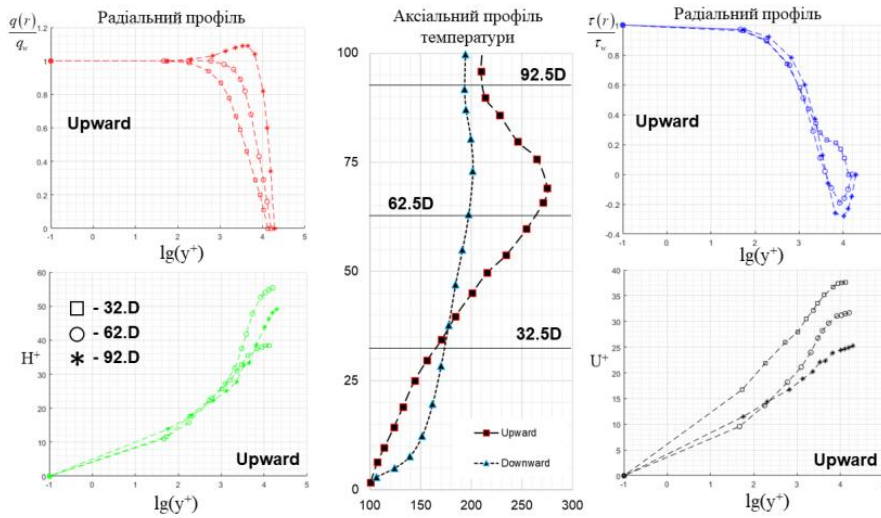


Рисунок 2 – Взаємозв'язок аксіального та радіального профілів при погіршенні теплообміну (ділянка обігріву – 2925 мм; масова швидкість – 2100 кг/(м²с); тепловий потік – 428.4 кВт/м², ентальпія входу – 595 кДж/кг; робочий тиск – 9,0 МПа)

$$h^+ = \rho u_\tau \frac{h - h_w}{q_w} \approx \rho u_\tau \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \frac{(T - T_w)}{q_w} = \rho u_\tau \bar{C}_p \cdot \frac{(T - T_w)}{q_w} = \frac{\bar{C}_p}{C_p} T^+ \Rightarrow T^+_{НКП} = \frac{C_p}{C_p} T^+_{КЛ} \quad (1)$$

Де $\rho u_\tau \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \frac{(T - T_w)}{q_w}$ є лінеаризацією, безрозмірної ентальпії h^+ відносно температури стінки.

Похідна ентальпії по тиску може трактуватися як середня величина ізобарної теплоємності між стінкою та точкою, що розглядається з координатою y^+ .

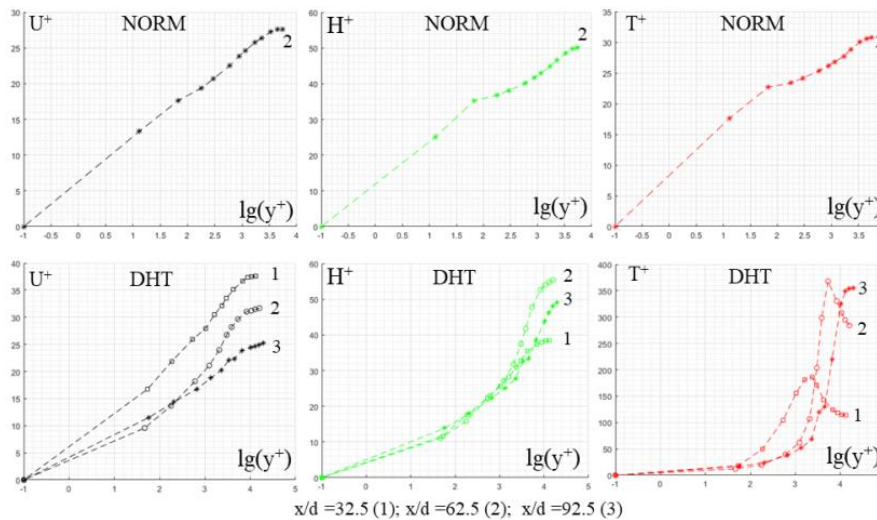


Рисунок 3 – Експериментальні УПФ (NORM – нормальний, DHT погіршений теплообмін)

В загальному випадку, структуру двозонної рівноважної температурної УПФ можна представити як [8]:

$$T^+ = e^{-\Gamma} f_{lam} y^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} \left[f_{turb} \ln(y^+) + B(Pr, Pr_t) \right] \quad (2)$$

Перший член (2) характеризує ламінарну частину теплового прилежого шару (зазвичай обмежується $y^+ \sim 11$), другий член відповідає турбулентній частині. Для сполучення ламінарної та

турбулентної зон використовується експоненціальні поправки, як функції числа Прандтля та безрозмірної координати.

Функція $B(\text{Pr}, \text{Pr}_t)$ характеризує додатковий термічний опір температурного прилеглового шару. Зважаючи на те, що в першому наближенні, «принципово» профіль швидкості не змінюється при переході від нормального до погіршеного теплообміну, то в першому наближенні, можна оцінити вплив модифікації $B(\text{Pr}, \text{Pr}_t) \frac{C_p}{C_p}$ на температурну УПФ.

Для апіорної оцінки (температура та тепловий потік на стінці відомі) використаємо двозонну УПФ Кадера [4], яка може бути представлена у вигляді:

$$T_{\text{КЛ}}^+ = e^{-\Gamma} (\text{Pr} y^+) + e^{-\frac{1}{\Gamma}} \left[2,39 \ln(9,79 \cdot y^+) + B(\text{Pr}, \text{Pr}_t) \right]; \Gamma = \frac{0,01(\text{Pr} y^+)^4}{1 + 5 \cdot \text{Pr}^3 y^+}$$

$$B(\text{Pr}, \text{Pr}_t) = 9,28 \left[\left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t} \right)^{\frac{3}{4}} - 1 \right] \left(1 + 0,28 \cdot e^{-0,007 \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t}} \right) \quad (3)$$

При застосуванні (3) для апіорної оцінки (див. Рис. 4) було використано фіксоване значення Pr_t , яке прийнято рівним 0,9.

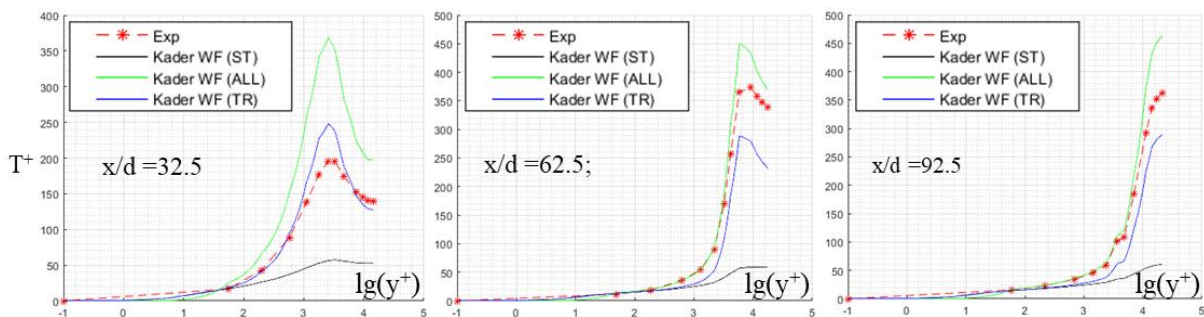


Рисунок 4 – Адаптовані УПФ (СПФ) (ST – стандартна, ALL – адаптація (1), TR – адаптація термічного опору $B(\text{Pr}, \text{Pr}_t)$)

Отримані результати апіорної оцінки є досить оптимістичним, оскільки в першому наближенні значно покращують прогностичні можливості пристінкової функції, яка взагалі кажучи отримана при принципово інших температурних умовах [4]. Навіть в області y^+ від 30 до 300 (а іноді до 1000 при числах Рейнольдса $\sim 10^6$ - 10^9), яка характерна для інженерних розрахунків запропонована модифікація УПФ дозволяє отримувати значно кращі прогнози (Рис. 5).

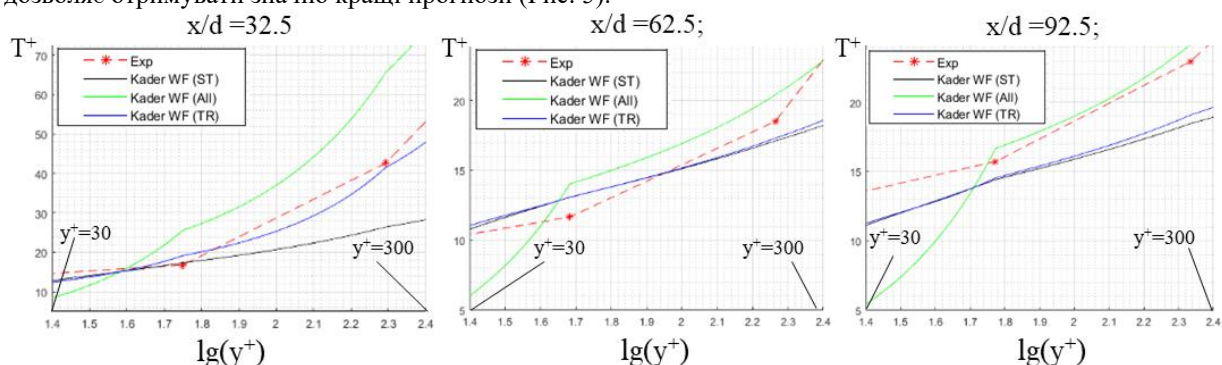


Рисунок 5 – Адаптовані УПФ (СПФ) у межах y^+ від 30 до 300 (ST – стандартна, ALL – адаптація (1), TR – адаптація термічного опору $B(\text{Pr}, \text{Pr}_t)$)

Таким чином, для інженерної практики запропонована досить проста модифікація може бути корисною. Зважаючи на те, що самі по собі пристінкові функції, які проінтегровані на ділянці від 0 до y^+ можуть бути неявними, то це означає, що проблеми неявних кореляцій, які описані в розділі 3 автоматично відносяться і до пристінкових функцій. Нижче наведені результати імплементації СПФ у розрахунковий CFD код.

2. Особливості імплементації та застосування пристінкової функції

Як видно із залежності (3), для визначення всіх коефіцієнтів необхідно обумовити опорне значення y^+ , для розрахунку теплофізичних властивостей. Якщо прийняти y^+ рівним локальному вузловому значенню першого контрольного об'єму, то отримаємо повністю явну постановку. Якщо ж визначальним значенням прийняти $y^+=0$, то отримаємо повністю неявну імплементацію, оскільки необхідні коефіцієнти є функціями температури стінки. Слід зазначити, що йде мова про теплові граничні умови другого роду, що є притаманними для такого роду задач. Згідно з [9] спосіб імплементації пристінкової функції в багатьох випадках є визначальним, і може бути реалізований навіть шляхом побудови щось типу екстраполяційного профілю, тобто задіяти декілька по нормалі пристінкових вузлів. Проте з алгоритмічної точки зору в загальному випадку такий спосіб є дуже складним і у комерційних CFD пакетах практично не застосовується.

Принциповою відмінністю від «лінійного» теплообміну у випадку застосування пристінкової функції є те, що теплофізичні властивості у межах характерної висоти пристінкового КО практично не змінюються. У випадку теплообміну при надкритичних параметрах (НКП) може виникнути проблема конвергенції із-за екстремально-нелінійної поведінки функції питомої теплоємності від температури. До того ж, при «лінійному» теплообміні можна прийняти постійність дотичних напружень, що підтверджується багатьма експериментами [4,8]. При теплообміні з НКП, в особливості при погіршені тепловіддачі постійність дотичних напружень не зберігається не тільки із-за зміни теплофізичних властивостей, але й із-за зміни «фізики», що поки не може бути враховано за допомогою УПФ та СПФ.

Саме з цих причин при застосуванні СПФ (1)-(3) представляється у вигляді (4), що за своєю формою являється неявним узагальненням, тобто з точки зору розрахункового коду втрачає деяку універсальність (з'являється параметр, який є деякою середньою функцією локального поля температури).

$$T^+ = c_p(T) \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p^{-1} \cdot T_{\text{кл}}^+ \approx \frac{c_p(T)}{\text{av}[c_p(T)]} T_{\text{кл}}^+ \quad (4)$$

Де, $\text{av}[\dots]$ - є певною процедурою усереднення аргументу, в якості якого виступає питома ізобарна теплоємність.

Для використання СПФ у формі (4) необхідно вирішити, яку функцію $\text{av}[\dots]$ необхідно обрати, а також організувати додаткову розрахункову процедуру у самому CFD кодї. Інтерфейс, який дозволяє працювати з власним пристінковими функціями присутній у комерційних розрахункових кодах, проте він має деякі особливості. По-перше організувати усереднення можливо лише шляхом введення додаткових циклічних рестартів методу встановлення (CFX), що може на відносно простій геометрії бути цілком прийнятним, проте на складних задачах втрачається сенс застосовувати СПФ (із-за необхідного часу розрахунків), По-друге, ANSYS CFX використовує в якості опорної температури типу «Wall Adjacent Temperature», тобто значення температури потоку. Як вже зазначалося вище, це є суттєвим недоліком при «нелінійному» теплообміні. Для реалізації СПФ таким підходом необхідно створювати спеціальну процедуру, яка б синхронізувала ітерації за потоком, з підпрограмою розрахунку температури стінки.

Для апробації побудованої температурної СПФ було реалізовано спеціальну підпрограму, яка застосовувалася послідовно після розрахунку основних полів потоку з надкритичними параметрами. Це дало можливість у порівнянні з (4) деякою мірою зберегти універсальність СПФ. Для визначення температури стінки було імплементовано трансцендентне рівняння (5) відносно температури стінки, яке враховує вище наведені особливості, які притаманні теплообміну при НКП.

$$u_\tau = \frac{\sqrt{\tau_w^{\text{CFD}} \cdot \rho(T_{\text{ref}})^{-1}}}{\sqrt{\rho(T_f)^{-1} \cdot [\mu(T_f) + \mu_f^{\text{CFD}}] \cdot \left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_f^{\text{CFD}}}}; y^+ = \frac{\left(y^+ \right)_{\text{CFD}}}{y_f u_\tau (T_{\text{ref}}) \cdot \nu(T_{\text{ref}})^{-1}} \quad (5)$$

$$q_w K(y^+) T_{\text{кл}}^+(y^+; \text{Pr}) = \rho(T_{\text{ref}}) u_\tau [h(T_w) - h(T_f)]; \text{Pr} = \text{Pr}(T_{\text{ref}})$$

Де T_{ref} - опорна температура, яка знаходиться в межах від T_f до T_w . $K(y^+)$ - коефіцієнт пропорційності.

Температура T_f визначається в CFD і якщо її обрати в якості опорної, то отримаємо повністю явний підхід. Варто зазначити деякі особливості (5). Те що реалізована СПФ є наслідком (4) не є очевидним, оскільки від безрозмірної температури вдалося перейти до безрозмірної ентальпії. Для цього в функцію $\text{av}[\dots]$ залежності (4) слід покласти середньоентальпійне значення теплоємності, яке визначається як $(h_w - h_f)/(T_w - T_f)$. Якщо звернути увагу на різницю між h^+ та T^+ , (див. Рис. 3) при нормальному

теплообміні (що є граничним випадком для (4) у сенсі $\frac{C_p(T)}{\text{av}[C_p(T)]} \rightarrow 1$), то в першому наближенні можна прийняти, що $h^+ \approx K(y^+)T^+$, як для нормального, так і для погіршеного теплообміну. Для $y^+ < 1000$, $K(y^+)$ знаходиться в межах від 1 до $\sim 1,5$.

Калібрування та валідація запропонованої СПФ проводилася при застосуванні High-Re моделей турбулентності EVT (однопараметрична) та SST (двопараметрична). Зазначимо, що для High-Re і побудовані пристінкові функції.

На Рис. 6 наведені результати тестування СПФ на основі експериментальних даних [6,7] для CO₂ на аналізі яких власне і була побудована відповідна адаптація УПФ.

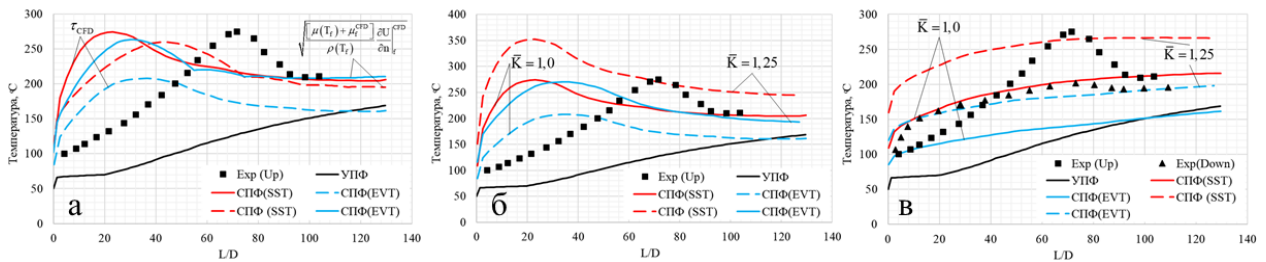


Рисунок 6 – Результати застосування СПФ (а – опорна температура біля стінки для T^+ та u_τ при різних способах визначення дотичних напружень; б - опорна температура біля стінки для T^+ та u_τ для різних середніх значень коефіцієнту пропорційності K ; в - опорна температура стінки для T^+ та u_τ , неявна постановка)

Отримані результати із застосуванням (5) демонструють якісну та кількісну зміну прогнозних значень при використанні СПФ. Варто зазначити, що в цілому отримані температури зросли у абсолютних величинах, а у випадку опорної температури потоку вдається і прогнозувати характерний пік в аксіальному розподілі (хоча цей пік зміщений у сторону ділянку обігріву і може бути результатом «реакції» на встановлення радіального профілю температури/швидкості). Також з результатів видно, що при використанні альтернативного способу визначення дотичних напружень на основі даних CFD (шляхом розрахунку градієнту швидкості) вдається отримати зміщений пік відносно вхідної ділянки, що краще узгоджується з експериментом. При альтернативному способі розрахунку дотичних напружень виникає необхідність аналізу більшого масиву даних (необхідно оперувати з полем швидкості принаймні у деякій кількості сусідніх вузлів по нормалі до стінки, що обігрівається). Необхідність альтернативної визначення дотичних напружень (виходячи із визначення) продиктовано тим, що в залежності від RANS моделі турбулентності присутні відмінності у визначенні напружень на стінці у CFD коді (використовується формулювання через кінетичну енергію турбулентних пульсацій).

У випадку застосування температури стінки (невідомо величина) в якості визначальної для T^+ та u_τ , то результати в цілому покращується кількісно, а якісно відповідають «лінійному» теплообміну. Отримані аксіальні профілі подібні до тих, які в переважній більшості отримуються при врахуванні low-Re ефектів [10], але потребують значно нижчі розрахункові ресурси (густина дискретизації зменшується в 4-10 разів). Відмітимо важливу особливість. Для повністю неявної постановки, при екстремально-нелінійній зміні теплофізичних властивостей виникає проблема конвергенції і для пристінкових функцій, що є подібною проблемою і для неявних кореляцій для НКП і в загальному вимагає використання спеціальних методів [11].

Отримані результати є очікуваними, оскільки як зазначалося вище СПФ, які базується на УПФ не здатні враховувати фізичні особливості процесів при погіршеному теплообміні.

Наступним кроком є розрахунковий тест, який відноситься до теплообміну з надкритичними параметрами води з чого і почалося обговорення проблеми УПФ (див. вступ). На прикладі експерименту, який вважається класичним для тестування розрахункових методів [12] розглянемо можливості застосування СПФ. Основні характеристик обраного режиму детально розглядаються наступні: довжина ділянки обігріву – 4 м; опорний тиск – 24 МПа; температура на вході – 352 °С; масова швидкість – 1500 кг/(м²с); тепловий потік -884 кВт/м². Відповідно до класифікації [13] даний режим відповідає погіршеному теплообміну, оскільки знаходиться в IV групі. На Рис. 7 наведені результати застосування СПФ.

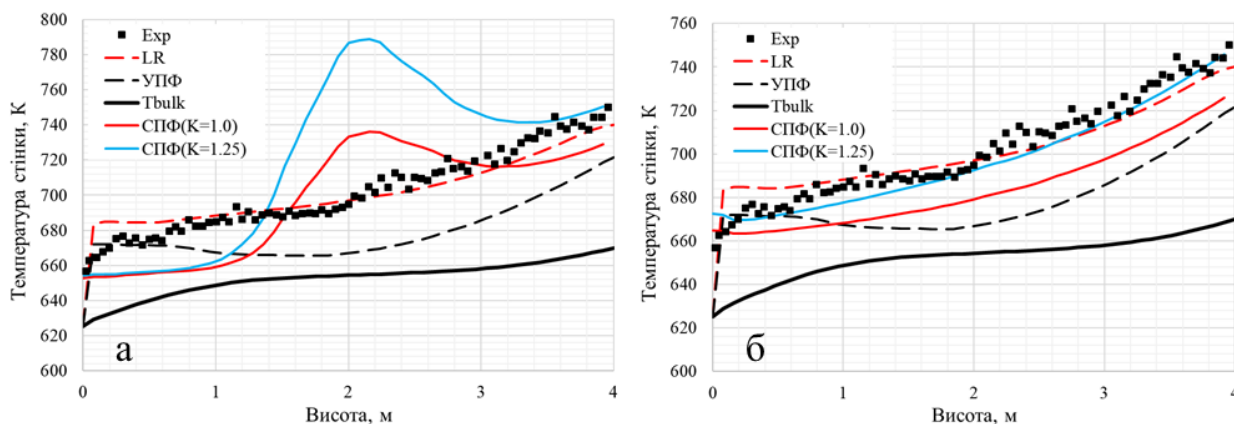


Рисунок 7 – Результати застосування СПФ (а – опорна температура біля стінки для T^+ та u_τ ; б – опорна температура стінки для T^+ та u_τ , неявна постановка)

Отримані результати ввідповідають вище зазначеним висновкам. Для конкретизації розрахункового тесту відмітимо, що в якості моделі турбулентності була використана модель EVT, з дискретизацією, яка відповідає значенню y^+ біля стінки ~ 400 . Для довідки: при розрахунку з використанням Low-Re розрахункова сітка в ~ 13 більше! має розрахункових вузлів лише за рахунок додаткової дискретизації пристінкової області).

Нижче наведені результати тестування СПФ на результатах експериментальних досліджень НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» для одно- та трьох-стержевого імітаторів твел при наступних режимних характеристиках : опорний тиск – 22,6/27,5 МПа; температура на вході – 246/212 °С/; масова швидкість – 2500/1500 кг/(м²·с); тепловий потік – 2750/2400 кВт/м² відповідно [14]. Отримані результати (Рис. 8) досить наглядно демонструють можливості СПФ у контексті їх застосування для збірок імітаторів твел.

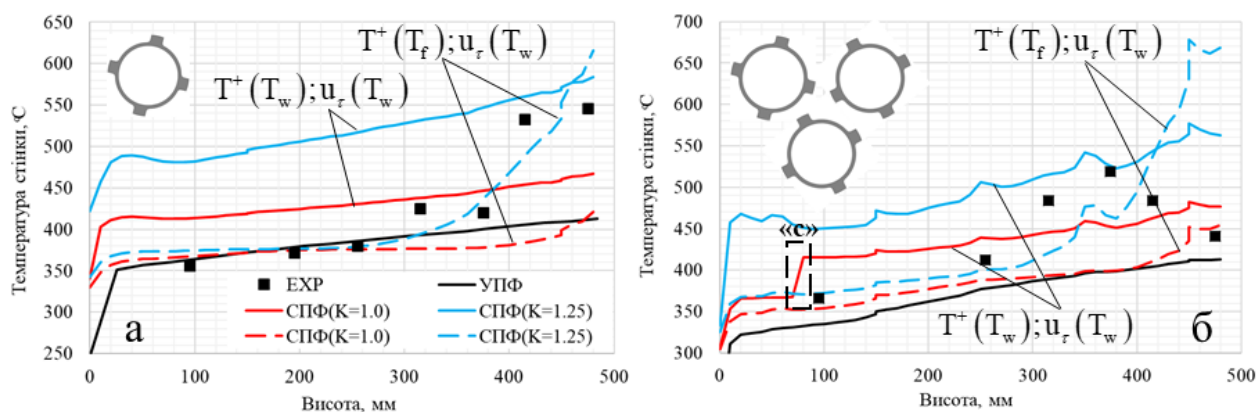


Рисунок 8 – Результати застосування СПФ для режиму з ПТВ (а – одно-стержевий імітатор; б – трьох-стержевий імітатор твел)

В цілому прогнозні властивості СПФ значно кращі у порівнянні з УПФ, проте для збірок імітаторів твел існують деякі особливості. По-перше, скоріше за все визначення дотичних напружень по температурі потоку дає велику похибку в першу чергу із-за специфіки дискретизації із-за наявності шнеків. Справа в тому, що зберегти по всьому тепловому периметру значення $y^+ > 100$ практично не можливо (це стосується першу чергу 3-ох та 7-ми стержевих імітаторів). По-друге, із-за досить тісної компоновки імітаторів складається ситуація, коли характерний розмір пристінкового контрольний об'єму співставний з характерним розміром всього ядра потоку. По-друге, це все приводить до того, що процедура усереднення параметрів потоку по тепловому периметру необхідних для (5) має суттєві неточності, що проявляється на аксіальних профілях температури. До того ж при повністю неявній постановці можуть виникати проблеми з конвергенцією притаманні такого типу розрахункам [11] (Рис. 8б, зона «с»). Те, що існує проблема з визначенням дотичних напружень також свідчить і вплив комбінації опорних температур, за яких T^+ за температурою потоку, а динамічна швидкість розраховується неявно (за температурою на стінці).

Виходячи з отриманих результатів, для подальших розрахунків можна рекомендувати застосовувати СПФ з High-Re, одно- та двох- параметричними моделями турбулентності в рамках RANS. Характерний розмір пристінкового контрольного об'єму слід обирати виходячи із рекомендованого значення u^+ , яке заходиться у межах від 100 до 1000. Середнє значення коефіцієнту пропорційності рекомендується прийняти рівним 1,25. Для строгості, варто відзначити, що застосування СПФ (УПФ) порушує консервативність розв'язку у контексті законів збереження.

Висновки

В представленій роботі обговорюється проблема прогнозування погіршеного теплообміну за допомогою CFD кодів, використовуючи інженерні підходи, які дають можливість раціонально підходити до аналітичної частини проектування перспективних активних зон. Досить потужним інженерним інструментом є метод пристінкових функцій, перспективність якого недооцінена в контексті розрахунку нелінійних режимів теплообміну при надкритичних параметрах. Вище представлена спроба адаптувати універсальні пристінкові функції для розрахунку в першу чергу зони з погіршенням тепловіддачі. Отримані результати переконають в перспективності даного підходу, оскільки:

– За допомогою запропонованої спеціальної пристінкової функції, вдається суттєво покращити прогнозні властивості погіршеного теплообміну не лише в трубах, алей в каналах складної форми поперечного перерізу.

– При найгірших прогнозних властивостях СПФ, результати принципово не відрізняються від тих, що отримані при врахуванні low-Re ефектів, про те досягається суттєвий приріст в швидкості розрахунків за рахунок зменшення густини дискретизації.

– Дискретизація розрахункової області при застосуванні СПФ може бути більш ніж в 10 разів меншою лише за рахунок пристінкової області, що є суттєвим з точки зору аналізу не фрагменту каналу, а фрагменту перспективної активної зони.

– Імплементация таких функцій принципово не змінює розрахунковий алгоритм CFD коду і фактично може застосовуватися послідовно (на етапі постобробки).

Основним недоліком СПФ, який потрібно мінімізувати у майбутньому є проінтегрована форма УПФ. Тобто УПФ отримані при таких гіпотезах (наприклад сталість дотичних напружень), які в загальному не справедливі при «нелінійному» теплообміні. Підтвердженням недоліку проінтегрованої форми УПФ являється те, що необхідно обумовити вибір опорної температури, за якою розраховуються безрозмірні величини. Також УПФ не враховують особливостей балансу сил біля неадіабатичної стінки, що не дозволяє враховувати фізику пов'язану із структурою потоку надкритичного середовища. Таким чином, СПФ дозволяє враховувати лише зміну теплофізичних властивостей, що є лише однією з причини погіршеного теплообміну. Запропонована адаптація стосується лише температурної пристінкової функції, хоча коректніше розглядати адаптацію системи УПФ $U^+ - T^+$.

Варто також відзначити, що залишається відкритим питання введення спеціальних інженерних методів оцінки турбулентного числа Прандтля, яка є складовою не тільки рівняння енергії, але й СПФ. Після апробації СПФ щ відповідними функціями Pr_t стане остаточно зрозумілим межа застосування СПФ, які побудовані на базі алгебраїчних УПФ.

Список використаної літератури.

1. Allegrini J., Dorer V., Defraeye T., Carmeliet J. An adaptive temperature wall function for mixed convective flows at exterior sur-faces of buildings in street canyons. *Building and Environment*. 2012. №49. pp. 55–66.
2. Popovac M., Hanjalic K. Compound Wall Treatment for RANS Computation of Complex Turbulent Flows and Heat Transfer. *Flow Turbulence Combust.* 2007. №78. pp. 177–202.
3. Кириллов П. Л., Терентьева М. И. Турбулентное число Прандтля (История и современность). Обнинск: ФЭИ– 3271. 2017. 56 с. (ISBN 978-5-906512-89-5).
4. Kader B. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981. №9. pp. 1541–1544.
5. Жлутков С. В., Аксенов А. А. Пристеночные функции для высокорейнольдсовых расчетов в программном комплексе FlowVision. Компьютерные исследования и моделирование. 2015. №6. С. 1221–1239.
6. Kurganov V. A., Kaptil'nyi A. G. Velocity and enthalpy Fields and eddy diffusivities in a heated supercritical fluid flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1992. №5. pp. 465–478.
7. Kurganov V. A., Kaptil'nyi A. G. Flow structure and turbulent transport of a supercritical pressure fluid in a vertical tube under the conditions of mixed convection. *Experimental data. Int. J. Heat Mass Transfer*. 1993. №36. pp. 3383–3392.

8. Жукаускас А., Шлянчюскас А. Теплоотдача в турбулентном потоке жидкости. Вильнюс: Минтис, 1973. С. 328.
9. Berni F., Fontanesi S. A 3D-CFD methodology to investigate boundary layers and assess the applicability of wall functions in actual industrial problems: A focus on incylinder simulations. *Applied Thermal Engineering*. 2020. №174. pp. 4–15.
10. Dubyk Y., Filonov V., Filonova Y., Kovalenko O. Deteriorated Heat Transfer Influence On the Stress-Strain State of SMR SCWR Fuel Bundles. *ASME J of Nuclear Rad Sci*. 2021. pp. 1–14.
11. Filonov V., Filonova Y., Dubyk Y., Pis'mennyi E. Transfer matrix method for analysis of flow thermohydraulic characteristics with extremely nonlinear behavior of thermophysical properties using channel approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. №15. С. 1–18.
12. Mokry S., Pioro I., Kirillov P., Gospodinov Y. Supercritical-water heat transfer in vertical bare tube. *Nuclear Engineering and Design*. 2010. №240. pp. 568–576.
13. Kurganov V. A., Maslakova I. V. Normal and deteriorated heat transfer upon heating of turbulent flows of heat carriers with variable physical properties in tubes. *High Temperature*. 2016. №54. pp. 577–598.
14. Filonov V., Filonova Y., Razumovskiy V., Pis'mennyi E. N. On experimental and computational investigation of heat transfer deterioration and hydraulic resistance in annular channel and SCWR 3-rod bundle. *Proceedings of the ICONE-26*. 2018.

V. Filonov^{1,2}, Ph.D. student, ORCID 0000-0001-8123-026X

E. Pis'mennyi¹, Dr. Tech. Sc., prof., ORCID 0000-0001-6403-6596

V. Razumovskiy¹, Ph.D, ORCID 0000-0002-7326-5056

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

²IPP-Centre LLC

ADAPTATION OF TEMPERATURE WALL FUNCTION FOR CALCULATION THE HEAT TRANSFER AT SUPERCRITICAL COOLANT PARAMETERS

To date, the engineering community pays special attention to the study, research and development of methods for predicting the behavior of the coolants at supercritical parameters. This paper discusses the problem of adaptation of the existing universal or specialized tools of thermohydraulic analysis for nonlinear heat transfer problems at supercritical coolant parameters with deterioration of heat transfer. Complexities of prediction the nonlinear heat transfer at supercritical parameters of the coolant by engineering methods of computational fluid dynamics are considered. A simple way to adapt the dual-zone Kader's temperature wall function on the basis of existing probe measurements for carbon dioxide is proposed. The problem of implementation into universal packages of computational fluid dynamics (CFD), which is based on the method of choosing the reference coordinate of the near-wall zone to determine the dynamic speed and dimensionless temperature, is discussed. The example on the ANSYS CFX using shows one of the ways to create a special user procedure, which has an improved tendency to predict the axial temperature profile with deteriorated heat transfer. Calibration and validation of the obtained results on the basis of experimental investigations for vertical pipes and rod assemblies of fuel simulators is carried out in the work. The paper also discusses the features of the proposed implementation, and formed recommendations for the application and further improvement of engineering approaches to predict the heat transfer deterioration at supercritical parameters of the coolant.

Keywords: universal wall functions, supercritical parameters, CFD, deteriorated heat transfer

References:

1. J. Allegri, V. Dorer, T. Defraeye, J. Car-meliet, “An adaptive temperature wall function for mixed convective flows at exterior sur-faces of buildings in street canyons,” *Building and Environment*, vol. 49, pp. 55–66, 2012.
2. M. Popovac, K. Hanjalic, “Compound Wall Treatment for RANS Computation of Complex Turbulent Flows and Heat Transfer,” *Flow Turbulence Combust*, vol. 78, pp. 177–202, 2007.
3. P. Kirillov, M. Terent'eva, “Turbulent Prandtl number (History and present),” (In Russian), Obninsk: IPE, 3271, p. 56, 2017. (ISBN 978-5-906512-89-5).
4. B. Kader, “Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 9, pp. 1541–1544, 1981.
5. S. ZHlutkov, A. Aksenov, “Near-wall functions for high-Reynolds calculations in the FlowVision software package,” (In Russian), *Computer research and modeling*, vol. 6, pp. 1221–1239, 2015.

6. V. Kurganov, A. Kaptil'nyi, "Velocity and enthalpy Fields and eddy diffusivities in a heated supercritical fluid flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 5, pp. 465–478, 1992.
7. V. Kurganov, A. Kaptil'nyi, "Flow structure and turbulent transport of a supercritical pressure fluid in a vertical tube under the conditions of mixed convection. Experimental data," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 36, pp. 3383–3392, 1993.
8. A. Zhukauskas, A. Shlyanchauskas, "Heat transfer in a turbulent fluid flow," (In Russian), Vilnius: Mintis, pp. 328, 1973.
9. F. Berni, S. Fontanesi, "A 3D-CFD methodology to investigate boundary layers and assess the applicability of wall functions in actual industrial problems: A focus on incylinder simulations," *Applied Thermal Engineering*, vol. 174, pp. 4–15, 2020.
10. Y. Dubyk, V. Filonov, Y. Filonova, O. Kovalenko, "Deteriorated Heat Transfer Influence On the Stress-Strain State of SMR SCWR Fuel Bundles," *ASME J of Nuclear Rad Sci*, pp. 1–14, 2021.
11. V. Filonov, Y. Filonova, Y. Dubyk, E. Pis'mennyi, "Transfer matrix method for analysis of flow thermohydraulic characteristics with extremely nonlinear behavior of thermophysical properties using channel approach," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 1–18, 2022.
12. S. Mokry, I. Piro, P. Kirillov, Y. Gospodinov, "Supercritical-water heat transfer in vertical bare tube," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 568–576, 2010.
13. V. Kurganov, I. Maslakova, "Normal and deteriorated heat transfer upon heating of turbulent flows of heat carriers with variable physical properties in tubes," *High Temperature*, vol. 54, pp. 577–598, 2016.
14. V. Filonov, Y. Filonova, V. Razumovskiy, E. N. Pis'mennyi, "On experimental and computational investigation of heat transfer deterioration and hydraulic resistance in annular channel and SCWR 3-rod bundle," *Proceedings of the ICONE-26*, 2018.

Надійшла 09.11.2021
Received 09.11.2021