

УДК 621.22:621.694

Роговий Андрій Сергійович, д.т.н., доц.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

Верифікація розрахунку зануреного закрученого струменя

***Анотація.** Шляхом порівняння результатів розрахунку та експериментальних досліджень верифіковано математичну модель зануреного закрученого струменя, яка складається з осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса та SST моделі турбулентності з коригуванням на кривизну ліній струму. Порівняння виконане не тільки якісно, але й кількісно за величиною швидкостей у характерних точках течії. Порівняння картин течії показує досить точний опис моделлю форми течії, величини загасання обертання й значень швидкості в різних перетинах. У поперечних перерізах спостерігається недостатня кількість зворотної течії, що пов'язане з недоліком визначення вакууметричного тиску поблизу осі закрученого потоку. Цей недолік RANS-моделей у цілому, і SST-моделі зокрема. З метою мінімізації подібного ефекту було застосоване коригування моделі турбулентності для урахування обертання й кривизни ліній струму. Однак, можливості такого коригування обмежені й не привели до повного збігу експериментальних і розрахункових даних.*

***Ключові слова:** верифікація, математична модель, занурений закручений струмінь, числові методи*

У багатьох гідравлічних пристроях виникає необхідність використання енергії закрученого струменя: вихорокамерні нагнітачі, турбіни, насоси, циклони [1]. Найчастіше закручений потік або викидається назовні, або використовується не повною мірою за допомогою напрямних апаратів. З іншого боку, використання класичних методів напрямлення потоків мають недоліки при використанні їх для закручених течій. Навіть, застосування конфузора приводить до виникнення «вихрового ефекту конфузора» [2]. Існують два підходи до дослідження обертових потоків: експериментальний і розрахунковий за допомогою обчислювальної гідродинаміки [3, 4]. На сьогоднішній день проведена величезна кількість досліджень когерентних вихрових структур, що виникають при витіканні закручених струменів. Однак, дотепер немає чіткого розуміння особливостей їхнього обертання та їх кількості залежно від ступеня закручення. Крім того, досить ускладнене застосування результатів цих робіт, отриманих, найчастіше за допомогою сучасних методів експериментальних і числових досліджень, з інженерними цілями. Тому, актуальним стає пошук процедур адекватного числового розрахунку та його застосування в інженерному аналізі, особливо при проходженні обертовим потоком дифузоров і конфузоров різних типів.

Оптимізація параметрів обертової течії потребує або доволі коштовних експериментів, або CFD-розрахунків, які можуть за витрати менших коштів та часу привести до досконалих результатів. Але числові розрахунки потребують обов'язкової перевірки адекватності експериментальними дослідженнями. Метою роботи стало дослідження витікання зануреного закрученого струменя та верифікація математичної моделі його розрахунку.

Складність прогнозування параметрів закрученого струменя пов'язане з тим, що зі збільшенням закручення, збільшується приосьова зона низького тиску та течії у зворотному напрямку [5]. Формування такої течії залежить від декількох параметрів, які найчастіше поєднують в один комплекс і називають коефіцієнтом закручення або ступенем закручення потоку. Той або інший коефіцієнт закручення використовують залежно від способу закручування потоку [6]. У перші роки досліджень, в якості оцінки ступенів закручення, використали геометричні параметри завихрювачів, але цей підхід пізніше привів до неможливості порівняння характеристик різних засобів створення закручення. У великій кількості публікацій щодо вихрових камер використовують число Россбі [6], яке визначають відношенням радіальної до тангенціальної складової швидкості біля циліндричної поверхні камери:

$$K = \frac{V_{\tau}}{V_z}, \quad (1)$$

де V_{τ} – тангенціальна швидкість, V_z – аксіальна швидкість.

У багатьох випадках, особливо коли порівнюють обмежені й необмежені закручені течії, такий критерій не підходить для порівняння потоків. Тому, пізніше почали використовувати інтегральні параметри з урахуванням відносної величини потоку імпульсу в тангенціальному напрямку, а, також циркуляцію швидкості. Як єдиний параметр, що найбільше повно враховує основні особливості закручених течій незалежно від способу їхніх генерацій, доцільно використати інтегральний параметр закручення Хігера-Бера Y [7].

$$Y = \frac{\int_0^R \rho V_{\tau} V_z r^2 dr}{R \int_0^R \rho V_z^2 r dr}. \quad (2)$$

По своїй сутності інтегральний параметр закручення характеризує відносну величину потоків імпульсу, які переносяться в кутовому й аксіальному напрямках.

Складність використання даного критерію полягає в неможливості його попереднього моделювання в експериментальних або числових дослідженнях. Якщо параметри, що входять у формулу (1) легко задати при моделюванні, то інтеграли, що входять у рівняння (2) попередньо розрахувати дуже складно. Тому, найбільше часто, спочатку виконують експеримент або числовий розрахунок, а вже потім розраховують параметр закручення, що ускладнює порівняння за таким критерієм. У деяких випадках, для спрощення порівняння течій, параметр Хігера-Бера, можна розрахувати в такий спосіб. Аксіальну швидкість V_z , з високим ступенем імовірності, можна вважати незалежною від радіуса. Тангенціальна швидкість на програмному рівні, при моделюванні, за допомогою пакетів програм CFD-розрахунків можна задати за залежностями квазитвердого обертання $V_{\tau} = \omega r$, хоча це може бути справедливим тільки в ядрі обертання. Очевидно, що таке завдання тангенціальної швидкості має досить велику помилку визначення ступеня закручення, однак, на попередньому етапі, до оцінки результатів розрахунку, це може бути цілком прийнятним.

На сьогоднішній день існує досить велика кількість програмних обчислювальних комплексів для проведення CFD-розрахунків, які містять у собі багато різних моделей турбулентності на платній і безкоштовній основі. Багато авторів доходять до висновку, що однією з найкращих за обчислювальними витратами й помилками розрахунку моделей турбулентності є модифікована двошарова « $k - \omega$ » модель турбулентності (SST-модель [8]).

Рішення задачі здійснене в пакеті програм OpenFoam. Розрахунок проведений у стаціонарній постановці для нестисливої рідини – води. Використався стандартний солвер OpenFoam на основі методу контрольних об'ємів й PISO-алгоритму. Розрахунок тривав до зниження нев'язань всіх рівнянь до значень 10^{-5} . Для оцінки необхідної кількості елементів сіткового розбиття були обрані три сітки, що складаються з тетрагональних і призматичних елементів біля твердих стінок [9].

Для підтвердження можливості використання математичної моделі в класі задач закручених течій проведено порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними. Порівняння результатів експерименту з розрахунком зроблено при однаковому ступені закручення. Експериментальні дані отримані за допомогою стерео-PIV техніки, особливості

якої можна довідатися зі статті [10], звідки були взяті експериментальні результати. Вихідний діаметр сопла був обраний $D_b = 38$ мм.

Математична модель цілком адекватно описує течію закрученого струменя, особливо в поздовжній площині. У поперечних перерізах спостерігається недостатня кількість зворотної течії, що пов'язане з недоліком визначення вакуумметричного тиску поблизу осі закрученого потоку. Цей недолік RANS-моделей у цілому, і SST-моделі зокрема, відомий й описаний у багатьох роботах [4, 11]. З метою мінімізації подібного ефекту було застосоване коригування моделі турбулентності для урахування обертання й кривизни ліній струму. Однак, можливості такого коригування теж обмежені й не привели до повного збігу експериментальних і розрахункових даних.

Верифікація математичної моделі проведена порівнянням розрахунку закрученого струменя з експериментальними даними не тільки якісно, але й кількісно за величиною швидкостей у характерних точках течії. Порівняння картин течії показує досить точний опис моделлю форми течії, величини загасання обертання й значень швидкості в різних перетинах.

Оцінено вплив коригування на кривизну ліній струму й обертання потоку SST-моделі турбулентності. Отримано, що хоча використання SST-моделі турбулентності, не приводить до повного збігу розрахункових даних з результатами експерименту, однак застосування коригування цілком точно пророкує вихрові структури поблизу осі. Застосування RANS-підходу з використанням скоригованої SST-моделі турбулентності дозволяє досить швидко, за допомогою комп'ютерів середньої потужності визначати всі основні характеристики закрученого потоку.

Хоча ступінь закручення обрана як основний параметр для порівняння, дослідження показали, що при зміні основних параметрів, що впливають на ступінь закручення в абсолютних одиницях виміру картини течії можуть відрізнитися, що вимагає певної уваги при використанні опублікованих результатів досліджень закручених течій інженерами. Це також підтверджує необхідність самостійних розрахунків при зміні розмірів вихідного сопла для оцінки ступеня загасання струменя й швидкостей в абсолютних одиницях.

Список використаних джерел

1. *Роговий А.С. Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.17 / Андрій Сергійович Роговий ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2017. – 36 с.*
2. *Кузнецов В. И. Некоторые предложения к варианту дифференциального уравнения физического процесса вихревой эффект конфузора. / В.И.Кузнецов // Омский научный вестник. – 2015. – №1 (137). – С.33-37.*
3. *Babenco V. V. Velocity Fluctuations in a Swirling Jet of a Vortex Chamber. / Babenco, V. V., Blohin, V. A., Voskoboinick, A. V., Turick, V. N. // International Journal of Fluid Mechanics Research. – 2005. – Vol. 32. No. 2. – P. 184-198.*
4. *Rogovyi A. Verification of fluid flow calculations in vortex chamber superchargers / A.Rogovyi // Автомобильный транспорт. – 2016. – №. 39. – С. 39-46.*
5. *Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. / Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. – Москва, УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.*
6. *Смульский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. / Смульский И.И. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. – 301 с.*
7. *Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. / Митрофанова, О.В. Москва: Физ-матлит, 2010. – 288 с.*
8. *Rogovyi A. Energy performances of the vortex chamber supercharger /A. Rogovyi //Energy. – 2018. – V. 163. – P. 52-60.*
9. *Сёмин Д.А. Влияние типа и размера расчетных сеток на точность расчета течений в вихрекамерных нагнетателях / Д.А. Сёмин, А.С. Роговой // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 41 (1213) – С. 70-77.*

10. Boushaki T. *Experimental investigation of CH₄-air-O₂ turbulent swirling flames by Stereo-PIV.* / Boushaki, T., Merlo, N., de Persis, S., Chauveau, C., Gökalp, I. // *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019. – Vol. 106. – P. 87-99.
11. Сѣмин Д. А. *Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах* / Д. А. Сѣмин, А. С. Роговой, А. М. Левашов, Я. М. Левашов // *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. Серія : *Машинобудування*. - 2016. - № 2. - С. 71-78