

конфузора. / Кузнецов В. И., Шариков О. А. // Омский научный вестник. – 2015. – №1 (137), – С.33-37.

7. Сьомін Д.О. Вплив закручення потоку, що перекачується, на енергетичні характеристики вихрекамерних насосів / Д.О. Сьомін, А.С. Роговий, А.М. Левашов. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 20 (1192) – С. 68-71.

8. 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.

9. Rogovyi A.S. Verification of Fluid Flow Calculation in Vortex Chamber Superchargers/ A.S. Rogovyi // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / МОН Украины, ХНАДУ. – Харьков, 2016. – Вып. 39. – С. 39-46.

Роговий Андрій Сергійович, д.т.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, [asrogovoy@ukr.net](mailto:asrogovoy@ukr.net)

## **ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАКРУЧЕНОГО ЗАТОПЛЕНОГО СТРУМЕНЯ НА ОСНОВІ ЧИСЛОВИХ РОЗРАХУНКІВ**

Закручені течії є одними з найпоширеніших у природі. Вони зустрічаються у природних явищах: торнадо, смерч та циклон. Часто закручені течії використовують в техніці: гідроциклони, пиловловлювачі, спалювання палива, вихрові клапани, струминні ежектори, міксери та центрифугування [1]. На відміну, від класичних спрямлених потоків, які в більшості випадків можливо розрахувати за допомогою досить простих рівнянь, закручені течії потребують розрахунків за допомоги рівнянь Нав'є-Стокса, або значних спрощень для асимптотичних рішень [2]. В практиці проектування вихрових пристроїв досить часто приходиться стикатися з закрученим затопленим струменем. На відміну від прямогочного затопленого струменя, для якого існують залежності для розрахунку основних його параметрів, для закрученого струменя необхідно кожного разу проводити нові розрахунки із урахуванням ступеня закручення. Це пов'язане із, щонайменше, з чотирма різними варіантами поведінки струменя у залежності від його ступеня закручення, що проілюстровано на рис. 1.

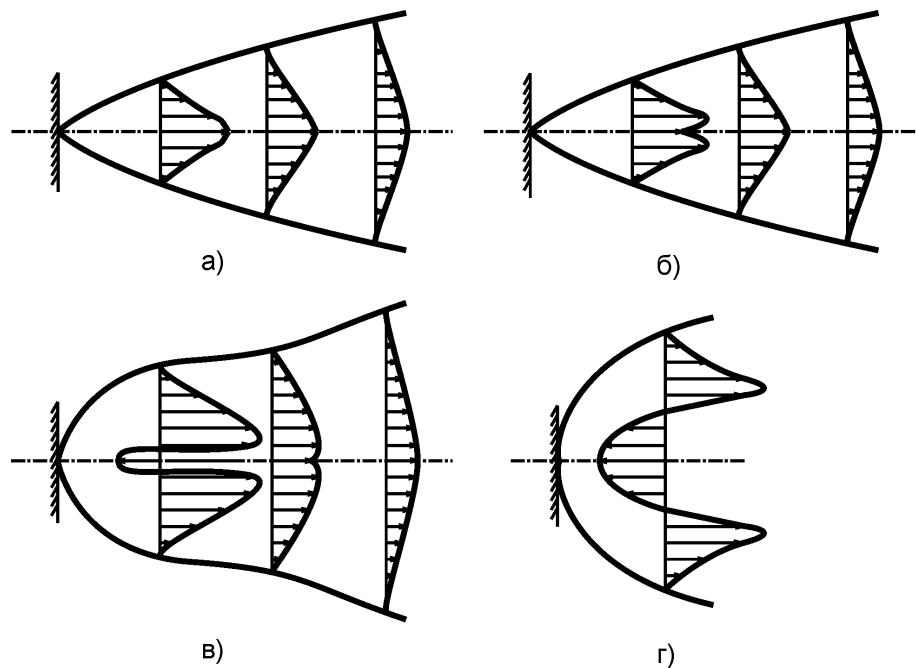


Рисунок 1 – Еюра аксіальної швидкості вільного затопленого струменя різного ступеня закручення: а) слабо закручений струмінь; б) помірно закручений струмінь; в) сильно закручений струмінь; г) сильно закручений розімкнений струмінь

На сьогоднішній день, проведено досить багато експериментальних та числових досліджень такої течії й отримано багато залежностей, що можуть допомогти дослідникам оцінити основні параметри. Але, якщо хоч один з параметрів виходить за рамки досліджених в цих роботах, то приходиться проводити самостійні розрахунки або експеримент.

Загалом кажучи, основні гідродинамічні параметри затопленого струменя залежать від ступеня закручення потоку. Зі збільшенням закручення збільшується приосьова зона низького тиску та течії у зворотному напрямку [3]. Формування зворотного напрямку течії залежить від декількох параметрів, які найчастіше збирають в один комплекс й називають коефіцієнтом закручення або ступенем закручення потоку. Той або інший коефіцієнт закручення використовують в залежності від способу закручення потоку [4].

Закручення потоку, що перекачується можливо створити за допомогою завихрювачів (рис. 2). За місцем розташування завихрювачі можливо розділити на апарати з торцевим завихрювачем та з завихрювачем, розташованим на циліндричній поверхні каналу. Завихрювачі можуть бути лопатними, щілинними, завитковими, тангенціальними з одним або кількома патрубками [4].

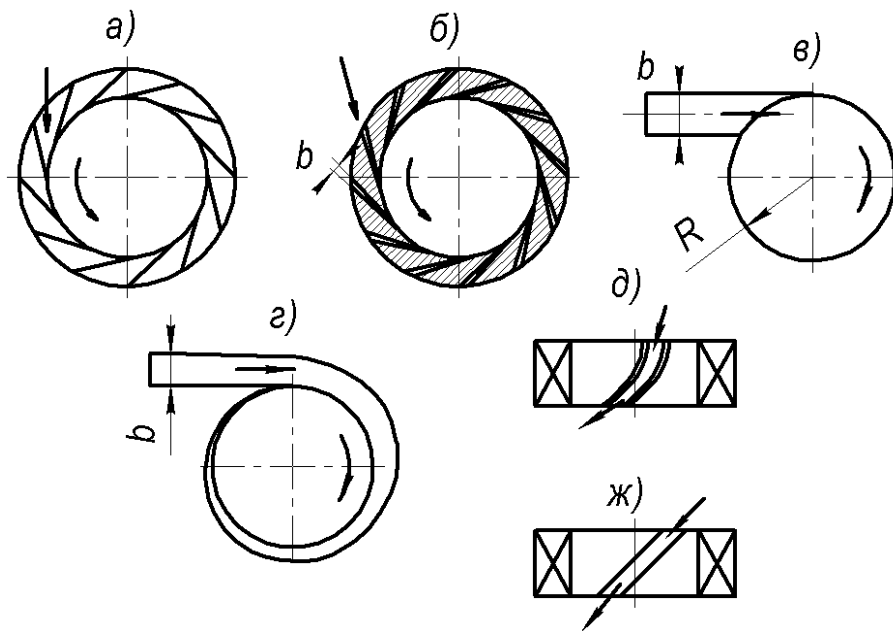


Рисунок 2 – Завихрювачі

а) лопатний; б) щілинний; в) із тангенціальним патрубком; г) завитковий; д), ж) торцеві лопатні

У перші роки досліджень закручених струменів у якості оцінки ступенів закручення використали геометричні параметри завихрювачів, але цей підхід пізніше привів до неможливості порівняння характеристик течій внаслідок використання різних способів створення закручення. Пізніше почали використовувати інтегральні параметри із урахуванням відносної величини потоку імпульсу в тангенціальному напрямку а, також циркуляцію швидкості. В роботі [5] в якості єдиного параметру, що найбільш повно враховує основні особливості закручених течій незалежно від способу їх генерації, використано інтегральний параметр закручення  $Y$  (параметр Хігера-Бера).

$$Y = \frac{\int_0^R \rho V_\tau V_z r^2 dr}{R \int_0^R \rho V_z^2 r dr},$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $V_\tau$  – тангенціальна швидкість,  $V_z$  – аксіальна швидкість,  $R$  – радіус каналу.

За своєю сутністю інтегральний параметр закручення характеризує відносну величину потоків імпульсу, що переносяться в кутовому та аксіальному напрямках, і саме цей параметр використано в більшості публікацій присвячених закрученим течіям.

Для спрощення у великій кількості публікацій для вихрових камер аналізують число Россбі [1, 6]. Для вихрових камер число Россбі та ступінь обертання рідини визначають відношенням радіальної до тангенціальної складової швидкості біля циліндричної поверхні камери. Загалом, для

обертових потоків ступінь закручення можна визначити двома способами: відношенням тангенціальної швидкості до радіальної (спіральний рух) або відношенням тангенціальної швидкості до аксіальної (гвинтовий рух) [7]. Для подальшого аналізу оберемо в якості параметра, що характеризує закручення потоку, параметр спірального руху рідини, який розраховується за формулою

$$K = \frac{V_{\tau}}{V_z}.$$

На сьогоднішній день існує досить велика кількість програмних обчислювальних комплексів для проведення CFD розрахунків, що включають у себе велику кількість різних моделей турбулентності, однак у більшості публікацій автори доходять висновку, що однією з найкращих за обчислювальними витратами і похибками розрахунку моделей турбулентності є модифікована двошарова « $k-\omega$ » модель турбулентності переносу зсувних напруг Ментера (SST модель [6-8]), що враховує особливості течії біля твердих стінок і в зовнішньому потоці. Для більш кращого розрахунку закручених течій використовують коригування на кривизну ліній току, розроблене для SST-моделі [7-9].

В даній роботі, математичне моделювання течії здійснене із такими граничними умовами: на твердій стінці – умова прилипання рідини  $\vec{V}|_b = 0$ , у вхідному перетині задавалося значення двох компонент швидкості: аксіальної  $V_z$  та тангенціальної  $V_{\tau} = \omega r$ , у вихідних каналах – рівність нулю тиску  $p|_b = 0$ . Сіткове розбиття забезпечувало параметр  $y^+ < 2$ . Вирішення задач виконувалося в стаціонарній постановці для нестисливої рідини.

На рис. 3 показано результати розрахунку розподілу швидкості затопленого струменя з використанням та без використання коригування моделі турбулентності.

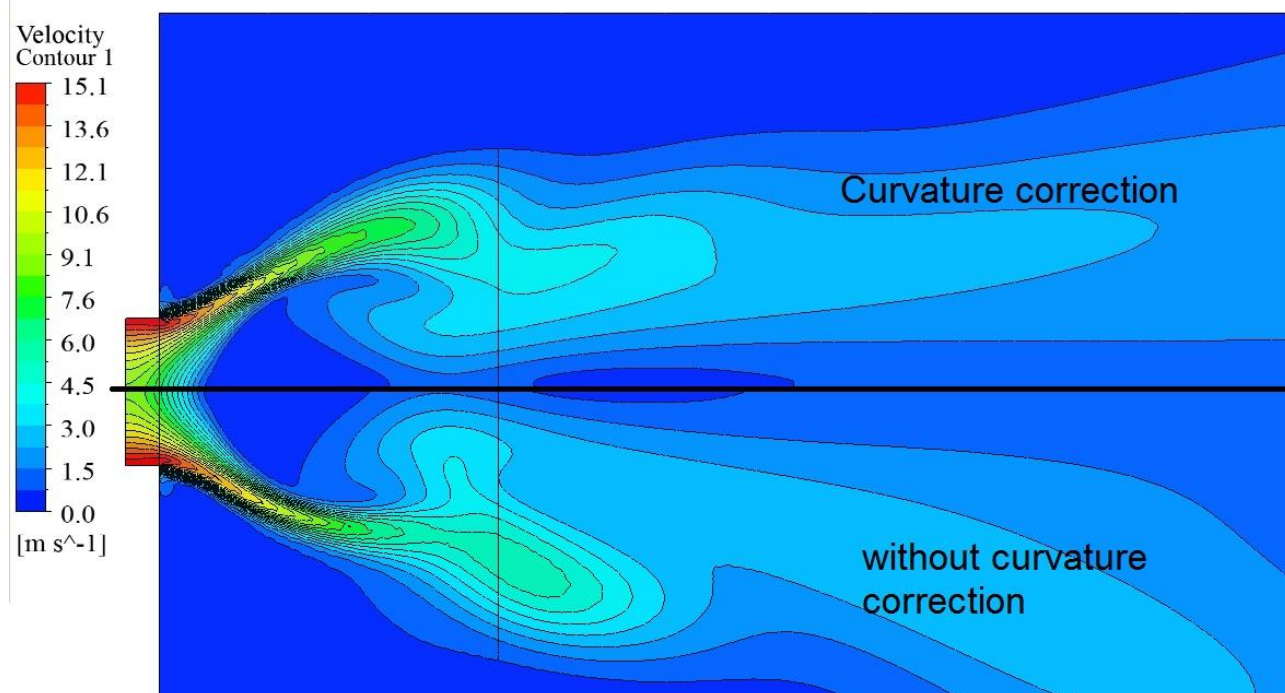


Рисунок 3 – Розподіл швидкості струменя

Використання коригування на кривизну ліній струму не приводить до значних змін у картині течії струменя (рис. 3, рис. 4).

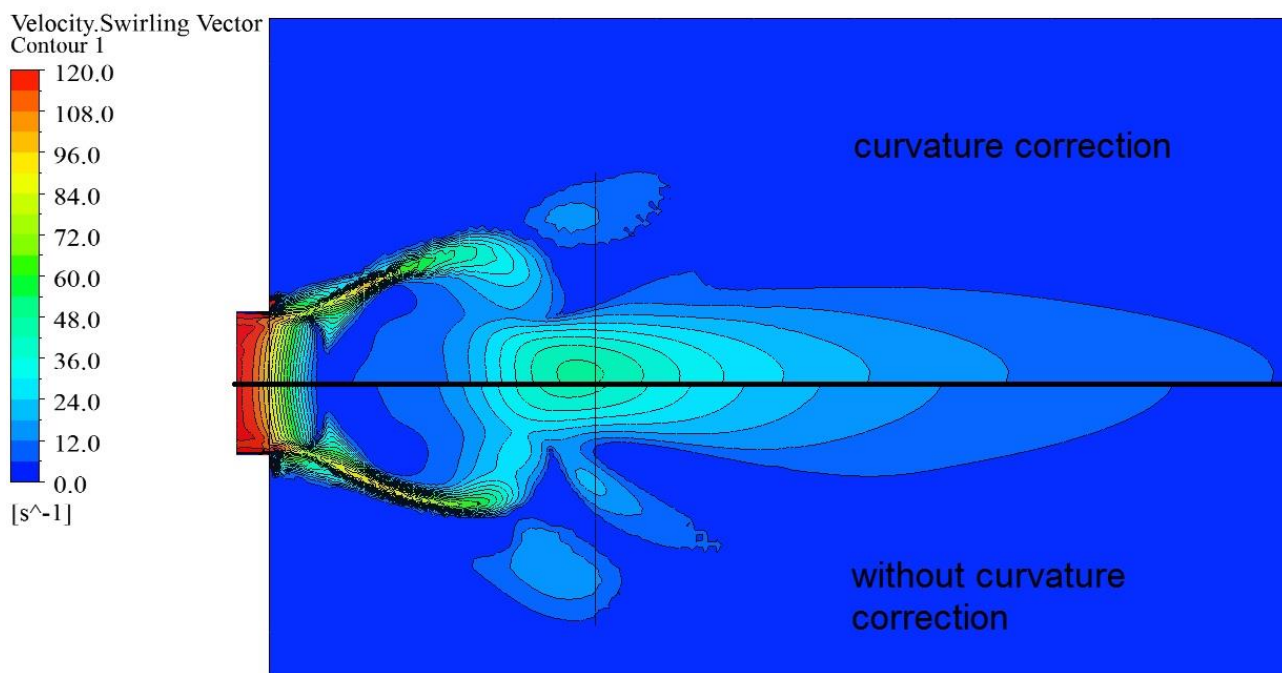


Рисунок 4 – Інтенсивність вихорів

На рис. 4 можна бачити наявність області обертання рідини біля осі. Також спостерігається збільшення області закрученої течії при використанні коригування на кривизну ліній струму.

**Висновки.** В роботі на основі числового моделювання шляхом вирішення рівнянь руху нестисливої рідини з SST моделлю турбулентності отримані розподіли швидкості та інтенсивності вихорів. Розрахунки зроблено з використанням та без використання коригування на кривизну ліній струму.

Спостерігається наявність області обертання рідини біля осі та збільшення області закрученої течії при використанні коригування на кривизну ліній струму.

### Література

1. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных сил: в 4-х т. /А.А. Халатов, А.А. Авраменко, И.В. Шевчук. – Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000 - т.3: Закрученные потоки. – 477 с.
2. Сьомін Д.О. Вихрові виконавчі пристрої: В 2-х частинах. Ч.2 Гетерогенні робочі середовища: монографія. / Сьомін Д.О., Павлюченко В.О., Мальцев Я.І., Войцеховський С.В., Роговий А.С., Дмитрієнко Д.В., Мальцева М.О. - Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2013. – 190 с.
3. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш.А. Пиралишвили, В.М. Поляев, М.Н. Сергеев. Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.

4. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах / И.И. Смутьский. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. – 301 с.
5. Митрофанова, О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О.В. Митрофанова. - М. : Физ-матлит, 2010. - 288 с.
6. Сьомін Д.О. Вплив закручення потоку, що перекачується, на енергетичні характеристики вихрекамерних насосів / Д.О. Сьомін, А.С. Роговий, А.М. Левашов. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 20 (1192) – С. 68-71.
7. Роговий А. С. Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.17/ Андрій Сергійович Роговий; Харківський політехнічний ін-т, нац. техн. ун-т. – Харків, 2017. – 36 с.
8. Сёмин Д.А. Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах. / Сёмин Д.А., Роговой А.С., Левашов А.М., Левашов Я.М. // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Машинобудування, 2016. – № 2 (77). – С. 71-78.
9. Rogovyi A.S. Verification of Fluid Flow Calculation in Vortex Chamber Superchargers/ A.S. Rogovyi // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / МОН Украины, ХНАДУ. – Харьков, 2016. – Вып. 39. – С. 39-46.

Сахно Володимир Прохорович, д.т.н., професор, Національний транспортний університет, [svp\\_40@ukr.net](mailto:svp_40@ukr.net)

Поляков Віктор Михайлович, к.т.н., професор, Національний транспортний університет

Місько Євген Михайлович, аспірант, Національний транспортний університет

## **ДО ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ РУХУ ТРИЛАНКОВОГО АВТОБУСНОГО ПОЇЗДА**

Безпечні системи громадського транспорту все більше розглядаються як важливий засіб безпечного підвищення мобільності населення, особливо в міських районах, які страждають від зростаючих транспортних заторів. У багатьох містах з високими доходами особливо акцентується політика скорочення використання особистого автомобільного транспорту за допомогою інвестицій в розвиток мереж громадського транспорту. Інвестиції в безпечний громадський транспорт розглядаються також як механізм, що стимулює зростання фізичної активності і, отже, сприяє зміцненню здоров'я населення

Метробус або нова система автобусного руху "Швидкісний автобусний транспорт" (Bus Rapid Transport, BRT) є результатом розвитку мережі автобусного суспільного транспорту. В порівнянні з метро цей проект володіє явними перевагами: менша вартість створення мережі, менша вартість рухомого складу, мобільність та ін. [1].

Система BRT має ряд незаперечних переваг [1]