

МЕТОДИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ ТА ШЛЯХИ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

*Є.О. Шквар (д.т.н., доц.)¹, Д.М. Зінченко (к.т.н.)²,
В.В. Зілінка (аспірант)², М.А. Саченко (аспірант)²,
В.В. Кравченко (ст. викладач)¹, С.О. Шевченко (аспірант)¹,
Національний авіаційний університет (1),
ДП "Антонов" (2), Київ, Україна*

Представлені результати чисельного відтворення ряду структурних особливостей вихрової структури турбулентних пристінних течій, актуальних з точки зору оптимізації обтікання літальних апаратів з метою покращення їх енергоефективності. Висвітлені результати ряду експериментальних досліджень профільованої обтічної поверхні. Наведено результати моделювання на основі методу моделювання великих вихорів вторинних вихроутворень у двогранному куті, зумовлених анізотропією турбулентності. Проаналізовано ряд підходів до побудови математичних моделей, що враховують профілювання поверхні, представлено результати досліджень обтікання профільованої поверхні, а також чисельного моделювання нестационарного просторового турбулентного обтікання вібруючої пластини на основі SST моделі турбулентності.

Управління турбулентними течіями, зменшення опору тертя, енергоефективність транспорту, чисельні методи моделювання.

Авіаційна транспортна галузь є одним із найбільших споживачів паливних енергоносіїв, тому для неї все більшої актуальності набувають розробка та впровадження методів енергозаощадження, спрямованих на управління та оптимізацію обтікання. Найефективнішим шляхом вирішення

цих задач є впровадження сучасних вихоро-розв'язувальних технологій математичного моделювання, що ґрунтуються на застосуванні високопродуктивних обчислювальних систем.

Мета роботи – викладення розроблених авторами концепцій та базових принципів математичного моделювання фізичних процесів, що обумовлюють турбулентне вихроутворення та, як наслідок, опір тертя.

Матеріали та методика досліджень. Реалізація цих підходів дозволить ефективно і цілеспрямовано здійснювати оптимізацію конструювання перспективних літальних апаратів та інших швидкісних транспортних засобів різноманітного призначення, а також розв'язувати вагому екологічну задачу визначення доцільності та обґрунтування змін рельєфу міської високоповерхової забудови з позицій забезпечення належної вентиляції. Найсуттєвішим пріоритетом досліджень є розробка шляхів покращення спроможності математичних моделей обтікання ЛА до адекватного відтворення особливостей турбулентного руху і обумовленого ним додаткового вихроутворення. Спроби розв'язання цих задач типовими методами мають, принаймні, декілька підстав виявитися невдалими. Зокрема, традиційний набір реалізованих в сучасних програмних пакетах аерогідродинамічного спрямування (ANSYS, Flowvision та ін.) типових напівемпіричних моделей турбулентності не спроможний передбачити обумовлене градієнтами рейнольдсових напружень додаткове вихроутворення другого роду згідно класифікації Прандтля [1]. При моделюванні турбулентного обтікання області зчеплення крила з фюзеляжем шляхом використання напівемпіричних моделей турбулентності, шкідливий ефект інтерференції між цими елементами ЛА в місці їх зчеплення буде відтворюватися розрахунковим шляхом не у повному обсязі, що при вирішенні задачі формування оптимальної геометрії залізу зашкодить отриманню якісних результатів [2]. Дана проблема стає ще більш вагомою при спробах теоретичного вирішення задачі встановлення засобів управління структурою примежового шару, таких як, наприклад, вихрогенератори. Ураховуючи малий розмір останніх у порівнянні з характерним лінійним розміром крила, виникає потреба в забезпеченні

відповідної роздільної здатності різницевої сітки для належного відтворення визначальних масштабів вихрових структур за вихрогенераторами та їх впливу на течію в цілому. Ця обставина з одного боку призводить до надмірного збільшення вимог до обчислювальних ресурсів, а з іншого – до потреби в надійному моделюванні багатомасштабної вихрової динаміки турбулентного примежового шару та належному відтворенні взаємодії між турбулентністю та штучним вихроутворенням. Отримання навіть задовільного з точки зору проблем проектування розв'язку даної задачі не є можливим без використання сучасних технологій паралельних і, зокрема, розподілених обчислень та застосування сучасних підходів до моделювання турбулентності, таких як моделювання динаміки великих вихорів (Large Eddy Simulation - LES) або переносу рейнольдсових напружень, які через надмірну ресурсовитратність та складність поки що не стали промисловими стандартами. Саме тому в дослідженнях авторів розробці цих технологій та моделей, а також їх впровадженню в практику аеродинамічного проектування приділяється пріоритетна увага.

Результати дослідження. Чисельне моделювання турбулентного обтікання двогранного кута. Проектування та оптимізація сучасної авіаційної техніки потребує розробки нових методологічних рішень та впровадження новітніх технологій аеродинамічного проектування, основу яких складають сучасні методи математичного моделювання. Однією із таких задач є обрахунок обтікання в зонах зчеплення крила з фюзеляжем літака, для покращення аеродинамічних характеристик літальних апаратів. У даному розділі розглядається задача моделювання течії у двогранному куті, який є максимально спрощеною моделлю зчеплення крила з фюзеляжем. При обтіканні зазначених зон утворюється небажане явище інтерференції, обумовлене системою приєднаних вихорів, представлених на рис. 1а. Для моделювання вищезазначеної вихрової системи обрано метод LES. У ролі вхідних даних для сформульованої задачі обрано геометрію у вигляді прямокутного паралелепіпеда зі сторонами в перетині 130x130 мм та довжиною 1300 мм. Задача вирішувалася у тривимірній постановці з наступними

граничними умовами (рис. 1б): одна із торцевих поверхонь являється входом повітря зі швидкістю $V_x = 20$ м/с, а протилежна є вихідною, грані *a* та *b* вважаються непроникними стінками, які імітують спрощену модельну задачу обтікання зони зчеплення крила з фюзеляжем, а на гранях *c* і *d* ставиться гранична умова симетрії.

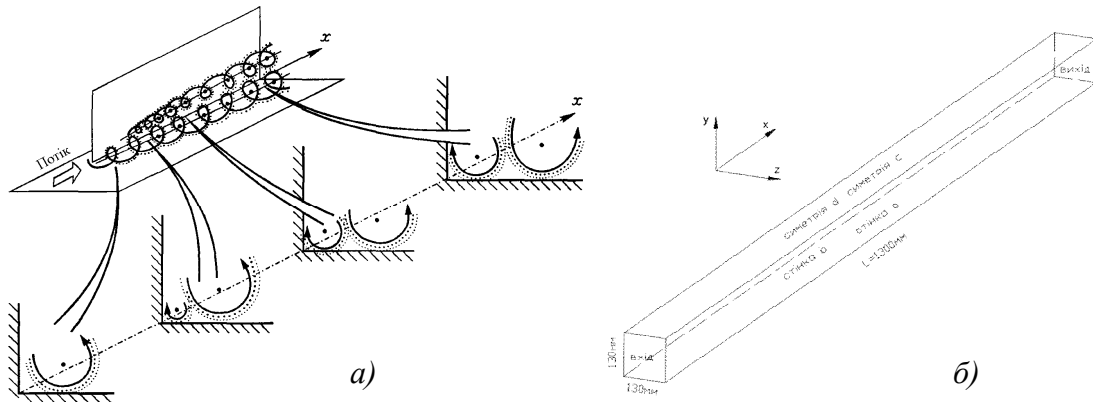


Рис. 1. а) схематизована картина розвитку вихорів в кутовій конфігурації;
б) граничні умови для модельної розрахункової області

Розрахункова область описувалась структурованою сіткою з 5,6 млн. кінцевих об'ємів. Товщина прилежого елемента сітки становила 0,01мм. Задача вирішувалась в програмному модулі Fluent пакету Ansys. Крок за часом обрахунку складав 1 с, час обрахунку тривав 6 годин із застосуванням 2-х ядер з тактовою частотою 3.3 GHz, збіжність нев'язок порядку 10^{-7} була досягнута на 510-й ітерації. На рис. 2 представлені результати обрахунку обтікання у вигляді проекції векторів швидкості на вихідну грань потоку.

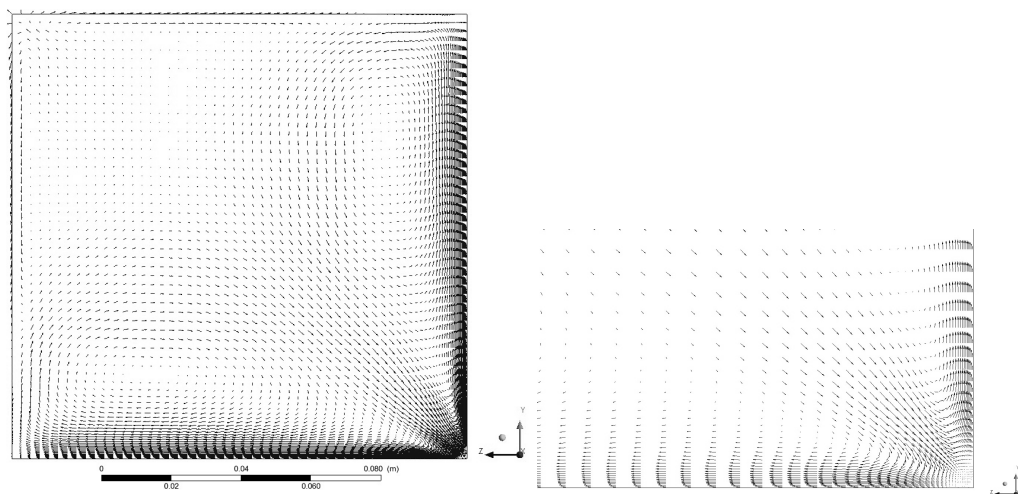


Рис. 2. Проекція векторів швидкості на площину OYZ у вихідному пенетині

За результатами, представленими на рис. 2, можна судити про належне відтворення розрахунковим шляхом розвинутої симетричної системи вторинних вихрових структур, які направлені до центру кута, що відповідає результатам фізичних випробувань [3] (рис. 3).

Оребрені поверхні, проблеми та перспективи їх застосування в аерогіродинаміці. Управління турбулентними примежовими шарами представляє інтерес з причини наявності значних потенційних переваг, таких як регуляризація вихрової структури течії, яка надає можливість знизити опір тертя. Опір поверхневого тертя складає близько половини повного опору для транспортної авіації, тому будь-яке зниження опору спричиняє істотну економію експлуатаційних витрат. Один із перспективних шляхів зменшення опору тертя являється застосування регулярних поздовжніх борозенок малих розмірів, так званих ріблетів, які реалізовані на обтічній поверхні ковзного крила та здатні зменшити опір тертя на 4-8%, а в окремих випадках навіть 15%. Мікропрофільювання має безпосереднє природне підґрунтя: луска риб, рельєф зовнішніх поверхонь раковин та покривів шкіри молюскоподібних (рис. 4). В роботі [4] було запропоновано декілька концепцій можливого механізму зниження опору за рахунок ріблетів. В [5] розглянуто взаємодію поздовжніх вихорів, що обертаються в протилежних напрямках, з маленькими вихорами, що утворюються біля вершин ріблет, доводячи, що вторинні вихори будуть послаблювати поздовжні вихори, привносячи високошвидкісну рідину до стінки в процесі турбулентного переносу, так само, як і утримуючи низькошвидкісну рідину в борозенках. Поздовжні вихори переміщуються від стінки, а турбулентний обмін імпульсами в поздовжньому напрямку зменшується. А оскільки цей обмін відповідає за високе локальне дотичне напруження біля стінки [6], його зниження призводить до зниження поверхневого тертя. У [7] показано, що гострі гребені ріблетів ускладнюють пересічні потоки, що викликані розташованими вище поздовжніми вихорами у в'язкому підшарі та те, що наявність ріблетів знижує інтенсивність імпульсного обміну в примежовому шарі, зменшуючи таким чином турбулентну енергію та

дотичні напруження. У цьому випадку, поблизу стінки будь-яка рідина поводить себе як високов'язка. Тому припустимо розраховувати течію поблизу малих ребер за допомогою теорії в'язкої рідини. Зниження опору за допомогою мікропрофілювання поверхні має сенс лише там, де турбулентне пристінне тертя вносить істотний внесок в аерогідродинамічні втрати. Однак в інших випадках, таких, наприклад, як аеродинаміка автомобілів, де привалює розподілений потік та опір форми, використання ріблетів вже не буде доцільним [8]. У роботі [4] висвітлені результати одного з останніх (2011) відомих авторам експериментальних досліджень характеристик поля турбулентної течії над поверхнею моделей у вигляді пластин із ріблетами та виконано порівняння отриманих результатів з властивостями течії над гладкою поверхнею. Тести були проведені у низькошвидкісній аеродинамічній трубі при сталій швидкості потоку в 20 м/с та числі Рейнольдса $Re = 4,9 \cdot 10^5$ по довжині пластини. Дослідження зниження опору тертя в турбулентному потоці над ребреною поверхнею представлені для двох моделей: прямі ріблети і синусоїдальні ріблети із співвідношенням $a/\lambda=0,01$ (a -відстань між сусідніми хвилями, λ -довжина хвилі).

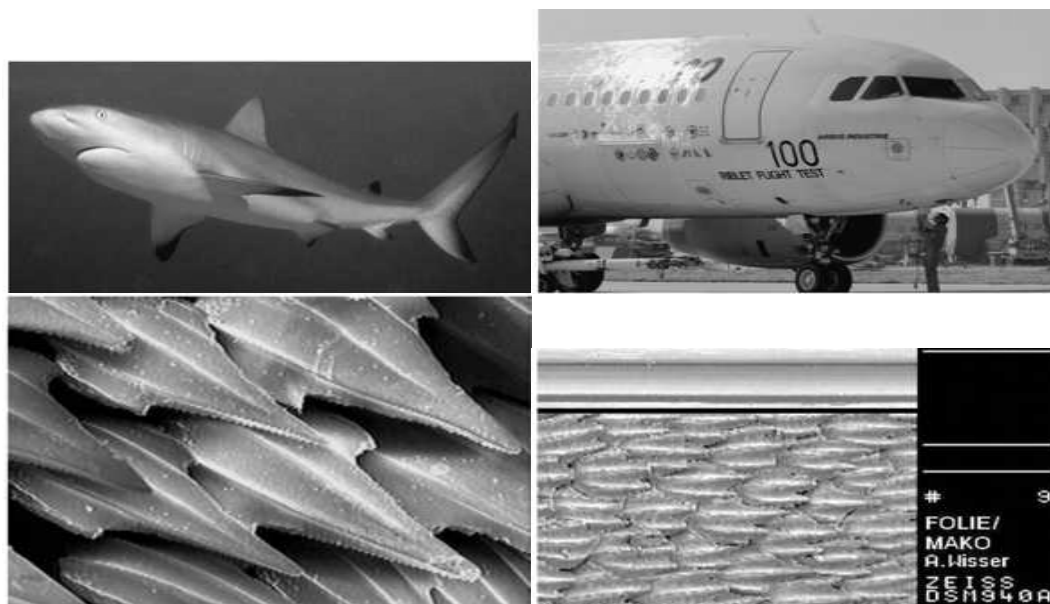


Рис. 4. Природні засоби впорядкування обтікання живих істот – рифлені поверхні (ріблети)

Пристінний профіль осередненої швидкості над оребреною поверхнею «зсувається» вниз по відношенню до гладкої поверхні, що означає зниження градієнту швидкості для потоку над ріблетами. Властивості турбулентного потоку, так само, як і характеристики примежового шару, змінюються із зміною типу профілювання обтічної поверхні. Це ілюструє наявність зниження товщини витіснення та втрати імпульсу. Коефіцієнт поверхневого тертя над оребреною поверхнею є меншим, ніж у випадку гладкої поверхні. Зниження дотичного напруження спостерігалось для більшості випадків ріблетів та ілюструє менше поверхневе тертя для оребрених поверхонь. Параметричні дослідження показали, що форма ріблетів, висота (h), ширина (w) і поперечна відстань між ними (s) (рис. 5) є основними визначальними факторами, що впливають на зниження опору (рис. 6). У випадку моделі із ріблетами прямокутного профілю було отримано зниження опору поверхневого тертя в діапазоні 10-14%, а кращі розміри ($h=0,25\text{мм}$, $s=1\text{мм}$, $w=1\text{мм}$).

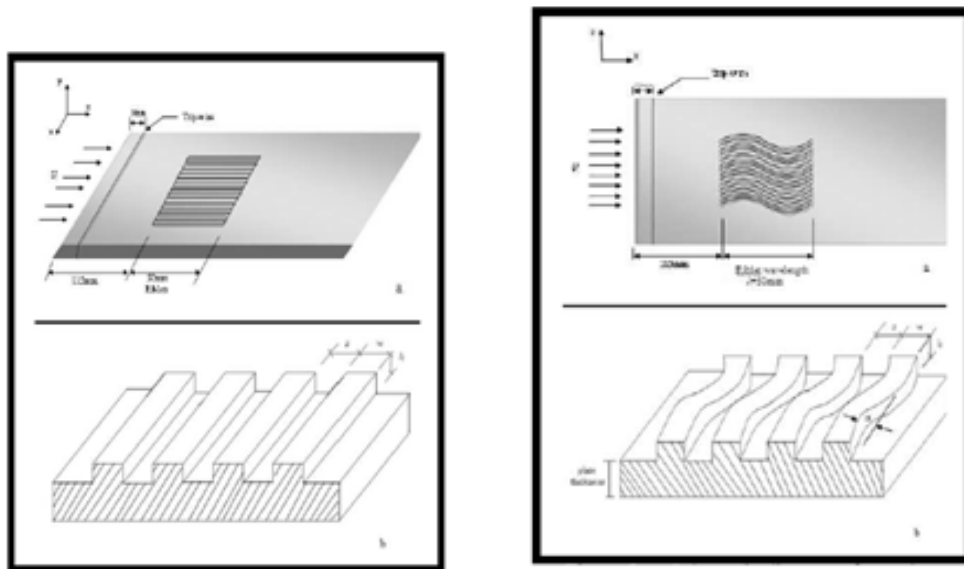


Рис. 5. Принципова схема пластини та поперечний переріз оребреної поверхні

Результати також довели, що більш значуще зниження опору досягається за рахунок синусоїдальних ріблетів завдяки набуття поперечною компонентою швидкості поблизу обтічної поверхні осцилюючої властивості, що є сприятливою по відношенню до основного потоку. Незважаючи на інтенсивний розвиток обчислювальної техніки і вражаючі успіхи, досягнуті в останні роки в області побудови ефективних чисельних алгоритмів, призначених для

вирішення завдань гідромеханіки і тепломасопереносу, а також в розробці відповідного математичного забезпечення (генератори сіток, інтерактивні системи введення даних і системи візуалізації результатів розрахунків), чисельне моделювання властивостей турбулентності, як і впродовж багатьох попередніх десятиліть, залишається однією з найбільш складних і актуальних проблем механіки рідин.

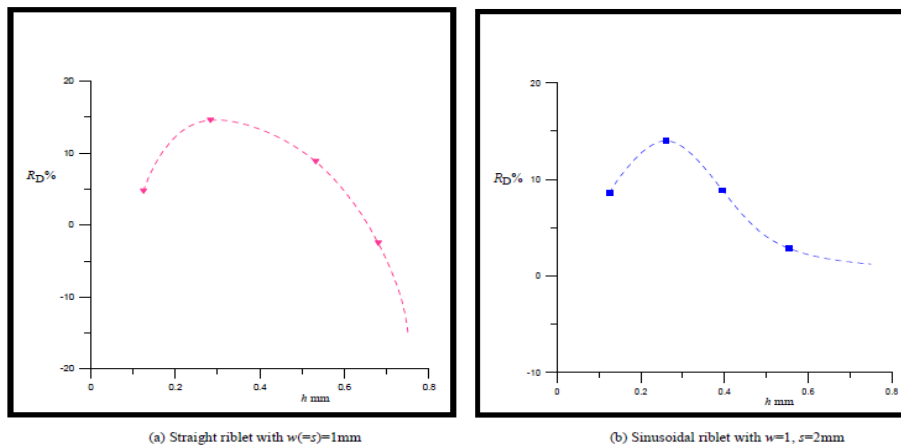


Рис. 6. Ефект дії риблетів (зменшення опору)

Особливо гостро ця проблема стоїть при необхідності моделювати ефекти від особливостей на кшталт риблетів, що мають вкрай малі розміри у порівнянні з характерними лінійними розмірами обтічного тіла чи відповідної зсувної течії.

Аналіз застосовності диференціальних моделей турбулентності при моделюванні обтікання деформованої пластини. Існує широке коло задач аеродинаміки, в яких має місце аеропружна взаємодія між потоком і тілом, що ним обтікається. Однією з таких задач є рух парашюта, жорсткість поверхні якого є результатом наддуву, отже на певних режимах обтікання можливо виникнення режимів автоколивань куполу. Задача моделювання течії, індукованої коливаннями пружної пластини, є актуальною для аеродинаміки та представляє собою математичний опис умов виникнення панельного флатеру. У теперішній час розрахунки складних турбулентних потоків в умовах реальних режимів обтікання та геометрії виконується, як правило, з використанням напівемпіричних моделей турбулентності, що призначені для замикавання осереднених за Рейнольдсом вихідних рівнянь (RANS). Особливо

широко розповсюджені диференціальні моделі. Наприклад, $k-\varepsilon$ та $k-\omega$ моделі турбулентності реалізовані в більшості комерційних CFD пакетах, орієнтованих на розв'язання задач аерогідродинамічного спрямування (CFD – Computational Fluid Dynamics) [9]. У даній роботі розглядається модельна задача обтікання гнучкої прямокутної пластини розмірами $1 \times 1 \times 0.1$ м, що здійснює згинальні коливання в потоці нестисливої рідини (рис. 7). Для виконання розрахунків застосовувався програмний модуль CFX пакету ANSYS. У проведених розрахунках використана одна з найбільш довершених двопараметричних диференціальних моделей турбулентності – SST, розроблена Ф.Ментером.

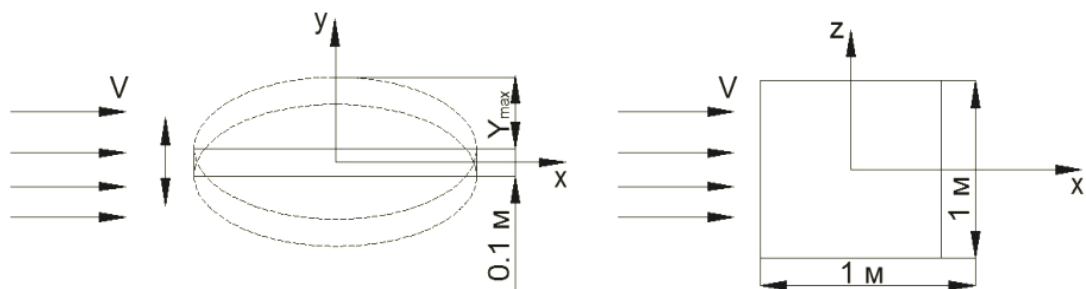


Рис. 7. Схема задачі

Деформація поперечного перерізу пластини задавалася на даному етапі дослідження наступним періодичним законом:

$$\bar{y} = 0,2(1 - (1 - 2\bar{x})^2) \sin(\omega t),$$

де $\bar{x} = x/L$, $\bar{y} = y/L$ – поздовжня та нормальна координати, безрозмірні щодо довжини пластини L ; $\omega = 2\pi/T$ – кутова частота деформованого руху з періодом T ; t – часова змінна; період вигинань пластини становив $T=0,5$ с. Використана в розрахунках сітка показана на рис. 8. Сітка складалася з 408864 елементів і мала згущення поблизу країв пластини. Задача вирішувалася в повній тривимірній постановці. Розрахункова область являє собою сферу радіусом 10 м. На межах області заданий рівномірний потік зі швидкістю по вісі x $V_x = 10$ м/с. Спочатку вирішувалася стаціонарна задача і після досягнення заданої точності розв'язку її результати використовувалися як початкові умови для розв'язку динамічної задачі. Крок за часом складав 0.005 с. Характер і властивості вихрогенерації в сліді, індукованої заданим видом деформації пластини, ілюструються рис. 9, на якому показані миттєві поверхні так званого

Q-критерію, що виявляє в потоці вихрові структури (області, де обертання рідини переважає над зсувом) .

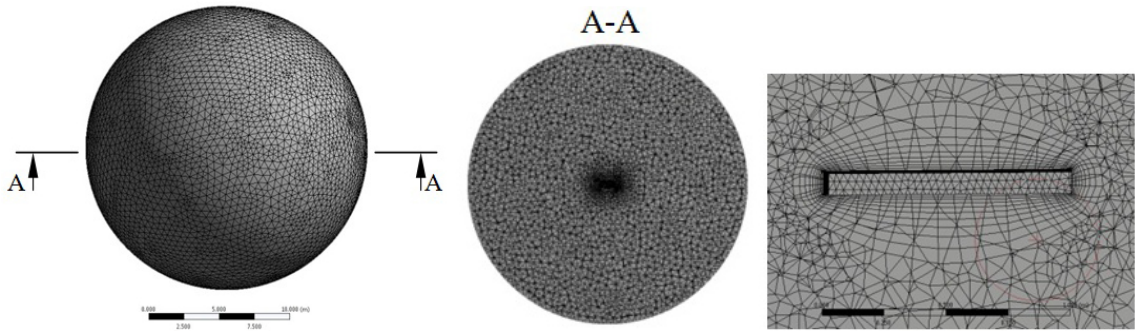


Рис. 8. Розрахункова сітка

Серед особливостей течії можна відмітити доволі великий кут розкриття струменю (до 60°), а також високий ступінь хаотичності та наявність великої кількості вихорів, що мають складну просторову структуру. Графічні ілюстрації полів осередненої швидкості в повздовжніх перерізах (площинах симетрії) течії показані на рис. 10.

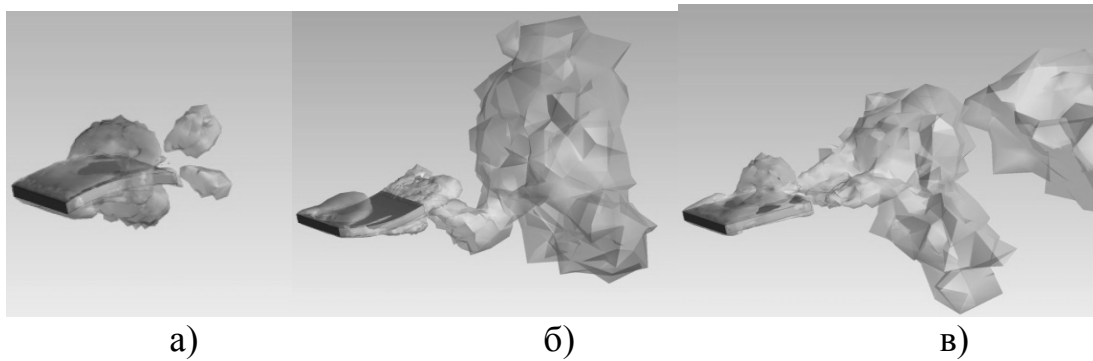
Висновки

1. Здійснено математичне моделювання формування турбулентної течії у двогранному куті, яке дозволяє адекватно відтворити систему вторинних вихорів, властивості яких відповідають фізиці процесу генерації та розвитку просторової турбулентної течії даного типу, що підтверджено експериментально.

2. Для моделювання подібного роду течій можна також використовувати підходи прямого чисельного моделювання (DNS), а також напівемпіричні моделі переносу рейнольдсових напружень (RST), що згідно структури побудови можуть забезпечити фізично коректне вирішення нестационарної тривимірної задачі. Накопичений світовий досвід застосування розглянутих методів, у тому числі й LES до моделювання течій в кутових конфігураціях досить малий, що визначає необхідність подальших досліджень у цьому напрямку.

3. Найперспективнішим методом моделювання характеристик турбулентних течій над профільованими поверхнями з метою отримання

детальної інформації про структурні особливості течії автори вважають метод LES.



а) б) в)
Рис. 9. Миттєві поверхні вихорів у момент часу:
а) $t=0,1$ с, б) $t=0,4$ в) $t=1$ с

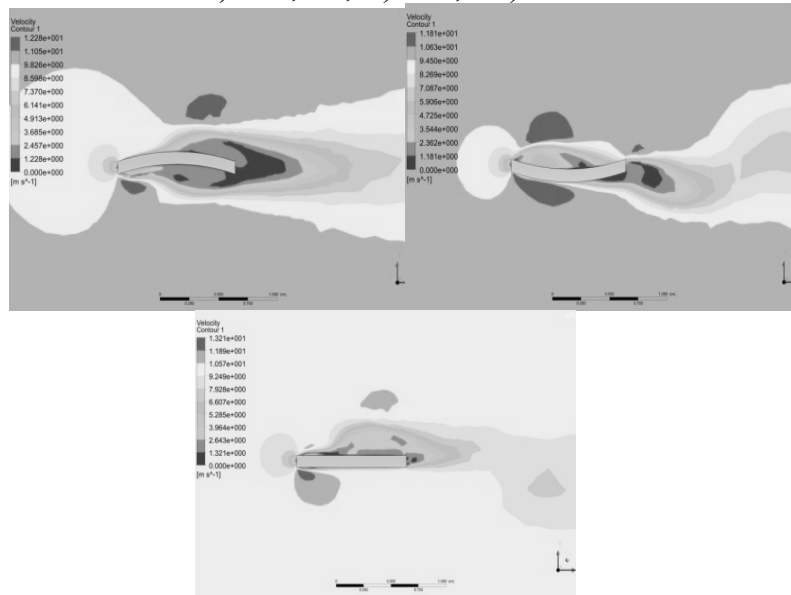


Рис. 10. Розподіл осередненої швидкості в перерізах $z=0$ та $y=0$ у момент часу: $t=0.1;0.4;1$ с

4. Змодельована складна течія, що індукована заданим видом періодичних деформацій пружної пластини кінцевої ширини. Вивчено структуру течії в сліді за пластиною, отримані миттєві поля швидкостей, тиску, завихреності. Показано, що незначне по максимальній амплітуді періодичне вигинання пластини спотворює в потоці вихрову динаміку складної структури, що також характеризується періодичністю. Лінійні масштаби вихрових структур за пластиною, що періодичним чином деформується, набагато переважають як амплітуди деформацій, так і розміри самої пластини.

5. Для моделювання розглянутих течій більш перспективними автори вважають метод моделювання великих вихорів (LES). Однак досвід застосування подібних вихоро-розв'язувальних формулювань до розв'язку

обтікання коливних тіл досить малий, що визначає необхідність та актуальність додаткових досліджень у цьому напрямку стосовно даного класу течій, на що будуть спрямовані подальші зусилля авторів.

Список літератури

1. Прандтль Л. Новые результаты в исследовании турбулентности / Л. Прандтль // Проблемы турбулентности. – М., Л.: ОНТИ. – 1936.
2. Шквар Є.О. Математичне моделювання регулярних вихрових структур у кутових конфігураціях обтічних поверхонь / Є.О. Шквар // Наукоємні технології. – К., 2011. – №1 – 2 (9–10). – С. 106 – 110.
3. Корнилов В.И. Пространственные пристенные турбулентные течения в угловых конфигурациях / В.И. Корнилов. // – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 399 с.
4. Imad S. Ali “Drag Reduction in Turbulent Flow using Different Kinds of Riblets” / S. Ali Imad, H. Al-Fatlawie Noor // Int. Conf. on Sunrise Techn. 13th – 15th Jan 2011, pp. 457 – 469.
5. Bacher E. V. “Turbulent boundary layer modification by surface riblets” / E. V. Bacher, C. R. Smith // AIAA Journal, Vol. 24, 1986. – Pp. 1382 – 1385.
6. Orlandi P. “On the generation of turbulent wall friction” / P. Orlandi P., J. Jiménez // Phys. Fluids, Vol. 6, 1994. – Pp. 634–641.
7. Bechert D. W. “The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs” / D. W. Bechert, M. Bartenwerfer // Fluid Mech. 206, 1989. – Pp. 105–129.
8. Bechert D. W. “Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application” / D. W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, R. Meyer // Springer-Verlag, Vol. 87, 2000. – Pp. 157– 171.
9. Isaev S.A. Mathematical modeling of turbulent vortical flows – the fundamental direction of modern fluid dynamics: different approaches, problems, outcomes and perspectives / S.A. Isaev, G.A. Voropaiev, V.T. Movchan., E.O. Shkvar // Aviation in the XXI-st Century. Safety in Aviation and Space Technologies: the Fifth World Aviation Congress, 25-27 September 2012: Proceedings. – К., 2012. – V.1. – С. 1.12.14 –1.12.18.

Представлены результаты численного воспроизведения ряда структурных особенностей вихревой структуры турбулентных пристенных течений, актуальных с точки зрения оптимизации обтекания летательных аппаратов с целью улучшения их энергоэффективности. Освещены результаты ряда экспериментальных исследований профилированной обтекаемой поверхности. Приведены результаты моделирования на основе метода моделирования крупных вихрей вторичных вихреобразований в двугранном угле, обусловленных анизотропией турбулентности. Проанализирован ряд подходов к построению математических моделей, учитывающих профилирование поверхности, представлены результаты исследований обтекания профилированной поверхности, а также численного моделирования нестационарного пространственного турбулентного обтекания вибрирующей пластины на основе SST модели турбулентности.

Управление турбулентными течениями, уменьшение сопротивления трения, энергоэффективность транспорта, численные методы моделирования.

The results of numerical prediction of some structural features of vortex structure of turbulent near-wall flows that are relevant in terms of optimizing the flying objects streamline with the aim of their energy efficiency improving are presented. The researches of flow, developing over a riffled surface and ways of corresponding mathematical models developing are analyzed. The secondary vortex formation inside a dihedral angle due to the anisotropy of the turbulence, performed on the base of Large Eddy Simulation (LES) and numerical modeling of unsteady three-dimensional turbulent flow around a vibrating plate, obtained on the base of SST turbulence model are presented.

Turbulent flow control, friction drag reduction, transport energy-efficiency, numerical methods of modeling.