

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ ГАЗОВОГО ПОТОКУ МЕТОДОМ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба<sup>1</sup>  
Вінницький національний технічний університет<sup>2</sup>

В статті наведено опис проведеного випробування для вивчення закономірностей течії газового потоку для каналу з трикутними виступами із застосуванням методу візуалізації для уточнення фізичної картини течії. Запропонований метод дозволяє отримати фіксовані картини обтікання при різних режимах та параметрах течії. Отримані картини обтікання обґрунтовуються теоретичними залежностями.

**Ключові слова:** метод, візуалізація, течія, газовий потік, трикутні виступи, градієнт тиску, завихрення, гофрована поверхня, критеріальні рівняння

### Вступ

Оскільки відомі диференціальні рівняння гідродинаміки, енергії та теплопровідності самі лише приблизно відображають відповідні моделі процесів перенесення імпульсу та енергії, доцільне більш детальне вивчення процесів при турбулізації потоку експериментально із застосуванням методу візуалізації для уточнення фізичної картини течії потоку [1-5].

### Результати роботи

Для випробувань моделей каналів використовувалася аеродинамічна труба розімкнутого виду (рис. 1) зі вставним елементом. В установці повітря прокачувалося високонапірним відцентровим вентилятором 2 через колектор мірний 1. Вхід колектора мав профіль лемніскасти. З мірного колектора повітря надходило через повітропровід з кутом розкриття дифузора 8 в камеру вирівнювання потоку з перерізом 0.08 x 0.08 м і довжиною 2.5 м, звідки надходило у вставний елемент з прозорими стінками. Потік повітря подавався за температури 20 °С. Для візуалізації потоку використовувалися димові шашки для обкурювання садів.

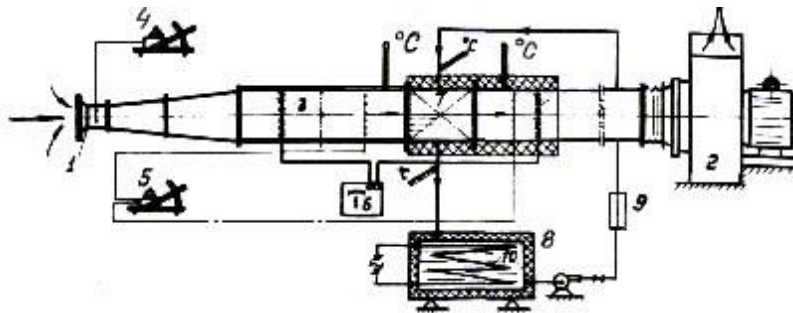


Рисунок 1 – Експериментальна установка для дослідження газового потоку методом візуалізації

Витрату повітря змінювали за допомогою заслінки 4. На відстані 250 мм до вставного елемента та після нього розташовувалися отвори для відбору статичного напору діаметром 1 мм. Нагрів досліджуваної поверхні здійснювався електричним струмом.

Аеродинамічний опір поверхонь визначався як різниця статичних тисків до і після вставної секції.

Фотографії візуалізації потоку для каналу з трикутними виступами при  $Re < 8 \cdot 10^3$  представлені на рис 2. Аналіз результатів візуалізації дозволяє скласти уявлення про фізичну модель течії, яка полягає в наступному.

При течії газового потоку в щільному каналі з трикутними виступами обтікання виступів характеризується утворенням зворотних течій і вихрових структур в зоні западин рифлень при відриві шару пристінного з вершини виступів. Як показують результати візуалізації пристінний шар, що відривається на вершині виступу, згодом знову приєднується на навітряній грані виступу, яка зумовлює стиснення потоку. Слід зазначити, що аналогічний характер течій спостерігався П. Чженом [1, 2] щодо гідродинаміки обтікання прямокутних западин.

Відрив потоку з вершин виступів відбувається на дискретних ділянках. При цьому потік, задовольняючи умові нерозривності, підтікає до тих ділянок, де відбувся відрив потоку. На умови відриву прикордонного шару впливає градієнт тиску. У деякій точці поверхні, на якій має місце відрив потоку, лінії течії відходять від поверхні в цій точці, обмежуючи відірваний слід, який знаходиться внизу по потоку, з відносно високою завихренністю і низьким тиском. Точка відриву є критичною точкою, у якій потік змінює напрямок. Таким чином, відрив потоку відбуватиметься, коли дотична напруга дорівнює нулю.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0} = 0$$

Стає очевидним, що необхідною умовою відриву потоку є нерівність:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)_{y=0} > 0$$

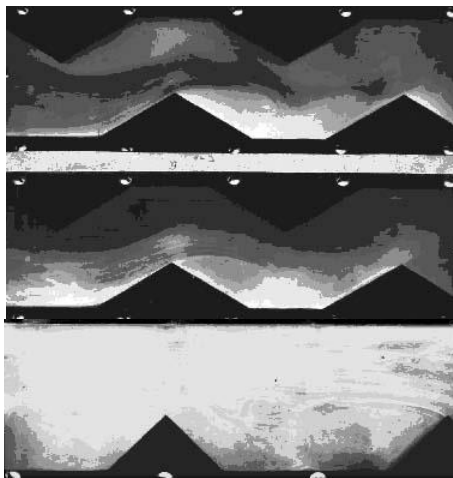


Рисунок 2 – Характер потоку при обтіканні трикутних виступів при  $Re < 8 \cdot 10^3$

Накладення відривної течії з потоком на основну течію обумовлює виникнення сил, в результаті дії яких між струменем, що відірвався, і основним потоком відбувається перемішування, яке, як видно з фотографій, має місце вже на невеликих відстанях від точки відриву. Це перемішування обмежене зоною зсуву, яка симетрична щодо розділяючої лінії течії. Поза цією зоною течія не залежить від процесів перемішування, проте всередині її воно має властивості пристінного шару.

В результаті досліджень з візуалізації фізична модель течії в щільному каналі з трикутними виступами представляється в такий спосіб. У западинах течія на підвітряній і навітряній гранях рифлень характеризується примикаючим шаром рідини, проміжним і вільним в'язким шаром. За наявності просвіту між вершинами рифлень траєкторія течії в цьому проміжку паралельна осі основного потоку. Навітряні грані рифлень зумовлюють стиснення потоку і тим самим сприяють утворенню інтенсивної вихрової течії, що взаємодіє з основним потоком.

Можна припустити, що внаслідок пульсацій у порожнину западини вздовж підвітряної грані рифлень, як показано на рис. 3, періодично втікає деяка маса рідини, яка на навітряній грані циркулює навколо вихору «стиснення», потрапляє у в'язкий шар та витікає за точкою стиснення. При цьому імпульс, відповідаючий перенесенню кількості руху в порожнину западини гофри, і відцентрова сила, яка обумовлена незбалансованою масою, що обертається навколо вихору стиснення, повинні бути рівноважені.

Теорія змішування за даними П. Чжена [1, 2] в спрощеній формі була розвинена Крокко та Лізом [2, 3], якими встановлено, що у відривній течії градієнт тиску вздовж поверхні може досягати максимального значення поблизу точки відриву і потім поступово зменшується. При приєднанні течії в сліді градієнт тиску досить малий на деякій відстані вгору за потоком від точки приєднання і швидко зростає при наближенні до цієї точки.

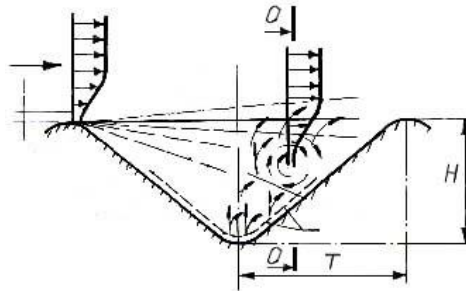


Рисунок 3 – Фізична модель течії при обтіканні трикутної западини

Для западин за наявності вихору «стиснення» з постійною завихренністю, оточеного в'язким шаром, для якого справедливі допущення теорії пристінного шару, Г. Б. Сквайром [4] розрахунковим шляхом отримано, що максимум швидкості всередині западини може досягати ~30 відсотків від швидкості зовнішнього потоку.

У зв'язку з цим при обтіканні западин рифлень стінок щілинного плоскопаралельного каналу можна припустити, що осьова швидкість у вільному шарі майже постійна на більшій частині поперечного перерізу, тоді як поперечна складова швидкості, мабуть, тангенціальна і лежить у площині перерізу вихрового ядра. Біля стінок граней рифлень така картина течії порушується, оскільки ефекти пристінного шару переважають. Умова нерозривності, очевидно, задовольняється лише течією вздовж підвітряної грані рифлень.

Проведений аналіз гідродинаміки течії в щілинних каналах з виступами дозволяє зробити такі висновки. При обтіканні виступів потоком газу (повітря) течія всередині западини може бути охарактеризовано трьома зонами. Перша зона – область течії вздовж підвітряної грані із майже постійною осьовою швидкістю; друга зона – проміжна область зі значною зворотною течією; третя зона – область інтенсивної вихрової течії або вихрового зміщення, з сумарним вектором швидкості, що стосується кожної точки закрученої лінії, інтенсивність якої значною мірою залежить від кроку і висоти рифлень стінок каналу. Аналіз гвинтового пристінного шару та вторинних течій становить значну складність. Тому можна лише припускати, що течія вздовж підвітряної грані рифлень, проходячи через переріз 0-0 (рис. 3), повертає вгору і захоплюється вихровим потоком, а потім викидається в зону в'язкого шару, проникаючи в основний потік. Такий характер течії, мабуть, обумовлений виникненням вторинної циркуляції, яка викликається геометрією виступів.

Таким чином, складна система вихорів безперервно викликає змішання течії у западинах з основним потоком, що, очевидно, призводить до збільшення гідравлічного опору, так і до інтенсифікації тепловіддачі каналів.

При візуалізації течії масова швидкість повітря, що прокачується, змінювалася в діапазоні від 2.2 до 20.2 кг/(м<sup>2</sup>·с), а відносний розмір виступів варіювався від  $t/n = 3...15$ . Для цих умов було визначено коефіцієнт гідравлічного опору  $\xi$  та критеріальне рівняння для визначення тепловіддачі залежно від числа  $Re$  та відносного розміру виступів ( $t/n$ ).

Тепловіддача поверхонь розраховувалася на основі дослідних даних щодо розподілу температури на поверхнях, які, у свою чергу, дозволили розрахувати місцеві значення коефіцієнтів тепловіддачі шляхом вирішення псевдозворотного завдання теплопровідності.

Аналіз локальних значень коефіцієнтів тепловіддачі та зіставлення результатів візуалізації потоку і розподілу температури вздовж профілю поверхні показують, що основний процес, що визначає інтенсивність теплообміну між потоком газу поверхнею – взаємодія шару зсувної течії з «зовнішнім» потоком і навітряною стороною гофри, що є більш навантаженою у сенсі теплообміну порівняно з підвітряною гранню, над якою розташовується «застійна» течія. Проте «застійна» не означає, що швидкість газу тут дорівнює нулю. Насправді у цій області спостерігається складна нестационарна течія. Характерно також те, що навітряна сторона більш чутлива до зміни швидкості потоку. По розподілу значень місцевих коефіцієнтів тепловіддачі видно, що збільшення швидкості призводить до підвищення коефіцієнта тепловіддачі на навітряній стороні на 30 % більше, ніж на підвітряної грані.

З використанням даних про місцеву тепловіддачу для турбулентного режиму руху  $Re = 10^4 - 4 \cdot 10^4$  повітря та висоти виступів  $H = 0.03$  м отримано критеріальне рівняння

$$Nu = 0.106 Re \cdot h^{0.673}.$$

Отримані дані дозволили отримати і узагальнене критеріальне рівняння каналу з трикутними виступами для режиму слабorozвиненої турбулентності потоку при  $Re = 10^3-10^4$  залежно від відносного розміру виступів ( $t/h$ ). Це рівняння, отримане з використанням розробленого критеріально-структурного методу, має вигляд

$$\overline{Nu} = 0,265 Re^{0,387} (t/h)^{-1,04}.$$

Слід зазначити, що з поверхні з трикутними виступами тепловіддача практично лінійно залежить від відносного розміру виступів ( $t/h$ ).

Цікаво також порівняти отримані дані по тепловіддачі поверхні з трикутними виступами з тепловіддачею пластини. Для ламінарного режиму руху критеріальне рівняння матиме вигляд

$$Nu_x = 0,028 Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33},$$

при турбулентному режимі аналогічне рівняння матиме вигляд

$$Nu_x = 0,036 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33},$$

а середній коефіцієнт тепловіддачі

$$\overline{Nu} = 0,036 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}.$$

З використанням даних про місцеву тепловіддачу для турбулентного режиму руху повітря та висоти виступів  $H = 0,03$  м отримано критеріальне рівняння

$$Nu = 0,106 Re \cdot h^{0,673}.$$

Отримані дані дозволили навести і узагальнене критеріальне рівняння каналу з трикутними виступами для режиму слабorozвиненої турбулентності потоку при  $Re = 10^3-10^4$  залежно від відносного розміру виступів ( $t/h$ ). Це рівняння, отримане з використанням розробленого критеріально-структурного методу, має вигляд

$$\overline{Nu} = 0,265 Re^{0,387} (t/h)^{-1,04}.$$

### Висновки

Порівняння наведених виразів дозволяє зробити висновок, що тепловіддача гофрованої поверхні при ламінарному і слабorozвиненому турбулентному режимах руху майже не відрізняється від тепловіддачі гладенької пластини. Очевидно це пов'язано з тим, що, як видно з наведених результатів, тепловіддача вздовж поверхні виступу суттєво різна. І, таким чином, високі значення  $\alpha$  на навітряній стороні трикутного виступу нівелюються значно нижчими значеннями на підвітряній стороні виступу. Тому можна зробити висновок, по-перше, при ламінарному та слабorozвиненому турбулентному режимах руху слід використовувати поверхні з відносно великими значеннями відносного розміру виступів  $t/h$  3...4; по-друге, при зазначених режимах руху інтенсивність тепловіддачі поверхні у вигляді щілинного каналу з трикутними виступами можна порівняти з тепловіддачею гладенької поверхні, однак, по компактності гофрована поверхня перевищує гладеньку.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чжен П. Отрывные течения потока. В 3-х томах. Том 1. – М.: Мир, 1972. – 300 с.
2. Чжен П. Управление отрывом потока. – М.: Мир, 1979. – 552 с.
3. Келекеев Р.В., Карпеченко А.Г. Математическое моделирование начальной зоны воздействия струи на преграду // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 7. – С. 81-81.
4. Сквайр Г.Б. Современное состояние гидроаэродинамики вязкой жидкости: Пер. с англ.; Под ред. С. Гольдштейна. М.: Иностран. лит., 1978. – 420 с.
5. Анипко О.Б., Миневич А.Б., Масыгин В.И., Горелов С.И. Основы газодинамических процессов в авиационных газотурбинных двигателях. Харьков: ХИВВС им. И. Кожедуба, 2003. – 148 с.

## REFERENCES

1. Chzhen P. Otryvnye techenyya potoka. V 3-kh tomakh. Tom 1. – М.: Myr, 1972. – 300 s.
2. Chzhen P. Upravlinnya vidryvom potoku. – М.: Myr, 1979. – 552 s.
3. Kelekeev R.V., Karpechenko A.H. Matematycheskoe modelyrovanye nachal'noy zony vozdeystviya struy na prehradu // Uspekhy sovremennoho estestvoznaniya. – 2004. – № 7. – S. 81-81.
4. Skvayr H.B. Sovremennoe sostoyanye hydroaэrodynamyky vyzkoy zhydkosti: Per. z anhl.; Pid red. S. Hol'dshteyna. М.: Ynostr. lyt., 1978. – 420 s.
5. Аныпко О.В., Минеvych А.В., Масыаhиn V.I., Horyelov S.I. Osnovy hazodynamichnykh protsesiv v aviatsiynykh hazoturbynykh dvyhunakh. Kharkiv: KHIVVS im. Y. Kozheduba, 2003. – 148 s.

**Аніпко Олег Борисович**, д. т. н., професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Email: [anipko\\_ob2022@gmail.com](mailto:anipko_ob2022@gmail.com)

**Коц Іван Васильович**, к.т.н., професор кафедри інженерних систем у будівництві, завідувач і науковий керівник науково-дослідної лабораторії гідродинаміки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Email: [ivvkots@ukr.net](mailto:ivvkots@ukr.net).

**A. Anipko**<sup>1</sup>  
**I. Kots**<sup>2</sup>

## RESEARCH OF GAS FLOW BY VISUALIZATION METHOD

Kharkiv National University of the Air Force named after Ivan Kozhedub<sup>1</sup>  
Vinnytsia National Technical University<sup>2</sup>

*The article describes the test conducted to study the patterns of gas flow for a channel with triangular protrusions using the visualization method to clarify the physical flow pattern. The proposed method makes it possible to obtain fixed patterns of the flow in different regimes and flow parameters. The obtained flow patterns are justified by theoretical dependencies.*

**Key words:** method, visualization, flow, gas flow, triangular protrusions, pressure gradient, vorticity, corrugated surface, criterion equations

**Anipko Oleg**, Dr. Sci. (Techn.), professor, Kharkiv National University of the Air Force named after Ivan Kozheduba, Kharkiv. Email: [anipko\\_ob2022@gmail.com](mailto:anipko_ob2022@gmail.com)

**Kots Ivan**, Ph.D., professor of the department of engineering systems in construction, head and scientific leader of the hydrodynamics research laboratory, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, E-mail: [ivvkots@ukr.net](mailto:ivvkots@ukr.net)