

УДК 629.7.002: 621.375.826

С. Є. АГЕЄВ

Національний авіаційний університет, м. Київ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ВОДЯНОЇ ПЛІВКИ В ПОВІТРЯНОМУ ПОТОЦІ

Наведено результати експериментального дослідження спільного руху водяної плівки у спутному повітряному потоці. Фізичне моделювання руху рідини в градієнтному потоці повітря дозволило встановити значні зміни середньої товщини плівки та хвильових збурень її поверхні під дією позитивного градієнта тиску. Представлено дані досліджень впливу турбулентності зовнішнього потоку на характер переміщення рідини. Отримані результати дають підставу припускати можливість управління процесами протікання в розшированих потоках з метою забезпечення оптимальних режимів роботи різних промислових пристроїв.

Ключові слова: експериментальне дослідження, рух рідини у потоці повітря, градієнт тиску, турбулентність.

Розширені газорідні потоки завдяки широкій реалізації в різноманітних галузях техніки на протязі багатьох років являються предметом всебічного вивчення. Однак, не дивлячись на те, що спільному переміщенню рідини та газу присвячено значну кількість наукових праць [1- 6], відомі на сьогоднішній день дані про взаємодію рідкої плівки зі спутним газовим потоком в реальних газодинамічних системах досить обмежені.

Загалом це передумовлено тим, що в більшості випадків, дослідники розглядали дану задачу в ідеалізованій постановці, коли процеси організації плівкової течії вивчались без урахування дії факторів, які за характером свого впливу на тонкий прошарок рідини можна віднести до зовнішніх. Узагальнення результатів цих досліджень [6] дозволило обґрунтовано визначити двопараметричну залежність характеристик гетерогенного потоку від витрати рідини в плівці й числа Рейнольдса повітряної фази

$$Re_{x_2} = u_{2n} x / \nu_2,$$

вираженого через повздовжню координату x , де u_{2n} – швидкість повітря на зовнішній межі граничного прошарку, ν_2 – кінематична густина повітря. Між тим, наявність при експлуатації різноманітного промислового обладнання, вібрацій поверхні течії рідини, зміни її змочуваності, варіацій турбулентних характеристик та повздовжньої швидкості спутної фази, може суттєво впливати на кінцеві параметри робочих систем [7].

Експерименти проводились на стенді, що включає в себе прямооточну аеродинамічну трубу та пристрої подачі та відводу рідини. В робочій ділянці труби реалізовувались швидкості повітряного пото-

ку до 35 м/с, а витрата рідини виражена в безрозмірній формі через плівкове число Рейнольдса

$$Re_1 = G_1 / \mu_1$$

(G_1 - приведена до ширини плівки масова витрата рідини, μ_1 - коефіцієнт динамічної густини рідини, змінювався від 0 до 860).

Нижня панель робочої частини являлась поверхнею протікання рідини, на якій було розміщено датчики товщини плівки. Для реєстрації параметрів рідинного шару використовувалась вимірювальна система, основана на методі локальної електропровідності з використанням щілинних резистивних первинних перетворювачів.

Для моделювання протікання рідини при різних градієнтах тиску повітря, верхня панель робочої ділянки експериментальної установки виготовлена з гнучкого матеріалу, що дозволяло шляхом регулювання довжини розпірних тяг створювати необхідні форми каналу проточної системи аеродинамічної труби.

З використанням вказаних конструктивних можливостей стенда було проведено серію експериментів, результати яких представлені на рис. 1. Вимірювання середньої товщини рідкої плівки $\bar{\delta}_1$ проводились при однакових умовах протікання (швидкість незбуреного потоку $u_{2\infty} = 20$ м/с, а витрата рідини $Re_1 = 192$), але різних значеннях градієнта тиску повітря (лінії 1 – 5 відповідають $dp_2 / dx = 17,7; 11,5; 0; -14,2; -34,4$ кг/м³). На рис. 2 показано порівняння хвильових профілів поверхні плівки (зміну локальної товщини рідкого шару δ_1 вздовж по

течії x) при $u_{2\infty} = 20$ м/с, $Re_1 = 192$, отриманих в градієнтному $dp_2/dx = 11,5$ кг/м³ (тонка лінія) та безградієнтному $dp_2/dx = 0$ (товста лінія) потоках повітря.

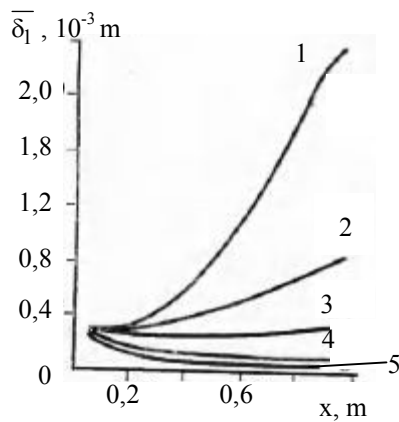


Рис. 1. Зміна середньої товщини водяної плівки в залежності від умов течії

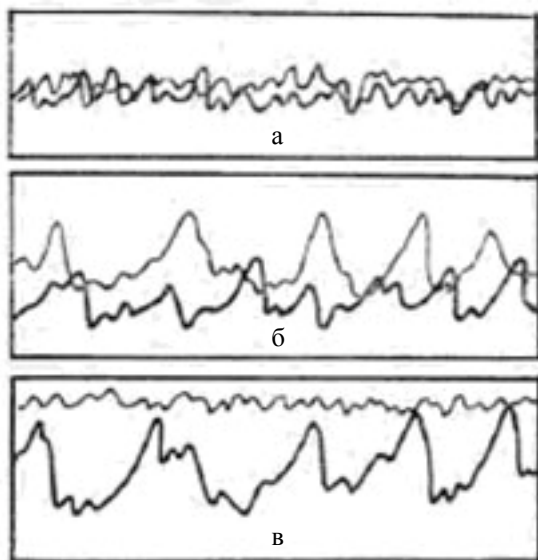


Рис. 2. Зміна хвилових профілів поверхні водяної плівки вздовж течії:
а – $x = 0,1$ м; б – $x = 0,5$ м; в – $x = 0,95$ м

Аналіз експериментальних даних дає можливість робити висновки про значний вплив постійно діючого позитивного градієнта тиску легкої фази на характер протікання рідини. Виходячи з фізичної моделі густинної взаємодії двох потоків з різними властивостями при дифузійному протіканні, наявність позитивної похідної dp_2/dx викликає додатковий до ефекту тертя об шорстку стінку (хвилова шорсткість у даному випадку може в декілька десятків разів перевищувати допустиму шорсткість) гальмуючий ефект перепаду тиску, що сприяє зни-

женню динамічного навантаження повітря на поверхню рідини. До відомих положень про дію позитивного градієнта тиску на протікання в пристінних прошарках слід додати, що наявність хвилового руху на поверхні плівки та транспортування повітрям крапель рідини, які зірвалися з гребенів хвиль, призводять до більш інтенсивної дисипації енергії двофазного потоку. Вимірювання розподілу швидкостей повітря по нормалі до стінки (рис. 3) при $dp_2/dx = 11,5$ кг/м³, $u_{2\infty} = 20$ м/с та $x = 0,5$ м ($Re_1 = 0; 192$ – лінії 1,2) показало, що двофазність течії сприяє зменшенню наповнення профілю швидкості. Значення форм параметра $N_2 = \delta_2^*/\delta_2^{**}$, що відповідає в однофазному турбулентному прошарку $N_2 = 1,48$, в гетерогенному потоці збільшується до $N_2 = 1,83$. Аналогічно до висновків про більш ранній перехід за умови спільного руху двох фаз ламінарного протікання в турбулентне [6] отримані результати дозволяють говорити про посилення дії градієнта тиску повітря при наявності тонкого шару рідини на поверхні, яка обтікається, що може сприяти передчасному відриву потоку.

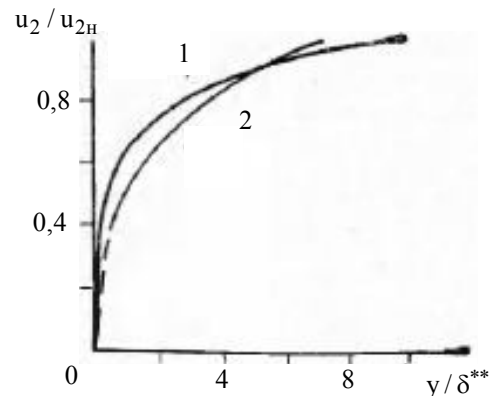


Рис. 3. Вплив двофазності течії на профіль швидкості в граничному прошарку

При від'ємному градієнті тиску газового середовища в досліджуваних умовах отриманий в першому випадку помітно виражений ефект впливу змін швидкості повітря на протікання рідини відсутній. Причиною цього, ймовірно, є вища у порівнянні з газом густина рідини, яка перешкоджає зростанню швидкості її руху в тонкому прошарку, а також менш інтенсивні зміни вздовж по потоку величини дотикової напруги, що в кінцевому підсумку призводить до зниження чуттєвості параметрів рідкої плівки до повздовжніх прискорень повітряних мас.

Більш глибокий аналіз впливу градієнта тиску повітря на рух рідини проведено на основі результа-

тів експериментів, в яких моделювання плівкового протікання рідини здійснювалось при різноманітних початкових умовах. Оцінка впливу вказаних факторів на середню товщину рідкого прошарку $\bar{\delta}_1$ проводилась за допомогою інтегрального параметру

$$m_1 = \rho_1 \int_0^L \bar{\delta}_1 dx,$$

де ρ_1 - густина рідини, L - довжина поверхні протікання рідини. Значення m_1 характеризує приведену до ширини каналу масу рідини, яка знаходиться на поверхні, що обтікається. Зміна m_1 в залежності від dp_2/dx при $Re_1 = 200$ (рис. 4, лінії 1 – 5 відповідають $dp_2/dx = 17,7; 6,8; 0; -7,9; -31,6$ кг/м³), а при $u_{2\infty} = 25,5$ м/с, (рис. 5 лінія 1 – 3 для $dp_2/dx = 25,5; 0; -31,6$ кг/м³) показує, що вплив градієнта тиску на протікання рідини визначається його величиною та знаком. Він більш суттєвий при малих швидкостях незбуреного потоку та великих витратах рідини в плівці. Із зменшенням градієнта тиску аж до від'ємних значень, вплив цих факторів слабшає.

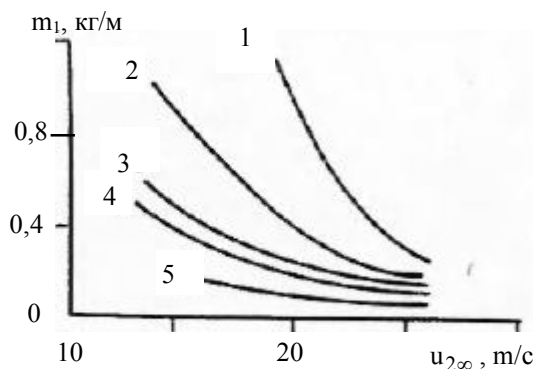


Рис. 4. Залежність приведенної маси рідини від швидкості спутного потоку

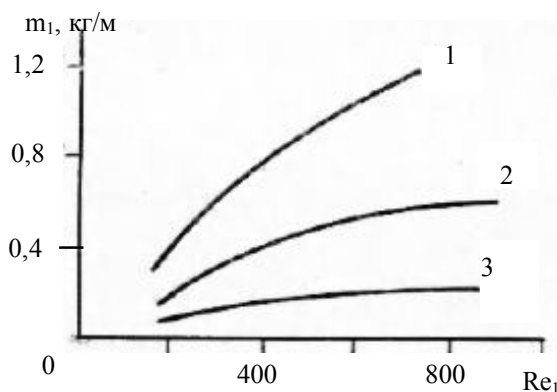


Рис. 5. Залежність приведенної маси рідини від числа Рейнольдса

В технічних установках, в каналах, в яких формуються розгалужені двофазні потоки, для розгону повітря, як правило, використовуються різноманітні енергетичні пристрої (наприклад, лопаточні машини), які сприяють значній його турбулізації. В зв'язку з цим, безперечний інтерес представляє дослідження впливу турбулентності зовнішнього потоку $Tu_{2\infty}$ на параметри рідкої плівки. З цією метою, за допомогою монопланових решіток, що є пасивними генераторами турбулентності, на робочій ділянці аеродинамічної труби встановлювались різні ступені турбулентних збурень повітряних мас, величини яких визначались термоанемометричною системою.

За критерій оцінки впливу зовнішньої турбулентності легкої фази на локальні параметри плівки, обрано початок утворення на поверхні рідини хвиль збурення, які добре спостерігаються в експерименті і відрізняються в широкому спектрі хвилювань великою амплітудою та широким фронтом хвилі. На рис. 6 представлено експериментальні результати (лінії 1 – 8 відповідають $u_{2\infty} = 15; 16; 17; 18; 20; 22; 25; 28$ м/с), які показують, що витрата рідини Re_1 , при якій починають зароджуватись хвилі збурення, залежить від швидкості та ступеню турбулентності спутного газового потоку. Значний вплив на структуру хвильової поверхні плівки турбулентність створює при невеликій швидкості потоку повітря, при поступовому збільшенні якої даний ефект вироджується. Причину виявленого впливу, вірогідно, слід шукати в характері змін збурень в граничному прошарку, які залежать від ступеню турбулентності та швидкості зовнішнього потоку. Положення праць [8, 9] вказують на те, що у відповідності із закономірностями перерозподілу, компонент пульсаційних складових швидкості, кінематична енергія турбулентності в прошарку, зростають до стінки тим більш інтенсивно, чим нижче ступінь зовнішніх збурень. В той же час збільшення швидкості повітряного потоку сприяє зниженню пристінної турбулентності. Внаслідок цього, навіть при низькій турбулентності зовнішнього потоку, в самому граничному прошарку повітряної фази генеруються потужні збурення, що посилюються з наближенням до поверхні плівки та сприяють утворенню хвиль. В міру руху рідини в повздовжньому напрямку в зв'язку з наявністю поверхневого натягу, відбувається накачка енергії хвильового руху (перехід брижі в крупні та шквальні хвилі [6]).

Характер впливу турбулентності зовнішнього потоку на хвильову межу рідини та газу, що визначається з рис. 6, вірогідно, можна пояснити розглядаючи процес розвитку хвильового руху на поверхні плівки як результат передачі рідини енергії повітряного потоку, що являє собою сукупність енергії,

обумовленої поступальним рухом фаз та енергії збурення, яка породжується пульсаціями повітряних мас поблизу поверхні плівки. Рис. 7 демонструє осцилограми хвильових профілів тонкого шару рідини при швидкості потоку $u_{2\infty} = 17 \text{ м/с}$, витраті води в плівці $Re_1 = 170$, але різних рівнях турбулентності (жирна лінія - $Tu_{2\infty} = 0,95\%$, тонка - $5,6\%$). Із збільшенням ступеню турбулентності в діапазоні швидкостей повітряних мас, при яких вплив зовнішніх збурень особливо відчутно, відбувається деяке підвищення середньої товщини плівки (рис. 8), викликане зниженням амплітуди хвиль та зменшенням кількості рідини, яка ними переноситься ($Re_1 = 192$, $u_{2\infty} = 15 \text{ м/с}$, $Tu_{2\infty} = 6,25$ та $0,99\%$ - точки 1 та 2).

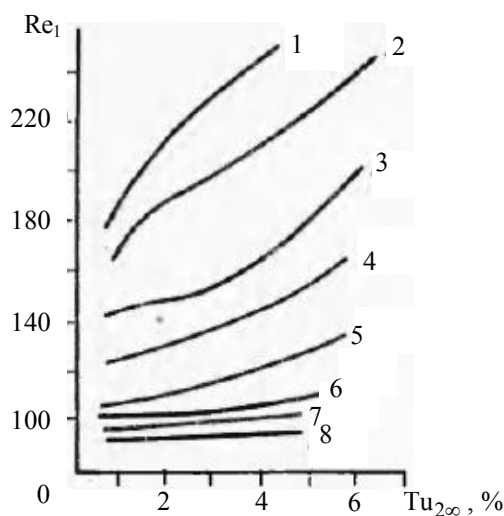


Рис. 6. Вплив турбулентності спутного потоку повітря на хвильову межу рідини та газу

На останок зробимо наступні висновки. Фізичне моделювання руху рідини в градієнтному потоці повітря дозволило встановити значні зміни середньої товщини плівки та хвильових збурень її поверхні під дією позитивного градієнта тиску. В цьому випадку із збільшенням позаддовжньої координати протікання товщина рідинного прошарку зростає, а нерівномірність межі розділу фаз зменшується. Дослідження впливу турбулентності зовнішнього потоку на характер переміщення рідини показує, що елементи хвиль, які зароджуються, та середня товщина плівки залежать від ступеню турбулентних збурень повітряних мас. При малих та помірних значеннях підвищення ступеню турбулентності призводить до зниження хвилеутворень поверхні розділу рідини та газу й збільшенню середньої товщини рідинного прошарку.

Отримані результати дають підставу припускати можливість управління процесами протікання в

розширених потоках з метою забезпечення оптимальних режимів роботи різних промислових пристроїв.

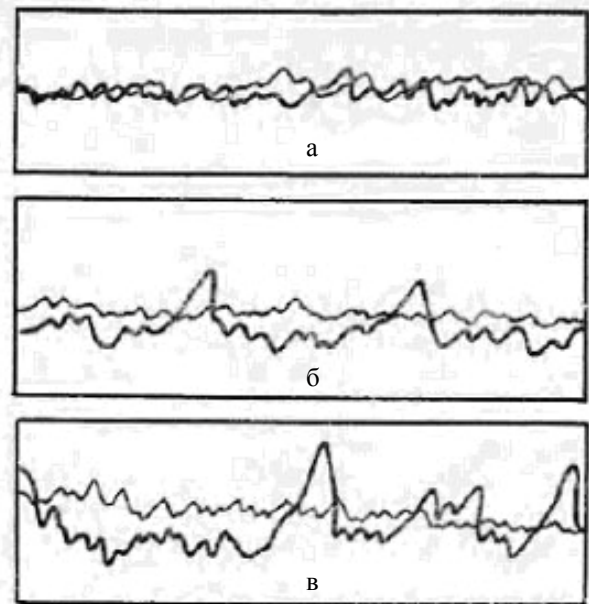


Рис. 7. Залежність хвильових профілів поверхні водяної плівки від параметрів повітряного потоку: а - $x = 0,1 \text{ м}$; б - $x = 0,5 \text{ м}$; в - $x = 0,95 \text{ м}$

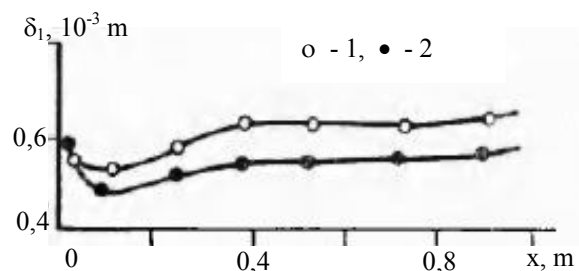


Рис. 8. Зміна середньої товщини водяної плівки від параметрів повітряного потоку

Література

1. Капица, П. Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости [Текст] / П. Л. Капица, С. П. Капица // ЖЭТДФ. - 1949. - Т. 19, вып. 2. - С. 106-120.
2. Бойко, В. Д. Исследование нелинейных волнообразований на поверхности тонкого слоя вязкой жидкости, текущей по наклонной поверхности [Текст] / В. Д. Бойко, В. Х. Кириллов // Вісник Одеського національного морського університету. - 2011. - № 33. - С. 27-38.
3. Зозуля, Ю. М. Толщина пленки и расход жидкости, текущей по горизонтальной поверхности под воздействием газового потока [Текст] / Ю. М. Зозуля // Тр. ДВПИ. - 1968. - Вып. 67. - С. 40-49.

4. Бояджи́ев, Х. Массоперенос в движущихся пленках жидкости [Текст] / Х. Бояджи́ев, В. Бешков. – М. : Мир, 1988. – 138 с.

5. Дейч, М. Е. Результаты статического анализа волновой структуры поверхности раздела фаз в двухфазном пограничье [Текст] / М. Е. Дейч, И. П. Тетера // ТВТ. – 1980. – № 4. – С. 101-112.

6. Дейч, М. Е. Газодинамика двухфазных сред [Текст] / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 472 с.

7. Саха, С. Исследование вибрационного воздействия течения жидких пленок [Текст] / С. Саха, Г. В. Томаров // Тез. докл. III Всесоюз. конф. моло-

дых специалистов «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики», 28 – 30 марта 1989 г. – Новосибирск, 1989. – С. 15.

8. Дыбан, Е. П. Теплообмен и гидродинамика турбулентных потоков [Текст] / Е. П. Дыбан, Э. Я. Этик. – Киев : Наук. думка, 1985. – 296 с.

9. Экспериментальное исследование влияния температурного фактора и турбулентности набегающего потока на переход в пограничном слое [Текст] / В. М. Капинос, В. Я. Левченко, А. Ф. Слитенко [и др.] // ИФЖ. – 1977. – Т. 32, № 3. – С. 293-398.

Поступила в редакцию 02.04.2014, рассмотрена на редколлегии 20.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры вищої та обчислювальної математики Є. О. Шквар, Національний авіаційний університет, м. Київ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОДНОЙ ПЛЕНКИ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

С. Е. Агеев

Приведены результаты экспериментального исследования совместного движения водяной пленки в спутном воздушном потоке. Физическое моделирование движения жидкости в градиентном потоке воздуха позволило установить значительные изменения средней толщины пленки и волновых возмущений ее поверхности от воздействия положительного градиента давления. Показаны данные исследования влияния турбулентности внешнего потока на характер перемещения жидкости. Полученные результаты дают основание допускать возможность управления процессами течения в расслоенных потоках с целью обеспечения оптимальных режимов работы различных промышленных устройств.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, движение жидкости в потоке воздуха, градиент давления, турбулентность.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE WATER FILM MOTION IN AIR FLOW

S. Ye. Agehev

Shows the results of experimental research of the water film common motion in following air flow. Physical modeling of fluid motion in a gradient flow of air allowed to establish significant changes in the average film thickness and the surface wave disturbances from the effects of a positive pressure gradient. Shows the influence of research data stream turbulence on the nature of fluid displacement. The obtained results show the possibility to allow process control flow in stratified flows to ensure optimum operating conditions for various industrial applications.

Key words: experimental research, motion of fluid in a stream of air, pressure gradient, turbulence.

Агеев Сергей Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры аэродинамики и безопасности полетов летательных аппаратов, Национальный авиационный университет, г. Киев, e-mail: unserv@ukr.net.