

УДК 629.7.036.3:533.6

В.В. Панін, канд. техн. наук, доц.,

Л.Г. Волянська,

В.М. Дихановський, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

## РОБОЧА ЛОПАТКА ДЛЯ ПЕРШИХ СТУПЕНІВ КОМПРЕСОРІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*Наведено опис конструктивних особливостей робочої лопатки з напливом у кореневій частині й результати порівняльного чисельного моделювання тривимірного обтікання звичайної та запропонованої робочих лопаток, призначених для трансзвукового ступеня компресора.*

Забезпечення стійкої роботи авіаційного газотурбінного двигуна (ГТД) в широкому діапазоні режимів його роботи й умов на вході в двигун є однією з найважливіших складових, що визначають рівень безпеки польотів. Вирішення цієї задачі потребує як удосконалення систем автоматичного керування двигунами, засобів механізації компресора та індикації помпажу, так і безпосереднього конструктивного удосконалення компресорних лопаткових вінців.

Так, зокрема, для розширення діапазону стійкої роботи ступеня компресора (вентилятора) пропонувалося використовувати робочі лопатки з передкрилками [1] і вентиляторні лопатки для турбореактивного двоконтурного двигуна (ТРДД) з високим ступенем двоконтурності, які мають роздвоєний профільний переріз у кореневій частині [2]. Розширення діапазону беззривних режимів також може забезпечуватися використанням поворотних робочих лопаток першого ступеня вентилятора [3]. Але ТРДД з поворотними робочими лопатками вентилятора конструктивно складний через необхідність застосування механізму повороту лопаток і редуктора між турбіною вентилятора та вентилятором, колова швидкість якого обмежена за умовами міцності.

Недоліками лопаток з передкрилками є недостатня міцність та жорсткість конструкції, яка проявляється при попаданні сторонніх предметів у двигун, і зменшення ККД ступеня в периферійній частині, де відносні швидкості надзвукові, а наявність геометрично незмінної системи з двох передніх кромки (лопатки та передкрилки) не дозволяє створити стійку систему косих стрибків ущільнення.

При визначенні діапазону значень кута стрілоподібності виходять з того, що нижня межа кутів стрілоподібності передньої кромки напливу, яка характеризується переходом від сильної турбулентної течії при відриві з нестрілоподібної передньої кромки до стійких вихрових утворень у випадку передньої кромки великої стрілоподібності, змінюється в широких межах у залежності від величини позитивного градієнта тиску й індивідуальних особливостей вентилятора конкретного типу ТРДД. Точне математичне описання процесу руйнування вихорю, що стікає зі стрілоподібної передньої кромки, до теперішнього часу відсутнє. Проте результати експериментів, які наведені в роботі [4], дозволяють зробити висновки, що діапазон кутів стрілоподібності складає  $70-85^\circ$ . У цьому діапазоні досягається найменше співвідношення між обертальною складовою швидкості повітря у вихорі й осью, що забезпечує максимально пізніше руйнування вихору.

Використання напливу дозволяє також підвищити колово швидкість ротора вентилятора, а отже і ступень підвищення тиску ступеня. Збільшення колової швидкості, яке обмежується умовами міцності, можливе через збільшення площі кореневого перерізу лопатки. Крім того, якщо вихор, що стікає з напливу, буде виведений на ту частину лопатки, де є обтікання з трансзвуковими швидкостями, то буде відбуватися здув місцевих прямих стрибків ущільнення. Це дозволить збільшити ККД ступеня та її напірність.

Передня кромка напливу може бути як прямою, так і криволінійною. Форма її вибирається з умови забезпечення ефективного вихроутворення.

Застосування лопатки з напливом у кореневій частині [5] дозволяє уникнути недоліків, що притаманні лопаткам з передкрилками, при вирішенні задачі розширення діапазону стійкої роботи. Тобто міцність лопатки може бути навіть збільшеною через збільшення площі її кореневого перерізу (рис. 1).

Дія напливу полягає в наступному. При обертанні робочого колеса виникає різниця тисків повітря на увігнутій та опуклій частині не тільки пера лопатки, а і напливу. Унаслідок цього перепаду тисків на напливі починається перетікання повітря із зони підвищеного тиску (на «коритці») до зони зниженого тиску (на «спині»). Таке перетікання повітря утворює вихор. Швидкість руху повітря у вихорі збільшується, а його тиск відповідно зменшується. Через наявність вихору до зони зниженого тиску на «спині» лопатки надходить додаткова частина повітря, що збільшує місцеву осьову швидкість руху потоку на «спині» пера лопатки, віддаляючи початок відриву потоку зі «спини».

Запобігання негативного впливу вихору, що створюється внаслідок наявності напливу, на роботу і вібраційний стан лопаток внутрішнього контуру, які встановлюються за вентилятором, забезпечується завдяки тому, що радіальний розмір напливу  $r_n$  (рис. 2) перевищує радіус роздільника потоків  $r_p$ . Унаслідок цього вихор, що відривається від лопатки вентилятора ТРДД з напливом, буде відводитися у зовнішній контур ТРДД, не викликаючи вібрації деталей компресора високого тиску.

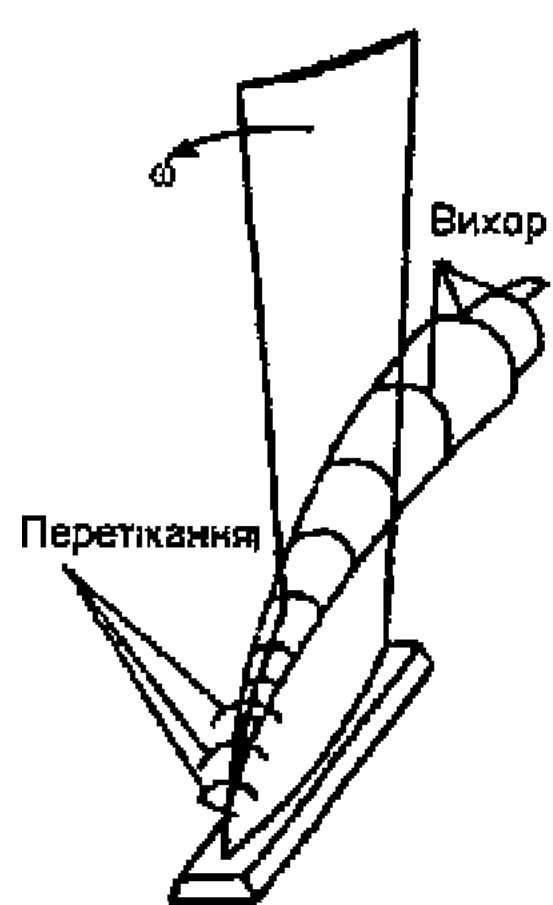


Рис. 1. Схема формування вихору

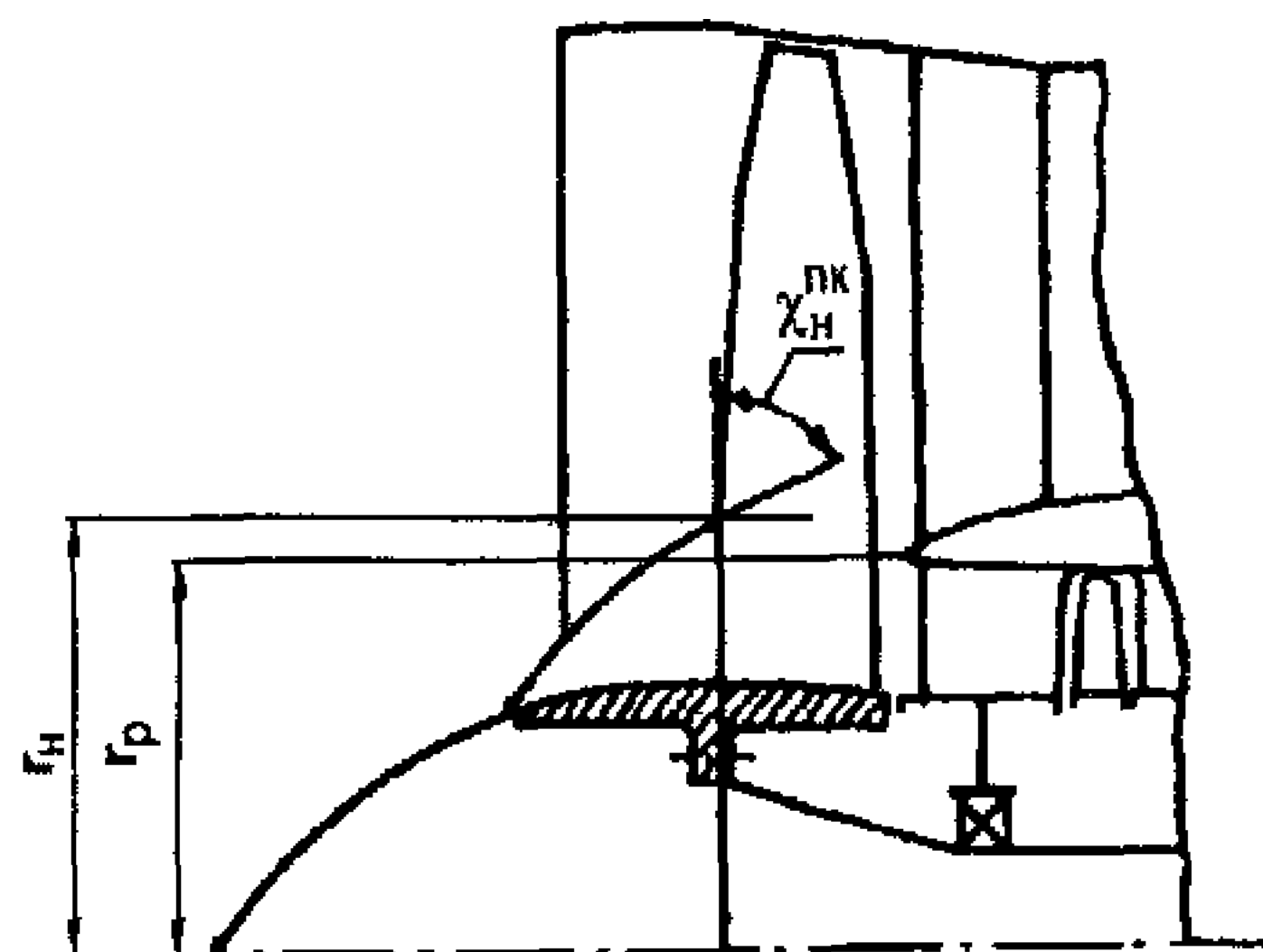


Рис. 2. Схема проточної частини ТРДД

Для кількісної оцінки впливу виконання передньої кромки робочої лопатки в кореневій частині на характер обтікання лопаткового вінця застосовувався скінченнорізницький аналог системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, що одержана заміною всіх часткових похідних скінченними різницями і в якій кожне диференціальне рівняння записується як лінійне алгебричне рівняння. Область дослідження дискретизувалася, будувалася розрахункова сітка, і розв'язок системи диференціальних рівнянь зводився до розв'язку системи алгебричних рівнянь у кожному вузлі сітки. Параметри течії в різних зонах розрахункової області й різних напрямках змінюються з різною інтенсивністю, тому для раціонального використання ресурсів обчислювальної техніки в деяких підобластях сітка робилася густішою, тому сітка адаптувалася відповідно до течії. Одержана у такий спосіб сітка має забезпечити поліпшення ефективності й точності чисельного розрахунку.

Результати розрахункового дослідження течії в робочому колесі з лопатками без напливу і з напливом при однакових умовах на вході в канал наведені на рис. 3, 4, 5.

На рис. 3 розглядається векторне поле швидкостей у площині обертання на відстані 0,57 хорди лопатки і великий план течії. З повних векторів швидкості вираховується середня потокова складова. На лопатці без напливу в кореневій частині течія безвихрова, на лопатці з напливом у кореневій частині на «спині» видно вихор. Саме цей вихор віддаляє початок відриву потоку зі «спини» лопатки.

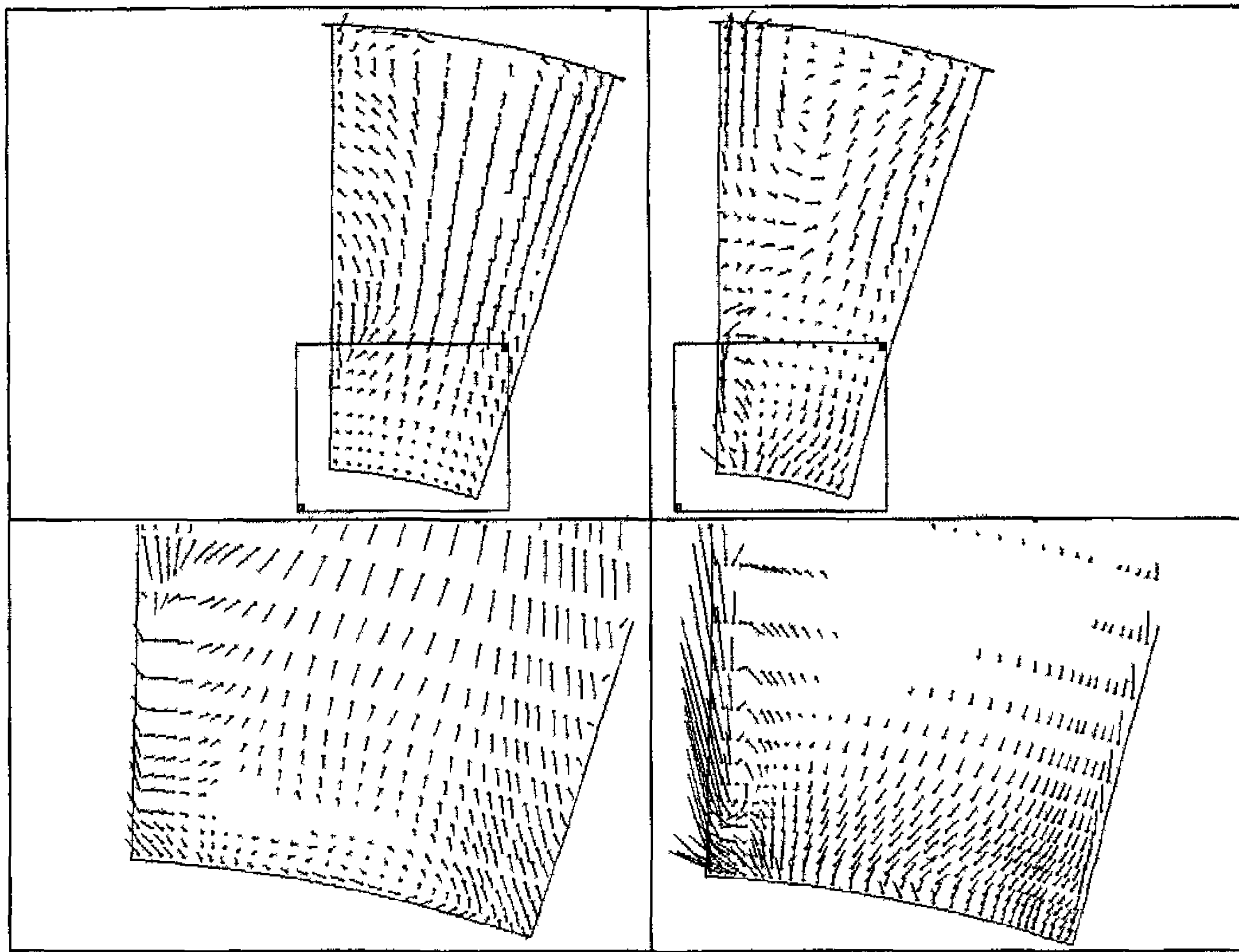


Рис. 3. Векторне поле швидкостей у площині обертання на відстані 0,57 хорди лопатки

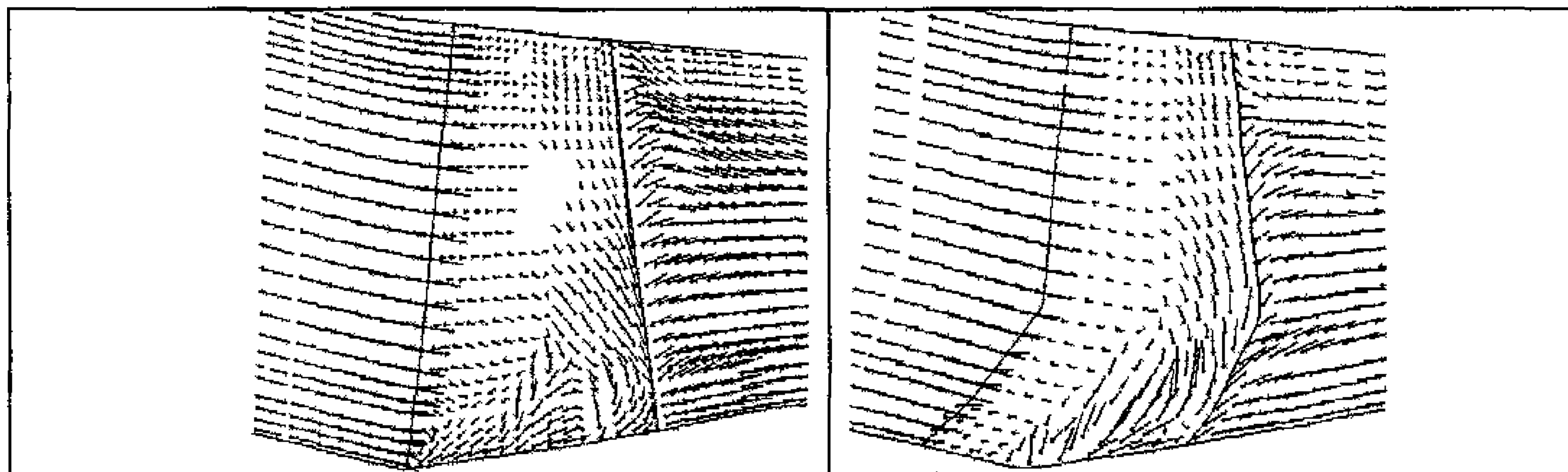


Рис. 4. Векторне поле швидкостей на дні примежового шару «спини» лопатки

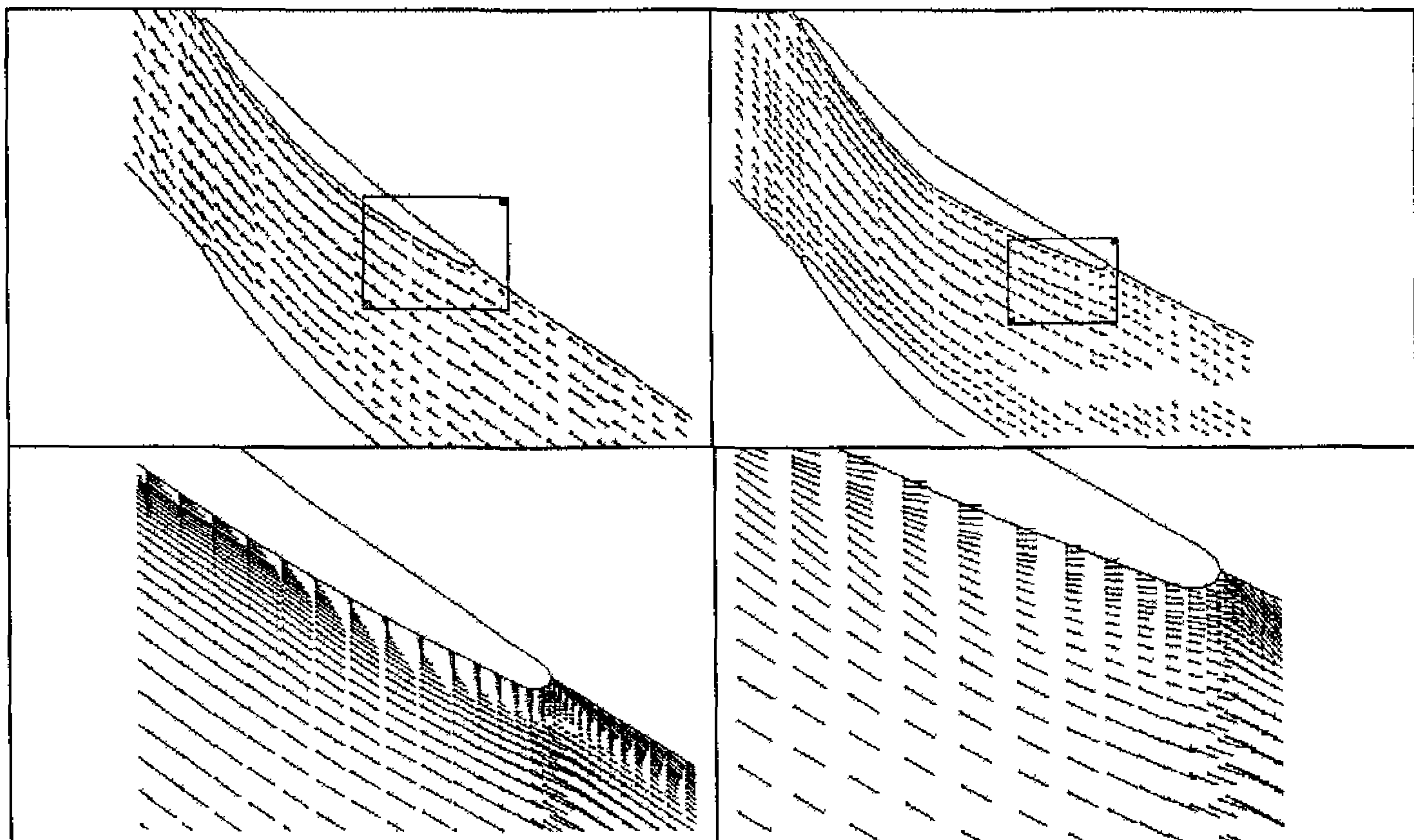


Рис. 5. Векторне поле швидкостей у площині решітки на висоті 0,22 висоти лопатки

Про зменшення відриву свідчить векторне поле швидкостей на дні примежового шару «спини», зображене на рис. 4. У кореневій частині лопатки без напливу є зворотна течія. У кореневій частині лопатки з напливом зворотної течії немає.

Про зменшення відриву свідчить також векторне поле швидкостей у площині ґратки на висоті 0,22 висоти лопатки (рис. 5). Великим планом наведена течія на «спині» задньої кромки лопатки. На лопатці без напливу є зворотна течія. На лопатці з напливом зворотної течії немає.

Для оцінки діапазону стійкої роботи робочих колес було проведено розрахункове дослідження течії в цих робочих колесах. Через розрахунок були одержані характеристики робочих колес з лопатками без напливу і з напливом (рис. 6, 7). Робоче колесо з лопатками з напливом має значно ширший діапазон стійкої роботи, ніж робоче колесо з лопатками без напливу (див. рис. 6). При цьому робоче колесо з лопатками з напливом має втрати кінетичної енергії в розглянутому діапазоні кутів входу потоку або такі ж, як і робоче колесо з лопатками без напливу, або менші (при малих кутах входу потоку).

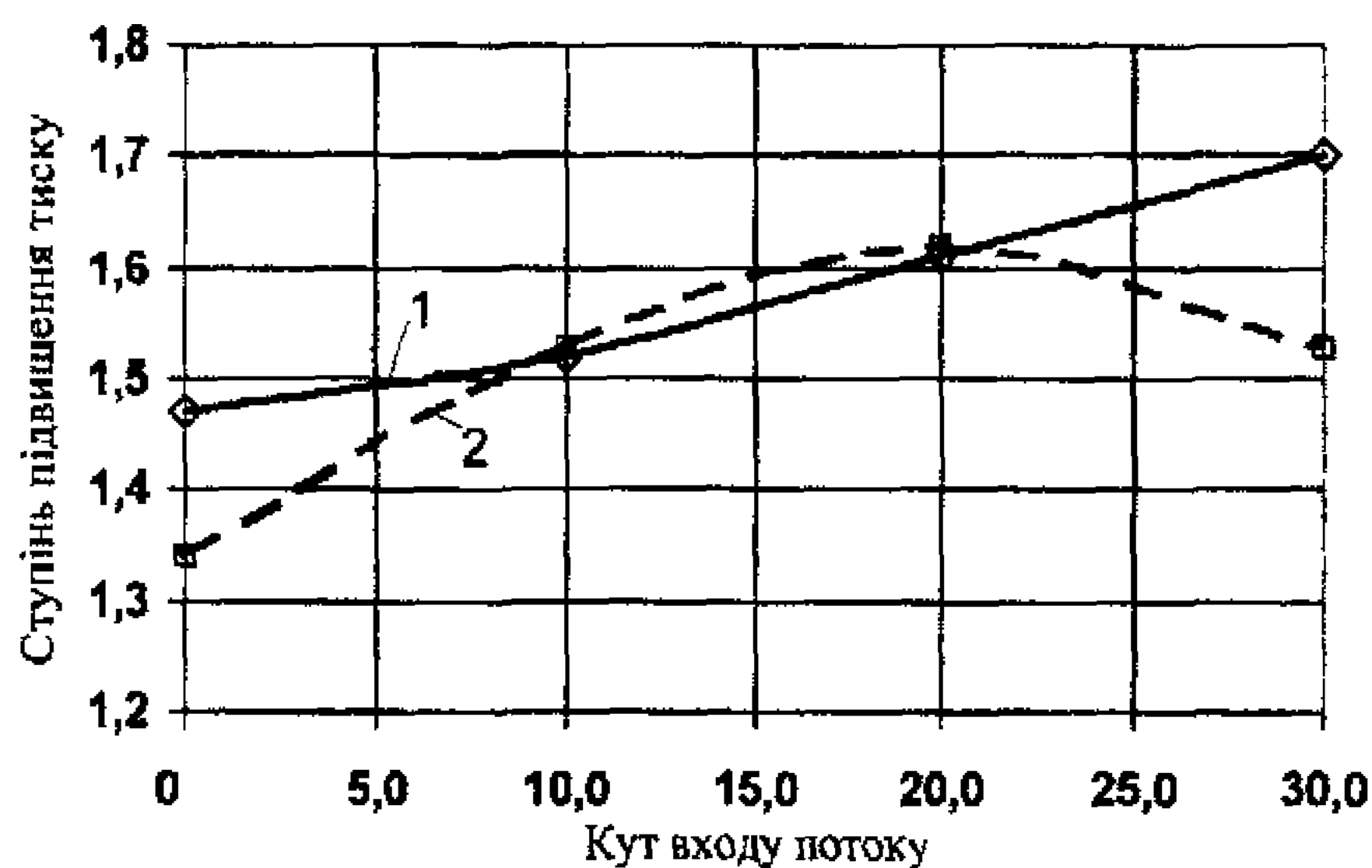


Рис. 6. Залежність ступеня підвищення тиску від кута входу потоку в робочі колеса з лопатками з напливом (1) і без напливу (2)

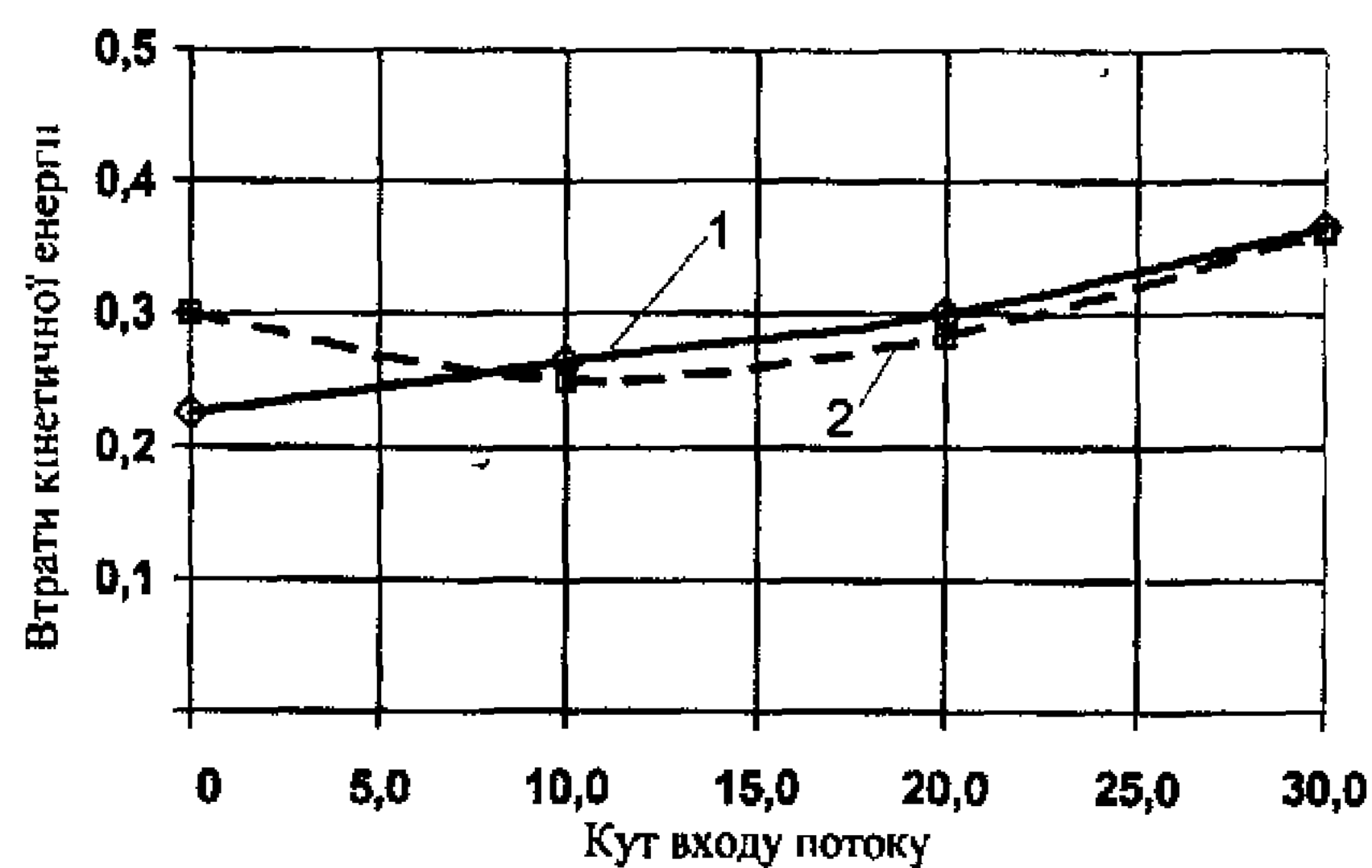


Рис. 7. Залежність втрат кінетичної енергії в робочих колесах від кута входу потоку в робочі колеса з лопатками з напливом (1) і без напливу (2)

Розрахунок також показав, що при великих кутах входу потоку в робоче колесо з лопатками без напливу різко знижується витрата повітря (від 40 до 22 кг/с), що характерно для течії з великими відривами потоку. У робочому колесі з лопатками з напливом відриви потоку значно менші, про що свідчить незначне зниження витрати повітря (від 40 до 37 кг/с) при великих кутах входу потоку.

Аналіз результатів розрахунку течії повітря показує, що робоче колесо з лопатками з напливом у порівнянні зі звичайними лопатками має зону відривної течії на «спині» значно меншу. Це дозволяє збільшити напірність у кореневій частині через збільшення закрутки. Робоче колесо з лопатками з напливом має значно ширший діапазон стійкої роботи ніж робоче колесо з лопатками без напливу при однакових рівнях втрат кінетичної енергії.

#### Список літератури

1. Iavur M.M., Murthy K.S., Kar S. The introduction of leading edge slats to improve the offdesign performers of axial flow fans// Int. Conf. Fan Des. And Appl., Guildford, Sept., 1982. Cranfield. – 1982. – P.281–295 (прототип).
2. Пат. 2106193 Великобританія, МКИ F01D5/14. Turbomachine rotor blade /Snell Leonard Stanley (Великобританія); Rolls-Royce Ltd. №8128947; Заявл. 14.09.82; Опубл. 07.04.83; НКІ FIV.
3. Пономарев Б.А. Настоящее и будущее авиационных двигателей. – М.: Воениздат, 1982. – С. 197–199.
4. Чжен П.К. Отрывные течения. Т. II. – М.: Мир, 1975. – С. 207–211.
5. Пат. 35380 А Україна, МПК<sup>6</sup> F 01D5/14. Лопатка вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна / В.В. Панін, С.О. Дмитрієв, В.В. Козлов, І.І. Гвоздецький; КМУЦА. – № 99105384; 01.10.99; Опубл. 15.03.01; Бюл. № 2.

Стаття надійшла до редакції 22.01.02.