

УДК 621:694.2

О.Г. Бутенко, канд. техн. наук, доц.,
С.Ю. Смик

Державний вищий навчальний заклад „Одеський національний політехнічний університет“, м. Одеса, Україна, e-mail: alex_butenko@ukr.net

ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЕЖЕКТОРА ЗА НЕОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

А.Н. Butenko, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
S.Yu. Smyk

State Higher Educational Institution “Odessa National Polytechnic University”, Odessa, Ukraine, e-mail: alex_butenko@ukr.net

IMPROVEMENT OF THE CENTRAL EJECTOR EFFICIENCY UNDER NONOPTIMAL OPERATING MODES

Мета. Підвищення ефективності центральних ежекторів за неоптимальних режимів роботи, зокрема – низьких коефіцієнтах ежекції.

Методика. Мета дослідження реалізовувалася шляхом математичного моделювання у програмному середовищі SOLID WORKS COSMOS FLO та шляхом експериментальних досліджень на фізичній моделі.

Результати. Отримані дані щодо кінематичної структури потоку в камері змішування центрального ежектора, які засвідчили, що при малих коефіцієнтах ежекції відбувається відрив потоку від стінок. Запропонований метод усунення відривних зон – заміна області їх існування твердими поверхнями.

Наукова новизна. Доведено, що при малих коефіцієнтах ежекції в камері змішування центрального ежектора виникають відривні зони, які характеризуються високим рівнем дисипативних процесів. На підтримання цих процесів витрачається певна частина механічної енергії потоку, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії ежектора в цілому. Визначені умови виникнення відривних зон і їх геометричні параметри. Це дало змогу замінити область їх існування твердими тілами, що вводяться до камери змішування ежектора. Математичне й фізичне моделювання засвідчили підвищення ефективності роботи ежекторів з тілами заміщення в досить широкому діапазоні режимів роботи.

Практична значимість. Центральні ежектори широко використовуються в різних галузях виробництва. Основний їх недолік – низька ефективність роботи. Особливо це актуально при роботі в області низьких коефіцієнтів ежекції. Проведені дослідження дозволили віднайти метод підвищення коефіцієнта корисної дії ежекторів, що працюють у таких умовах. Метод достатньо простий, економічний, не вимагає додаткових експлуатаційних витрат, на виробництві він може бути реалізований силами обслуговуючого персоналу.

Ключові слова: центральний ежектор, коефіцієнт ежекції, модуль ежектора, камера змішування, тіло заміщення

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Струминні насоси, як один з видів нагнітального обладнання, завдяки численним позитивним якостям, отримали широке застосування в різних галузях промислового виробництва. Основним недоліком струминних насосів є невисока ефективність роботи. Проблема ще більш ускладнюється, якщо на режим роботи насоса накладаються технологічні обмеження. Так, наприклад, у комбінованій системі очищення аспіраційного повітря центральний ежектор є важливим елементом, що виконує функцію не тільки всмоктування запиленого повітря до системи, але й змішування двох потоків [1, 2]. Технологічною умовою таких систем є

робота насоса в режимі низьких коефіцієнтів ежекції, що значно знижує й без того невисокий ККД апарату.

Виділення нерозв’язаної раніше частини загальної проблеми. Керуючись прийнятою класифікацією втрат потужності в нагнітачах, можна виділити їх три види – механічні, об’ємні та гідравлічні. Оскільки в ежекторах немає рухомих деталей, то механічні втрати в таких нагнітачах відсутні. Те ж відноситься й до об’ємних втрат, оскільки конструкція ежектора не передбачає кінцевих ущільнень і перетоків із зони нагнітання до зони всмоктування. Таким чином, єдиним видом втрат потужності в ежекторах є гідравлічні, значна частина яких припадає на камеру змішування, оскільки саме в ній відбуваються процеси змішування робочого й ежекторного потоків, обміну між ними енергією [3].

Тому оптимізація гідродинамічних процесів у проточній частині ежектора – основний шлях підвищення його ефективності.

Формулювання мети роботи. Метою роботи є підвищення ККД центральних ежекторів, що працюють з низькими коефіцієнтами ежекції.

Викладення основного матеріалу. Гідродинамічні дослідження здійснювалися у два етапи. На першому етапі вивчалася кінематична структура потоку шляхом математичного моделювання за допомогою прикладного пакету SOLID WORKS COSMOS FLO [4], в якому реалізується $k - \epsilon$ модель турбулентності. На другому – результати математичного моделювання перевірялися експериментальним шляхом.

Математичному моделюванню течії у КС передував аналіз поставленої задачі за допомогою π -теореми. До числа незалежних розмірних величин були віднесені: 1) геометричні параметри – діаметри сопла d_c і камери змішування d_k , довжина камери змішування l_k , відступ вихідного перерізу сопла від вхідного перерізу камери змішування Δ ; 2) режимні параметри апарату – витрати робочої Q_p та ежектованої рідини $Q_{ек}$; 3) властивості рідини – її густина ρ і динамічна в'язкість μ . Аналіз показав, що моделювати процес слід з урахуванням геометричних критеріїв подібності

$$\pi_1 = \frac{d_k}{d_c} = \sqrt{m}; \quad \pi_2 = \frac{\Delta}{d_c}; \quad \pi_3 = \frac{l_k}{d_c},$$

режимного критерію $\pi_4 = \frac{Q_{ек}}{Q_p} = q$ і критерію гідродинамічної подібності $\frac{1}{\pi_5} = \frac{v_c d_c \rho}{\mu} = Re_c$,

де $m = \frac{A_k}{A_c}$ – модуль ежектора; q – коефіцієнт ежекції;

v_c – швидкість витікання робочої рідини із сопла.

При проведенні числового моделювання у програмному середовищі SOLID WORKS COSMOS FLO для ежектора з певними геометричними параметрами задавалися Q_p і $Q_{ек}$ (тим самим досягалося бажане значення

коефіцієнта ежекції), а також тиск суміші на виході ($P_{см}$). Тиски робочого (P_p) й ежектованого ($P_{ек}$) потоків визначалися за результатами розрахунку. Моделювання проводилося в автомоделній області за числом Рейнольдса.

У першій серії числових експериментів ставилися завдання: 1) зіставити результати моделювання та літературні дані з метою перевірки адекватності використовуваної моделі щодо подібних розрахунків; 2) дослідити кінематичну структуру потоку в камері змішування; 3) оцінити ступінь впливу виявлених критеріїв подібності на досліджуваний процес.

Розраховувалися: коефіцієнт ежекції q , коефіцієнт напору

$$h = \frac{(P_{см} - P_{эж})}{(P_p - P_{эж})}$$

і коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{qh}{(1-h)}$$

Зіставлення отриманих графіків $h = f(q)$ і $\eta = f(q)$ з експериментальними даними літературних джерел показало їх високу відповідність [3]. Тим самим підтверджено правомірність рішення поставленої задачі використанням прикладним програмним пакетом. Крім того виявлено, що при деякому поєднанні режимних і геометричних параметрів біля стінок камери змішування відбувається відрив потоку, тобто утворюється зона зворотної течії (ЗЗТ), що характеризується високим рівнем дисипативних процесів (рис. 1). Очевидно, що усунення відриву потоку дозволить підвищити ККД струминного апарату. Таким чином було визначено шлях вирішення поставленого завдання – підвищення ефективності роботи центрального ежектора за рахунок усунення зон зворотної течії в його камері змішування. Також встановлено, що на конфігурацію відривних зон критерії π_2 і π_3 помітного впливу не мають. Тому з подальшого розгляду вони виключені.

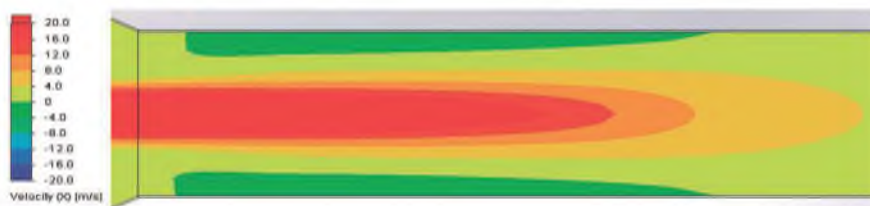


Рис. 1. Ізолінії поздовжньої проєкції швидкості рідини в камері змішування центрального ежектора ($m = 11$; $q = 0,5$)

Друга серія числових експериментів проводилася для центрального ежектора, у якого варіювалися тільки коефіцієнт ежекції в межах від 0,1 до 1,5 і модуль, що задавався рівним 5, 7, 9 і 11. Обробка результатів дозволила визначити безрозмірний параметр $p = q/m$ – параметр безвідривної роботи центрального ежектора. Зворотна течія відбувається, якщо $p < 0,11$. Причому, чим менше p , тим більші відносні розміри має відривна зона.

Дані другої серії математичного моделювання дозволили визначити розміри ЗЗТ, контури яких збігаються з ізолінією осьової проєкції швидкості $u_x = 0$ на рис. 1.

Найбільш простим способом усунення відривних зон є заміна області їх існування твердою поверхнею – тілом заміщення (ТЗ). Такий спосіб успішно використаний для вирішення схожих гідродинамічних задач [5, 6].

Третя серія числових експериментів проводилася для центральних ежекторів, у яких ЗЗТ була замінена ТЗ. Моделювання показало, що, по-перше, очікуване зростання коефіцієнта напору та ККД апарату з ТЗ у камері змішування дійсно відбувається, по-друге, безпосередньо біля поверхні ТЗ, а саме в тильній його частині, виникають невеликі залишкові відривні зони. Тому розміри ТЗ уточнювалися, а розрахунки повторювалися. У кожному подальшому розрахунку розміри області залишкового відриву зменшувалися, а величини h і η ежектора зростали. Виявлялося достатньо не більше 2-3 ітерацій.

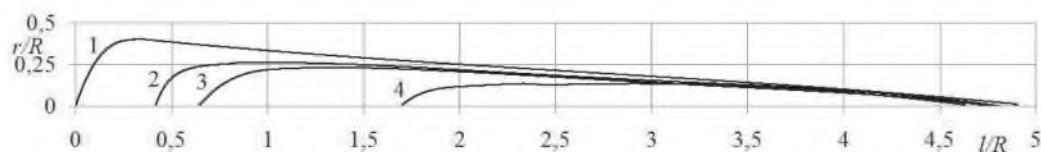


Рис. 2. Геометричні параметри ТЗ для центрального ежектора з $m = 5$ і коефіцієнтом ежекції $q = 0,1$ (1); $q = 0,25$ (2); $q = 0,35$ (3); $q = 0,5$ (4)

Криві, що відповідають профілю ТЗ, описані за допомогою полінома

$$\frac{r_l}{R} = \sum_{j=1}^n a_j \left(\frac{l_l}{L} \right)^j,$$

де r_l – значення поперечної координати точки профілю, відповідної поздовжній координаті l_l , відрахованої від початку ТЗ.

Для перевірки результатів числового моделювання в лабораторії кафедри прикладної екології та гідродинаміки Одеського національного політехнічного університету був побудований експериментальний стенд (рис. 3). У ході експериментів вимірювалися: перепад напору у витратомірному колекторі робочого потоку, перепад тиску у витратомірному колекторі ежектованого потоку. Профілі колекторів розраховані за формулою Вітошинського. За цими величинами визначалися витрати робочого та ежектованого повітря. Тиски робочого потоку та потоку суміші вимірювалися за допомогою рідинних U-подібних дифманометрів, а тиск ежектованого потоку – дифманометром Testo 506. Режим роботи ежектора задавався за допомогою поворотних заслінок на всмоктуючому трубопроводі та на виході з напірного трубопроводу (на рис. не показана). Як і у випадку математичного моделювання, розраховувалися коефіцієнт ежекції, коефіцієнт напору та коефіцієнт корисної дії.

Зіставлення результатів математичного й фізичного моделювання дозволяє зробити висновок щодо їх задовільного збігу. На рис.4, як приклад, наведено графіки $\eta = f(q)$ для ежектора з $m = 9$ і ТЗ, виготовленим відповідно до розмірів ЗЗТ, що виникає при роботі струминного насоса з коефіцієнтом ежекції $q_p = 1$ (q_p – розрахунковий коефіцієнт ежекції).

Графіки засвідчили, що підвищення ефективності ежектора відбувається не тільки при розрахунковому

За результатами третього етапу числового моделювання були отримані геометричні параметри ТЗ. На рис. 2, як приклад, у безрозмірному вигляді представлені ТЗ для ежектора з $m = 5$. Геометричні параметри ТЗ і їх розташування в камері змішування представлялися у вигляді залежностей

$$\frac{L_0}{R} = f(q); \quad \frac{L_{\max}}{R} = f(q); \quad \frac{L}{R} = f(q); \quad \frac{r_{\max}}{R} = f(q).$$

де R – радіус камери змішування; L_0 – відстань від початку камери змішування до ТЗ; L_{\max} – відстань від початку ТЗ до перерізу з його максимальним радіусом r_{\max} ; r_{\max} – максимальний поперечний розмір ТЗ; L – довжина ТЗ.

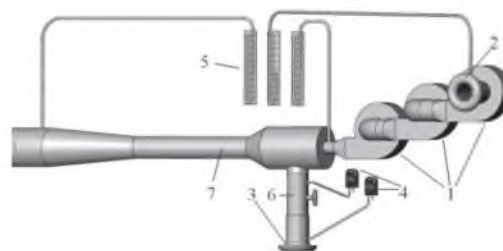


Рис. 3. Принципова схема експериментального стенду: 1 – відцентрові вентилятори ОКС-3361; 2 – колектор робочого потоку; 3 – колектор ежектованого потоку; 4 – диференціальні манометри Testo 506; 5 – рідинні U-подібні диференціальні манометри; 6 – дросель; 7 – центральний ежектор

значенні коефіцієнта ежекції q_p , але й у досить широкому інтервалі режимів роботи. Однак при досягненні деякого граничного коефіцієнта ежекції ефект від введення ТЗ стає негативним. Пов'язано це з тим, що заміна ЗЗТ тілом заміщення, з одного боку, виключає втрати енергії, пов'язані зі зворотними течіями, а з іншого – збільшує втрати на тертя. Чим менше коефіцієнт ежекції, тим більші відносні розміри ЗЗТ і тим більший ефект від їх заміщення. У цьому випадку зниження гідравлічного опору через усунення ЗЗТ значно перевищує додатковий опір тертя, викликаний присутністю ТЗ. Зі збільшенням q у порівнянні з q_p , величина ЗЗТ зменшується, а отже розміри ТЗ стають зайвими – позитивний ефект від ТЗ знижується, а частка втрат енергії на гідравлічне тертя зростає. Дослідження показали, що максимальне зростання ККД відбувається з ТЗ для малих q_p – до 11%, а найбільш широка область режимів, на якій відбувається підвищення ККД – з ТЗ для відносно великих q_p .

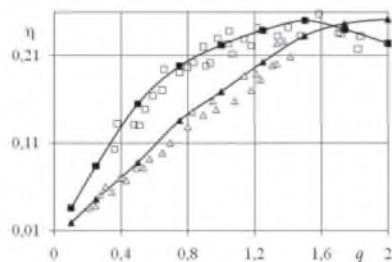


Рис. 4. Залежність ККД від коефіцієнта ежекції для апарату з $m = 11$ для $q_p = 1$: \blacktriangle – результати математичного моделювання ежектора без ТЗ; \blacksquare – результати математичного моделювання ежектора з ТЗ; \triangle – результати фізичного моделювання ежектора без ТЗ; \square – результати фізичного моделювання ежектора з ТЗ

Висновки. Таким чином, проведені дослідження дозволили з'ясувати одну з основних причин низької ефективності центрального ежектора при його роботі з низьким коефіцієнтом ежекції – відрив потоку в камері змішування. Математичне моделювання дозволило встановити умову виникнення відривної течії й визначити відносні розміри відривних зон. Для усунення зворотних течій запропоновано заміщати область їх існування твердою поверхнею. Математичне й фізичне моделювання підтвердило ефективність такого метода.

Список літератури / References

1. Бутенко А.Г. Комбинированная система очистки воздуха / А.Г. Бутенко, С.Ю. Смык // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 6. – С. 66–69.
Butenko, A.G. (2010), “Combined air-filtering system”, *Energotehnologii i resursosberezhenie*, no. 6, pp. 66–69.
2. Бутенко А.Г. Гидравлический расчет комбинированной системы очищения воздуха / А.Г. Бутенко, С.Ю. Смык // Труды Одесского политехнического университета: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. – 2011. – Вып. 1(35). – С. 190–194.
Butenko, A.G. and Smyk, S.Yu. (2011), “Hydraulic calculation of the combined air cleaning system”, *Trudy Odesskogo Politehnicheskogo Universiteta*, no. 1(35), pp. 190–194.
3. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др.] – СПб.: ВХВ-Петербург; 2005. – 800с.
Alyamovskiy, A.A., Sobachkin, A.A., and Odintsov, Ye.V. (2005), *Kompyuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike* [SolidWorks. Computer Modeling in Engineering Practice], VHV – Peterburg, St.-Petersburg, Russia.
4. Дунчевский Г.М. Гидравлический расчет гидроструйных насосов и систем. Теория, справочный материал, программное обеспечение. Ч.1. / Г.М. Дунчевский – Одесса: ОПИ, 1992. – 66 с.
Dunchevsky, G.M. (1992), [Hydraulic Calculation Jetting Pumps and Systems. Theory, Reference Material, Software], Part 1., OPI, Odessa, Ukraine.
5. Интенсификация работы газовой турбины за счет совершенствования аэродинамических процессов /

В.А. Арсирый, Е.А. Арсирый, А.С. Мазуренко, В.И. Кравченко // Forum Energetykow GRE-2012, Opole, Poland, 2012. – С.25–30.

Arsiry, V.A., Arsiry, E.A. and Mazurenko, A.S. “Intensification of the gas turbine by improving aerodynamic processes”, *Forum Energetykow GRE-2012*, Opole, Poland, pp. 25–30.

6. Arsiry, V. and Arsiry, E. (2008), “Reduction of Noise and Vibration of Turbo Machinery due to Improvement of Flowing Part”, *International Symposium on Compressor & Turbine Flow Systems – Theory & Application Areas “SYMKOM’08”*, Institute of Turbomachinery Technical University of Lodz, September, pp. 15–17.

Цель. Повышение эффективности центральных эжекторов при неоптимальных режимах работы, в частности – низких коэффициентах эжекции.

Методика. Цель исследования реализовывалась путем математического моделирования в программной среде SOLID WORKS COSMOS FLO и путем экспериментальных исследований на физической модели.

Результаты. Получены данные о кинематической структуре потока в камере смешения центрального эжектора, которые показали, что при малых коэффициентах эжекции происходит отрыв потока от стенок. Предложен метод устранения отрывных зон – замена области их существования твердыми поверхностями.

Научная новизна. Доказано, что при малых коэффициентах эжекции в камере смешения центрального эжектора возникают отрывные зоны, которые характеризуются высоким уровнем диссипативных процессов. На поддержание этих процессов затрачивается некоторая часть механической энергии потока, что приводит к снижению коэффициента полезного действия эжектора в целом. Определены условия возникновения отрывных зон и их геометрические параметры. Это позволило заменить область их существования твердыми телами, вводимыми в камеру смешения эжектора. Математическое и физическое моделирование показали повышение эффективности работы эжекторов с телами замещения в достаточно широком диапазоне режимов работы.

Практическая значимость. Центральные эжекторы широко используются в различных отраслях производства. Основной их недостаток – низкая эффективность работы. Особенно это актуально при работе в области низких коэффициентов эжекции. Проведенные исследования позволили найти способ повышения коэффициента полезного действия эжекторов, работающих в таких условиях. Метод достаточно прост, экономичен, не требует дополнительных эксплуатационных расходов, на производстве он может быть реализован силами обслуживающего персонала.

Ключевые слова: центральный эжектор, коэффициент эжекции, модуль эжектора, камера смешения, тело замещения

Purpose. The study aimed the improvement of the central ejector efficiency under nonoptimal operating modes, in particular low coefficients of ejection.

Methodology. The purpose of the study was implemented by means of mathematical modeling in the SOLID WORKS COSMOS FLO software environment and by experimental studies on the physical model.

Findings. The data about kinematic structure of the stream in the mixing chamber of the central ejector were obtained. They showed that at low ratios of ejection the separation of the flow away from the walls occurs. A method of eliminating separation zones – replacing of their existence areas by hard surfaces was proposed.

Originality. It was proved that separation zones arise under small coefficients of ejection in the mixing chamber of the central ejector. They are characterized by a high level of dissipative processes. On maintaining of these processes some part of mechanical energy of the stream is expended, leading to a decrease in efficiency of the ejector as a whole. The conditions of separation zones and their geometrical parameters were defined. It

made possible to replace the area of their existence by solids introduced into the mixing chamber of the ejector. Mathematical and physical modeling showed improving of ejectors efficiency with replacement bodies within a wide range of operating modes.

Practical value. Central ejectors are widely used in various industries. Their main drawback is poor performance. This is especially true when working in the low coefficients of ejection. The conducted studies have provided a way to improve efficiency of ejectors working in such conditions. The method is simple, economical, does not require additional operating costs; it can be implemented by the staff in manufacturing.

Keywords: *central ejector, ejection coefficient, ejector module, mixing chamber, replacement body*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
О. І. Буровим. Дата надходження рукопису 02.02.14.*