

УДК 621.694.3

## DETERMINATION OF RATIONAL PARAMETERS OF JET APPARATUS WITH NON-STATIONARY STREAM OF LIQUID

**V. Ponomarenko, A. Slyusenko, Ya. Khitriy, S. Lementar***National University of Food Technologies***Key words:**

jet apparatus,  
non-stationarity,  
pulsation frequency,  
ejection

**Article history:**

Received 03.02.2019  
Received in revised form  
05.03.2019  
Accepted 22.05.2019

**Corresponding author:**

andriy\_slyusenko@ukr.net

**ABSTRACT**

The article discusses the advantages of discrete-pulse energy input with the working fluid and the possibility of using this method for jet apparatus. Their wide application in various industries is due to the extraordinary technical simplicity of the design, compactness, reliability. The creation of energy-efficient jet apparatus with high efficiency and their implementation in the processes of food production will solve many problems of intensification of processes.

One of the promising and innovative types of jet apparatus are ejectors with non-stationary (pulse) jet of liquid. However, research on their work is extremely scarce. The non-stationarity is seen only as a period of the output of the ejector in the operating mode and when starting it up. For the operation of the jet apparatus, the choice of a liquid sprayer is important, which will form a pulsed supply of the active flow to the mixing chamber. He needs to provide a dispersed the liquid jet of fluid (a significant surface of contact of phases) and be reliable (not to create when working hydraulic shocks).

The study of the ejector with non-stationarity liquid jet were carried out on a hydraulic bench. As a working nozzle of the ejector, a patented pulsating nozzle with a rotating inner cup is used, the advantage of which is the smooth opening and closing of the inlet channels, which prevents the formation of hydraulic shock when creating a significant contact surface of the phases.

Comparison of the ejector operation with the pulse supply of the working liquid and the dependences of the ejection coefficient on the frequency of the jet pulsations are found. Is established the optimal value of the ripple frequency in the range  $18...22 \text{ s}^{-1}$ , at which the maximum  $K_{ej}$  is reached, which exceeds almost five times the numerical value of other ejectors with a similar geometric characteristic.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2019-25-15

---

## ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННОГО АПАРАТУ З НЕСТАЦІОНАРНИМ СТРУМЕНЕМ РІДИНИ

В. В. Пономаренко, канд. техн. наук

А. М. Слюсенко

Я. С. Хитрий

С. Ю. Лементар, канд. техн. наук

Національний університет харчових технологій

*У статті розглянуто переваги дискретно-імпульсного введення енергії з робочою рідиною та можливість застосування цього методу для струминних апаратів. Досліджено роботу ежектора з нестационарним струменем рідини на гідравлічному стенді та знайдено залежність коефіцієнта ежекції від частоти пульсації струменя. Встановлено раціональне значення частоти пульсацій в діапазоні  $18...22\text{ с}^{-1}$ , при якому досягається коефіцієнт ежекції, що перевищує майже в п'ять разів  $K_{\text{еж}}$  інших ежекторів з аналогічною геометричною характеристикою.*

**Ключові слова:** струминний апарат, нестационарність, частота пульсації, ежекція.

**Постановка проблеми.** Широке застосування струминних апаратів в різних галузях промисловості як гідроструминних насосів, вакуумних установок для відсмоктування рідин і газів, змішувачів та ін., специфіка умов роботи та різноманітність виконання завдань обумовлено такими їхніми незаперечними перевагами: відсутність рухомих деталей з поверхнями тертя, що є важливим при роботі з гарячими або агресивними середовищами, технічна і технологічна простота, компактність та надійність роботи, що дає змогу створювати пристрої необхідної продуктивності та встановлювати їх в будь-якому місці.

Робота струминних апаратів поєднує в собі гідродинамічні та кавітаційні явища, кінцеві ефекти, інтенсивне оновлення поверхні контакту фаз, можливість ежекції достатньої кількості газової фази без додаткових затрат енергії.

Однак загальним недоліком струминних апаратів є низький коефіцієнт корисної дії (ККД), що знаходиться в межах 30...40%. Дослідження роботи струминних апаратів вітчизняних і зарубіжних вчених проводяться в основному з метою інтенсифікації технологічних процесів у струминних течіях і створення апаратів з високим ККД.

Одним з перспективних впливів на двофазне середовище з метою прискорення обмінних процесів є дискретно-імпульсне введення енергії [1]. Його перевагами є:

- збільшення швидкості трансформації кінетичної енергії, яке можливе за рахунок збільшення рівня енергії на вході, що приводить до збільшення швидкості потоків;

- скорочення часу перетворення кінетичної енергії.

На жаль, про використання методу дискретно-імпульсного введення енергії для інтенсифікації роботи ежекційних апаратів відомо дуже обмежено. В основному нестационарність роботи ежекторів розглядається лише як епізод при виході на розрахунковий режим або при регулюванні [2; 3]. Проведені дослідження ежекторів з імпульсними струменями рідини і струминною форсункою показали

[4], що в цьому випадку коефіцієнт ежекції збільшується в 2...5 разів, що підтверджується також нашими дослідженнями.

У [2] відмічається, що струменеві насоси, маючи високу надійність, у багатьох випадках споживають надмірно високі обсяги робочої рідини та енергії, а ежекційні можливості нестационарних струменів і апаратів на їх основі вивчені недостатньо. Існуючі методи розрахунку орієнтовані виключно на сталі режими роботи струминних апаратів з безперервним активним струменем, а перехідні режими, характерні для багатьох гідросистем зі струминними насосами, практично не розглядаються.

На основі даних [2] встановлено, що найбільша ефективність імпульсних струминних насосів (ІСН) спостерігається при таких діапазонах значень параметрів його роботи:  $Sh = 0,008...0,012$ ;  $F = 0,56...0,6$ ;  $Q = 0,1...0,07$ ;  $x = 17...23$  ( $Sh$  — критерій Струхалія,  $F$  — відносна площа сопла,  $Q$  — параметр розривності струменя,  $x$  — відношення інерційних довжин сопла та проточної частини ежектора).

На цих режимах спостерігається значне збільшення ККД ІСН порівняно з класичними струминними насосами. Вихід за діапазони оптимальних значень параметрів  $Sh$ ,  $F$ ,  $Q$ ,  $x$  може призвести або до різкого зниження коефіцієнта ежекції або до нестійкої роботи апарата, що супроводжується коливаннями коефіцієнта ежекції.

Слід зауважити, що хоча автор знайшов оптимум роботи ежекторів при  $F = 0,56...0,6$ , в подальшому досліджувались ежектори з  $F = 0,27...0,4$ . Діапазон головної геометричної характеристики ежекторів було таким чином розширено, однак не пояснено, чому досліди проводились в неоптимальному діапазоні.

У [5; 6] автори відмічають складні процеси, що відбуваються при змішуванні активного та пасивного потоків у струминних апаратах при перехідних процесах. Найявні напівемпіричні теорії не описують складність цих процесів, тому авторами зроблена спроба комп'ютерного моделювання на основі пакета ANSYS CFX та проведено експериментальне дослідження водяного ежектора з циліндричною камерою змішування без дифузора діаметром 20,3 мм та робочими соплами діаметрами 10,5 та 12,76 мм.

Порівняння числового експерименту з фізичним показало достовірність отриманих результатів, адекватність пакета програм і його перспективність. Такий пакет програм можливо використовувати як удосконалення відомих методик розрахунку і проектування ежекторів та створення принципово нових методик.

Можливість збільшення коефіцієнта ежекції за рахунок додаткового хвильового приєднання маси повітря, при використанні пульсуючого газодинамічного резонатору, показано в розрахунково-теоретичному дослідженні [7]. У разі стаціонарного витікання витрата газу знижується при віддаленні від сопла внаслідок розповсюдження в зовнішнє середовище. При нестационарному процесі витоку рідини її витрата при віддаленні від вихідного сопла збільшується, що пояснюється приєднаною масою. Ці дослідження зроблені для ежекторів з числами Маха близько одиниці.

З огляду на такі дані основним і надійним методом досліджень роботи струминних апаратів є експериментальний, який виявив складні взаємозв'язки розмірів, взаємного положення, конструктивних особливостей виконання окремих його елементів на кінцевий результат. Доволі часто отримані результати спірні та неоднозначні. Такі дані потребують перевірки та теоретичного пояснення.

На жаль, досліджень роботи імпульсних струминних апаратів, їхніх робочих характеристик, раціональних розмірів, при яких досягається найвища ефективність їх роботи, надзвичайно мало.

Розробка досконалих струминних апаратів з високим ККД і їх впровадження вирішує багато проблем інтенсифікації обмінних процесів у харчовій та інших галузях промисловості. Зокрема, в цукровій промисловості це дасть змогу: удосконалити процес сульфатації води і цукрових розчинів; проводити процес деамонізації конденсатів в інтенсивному та енергоефективному режимі; створити двосекційні сатуратори та одержати цукрові розчини з високими якісними показниками. Беззаперечні переваги струминних апаратів забезпечують їх використання при утилізації викидів цукрових заводів, що сприяє зменшенню матеріальних та енергетичних витрат на виробництво продукції і покращує екологічну й біологічну безпеку.

**Мета дослідження:** визначити раціональні параметри струминних апаратів з нестационарним (імпульсним) струменем рідини, встановити закономірності роботи та пояснити механізм дії.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- створити гідравлічний стенд для дослідження роботи ежектора в нестационарному режимі;
- знайти раціональні значення частот пульсацій активного потоку, при яких досягається найбільша ефективність роботи струминного апарата;
- визначити перспективні напрями досліджень ежекторів з нестационарним струменем рідини.

**Матеріали і методи.** Для встановлення закономірностей гідродинаміки двофазного потоку в циліндричній камері змішування ежектора та раціональних значень частот пульсацій, при яких досягається найбільша ефективність роботи струминного апарата, на кафедрі технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування НУХТ був виготовлений гідравлічний стенд (рис. 1).

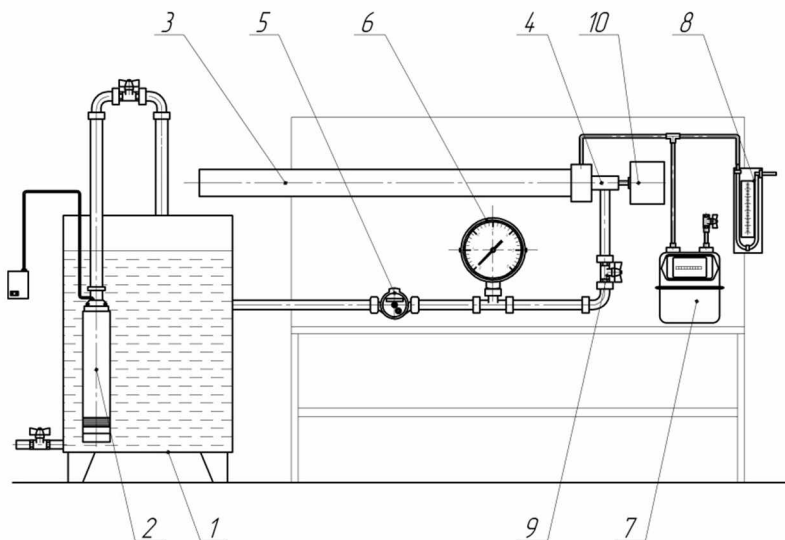


Рис. 1. Експериментальна установка: 1 — смісь для рідини; 2 — насос; 3 — камера змішування ежектора; 4 — форсунка; 5 — витратомір рідини; 6 — манометр; 7 — витратомір газу; 8 — дифманометр; 9 — регулювальний кран; 10 — привідний механізм

Витрата рідини вимірювалась ротатійним витратоміром типу КВ-1,5, клас точності 1,5. Тиск рідини на форсунці контролювався манометром ОБМ1-160, кл. точності — 1,5. Витрата газу вимірювалась лічильником Compteur magnol S6.20 М об'ємного типу. Розрідження в камері змішування контролювалось диференційним манометром.

Обробка експериментальних даних проводилась в програмах Microsoft Excel (обробка табличних даних), побудова графіків в програмах OriginPro 8, Curve-ExpertPro-2.2.0, Microsoft Excel.

Як робоче сопло використовувалась розроблена та запатентована форсунка, яка працювала в імпульсному режимі (рис. 2) [8].

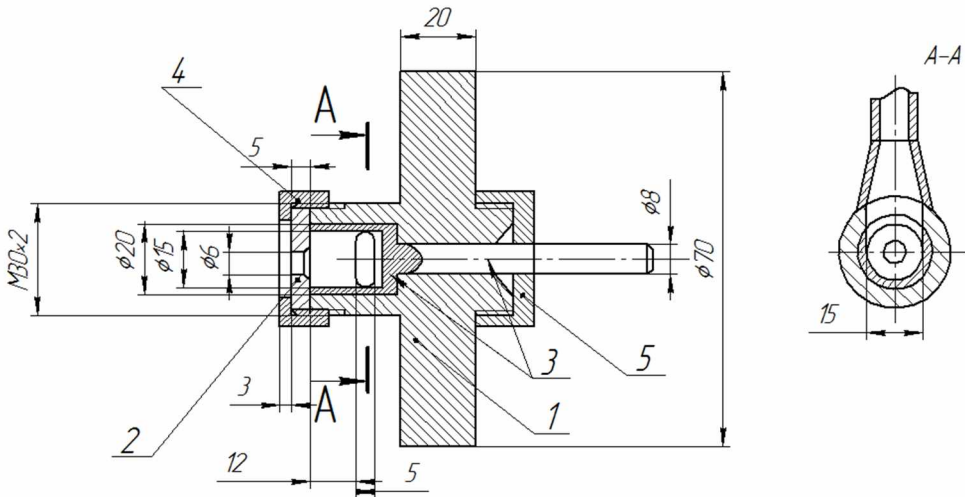


Рис. 2. Експериментальна форсунка:

1 — корпус; 2 — сопло; 3 — стакан зі штоком; 4, 5 — притисні гайки

Камера змішування ежектора була скляною, що надавало можливість візуально спостерігати за течією рідинно-газової суміші.

*Методика проведення досліджень.* Робоча рідина (вода при температурі 20°C) насосом через витратомір об'ємного типу подається в розпилувач. Контроль тиску здійснювався манометром, який знаходився на одній висоті з віссю форсунки.

Частота пульсацій робочої рідини змінювалась шляхом періодичного перекриття вхідних каналів корпусу та стакана зі штоком форсунки за допомогою привідного механізму 10 (рис. 1) зі змінним числом обертів. Внаслідок цього створювався пульсаційний ефект витоків активного потоку в камеру змішування ежектора.

Витрата повітря, що ежектувалось при температурі 20°C та відносній вологості 80%, вимірювалась об'ємним методом, а розрідження в камері змішування — дифманометром.

Дослідження роботи ежектора проводилось при відносній площі сопла:

$$F = f_c / F_{к.з} = 0,016,$$

де  $f_c$  — площа сопла форсунки ( $d_c = 6$  мм);  $F_{к.з}$  — площа камери змішування ( $D_{к.з} = 45$  мм).

Частота пульсацій рідини змінювалась в межах  $1 \dots 20 \text{ c}^{-1}$ . Широкий діапазон зміни частот пульсацій пояснюється необхідністю знайти для такого типу розпилювача його раціональне значення, при якому досягається найвищий коефіцієнт ежекції.

**Результати досліджень.** Енергія до ежектора підводиться з робочою рідиною з тиском  $p_p$ , низьконапірне пасивне середовище (газ) має тиск  $p_n$ . Суміш після проходження ежектора буде мати тиск  $p_s$ , який є проміжним між  $p_p$  та  $p_n$ . Зазвичай, аналіз роботи струминних апаратів виконується з використанням безрозмірних режимних і геометричних параметрів.

Найважливішими *режимними* параметрами є:

$\Delta h$  — відносний напір (відношення підвищення повного тиску пасивного потоку до різниці повних тисків активного і пасивного потоків перед входом в ежектор):

$$\Delta h = (p_s - p_n) / (p_p - p_n). \quad (1)$$

$K_{ежк}$  — коефіцієнт ежекції (відношення витрати пасивного потоку до витрати активного):

$$K_{ежк} = Q_e / Q_p. \quad (2)$$

Коефіцієнт корисної дії ежектора:

$$\eta = \Delta h K_{ежк}. \quad (3)$$

Основним *геометричним* параметром, що є також критерієм геометричної подібності струминних апаратів, є відносна площа сопла (відношення площ поперечних перерізів сопла і робочої камери):

$$F = f_c / F_{к.з}. \quad (4)$$

Для імпульсних (нестационарних) течій рідин і газів при даних режимах обтікання крапель рідини потоком газу (в діапазоні значень критерія Рейнольдса  $Re = 50 \dots 150$ ) користуються критерієм подібності — числом Струхала, яке, зазвичай, визначається співвідношенням:

$$Sh = fL / \nu, \quad (5)$$

де  $f$  — характерна частота процесу (частота утворення вихорів),  $L$  — характерний лінійний розмір (гідрравлічний діаметр),  $\nu$  — характерна швидкість потоку.

Відповідно до мети досліджень, на гідрравлічному стенді (рис. 1) були проведені пілотні дослідження роботи ежектора з нестационарним струменем рідини, який створювався пульсаційною форсункою (рис. 2).

При частоті обертів штока  $300 \text{ об./хв}$ , що відповідає частоті пульсацій  $5 \text{ c}^{-1}$ , коефіцієнт ежекції досягає числового значення  $1,5$  (рис. 3). Тиск рідини в соплі форсунки коливається в межах  $0,1 \dots 0,5 \text{ МПа}$ . При збільшенні частоти обертання штоку до  $1200 \text{ об./хв}$ , що відповідає частоті пульсацій  $20 \text{ c}^{-1}$ , коефіцієнт ежекції досягає свого максимального числового значення  $2,9 \dots 3,1$ . Коефіцієнт ежекції зростає майже вдвічі.

У дослідженому ежекторі число Струхаля нестационарної течії лежить у межах  $0,0012 \dots 0,0054$ , відношення інерційних довжин проточної частини ежектора та сопла  $x = 50$ . Слід зауважити, що вибрані параметри ежектора були хоч і не оптимальними з точки зору отримання максимального коефіцієнта ежекції, проте навіть при цьому були досягнуті позитивні результати. Крім того, значною відмінністю від досліджених ежекторів є використання пульсаційної форсунки, яка в процесі одного циклу пульсацій змінює факел розпилення рідини з відцентрового на відцентрово-струминний і потім на струминний, що гарантовано створює зону розрідження в камері змішування, а отже, і ежекції. Другою перевагою даної форсунки є плавне відкриття та перекриття вхідних каналів, що запобігає виникненню гідравлічного удару в трубопроводах.

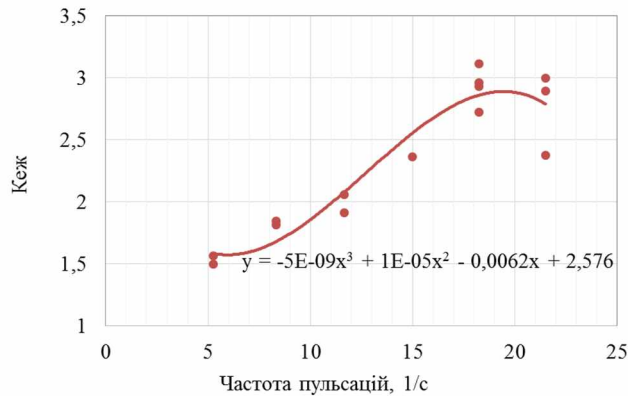


Рис. 3. Залежність коефіцієнта ежекції  $K_{ек}$  від частоти пульсацій активного потоку

Для порівняння на рис. 4 представлені результати дослідження роботи ежектора з  $d_c = 6$  мм,  $D_{кз} = 45$  мм, тобто з ідентичними розмірами, та відцентрово-струминною форсункою як сопла. Максимальний коефіцієнт ежекції досягає числового значення 0,6.

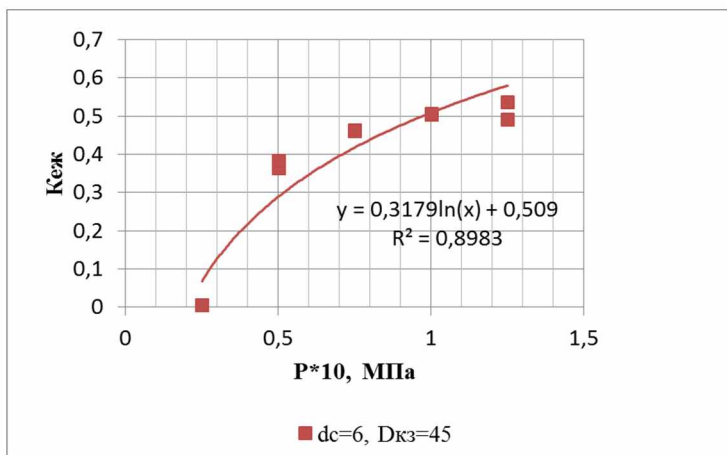


Рис. 4. Залежність  $K_{ек}$  від тиску подачі робочої рідини для ежектора з  $d_c = 6$  мм  $D_{кз} = 45$  мм ( $F = 0,016$ )

Порівняння роботи струминних апаратів з однаковою відносною площею сопла  $F$ , з пульсаційною та відцентрово-струминною форсункою як сопла показує незаперечні переваги ежектора з пульсаційною подачею рідини в камеру змішування ежектора. Коефіцієнт ежекції навіть за частоти пульсацій  $5 \text{ с}^{-1}$  перевищує аналогічний показник для ежектора з відцентрово-струминною форсункою при співрозмірних тисках подачі рідини майже в 2,5 раза, а при збільшенні частоти пульсацій до  $20 \text{ с}^{-1}$  коефіцієнта ежекції зростає майже в 5 разів.

Збільшення коефіцієнта ежекції струминного апарату з нестационарним струменем рідини пояснюється тим, що, крім зсувних зусиль, що виникають при русі активного потоку, виникають додаткові сили тиску від його руху (імпульсна подача рідкої фази викликає тиск, подібний до тиску від руху поршнів).

#### **Висновки.**

1. Для дослідження роботи ежекторів в нестационарному режимі створено гідравлічний стенд.

2. Встановлено раціональне значення частоти пульсацій активного потоку ( $18 \dots 22 \text{ с}^{-1}$ ) в діапазоні зміни числа Струхаля  $0,0012 \dots 0,0054$  та відносній площі сопла  $F = 0,016$ , при якому досягається коефіцієнт ежекції  $K_{ежк} = 2,9$ , що перевищує майже в 5 разів  $K_{ежк}$  для ежекторів з аналогічною геометричною характеристикою та відцентрово-струминною форсункою як сопла.

3. Подальші дослідження будуть направлені на встановлення оптимальних геометричних розмірів ежекторів з нестационарним струменем рідини, особливостей течії пульсуючого потоку та проведення комп'ютерного моделювання.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Ободович А. Н.* Разработка научно-технических основ процессов перемешивания и диспергирования жидкостных гетерогенных систем и их аппаратное обеспечение: дис. ... докт. техн. наук: 05.18.12 / Ободович Александр Николаевич. Национальный университет пищевых технологий. — Киев, 2009. — 321 с.

2. *Дурасов А. А.* Повышение эффективности жидкостных струйных насосов путем реализации возможностей нестационарной эжекции: автореф. дис. ... к.т.н.: 05.04.13 / Дурасов Алексей Анатольевич. — Южно-Уральский государственный университет. — Омск, 2009. — 19 с.

3. *Афанасенко В. Г.* Совершенствование конструкции массообменного устройства для проведения процесса абсорбции: автореф. дис. ... к.т.н.: 05.04.13 / Афанасенко Виталий Геннадьевич. — Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа, 2008 — 24 с.

4. *Спиридонов Е. К.* Моделирование нестационарной эжекции / Е. К. Спиридонов, А. А. Дурасов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение», выпуск 13. — 2009. — № 11. — С. 28—36.

5. *Нафиков И. Р.* Повышение эффективности промывки доильной установки путем разработки ежектора вакуумного агрегата: автореф. дис. ... к.т.н.: 05.20.01 / Нафиков Инсаф Рафитович. — Казанский государственный аграрный университет. Казань, 2016. — 16 с.

6. *Спиридонов Е. К.* Характеристики нестационарной эжекции в жидкостном струйном насосе / Е. К. Спиридонов, А. А. Дурасов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение», выпуск 10. — 2007. — № 25. — С. 35—43.

7. Влияние взаимодействия масс газа на тяговую эффективность пульсирующих двигателей [Электронный ресурс] / Россия, ОАО «НПО «Сатурн», РГАТА им. П.А. Соловьёва. — Режим доступа: \ <http://technomag.bmstu.ru/doc/522954.html> / — 01.01.2013 г. — Загл. с экрана



8. А.с. №1623776. СССР, МКИ 3 В 05 В 3 / 34. Форсунка / В. Б. Выскребцов, Н. И. Безлюда, В. В. Пономаренко, А. Н. Ганжа (СССР). — 4454643/31-05; опубл. 30.01.91, Бюл. № 4. — 4 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО АППАРАТА С НЕСТАЦИОНАРНОЙ СТРУЕЙ ЖИДКОСТИ

**В. В. Пономаренко, А. М. Слюсенко, Я. С. Хитрый, С. Ю. Лементарь**  
*Национальный университет пищевых технологий*

*Рассмотрены преимущества дискретно-импульсного ввода энергии с рабочей жидкостью и возможность применения этого метода для струйных аппаратов. Исследована работа эжектора с нестационарной струей жидкости на гидравлическом стенде и найдена зависимость коэффициента эжекции от частоты пульсации струи. Установлено рациональное значение частоты пульсаций в диапазоне  $18 \dots 22 \text{ с}^{-1}$ , при котором достигается коэффициент эжекции, что превышает почти в пять раз  $K_{\text{эж}}$  других эжекторов с аналогичной геометрической характеристикой.*

**Ключевые слова:** струйный аппарат, нестационарность, частота пульсаций, эжекция.