

УДК 662.210.587.621.572

Шевелёва А.М., аспирант
(ИТМ НАНУ и ГКАУ)
Тынына С.В., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛОСКОЙ
МОДЕЛИ ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ
ПОДВОДОМ МАССЫ**

Шевельова Г.М., аспирант
(ИТМ НАНУ і ДКАУ)
Тинина С.В., магістр
(ІГТМ НАН України)

**МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПЛОСКОЇ
МОДЕЛІ ГАЗОВОГО ЕЖЕКТОРА З ДОДАТКОВИМ
ПІДВЕДЕННЯМ МАСИ**

Shevelyova A.M., Doctoral Student
(ITM NASU & SSAU)
Tynyna S.V., M.S. (Tech)
(IGTM NAS of Ukraine)

**METHODS FOR EXPERIMENTAL STUDYING FLAT MODEL GAS
EJECTOR WITH AN ADDITIONAL SUPPLY OF WEIGHT**

Аннотация. Разработана методика экспериментальных исследований влияния основных геометрических и газодинамических параметров эжектора на характер течения внутри разгонного канала, оснащенного дополнительным подводом энергоносителя. Методика направлена на проведение экспериментальных исследований по установлению принципиальной возможности защиты стенок струйного эжектора за счет подвода дополнительного потока энергоносителя в смесительную камеру.

Представлена схема и описание лабораторной модели для исследования физических процессов, которые протекают в эжекторе, работающем в среде двухфазных газовых потоков.

Выбран и обоснован план многофакторного эксперимента, установлены параметры, подвергающиеся изменению и контролю при проведении исследований, а также уровни и интервалы варьирования исследуемых параметров.

Представлена схема обработки и анализа результатов экспериментальных исследований по изучению влияния основных геометрических и газодинамических параметров эжектора на эффективность протекания внутрикамерных процессов.

Предложенная методика позволяет разработать регрессионно-статистическую модель эжектора с дополнительным подводом энергоносителя, которая, в свою очередь, позволит разработать конструкцию данного эжектора с усовершенствованными геометрическими и газодинамическими параметрами.

Ключевые слова: многофакторный эксперимент, плоская модель, эжекторный узел, износ стенок разгонного канала, дополнительный подвод энергоносителя.

Для предотвращения воздействия двухфазного потока (газ – твердые частицы) на стенки разгонного канала эжекторного узла, приводящего к износу последних, необходимо проведение мероприятий по защите элементов конструкции.

Одним из способов защиты стенок разгонного канала является введение в канал дополнительного пристеночного потока газа-энергоносителя.

Оценка эффективности использования данного способа требует проведения экспериментальных исследований с целью установления параметров способа, обеспечивающих надежную защиту элементов конструкции от износа.

Целью данной работы является разработка методики экспериментальных исследований по изучению влияния основных геометрических и газодинамических параметров эжектора на характер течения с возможностью получения экспериментально-статистических данных для разработки математических моделей выходных параметров в заданном диапазоне исследований.

Методика направлена на проведение экспериментальных исследований по установлению принципиальной возможности защиты стенок разгонного канала струйного эжектора за счет подвода дополнительного (защитного) потока энергоносителя в смесительную камеру и включает в себя решение следующих задач:

- выбор параметров, которые будут изменяться в процессе исследований (факторов варьирования);
- разработку и изготовление лабораторной модели, допускающей активное влияние, для изучения процессов, протекающих внутри разгонного канала данной модели;
- выбор критериев оценки конечных результатов экспериментальных исследований;
- планирование многофакторного эксперимента, установление уровней и интервалов варьирования исследуемых параметров;
- определение коэффициентов регрессионной математической модели;
- установление характера воздействия геометрических и газодинамических параметров модели на эффективность протекания внутрекамерных процессов.

Выбор варьируемых факторов. Параметрами исследуемого процесса являются следующие [1-3]:

- скорость эжектирующего газа на выходе из сопла V_{z1} , м/с;
- скорость движения твердой фазы на выходе из сопла $V_{ч1}$, м/с;
- давление основного потока газа на входе в сопло P_{0o} , МПа;
- температура эжектирующего газа на входе в сопло T_{0o} , К;
- атмосферное давление P_a , МПа;
- плотность газа ρ_{z0} , кг/м³;
- газовая постоянная R , Дж/кг·К;
- диаметр твердых частиц $d_{ч}$, м;
- масса частиц твердой фазы $m_{ч}$, кг;
- площадь сопла эжектирующего газа f_c , м²;
- площадь сечения разгонной трубки $F_{тр}$, м²;

- длина разгонной трубки L_{mp} , м;
- давление дополнительного потока газа P_{don} , МПа;
- температура защитного потока газа T_{don} , К;
- расстояние между щелевыми отверстиями l , м;
- ширина щелевого отверстия h , м;
- количество щелевых отверстий n , шт.;
- угол подвода эжектирующего потока газа α , град;
- угол подвода дополнительного потока газа α_{don} , град.

Вследствие того, что исследовать влияние всех параметров невозможно, необходимо выбрать те из них, изучение влияния которых даст наиболее информативную картину процесса. К изменяемым факторам предъявляются следующие требования [4,5].

1. Факторы являются функционально и статистически независимыми.
2. Значение переменных должны устанавливаться по воле оператора.
3. Их значения должны быть однозначно определены. Точность их определения должна быть примерно на порядок больше, чем точность измерения отклика.
4. Факторы должны быть совместимы, т.е. не вызывать аварийных ситуаций в работе исследуемого устройства.

В качестве варьируемых факторов были приняты следующие: относительный перепад давлений эжектирующего газа P_{0o}/P_a ; относительный перепад давлений дополнительного потока газа P_{don}/P_{0o} ; относительная ширина щелевых отверстий h/l ; количество щелевых отверстий n , шт.; относительный угол подвода дополнительного потока газа α_{don}/α ; относительная площадь сечения разгонного канала F_{mp}/f_c (таблица 1).

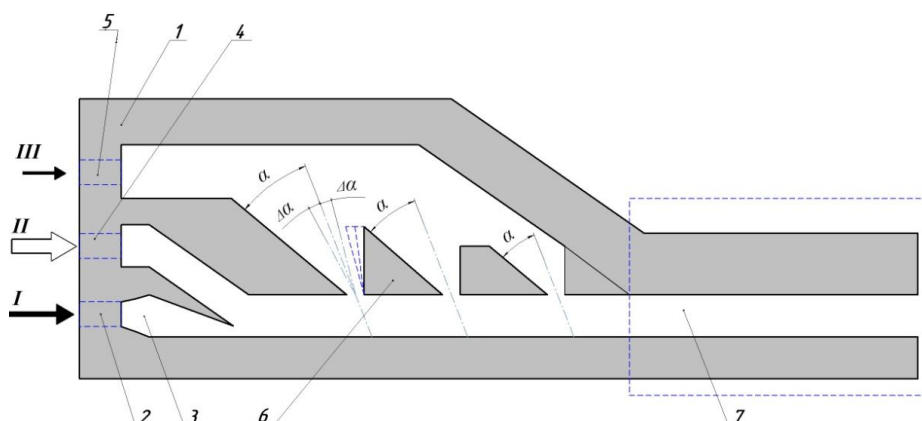
Таблица 1 – Исследуемые факторы и уровни варьирования

Исследуемые факторы	Обозначение	Уровень варьирования		
		-1	0	+1
P_{0o}/P_a	X_1	0,4	0,5	0,6
P_{don}/P_{0o}	X_2	0,8	0,9	1
h/l	X_3	0,08	0,09	0,1
n , шт.	X_4	1	2	3
α_{don}/α	X_5	1/2	2/3	5/6
F_{mp}/f_c	X_6	10	11,2	12,4

Описание лабораторной модели. Принципиальная схема лабораторной модели для исследования защиты стенок разгонного канала эжектора за счет подвода дополнительного периферийного потока энергоносителя представлена на рисунке 1 [6].

Конструкция представленной модели эжектора позволяет влиять на протекающие внутрикамерные процессы путем варьирования газодинамических и геометрических параметров: давления основного и дополнительного потоков

газа, ширины и количества щелевых отверстий, расстояния между щелевыми отверстиями, угла подвода защитного газового потока.



- 1 – корпус модели; 2 – канал подвода эжектирующего газа; 3 – сопло эжектирующего газа;
 4 – канал подвода твердой фазы; 5 – канал подвода дополнительного потока газа; 6 – сменные элементы; 7 – разгонный канал;
 I – эжектирующий поток газа; II – эжектируемый поток; III – дополнительный поток газа;
 α – угол наклона подвода дополнительного потока; $\Delta\alpha$ – изменение угла подвода

Рисунок 1 – Схема плоской модели эжекторного узла

План эксперимента. В качестве основного рабочего плана может быть использован план полного многофакторного эксперимента с двухуровневым варьированием параметров, дополненный однофакторным планом со стабилизацией. Для исключения влияния на функцию отклика систематических ошибок, вызванных внешними условиями, предусмотренные матрицей планирования опыты следует проводить в случайной последовательности [7,8].

План-матрица однофакторного эксперимента с частичной стабилизацией факторов – в таблице 2, матрица планирования для проведения многофакторного эксперимента представлена в таблице 3.

Таблица 2 – План-матрица однофакторного эксперимента с частичной стабилизацией факторов

№ опыта	Фактор				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	+	0	0	0	0
2	-	0	0	0	0
3	0	+	0	0	0
4	0	-	0	0	0
5	0	0	+	0	0
6	0	0	-	0	0
7	0	0	0	+	0
8	0	0	0	-	0
9	0	0	0	0	+
10	0	0	0	0	-
11	0	0	0	0	0

Таблица 3 – Матрица планирования

№ опы- та	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	2	3	4	5	6
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	-1	-1
1	2	3	4	5	6
9	-1	-1	-1	+1	-1
10	+1	-1	-1	+1	-1
11	-1	+1	-1	+1	-1
12	+1	+1	-1	+1	-1
13	-1	-1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	-1
17	-1	-1	-1	-1	+1
18	+1	-1	-1	-1	+1
19	-1	+1	-1	-1	+1
20	+1	+1	-1	-1	+1
21	-1	-1	+1	-1	+1
22	+1	-1	+1	-1	+1
23	-1	+1	+1	-1	+1
24	+1	+1	+1	-1	+1
25	-1	-1	-1	+1	+1
26	+1	-1	-1	+1	+1
27	-1	+1	-1	+1	+1
28	+1	+1	-1	+1	+1
29	-1	-1	+1	+1	+1
30	+1	-1	+1	+1	+1
31	-1	+1	+1	+1	+1
32	+1	+1	+1	+1	+1

В качестве функции отклика на воздействия исследуемых факторов выбраны: скорость двухфазного потока, движущегося в разгонном канале, V_2 , м/с; расстояние от выходного сечения разгонного канала до места оседания твердых частиц на стенки $L_{эф}$, м, отвечающие ряду требований к параметрам функции отклика: универсальность, возможность представления одним членом и представления в количественном виде.

Обработка и анализ результатов исследования. Получаемая при обработке результатов эксперимента математическая модель является уравнением регрессии, которое имеет вид [9]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j ,$$

где y – исследуемые параметры; a_0 – свободный член уравнения; a_i, a_{ij} – коэффициенты при линейных параметрах и парном взаимодействии факторов соответственно; x_i, x_j – уровни варьирования факторов.

Оценка значимости каждого из коэффициентов производится по критерию Стьюдента, адекватность полученного уравнения регрессии проверяется с помощью критерия Фишера, а проверка однородности оценок проводится по критерию Кохрена [10].

При исследовании способа защиты стенок разгонной трубки модели от износа целесообразно представить полученные уравнения в натуральной форме. Переход к физическим переменным в уравнении регрессии осуществляется следующим образом

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} ,$$

где X_i – кодированное значение исследуемого фактора; x_i – натуральное (текущее) значение фактора; x_{i0} – натуральное значение нулевого фактора; Δx_i – интервал варьирования i -го параметра.

Значимость факторов определяется с помощью коэффициента эластичности, показывающего, на сколько процентов изменяется функция при изменении аргумента на единицу (на 1%).

$$\mathcal{E}_i = \frac{a_i x_{i0}}{a_0} ,$$

где x_{i0} – натуральное значение нулевого фактора; a_0, a_i – коэффициенты регрессии.

Коэффициент эластичности

$$\xi = \frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_\Sigma} \cdot 100\% .$$

Выводы. В соответствии с поставленными задачами определена методика проведения экспериментальных исследований по изучению влияния основных геометрических и газодинамических параметров эжектора на характер течения внутри разгонного канала, оснащенного дополнительным подводом энергоносителя.

Представлено описание модели для установления характера воздействия геометрических и газодинамических параметров на эффективность способа защиты стенок разгонного канала от износа за счет дополнительного подвода энергоносителя.

Выбран и обоснован план многофакторного эксперимента, определены исследуемые факторы, уровни их варьирования.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Александров, В.Ю. Оптимальные эжекторы (теория и расчет) / В.Ю. Александров. – М.: Машиностроение, 2012. – 136 с.
2. Аркадов, Ю. К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы / Ю.К. Аркадов. – М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2001. – 336 с.
3. Kürten H., Strömung und Zerkleinerung beim Stoß zweier Gas-Peststoff-Strahlen / H. Kürten, N. Rink, H. Rumpf // *Powder Technology*. – 1971. - vol. 4, no 4. - P. 221-231.
4. Бурыкин, А.А. Теория эксперимента. Курс лекций / А.А. Бурыкин. – Екатеринбург: УРФУ, 2012. – 163 с.
5. Архипов, В.А. Основы теории инженерно-физического эксперимента: учебн. пособие / В.А. Архипов, А.П. Березиков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 206 с.
6. Шевелёва, А.М. Плоская модель для исследования возможности защиты стенок разгонной трубки струйного измельчителя от износа / А.М. Шевелёва, С.В. Тынына // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 117. – С. 103-109.
7. Сидняев, Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособие / Н.И. Сидняев, Н.Т. Вилисова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 463 с.
8. Рыков, В.В. Математическая статистика и планирование эксперимента / В.В. Рыков, В.Ю. Иткин. – М.: Российский государственный ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина, 2008. – 210 с.
9. Лагутин, М.В. Наглядная математическая статистика: Учеб. пособие / М.В. Лагутин. – М.: БИНОМ; Лаборатория знаний, 2007. – 472 с.
10. Лавров, В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / В.В. Лавров, Н.А. Спирин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

REFERENCES

1. Aleksandrov, V.Ju. (2012), *Optimalnye jezhektory (teoriya i raschet)*, [Optimal ejectors (theory and calculation)], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
2. Arkadov, Ju. K. (2001), *Novye gazovye jezhektory i jezhekcionnye processy*, [New gas ejectors and ejection processes], Izdatelstvo Fiziko-matematicheskoy literatury, Moscow, Russia.
3. Kürten, H., Rink N. and Rumpf, H. (1971), “Strömung und Zerkleinerung beim Stoß zweier Gas-Peststoff-Strahlen“, *Powder Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 221-231.
4. Burykin, A.A. (2012), *Teoriya eksperimenta. Kurs lekciy* [The theory of the experiment. Lecture course], URFU, Ekaterinburg, Russia.
5. Arhipov, V.A. and Berezhikov, A.P. (2008), *Osnovy teorii inzhenerno-fizicheskogo jeksperimenta*: [Basic theory of engineering physics experiment], Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Tomsk, Russia.
6. Shevelyova, A.M. and Tynyna, S.V. (2014), “Plane model for the study of the possibility of accelerating the protection of the walls of the pipe jet grinder wear”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 117, pp. 103-109.
7. Sidnyaev, N.I. and Vilisova, N.T. (2011), *Vvedenie v teoriyu planirovaniya eksperimenta* [Introduction to experimental design], Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, Moscow, Russia.
8. Rykov, V.V. and Itkin, V.Ju. (2008), *Matematicheskaya statistika i planirovanie eksperimenta*, [Mathematical statistics and experimental design], Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet nefti i gaza im. I.M. Gubkina, Moscow, Russia.
9. Lagutin, M.V. (2007), *Nagljadnaja matematicheskaja statistika*, [Transparent mathematical statistics], BINOM, Moscow, Russia.
10. Lavrov, V.V. and Spirin, N.A. (2004), *Metody planirovaniya i obrabotki rezultatov inzhenernogo eksperimenta*, [Planning methods and data processing engineering experiment], GOU VPO UGTU-UPI, Ekaterinburg, Russia.

Об авторах

Шевелёва Анна Михайловна, аспирант, Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ), Днепрпетровск, Украина, belgorod98@i.ua.

Тынына Сергей Владимирович, магістр, младший научный сотрудник отдела Механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, otd-8-11@mail.ru.

About the authors

Shevelyova Anna Mihajlovna, Doctoral Student, Institute of Technical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine (ITM, NASU & SSAU), Dnepropetrovsk, Ukraine, belgorod98@i.ua.

Тынына Сергей Владимирович, Master of Science, Junior Researcher at the Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, otd-8-11@mail.ru.

Анотація. Розроблено методику експериментальних досліджень впливу основних геометричних і газодинамічних параметрів ежектора на характер плинусу усередині розгінного каналу, оснащеного додатковим підведенням енергоносія. Методика спрямована на проведення експериментальних досліджень по встановленню принципової можливості захисту стінок струминного ежектора за рахунок підведення додаткового потоку енергоносія в змішувальну камеру.

Представлено схему й опис лабораторної моделі для дослідження фізичних процесів, які протікають в ежекторі, що працює в середовищі двофазних газових потоків.

Обрано й обґрунтовано план багатофакторного експерименту, установлені параметри, що піддаються зміні й контролю при проведенні досліджень, а також рівні й інтервали варіювання досліджуваних параметрів. Представлено схему обробки й аналізу результатів експериментальних досліджень по вивченню впливу основних геометричних і газодинамічних параметрів ежектора на ефективність протікання внутрікамерних процесів.

Запропонована методика дозволяє розробити регресійно-статистичну модель ежектора з додатковим підведенням енергоносія, яка, у свою чергу, дозволить розробити конструкцію даного ежектора з удосконаленими геометричними і газодинамічними параметрами.

Ключові слова: багатофакторний експеримент, плоска модель, ежекторний вузол, знос стінок розгінного каналу, додаткове підведення енергоносія.

Abstract. The methods of experimental research of the basic geometric and gas-dynamic **Abstract.** The article presents new methods for experimental studying the ejector basic geometric and gas-dynamic parameters which impact on the flow character inside the accelerating channel equipped with an additional source of energy supply. The methods were designed for experimental study of a possibility to protect the jet ejector walls by providing additional energy flows into the mixing chamber.

The authors describe a design of a laboratory model which was used for studying physical processes occurred in the ejector operating in a medium with two-phase gas flows.

A multivariate experiment plan was drawn and substantiated, parameters were chosen which were subject to be varied and controlled during the study, as well as levels and intervals of the parameters varying. A scheme is presented for processing and analyzing the experimental findings on dependence between the basic geometric and gas-dynamic ejector parameters and efficiency of the processes occurred inside the chamber.

The proposed methods can be used for designing a regression-and-statistical model of the ejector with an additional source of energy supply, which, in its turn, will let to design an ejector with improved geometrical and gas-dynamic parameters.

Keywords: multivariate experiment, two-dimensional model, ejector unit, wear of the accelerating channel walls, additional source of energy supply.

Статья поступила в редакцию 27.07.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым