

Московский Государственный Технический Университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

На правах рукописи
УДК 62 – 9


Хамади Михаил Искандерович

Разработка математической модели процесса откачки газа
многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором, алгоритма
расчета основных параметров системы пневмовакуумного
разгрузчика сыпучих материалов

Специальность: 2.5.10. «Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная
техника, гидро- и пневмосистемы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре вакуумной и компрессорной техники в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

кандидат технических наук
Очков Андрей Андреевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа
(НИУ) имени И.М. Губкина»
Дроздов Александр Николаевич

кандидат технических наук,
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая
академия имени А.Ф. Можайского»
Министерства обороны Российской
Федерации
Шевченко Артём Васильевич

Ведущая организация:

ФГБООУ ВО «Московский
авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)»

Защита состоится «11» февраля 2026 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.22 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке и на сайте (www.bmstu.ru) Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.22.

Автореферат разослан « » 202 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.331.22 доктор
технических наук, доцент



А.В. Шакуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

В настоящее время вакуумные эжекторы широко используются инженерами и исследователями в различных областях науки и техники в силу малогабаритной конструкции и простоты в эксплуатации. Достижения последних лет в области металлургии, аддитивного производства позволяют изготавливать вакуумные эжекторы сложной конфигурации, требующих обеспечения высокой точности при изготовлении. Использование таких конфигураций даёт возможность повысить эффективность и уменьшить габариты вакуумного эжектора, и, вследствие этого, использовать его в других отраслях промышленности, например, в системе пневмовакуумного разгрузчика – системе, используемой для разгрузки емкостей, заполненных сыпучими материалами. Основным преимуществом данной системы является её мобильность. Несмотря на преимущества системы пневмовакуумного разгрузчика над другими аналогичными системами, предназначенными для транспортировки сыпучего материала из различных емкостей, в настоящее время лидером по производству данных систем является итальянская компания PIAV. Как показал анализ российского рынка оборудования пневматических систем транспортировки сыпучих материалов, в Российской Федерации системы пневмовакуумных разгрузчиков не производятся.

В настоящее время существует множество математических моделей рабочих процессов, протекающих в вакуумном эжекторе классической конфигурации, также существуют работы, описывающие процесс пневматической транспортировки сыпучего материала с использованием вакуумного насоса. Однако, существующие методики расчёта вакуумного эжектора классической и сверхзвуковой конфигураций не позволяют определить рабочие параметры улучшенной конструкции вакуумного эжектора для использования в системе пневмовакуумного разгрузчика.

Объектом исследования: многосопловые сверхзвуковые вакуумные эжекторы, системы пневмовакуумных разгрузчиков сыпучих материалов.

Предмет исследования: процесс течения рабочего и эжектируемого газов, а также их смеси в рабочей полости многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора, входящего в состав системы пневмовакуумного разгрузчика сыпучих материалов.

Цель работы: разработка математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором и алгоритма расчета основных параметров системы пневмовacuумного разгрузчика сыпучих материалов для подготовки и внедрения в деятельность промышленных предприятий практических рекомендаций.

Задачи исследования:

1. Разработка математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором.
2. Исследование влияния различных факторов на параметры многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора.
3. Разработка практических рекомендаций для проектирования многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора.
4. Разработка алгоритма расчета основных параметров системы пневмовacuумного разгрузчика сыпучих материалов.
5. Исследование влияния различных факторов на основные параметры системы пневмовacuумного разгрузчика.
6. Разработка практических рекомендаций для проектирования системы пневмовacuумного разгрузчика сыпучих материалов.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель, описывающая процесс откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором с заданными геометрическими параметрами и различным количеством сверхзвуковых сопел активного газа, расположенных параллельно.
2. Исследовано влияние различных факторов на рабочие параметры многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора, разработаны практические рекомендации для его проектирования.
3. Разработан алгоритм расчета основных параметров системы пневмовacuумного разгрузчика сыпучих материалов.
4. Исследовано влияние различных факторов на основные параметры системы пневмовacuумного разгрузчика сыпучих материалов, разработаны практические рекомендации по их проектированию.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором и алгоритм расчёта основных параметров системы пневмовacuумного разгрузчика, что позволят

проектировать системы пневмовакуумного разгрузчика, в состав которых входит многосопловой вакуумный эжектор, обеспечивающий требуемые рабочие характеристики.

2. Исследовано влияние различных факторов на основные параметры системы пневмовакуумного разгрузчика сыпучих материалов.

3. Разработаны практические рекомендации для проектирования систем пневмовакуумных разгрузчиков сыпучих материалов, в том числе, в состав которых входит многосопловой сверхзвуковой вакуумный эжектор.

4. Результаты работы внедрены в деятельность предприятия ПАО «Казаньоргсинтез» и учебный процесс МГТУ им. Н. Э. Баумана, что подтверждено актами о внедрении.

Публикации:

Основные научные результаты диссертации отражены в 3 научных статьях, в том числе в 2 статьях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в 1 статье из перечня рецензируемых научных журналов и изданий международной базы Scopus.

Апробация работы:

Основные положения, результаты работы обсуждались на конференциях, выставках и заседаниях кафедры вакуумной и компрессорной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана:

1. XVI Всероссийская инновационная молодежная научно-инженерная выставка «Политехника», МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2021).

2. Международный военно-технический форум «АРМИЯ-2021», 2021.

3. Доклады по теме диссертационной работы на заседаниях кафедры вакуумной и компрессорной техники МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021 – 2025 гг.

Положения, выносимые на защиту:

Математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором. Алгоритм расчёта основных параметров системы пневмовакуумного разгрузчика сыпучих материалов. Оценка влияния различных факторов на основные параметры системы пневмовакуумного разгрузчика сыпучих материалов.

Личный вклад соискателя:

Все исследования, представленные в диссертационной работе, проведены лично соискателем совместно с научным руководителем в процессе работы над материалом диссертации. Заимствованный материал в диссертационной работе обозначен ссылками.

Объем и структура работы:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, приложения. Диссертационная работа изложена на 160 страницах, содержит 39 иллюстраций и 14 таблиц. Библиографический список включает 158 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель исследования и поставлены задачи для её достижения, указаны объект исследования, а также научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ научных работ, посвящённых исследованиям разработанных математических моделей рабочих процессов в вакуумных эжекторах классической конфигурации, а также сверхзвуковой, многосопловой и модульной, рассмотрены существующие конструкции вакуумных эжекторов, в том числе многосопловые, и конструкции систем пневмовакuumных разгрузчиков. Сделан вывод о том, что рассмотренные многосопловые конфигурации сверхзвукового эжектора проектировались на основе результатов гидродинамических расчётов в специализированных программных комплексах и что не существует математических моделей процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором; не существует алгоритма расчёта основных параметров систем пневмовакuumных разгрузчиков сыпучих материалов.

На основании проведённого анализа научных работ сформулирована цель диссертационной работы, обоснована её актуальность, поставлены задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость проведённых исследований.

Вторая глава посвящена разработке математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором.

На Рисунке 1 приведена расчётная конструктивная схема продольного разреза пятисоплового сверхзвукового вакуумного эжектора.

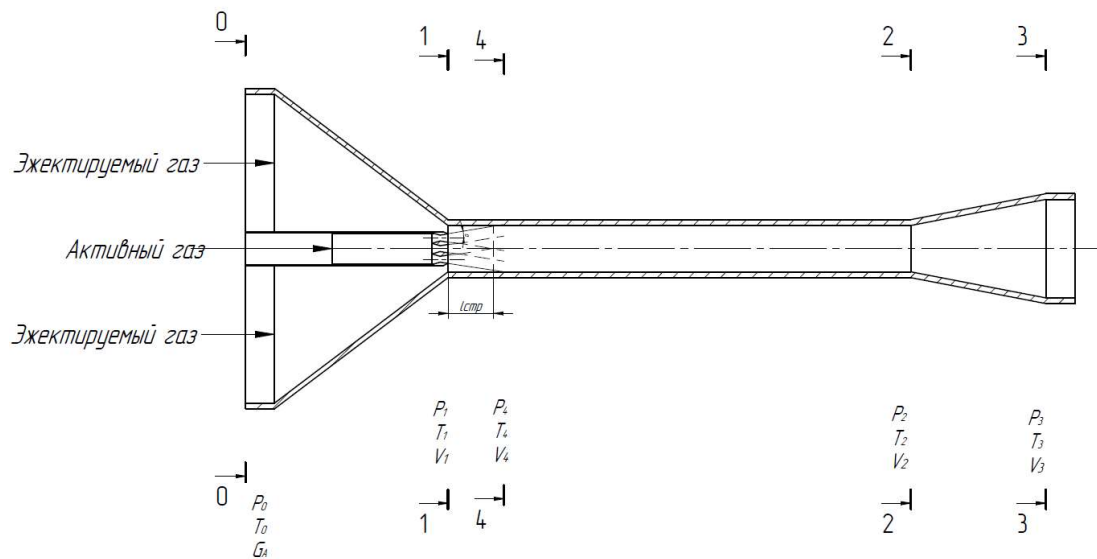


Рисунок 1.

Расчётная схема пятисопловой конфигурации сверхзвукового эжектора

При разработке математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором были приняты следующие допущения:

- активный и эжектируемый газы, а также их смесь в выходном сечении камеры смешения описываются уравнениями состояния идеального газа;
- стенки сопел, камеры смешения и диффузора не теплопроводны и газонепроницаемы;
- течение газа в соплах эжектора одномерное;
- активный и эжектируемый газы на участке между сечениями 1-1 и 4-4 не смешиваются и имеют постоянные полные давления, температуры торможения и расходы;
- взаимодействие сверхзвуковых потоков, образованных сверхзвуковыми соплами, между собой не учитывается;
- рабочий газ равномерно распределяется между сверхзвуковыми соплами.

Постановка задачи, решаемой с использованием разработанной математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым

газовым эжектором, имеет следующий вид: для многосоплового сверхзвукового газового эжектора с цилиндрической камерой смешения найти быстроту действия при следующих заданных параметрах:

- полное давление активного газа на входе в эжектор, P_{A0} ;
- полное давление эжектируемого газа на входе в эжектор, $P_{Э0}$;
- геометрические параметры эжектора, $d_{ex.A}, d_{ex.Э}, d_{к.с.}, l_{к.с.}$;
- род газов;
- полные температуры газов на входе, выходе, T_0, T_3 ;
- давление в выходном сечении эжектора, P_3 .

Последовательность определения быстроты действия многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора следующая:

- задать количество сверхзвуковых сопел;
- определить геометрические параметры сверхзвуковых сопел и параметров активного газа на выходе из них;
- определить параметры активного и эжектируемого газов в сечении запираания (сечение 4 – 4 Рисунок 1);
- определить быстроту действия многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора.

Для определения геометрических параметров сверхзвуковых сопел и параметров активного газа на выходе из них задаются параметры сопла:

- угол входа, α_{ex} ;
- угол раскрытия, α_{exl} ;
- отношение длины участка от входа в сопло до критического сечения, $l_1/d_{кр}$.

При расчете критического диаметра сверхзвукового сопла используется зависимость:

$$d_{кр} = \frac{d_1}{[1 + 2 \cdot r \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{сопла})]}, \quad (1)$$

где $d_{кр}$ – диаметр сопла в критическом сечении; r – отношение длины входного участка сопла к его диаметру в критическом сечении; $\alpha_{сопла}$ – угол сужения сопла; d_1 – диаметр входного сечения в сверхзвуковое сопло активного газа.

Для определения d_l для заданного числа сверхзвуковых сопел $N_{\text{сопел}}$ активного газа с диаметром D_{A0} без изменений геометрических параметров эжектора предложена следующая зависимость:

$$d_l = \frac{D_{A0} - 2 \cdot h_{\text{стенки}} \cdot (N_{\text{сопел}} - 1)}{N_{\text{сопел}}}, \quad (2)$$

где D_{A0} – внутренний диаметр входного патрубка активного газа, $h_{\text{стенки}}$ – толщина стенки сверхзвукового сопла, $N_{\text{сопел}}$ – количество сверхзвуковых сопел.

Значения параметров давления, температуры и скорости активного газа на входе в КС (Рисунок 1, сечение 1–1) будут соответствовать полученным значениям давления, температуры и скорости активного газа в выходном сечении сверхзвукового сопла.

Для определения параметров газа в сечении запираания (Рисунок 1, сечение 4 – 4) по заданным коэффициентам потерь считаются связанные коэффициенты потерь (коэффициент потерь скорости можно задать произвольно только для одного из газов) λ_{A1} или $\lambda_{Э1}$.

Выражение, связывающее эти коэффициенты:

$$P_{A1}^* \left(1 - \frac{n_A - 1}{n_A + 1} \lambda_{A1}^2\right)^{\frac{n_A}{n_A + 1}} = P_{Э1}^* \left(1 - \frac{n_{Э} - 1}{n_{Э} + 1} \lambda_{Э1}^2\right)^{\frac{n_{Э}}{n_{Э} + 1}}, \quad (3)$$

где P_{A1}^* – полное давление активного газа в сечении 1 – 1, $P_{Э1}^*$ – полное давление эжектируемого газа в сечении 1 – 1, n_A и $n_{Э}$ – показатели адиабаты активного и эжектируемого газов соответственно, λ_{A1} и $\lambda_{Э1}$ – приведенные скорости активного и эжектируемого газов в сечении 1 – 1.

Расчёт полных давлений газов в сечении 1–1 (с использованием коэффициентов потерь скорости и рассчитанных и заданных давлений):

$$P_{A1}^* = P_{A0}^* \cdot v_A; \quad (4)$$

$$P_{Э1}^* = P_{Э0}^* \cdot v_{Э}, \quad (5)$$

где v_A и $v_{Э}$ – коэффициенты потери скорости активного и эжектируемого газов соответственно, P_{A0}^* и $P_{Э0}^*$ – полные давления активного и эжектируемого газов в сечении 0 – 0 соответственно.

В ходе работы при расчёте λ_{A4} и $\lambda_{Э1}$ – приведенных скоростей активного и эжектируемого газов в сечении 4 – 4 соответственно использован блок численного решения со следующими граничными условиями:

$$\alpha \cdot \frac{\frac{P_{\text{Э1}}}{(1 - \frac{n_{\text{Э}} - 1}{n_{\text{Э}} + 1} \cdot \lambda_{\text{Э1}}^2)^{\frac{n_{\text{Э}}}{n_{\text{Э}} - 1}}}}{P_{\text{А1}}^*} \cdot \frac{\lambda_{\text{Э1}} \cdot (1 - \frac{n_{\text{Э}} - 1}{n_{\text{Э}} + 1} \cdot \lambda_{\text{Э1}}^2)^{\frac{1}{n_{\text{Э}} - 1}}}{\lambda_{\text{А1}} \cdot (1 - \frac{n_{\text{А}} - 1}{n_{\text{А}} + 1} \cdot \lambda_{\text{А1}}^2)^{\frac{1}{n_{\text{А}} - 1}}} \cdot (\lambda_{\text{Э1}} + \frac{1}{\lambda_{\text{Э1}}} - 2) -$$

$$(1 + \alpha) \cdot \delta \cdot \frac{P_{\text{Э1}}}{(1 - \frac{n_{\text{Э}} - 1}{n_{\text{Э}} + 1} \cdot \lambda_{\text{Э1}}^2)^{\frac{n_{\text{Э}}}{n_{\text{Э}} - 1}}} \cdot (1 - \frac{n_{\text{Э}} - 1}{n_{\text{Э}} + 1} \cdot \lambda_{\text{Э1}}^2)^{\frac{1}{n_{\text{Э}} - 1}}$$

$$-(\lambda_{\text{А4}} + \frac{1}{\lambda_{\text{А1}}} - (\lambda_{\text{А1}} + \frac{1}{\lambda_{\text{А1}}})) + \frac{1}{(1 - \delta) \cdot P_{\text{А1}}^* \cdot (1 - \frac{n_{\text{А}} - 1}{n_{\text{А}} + 1} \cdot \lambda_{\text{А1}}^2)^{\frac{1}{n_{\text{А}} - 1}}} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{1 + \alpha}{1 - \delta} = \frac{\lambda_{\text{А1}} \cdot (1 - \frac{n_{\text{А}} - 1}{n_{\text{А}} + 1} \cdot \lambda_{\text{А1}}^2)^{\frac{1}{n_{\text{А}} - 1}}}{\lambda_{\text{А4}} \cdot (1 - \frac{n_{\text{А}} - 1}{n_{\text{А}} + 1} \cdot \lambda_{\text{А4}}^2)^{\frac{1}{n_{\text{А}} - 1}}} + \alpha \cdot \lambda_{\text{Э1}} \cdot (1 - \frac{n_{\text{Э}} - 1}{n_{\text{Э}} + 1} \cdot \lambda_{\text{Э1}}^2)^{\frac{1}{n_{\text{Э}} - 1}} \cdot (\frac{n_{\text{Э}} + 1}{2})^{\frac{1}{n_{\text{Э}} - 1}}; \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{А4}} = \sqrt{\frac{n_{\text{А}} + 1}{n_{\text{А}} - 1} \cdot (1 - (\frac{\frac{P_{\text{Э1}}}{(1 - \frac{n_{\text{Э}} - 1}{n_{\text{Э}} + 1} \cdot \lambda_{\text{Э1}}^2)^{\frac{n_{\text{Э}}}{n_{\text{Э}} - 1}}} \cdot (\frac{2}{n_{\text{Э}} + 1})^{\frac{n_{\text{Э}}}{n_{\text{Э}} - 1}}}{P_{\text{А1}}^*})^{\frac{n_{\text{А}} - 1}{n_{\text{А}}}})}, \quad (8)$$

где α – отношение площади выходного сечения сопла эжектируемого газа к площади выходного сечения сопла активного газа, δ – отношение площади торцев сопел активного газа к площади камеры смешения в сечении 1–1.

Сечение запираания пятисоплового эжектора может иметь форму, представленную на Рисунке 2, где заштрихованная область обозначает площадь сечения, занимаемую рабочим газом.

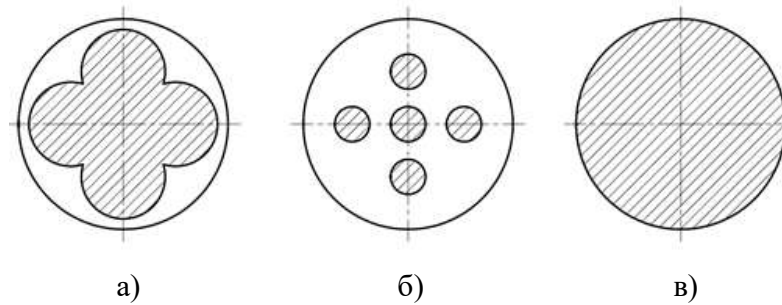


Рисунок 2.

Варианты сечений запираания для пятисоплового эжектора

Определение параметров газов в сечении запираания:

- давление эжектируемого газа в сечении запираания:

$$P_{\text{э4}} = P_{\text{э1}}^* \left(\frac{2}{n_{\text{э}} + 1} \right)^{\frac{n_{\text{э}}}{n_{\text{э}} - 1}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{э4}}$ – давление эжектируемого газа в сечении 4 – 4;

- приведенная скорость активного газа в сечении запираания:

$$\lambda_{\text{А4}} = \sqrt{\frac{n_{\text{А}} + 1}{n_{\text{А}} - 1} \left(1 - \left(\frac{P_{\text{э4}}}{P_{\text{А4}}^*} \right)^{\frac{n_{\text{А}} - 1}{n_{\text{А}}}} \right)} \quad (10)$$

- сумма площадей струй активного газа в сечении запираания.

При определении расхода эжектируемого газа $G_{\text{э}}$, использована зависимость при $\lambda_{\text{э4}} = 1$:

$$G_{\text{э}} = \rho_{\text{э4}} \cdot \lambda_{\text{э4}} \cdot a_{\text{к.э}} \cdot F_{\text{э4}} = \frac{P_{\text{э1}}^* \cdot F_{\text{э4}}}{\sqrt{R_{\text{э}} \cdot T_{\text{э}}^*}} \cdot \sqrt{n_{\text{э}} \cdot \left(\frac{2}{n_{\text{э}} + 1} \right)^{\frac{n_{\text{э}} + 1}{n_{\text{э}} - 1}}}, \quad (11)$$

где $F_{\text{э4}}$ - площадь сечения запираания, занимаемая эжектируемым газом, $R_{\text{э}}$ – газовая постоянная эжектируемого газа, $T_{\text{э}}^*$ – температура торможения эжектируемого газа.

По известному массовому расходу эжектируемого газа определяется быстрота действия эжектора $S_{\text{н}}$ путём пересчёта массового расхода откачиваемого газа на условия всасывания:

$$S_{\text{н}} = \frac{G_{\text{э}}}{\rho_{\text{э}}}, \quad (12)$$

где $\rho_{\text{э}}$ – плотность эжектируемого газа для условий в сечении 0-0.

Разработанная математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором верифицирована путём сравнения результатов расчета с экспериментальными данными. На Рисунке 3 точками обозначены экспериментальные данные, линиями – результаты аналитического расчёта.

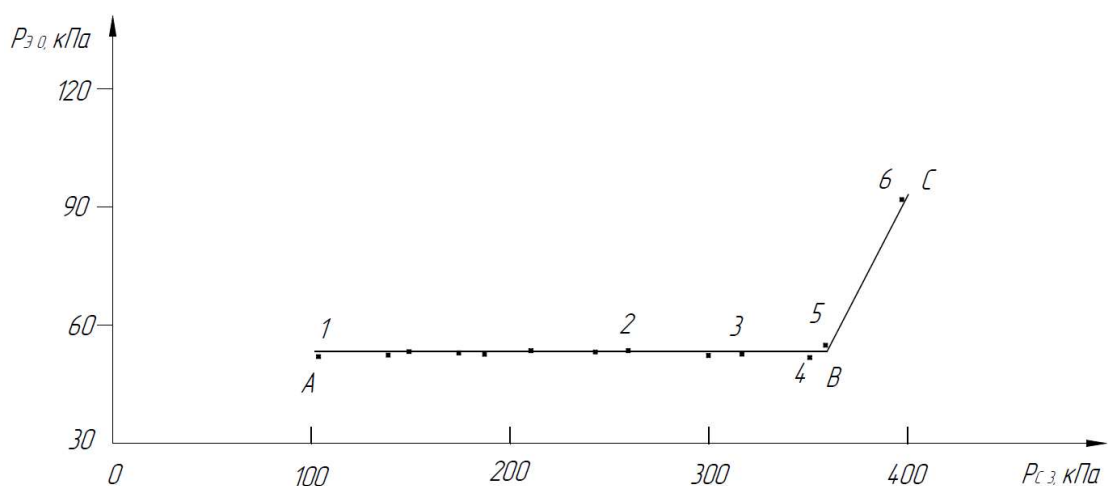


Рисунок 3.

Дроссельная характеристика односоплового сверхзвукового вакуумного эжектора

Максимальное расхождение результатов расчета с экспериментальными данными не превысило 9 %.

Третья глава посвящена численному эксперименту по определению параметров газов в рабочих полостях многосопловых конфигураций сверхзвукового эжектора. Численный эксперимент проведён в программном комплексе Ansys Fluent. Для обоснования выбора программного комплекса для проведения численного эксперимента в выбранном программном комплексе (Ansys Fluent) выполнен расчет с помощью численных методов гидродинамики (CFD) конфигурации эжектора, с экспериментальными данными испытаний которого проводилось сравнение результатов аналитических расчётов, полученных с использованием разработанной математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором, расхождение результатов CFD расчета с экспериментальными данными не превысило 17%. Сделан вывод, что выбранный программный комплекс с указанными настройками CFD расчёта можно использовать для проведения численного эксперимента по определению рабочих параметров многосопловых конфигураций сверхзвукового вакуумного эжектора.

Результаты численного эксперимента и аналитического расчёта конфигураций многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора,

полученные с использованием разработанной математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором приведены в Таблице 1. Расхождение не превысило 15.1 %.

Таблица 1.

Результаты численного эксперимента и аналитических расчетов
многосопловых конфигураций сверхзвукового вакуумного эжектора

Вариант расчёта	Количество сопел	Аналитический расчёт			Численный эксперимент			Расхождение		
		$G_{э}$, кг/с	$v_{вых}$, м/с	$P_{нагн}$, кПа	$G_{э}$, кг/с	$v_{вых}$, м/с	$P_{нагн}$, кПа	ΔG , %	Δv , %	ΔP , %
1	3	0.047	111.4	741.8	0.055	125.8	693	14.5	12.9	7.0
2	3	0.613	149.0	162.1	0.69	156.3	156	11.16	4.67	3.9
3	4	0.038	111.5	764	0.037	115.8	658	2.7	3.92	13.9
4	5	0.392	111.3	303	0.42	122.5	347	7.14	9.13	12.7
5	7	0.028	111.5	745	0.025	128.2	632	10.7	13.05	15.1

Разработаны практические рекомендации по проектированию многосопловых конфигураций сверхзвуковых вакуумных эжекторов: для обеспечения высоких значений скорости действия многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора следует выбирать конструкцию с тремя сверхзвуковыми соплами активного газа с полным давлением 2 ...2,5 атм.; для уменьшения габаритных размеров камеры смешения вакуумного эжектора следует выбирать конструкцию с пятью сверхзвуковыми соплами активного газа.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритма и программы расчета основных параметров системы пневмовакuumного разгрузчика (ПВР) сыпучих материалов (далее системы пневмовакuumного разгрузчика), в состав которой входит многосопловой сверхзвуковой вакуумный эжектор, и исследованию влияния различных факторов на основные параметры системы пневмовакuumного разгрузчика с использованием разработанной программы расчёта.

Принцип действия системы ПВР (Рисунок 5) основан на принципе пневматической транспортировки сыпучего материала, которая представляет собой движение по трубопроводу двухфазного потока газ – твердые частицы.

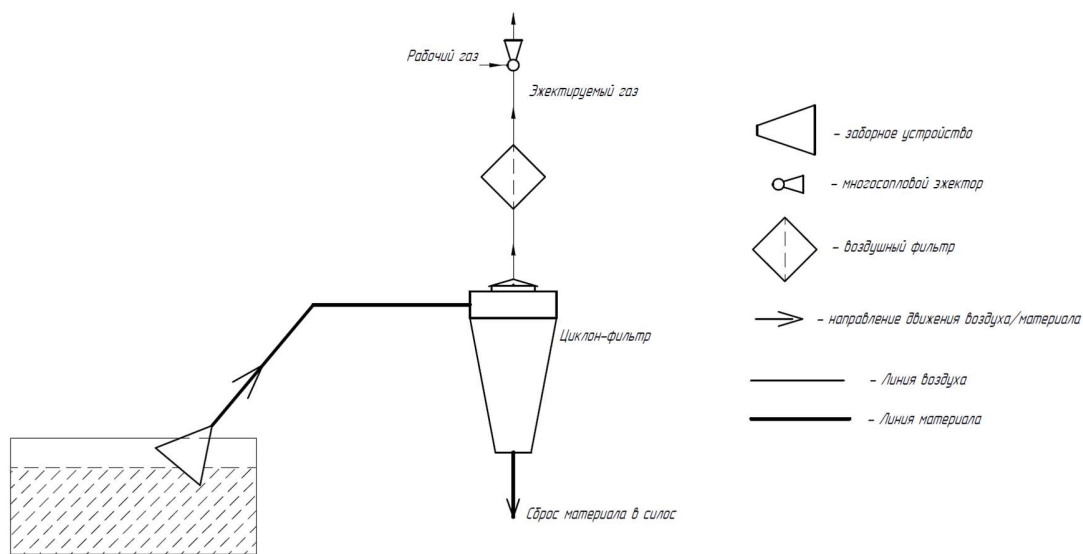


Рисунок 5.
Схема ПВР

Основными параметрами ПВР являются:

- производительность по материалу G , т/ч;
- максимальная длина транспортировки материала l_{max} , м;
- максимальная высота подачи материала h_{max} , м;
- максимальная длина вакуумной магистрали $l_{вак}$, м.

Основные этапы расчета включают определение потерь давления, скорости потока рабочего газа, а также выбор подходящего оборудования.

Исходными данными для такого расчета будут:

- массовая производительность системы, кг/ч;
- свойства транспортируемого материала;
- общая длина трубопровода, м;
- род рабочего газа.

Для расчета потока газа, откачиваемого вакуумным эжектором $S_{вак}$ системы ПВР, обеспечивающего требуемую массовую производительность системы, предложена зависимость:

$$S_{вак} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \bar{p} \cdot (p_1 - p_2)}{8 \cdot l_{прив} \cdot \eta} \cdot \frac{m^3 Pa}{c}, \quad (13)$$

где R – радиус поперечного сечения трубопровода, м; $\bar{p} = \frac{(p_1 + p_2)}{2}$ – среднее давление в трубопроводе, Па; $l_{прив}$ – приведенная длина трубопровода, м; η – динамическая вязкость, Па/с.

Блок – схема программы разработанного алгоритма расчета основных параметров системы ПВР, в состав которой входит многосопловой сверхзвуковой эжектор представлена на Рисунке 6.

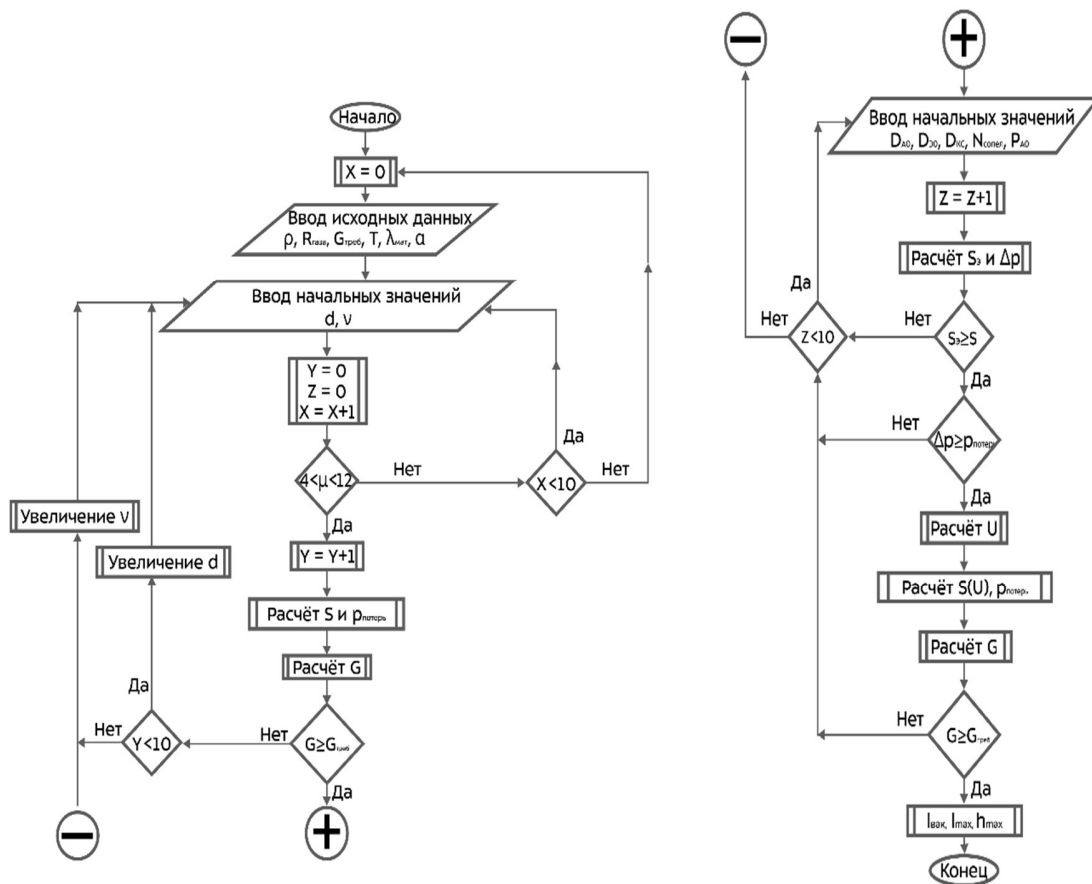


Рисунок 6.

Блок-схема программы расчета максимальной массовой производительности системы пневмовакuumного разгрузчика в состав, которой входит многосопловой сверхзвуковой вакуумный эжектор

Исследовано влияние различных факторов на основные параметры системы ПВР (Рисунок 7).

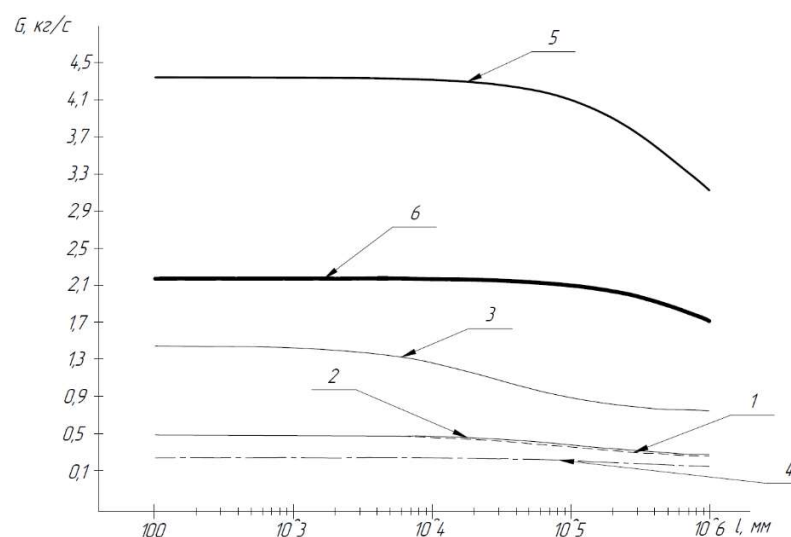


Рисунок 7.

Влияние различных факторов на основные параметры системы пневмовакуумного разгрузчика

Значения параметров, влияние которых было исследовано, и которые соответствуют обозначенным на Рисунке 7 кривым 1 – 6, приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Параметры кривых, принятые при исследовании влияния различных факторов на основные параметры системы пневмовакуумного разгрузчика

Номер кривой	Значения параметров		
	Внутренний диаметр трубопровода, мм	Перепад давления, кПа	Скорость потока газа, м/с
1	80	30	10
2	80	90	10
3	80	30	30
4	80	90	5
5	240	30	10
6	240	15	5

На основании результатов исследования, проведённого с помощью разработанной программы расчёта основных параметров системы

пневмовакуумного разгрузчика, были разработаны практические рекомендации для проектирования соответствующих систем: для увеличения массовой производительности системы пневмовакуумного разгрузчика следует использовать вакуумный эжектор с 3 сверхзвуковыми соплами активного газа, полное давление которого на входе в эжектор находится в диапазоне от 2 атм. до 2,5 атм.; значение массовой концентрации μ материала в трубопроводе должно находиться в диапазоне 6..8 для уменьшения величины потерь давления. Для уменьшения потерь массовой производительности по материалу по длине трубопровода в системах пневмовакуумного разгрузчика, использующих трубопровод с внутренним диаметром более 200 мм, рекомендуется транспортировать материал со скоростью 5..10 м/с, для диаметра трубопровода менее 200 мм – со скоростью 12..20 м/с.

Основные результаты и выводы по работе

1. Разработана математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором, позволяющая определить быстроту действия и создаваемый перепад давлений таким эжектором, геометрические параметры эжектора определенной многосопловой конфигурации для обеспечения требуемых рабочих параметров. Разработанная математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором верифицирована сравнением результатов аналитических расчетов с экспериментальными данными, расхождение не превысило 9%. Проведен численный эксперимент для многосопловых сверхзвуковых конфигураций вакуумного эжектора с различными геометрическими параметрами, количеством сверхзвуковых сопел и параметрами рабочего и эжектируемого газов на входе в эжектор. Расхождение между результатами численного эксперимента и аналитического расчета не превысило 15%.

2. Исследовано влияние количества сверхзвуковых сопел и параметров активного газа на входе в эжектор на геометрические и рабочие параметры многосоплового вакуумного эжектора. Разработаны практические рекомендации для проектирования многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора: для увеличения быстроты действия многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора следует выбирать конструкцию с тремя сверхзвуковыми соплами активного газа с полным давлением 2...2,5 атм.; для уменьшения габаритных размеров вакуумного эжектора следует выбирать конструкцию с пятью сверхзвуковыми соплами активного газа.

3. Разработаны алгоритмы и программы расчета основных параметров системы пневмовакуумного разгрузчика сыпучих материалов.

4. Исследовано влияние рабочих параметров вакуумного эжектора, геометрических параметров трубопровода, скорости рабочего газа на основные параметры системы пневмовакуумного разгрузчика сыпучих материалов. Разработаны практические рекомендации для проектирования системы пневмовакуумного разгрузчика: для увеличения массовой производительности системы пневмовакуумного разгрузчика следует использовать вакуумный эжектор с 3 сверхзвуковыми соплами активного газа, полное давление которого на входе в эжектор находится в диапазоне от 2 атм. до 2,5 атм; значение массовой концентрации μ материала в трубопроводе должно находиться в диапазоне 6..8 для уменьшения потерь давления; для уменьшения потерь массовой производительности по материалу по длине трубопровода в системах пневмовакуумного разгрузчика, использующих трубопровод с внутренним диаметром более 200 мм, рекомендуется транспортировать материал со скоростью 5..10 м/с, для диаметра трубопровода менее 200 мм – со скоростью 12..20 м/с.

5. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана и деятельность предприятия ПАО «Казаньоргсинтез».

По теме диссертационного исследования автором опубликованы следующие работы:

1. Ochkov A.A., Hamadi M.I., Vartanyan A.E. Prospects of the pneumatic hemostatic powder delivery system use for surgical operations // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2549, No. 1. P. 210017. (0,31 пл./0,1 пл.).

2. Очков А. А., Хамади М. И. Математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. вып. №12, 2024, 19 с. (1,19 пл./0,6 пл.).

3. Очков А. А., Годорожа С. В., Хамади М. И. Исследование процесса пневмотранспорта гранул полиэтилена в поворотных коленах трубопровода // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 11. С. 79-88. (0, 56 пл./0,19 пл.).