

*На правах рукописи*



**ЛЕОНТЬЕВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАХТНЫХ  
ТРУБОПРОВОДНЫХ ПНЕВМОПОДЪЁМНЫХ УСТАНОВОК**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**Научный руководитель**      **Таугер Виталий Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической механики ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**Официальные оппоненты:**

**Залазинский Александр Георгиевич** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории системного моделирования ФГБУН «Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН» (г. Екатеринбург)

**Зверев Валерий Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горной электромеханики (ГЭМ) ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь)

**Ведущая организация**      ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» («МГТУ им. Г.И. Носова»)

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.423.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» в зале заседаний Ученого совета по адресу: 620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30, 2-ой учебный корпус, ауд. 2142.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»: <https://ursmu.ru/zashhita-leontev>

Автореферат диссертации разослан «23» октября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент

 А.Е. Пелевин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Скиповая подъёмная установка выполняет на горнодобывающем предприятии чрезвычайно важную функцию транспортирования ископаемого с горизонтов на поверхность. Бесперебойная ритмичная работа предприятия обеспечивается достаточно высокой эффективностью скипового подъёма. Недостатки канатных подъёмных установок, проявившиеся с увеличением глубины месторождений и повышением скорости проходческих и очистных работ, привели к выводу о необходимости поиска альтернативных способов шахтного подъема, обладающих более высокой удельной производительностью. В начале 1990-х годов была предложена конструкция скиповой пневмоподъёмной установки, перемещение гружёного скипа в которой осуществляется за счёт энергии сжатого воздуха, причём скип движется непосредственно по стволу, полностью перекрывая его сечение. Шахтная пневмоподъёмная установка (ППУ) была свободна от недостатков канатных установок, но имела собственные, препятствующие широкому применению данной конструкции. Следующим шагом развития пневмоподъёма стали более совершенные в конструктивном отношении трубопроводные установки, исследование которых ведётся с 2015 г. Их разработчики столкнулись с отсутствием теоретической базы, не позволяющим осуществлять достоверные проектировочные расчёты. Учитывая конструктивную привлекательность и прогнозируемые высокие эксплуатационные характеристики трубопроводной системы, следует считать актуальным исследование, направленное на обоснование её рациональных параметров на стадии проектирования.

**Объект исследования** – подъёмная установка как комплекс устройств, обеспечивающих вертикальное перемещение ископаемого по трубопроводам с помощью сжатого воздуха.

**Предмет исследования** – физические процессы, протекающие в трубопроводной пневмоподъёмной установке при энергетическом взаимодействии её компонентов.

**Цель исследования** – обоснование рациональных кинематических, динамических, геометрических и энергетических параметров трубопроводного пневмоподъема с помощью разработанной математической модели установки.

**Идея исследования** заключается в том, что оптимальные по критериям производительности и эффективности параметры ППУ возможно определить на основе развернутой математической модели, учитывающей комплекс воздействующих факторов, связанных с работой установки.

### **Задачи исследования:**

1. Оценка наиболее перспективных конструктивных схем ППУ на основе обобщённых критериев.
2. Получение аналитических зависимостей для определения оптимальных по критериям производительности и энергопотребления геометрических и энергетических параметров замкнутой схемы ППУ, для теоретического описания теплообменных процессов в подъемном трубопроводе установки, для описания кинематических параметров скипа в подъемном и спускном трубопроводах.

3. Теоретическое исследование влияния зазоров в направляюще-уплотнительных устройствах на объёмный КПД установки.

4. Разработка методики физического эксперимента, позволяющего оценить снижение объёмного КПД установки вследствие утечки воздуха через бесконтактные направляюще-уплотнительные устройства.

#### **Научная новизна:**

1. Предложена классификация трубопроводных ППУ по конструктивным признакам и установлено, что наименьшей материало- и энергоёмкостью обладает установка, выполненная по двухтрубной замкнутой схеме.

2. Выведены формулы для нахождения конструктивных и энергетических параметров трубопроводной пневмоподъёмной установки замкнутой схемы; получено теоретическое описание теплообменных процессов в подъёмном трубопроводе, позволяющее аналитически определить среднюю скорость гружёного сосуда; получено теоретическое описание теплообменных процессов в подъёмном трубопроводе, позволяющее аналитически определить среднюю скорость гружёного сосуда; получены формулы, описывающие кинематику порожнего сосуда в спускном трубопроводе.

3. Определена зависимость давления в спускном трубопроводе под порожним сосудом от времени движения, положенная в основу способа повышения ускорения гружёного сосуда за счёт рекуперации кинетической энергии порожнего сосуда.

4. Получены формулы, позволяющие прогнозировать величину объёмного КПД установки в зависимости от расхода воздуха в трубопроводах и зазора в бесконтактных направляюще-уплотнительных устройствах.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Получены аналитические зависимости для определения основных конструктивных и энергетических характеристик трубопроводной пневмоподъёмной установки по техническому заданию горнодобывающего предприятия на стадии проекторочного расчёта.

2. Предложены конструкции трубопровода, загрузочной и разгрузочной станций, направленные на снижение аэродинамического сопротивления трубопровода и уменьшение времени рабочего цикла установки.

3. Предложены конструкции адаптивных уплотнений зазора между сосудом и стенкой трубопровода, способных в зависимости от величины избыточного давления воздуха изменять свой вид с контактных на бесконтактные и повысить таким образом их долговечность при ограничении утечки допустимым значением.

**Методология и методы исследования.** Методы исследования включают теоретический анализ физических процессов и синтез зависимостей, формирующих математическую модель ППУ, математическое моделирование, физическое моделирование и лабораторный эксперимент.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Наиболее перспективной по критериям производительности и энергопотребления следует считать схему ППУ с двумя трубопроводами, один из которых служит для подъёма гружёного, а другой – для спуска порожнего сосуда.

2. Основные конструктивные и функциональные параметры двухтрубной замкнутой схемы с компенсацией собственного веса сосуда следует определять

с учетом теплообмена между воздушным потоком в подъемном трубопроводе и атмосферой в стволе.

3. Адаптивные уплотнения, способные в зависимости от перепада давления воздуха изменять вид с контактных на бесконтактные, являются оптимальными по критериям их долговечности и объемного КПД установки.

**Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций** обоснована корректным использованием положений аэро- и термодинамики, механики жидкости и газа, теоретической механики, методов математического и физического моделирования, теории подобия, апробированных методов экспериментальных исследований, теорий вероятности и математической статистики и подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, относительное расхождение которых не превышает пределов, обусловленных физическими особенностями исследуемых объектов.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы и ее отдельные положения представлены на научно-практической конференции «Уральская горная школа – регионам», Екатеринбург, 2018 г.; научно-практической конференции «Уральская горная школа – регионам», Екатеринбург, 2019 г.; научно-практической конференции «Математическое моделирование механических явлений», Екатеринбург, 2019 г.

**Личный вклад соискателя** состоит в разработке классификации ППУ по количеству сосудов и трубопроводов, сравнительном анализе различных схем, выводе аналитических зависимостей, формирующих математическую модель ППУ и позволяющих определить кинематические и энергетические параметры установки, составлении методики и проведении физического моделирования.

**Реализация результатов работы.** Основные результаты работы получили одобрение и переданы для использования в ОАО «УГМК» (заключение от 26.05.2021 г.). В заключении специалистов компании указано, что схемы и математическая модель ППУ представляют практический интерес, и после проектно-конструкторской проработки установка может быть рассмотрена как вариант скипового подъема нового рудника.

Результаты работы планируются к внедрению в учебный процесс кафедры технической механики ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе пять работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и в одном патенте на изобретение.

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников из 112 наименований. Основной текст работы изложен на 178 страницах, включая 15 таблиц, 59 рисунков, имеет 5 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований, поставлены их цели и задачи, представлены научные положения, выносимые на защиту, описаны методы исследований, обоснована научная и практическая значимость работы, описан личный вклад автора, реализация и апробация результатов.

**В первой главе** рассматривается современный уровень развития шахтных скиповых подъемных установок и их недостатки в текущих условиях, описываются известные альтернативные способы шахтного подъема.

Высокий уровень развития современных канатных скиповых установок достигнут благодаря трудам академиков М. М. Фёдорова, А. П. Германа, А. С. Ильичёва, профессоров Ф. Н. Шклярского, Г. М. Еланчика, В. Б. Уманского, Б. А. Носырева, Г. Д. Трифанова. Большая работа выполнена Ю. В. Поповым, С. М. Кубаревым и др.

Поиски альтернативных способов транспортирования ископаемого ведутся с конца прошлого века. В 1991 г. Ю. А. Николаевым была предложена схема ППУ, которая, согласно расчёту, позволяет обеспечить производительность, недостижимую канатным подъёмом. Однако данная схема обладает следующими серьёзными недостатками:

- скип и направляюще-уплотнительные устройства (НУУ) перекрывают поперечное сечение ствола, вследствие чего невозможно использовать ствол с другими целями, например, для проветривания шахты;

- количество НУУ в глубоком стволе достигает нескольких сотен, в результате чего увеличиваются стоимость установки и затраты на её эксплуатацию;

- НУУ создают существенное аэродинамическое сопротивление воздушному потоку в стволе, приводящее к завышению энергозатрат нагнетательной станции.

Отмеченных недостатков лишены трубопроводные ППУ, разработка которых ведётся в Уральском государственном горном университете с 2015 г. Их отличие от установки конструкции Ю. А. Николаева состоит в том, что скип, снабжённый НУУ, перемещается в трубопроводе, диаметр которого значительно меньше диаметра ствола. Один или несколько трубопроводов размещаются в стволе, занимая лишь часть его поперечного сечения. Прогноз, основанный на оценочных расчётах, показал перспективность использования подобных систем в качестве высокопроизводительного транспорта.

В то же время для обеспечения достоверности проектировочных расчётов потребовался учёт специфики физических процессов в сложных системах, включающих порожний и гружёный скипы, спускной и подъёмный трубопроводы, нагнетатель, а также воздушный поток в качестве энергоносителя. Возникла настоятельная необходимость в полноценной математической модели (ММ) трубопроводной ППУ.

В дальнейшем под ППУ подразумевается трубопроводная установка.

**Во второй главе** приводится описание возможных схем построения ППУ и описывается ММ трубопроводной ППУ.

Принцип трубопроводного пневмоподъёма предоставляет возможность создания разнообразных систем, обеспечивающих широкий диапазон производительностей и максимально адаптированных к конкретным условиям эксплуатации.

На рисунке 1 показан вариант конструктивного исполнения ППУ.

Установка содержит подъёмный 1 и спускной 2 трубопроводы, смонтированные в шахтном стволе (на рисунке 1 не показан), разгрузочную 3 и загрузочную 4 станции, воздуходувку 5 и распределительную систему 6, в которую входят краны 7 – 10. Поворотная секция (на рисунке 1 позицией не обозначена) снабжена фиксаторами 11 скипа.

Поток воздуха под повышенным давлением от нагнетательной станции 5 перемещает гружёный скип по трубопроводу 1 к поверхности, в то время как порожний скип под собственным весом спускается по трубопроводу 2. На разгрузочной станции скип, удерживаемый фиксаторами 11 в поворотной секции, опорожняется в бункер, после чего подаётся в трубопровод 2. Порожний сосуд (скип) на загрузочной станции 4 перемещается на позицию загрузки, а затем в трубопровод 1. Распределительная система 6 обеспечивает подачу воздуха из спускного трубопровода 2 на вход нагнетательной станции 5.

Данная схема ППУ защищена патентом.

Сосуд 1 (рисунке 2) представляет собой капсулу (корпус) 2, снабжённую уплотнениями 3, которые обеспечивают её центрирование в трубопроводе 4 при достаточно высоком объёмном КПД установки. Трубопроводы и сосуды выполнены из композитов и обладают высокими физико-механическими показателями и малым собственным весом.

Устройство различных ППУ поясняется на рисунке 3.

Однотрубная односкиповая установка (рисунке 3, а) содержит трубопровод 1, скип 2, нагнетатель 3 с пневмосистемой 4, а также загрузочную 5 и разгрузочную 6 станции.

Однотрубная многоскиповая установка показана на рисунке 3, б (компонентам присвоены те же позиции, что и на рисунке 3, а). Выдача ископаемого производится двумя или более сосудами, а в загрузочную 5 и разгрузочную 6 станции входят накопители. В накопителе станции 5 порожний сосуд ожидает загрузки и подъёма, а в накопителе станции 6 – спуска. Ещё большей производительностью

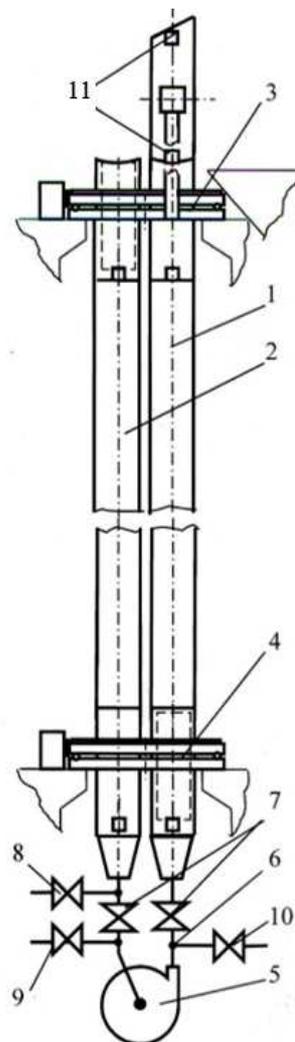


Рисунок 1 – Конструкция ППУ

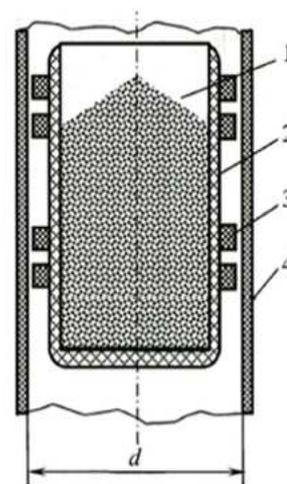


Рисунок 2 – Сосуд

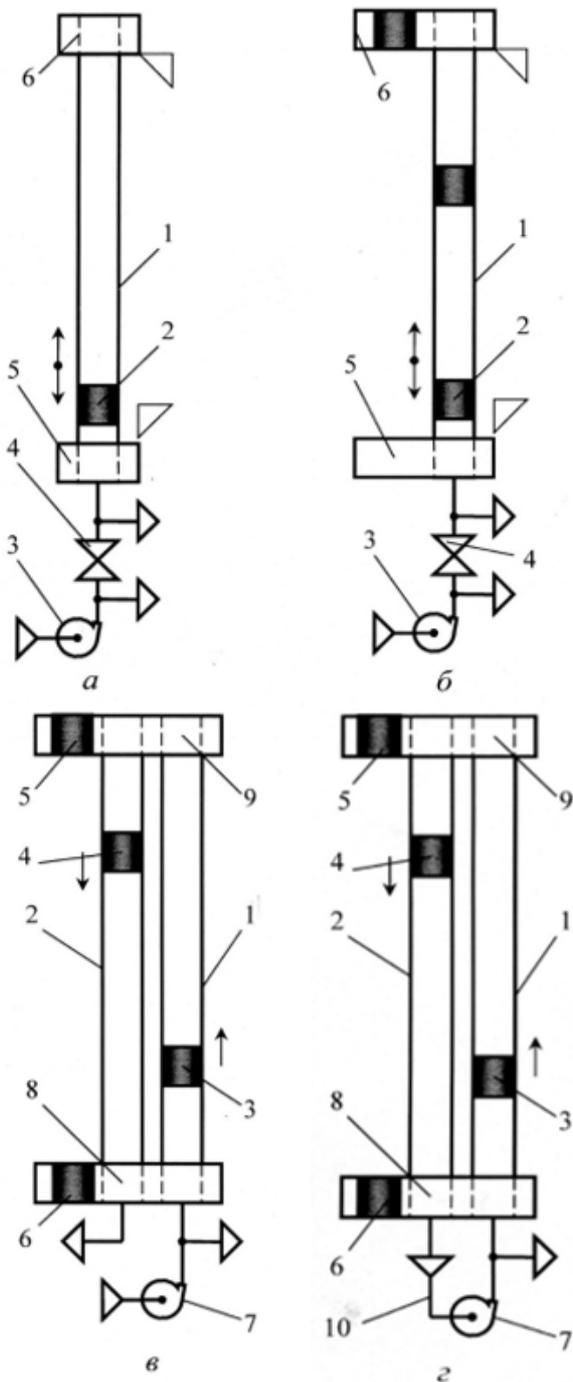


Рисунок 3 – Конструктивные разновидности ППУ

сти системы, критерием которой служит средневзвешенный КПД установки.

Средневзвешенный КПД определялся по формуле

$$\bar{\eta} = \eta \frac{m_m t_{\text{п}}}{(m_m + m_c) t_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где  $\eta = 0,8$  – номинальный КПД нагнетателя;  $t_{\text{п}}$  – время подъёма;  $t_{\text{ц}}$  – длительность цикла;  $m_m$  – ёмкость сосуда (масса транспортируемого материала);  $m_c$  – собственная масса скипа.

обладает *двухтрубная четырёхскиповая* ППУ (рисунок 3, в). В неё входят подъёмный 1 и спускной 2 трубопроводы, сосуды 3 – 6, нагнетатель 7, загрузочная 8 и разгрузочная 9 станции с накопителями скипов. Станции 8 и 9 оборудованы также устройствами для перемещения сосудов из одного трубопровода в другой. С целью снижения невозвратных потерь энергии предложена *двухтрубная система с замкнутой схемой*, в которой вытесняемый порожним сосудом воздух подаётся во входное окно нагнетателя (рисунок 3, г). К элементам, входящим в ППУ по рисунку 3, в, в замкнутой схеме добавляется воздухопровод 10, соединяющий нижнее сечение спускного трубопровода 2 со входом воздухонагнетательного агрегата (воздуходувки).

В *двухтрубной разомкнутой* схеме длительность паузы в подаче сжатого воздуха от нагнетателя в подъёмный трубопровод снижена до времени, необходимого для выполнения операций загрузки-разгрузки и перестановки сосудов из одного трубопровода в другой. Однако для разомкнутой схемы характерны затраты энергии на подъём собственной массы сосуда.

*Двухтрубная замкнутая система* свободна от указанного недостатка. Рекуперация энергии порожнего сосуда путём подачи воздуха из спускного трубопровода во входное окно воздухонагнетательного агрегата в период спуска позволит устранить затраты энергии на подъём собственной массы гружёного сосуда и добиться максимальной энергоэффективности

В качестве второго критерия эффективности использовано отношение ожидаемой производительности схемы ППУ к однотрубной односкиповой, т. е. относительная производительность  $\bar{Q}$ . Установлено, что наивысшими значениями критериев обладает двухтрубная четырехскиповая ППУ с замкнутой схемой.

Синхронность прибытия порожнего сосуда на загрузочную, а грузёного – на разгрузочную станции обеспечивается выполнением диаметра трубопроводов в соответствии с формулой:

$$d = \sqrt{\frac{2Q_0\rho_{0r}}{\pi\rho_0\bar{v}} + \sqrt{\left(\frac{2Q_0\rho_{0r}}{\pi\rho_0\bar{v}}\right)^2 + \frac{16Q_0\rho_{0r}(m_n + m_c)g}{\pi^2\bar{v}\rho_0 p_0}}}, \quad (2)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубопроводов;  $Q_0$  – значение расхода во входном сечении трубопровода;  $\rho_0$  – плотность воздуха при нормальных условиях;  $\rho_{0r}$  – плотность воздуха при атмосферном давлении и температуре, которую воздух приобретает, пройдя через воздухоудувку;  $m_n, m_c$  – масса ископаемого и собственная масса сосуда соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\bar{v}$  – средняя по глубине ствола скорость потока;  $p_0$  – атмосферное давление.

Оценочные расчеты подтверждают перспективность ППУ как высокопроизводительного транспортного средства.

На рисунке 4 приведены графики, иллюстрирующие зависимость прогнозируемой производительности от глубины шахты и диаметра трубопроводов для следующих исходных параметров:

- средняя скорость подъема – 20 м/с;
- избыточное статическое давление, развиваемое воздухоудувкой – 50 кПа;
- ряд диаметров трубопроводов, м: 1,0; 1,2; 1,4; 1,6;
- схема двухтрубная четырехскиповая. Кроме того, дан прогноз производительности трехтрубной схемы с диаметром трубопроводов 1,6 м. Значения давления и скорости не являются предельными, а потому величины производительности не следует считать наибольшими из возможных.

Сложность разработки ММ трубопроводной ППУ связана с многообразием факторов, влияющих на кинематику сосудов и определяющих требования

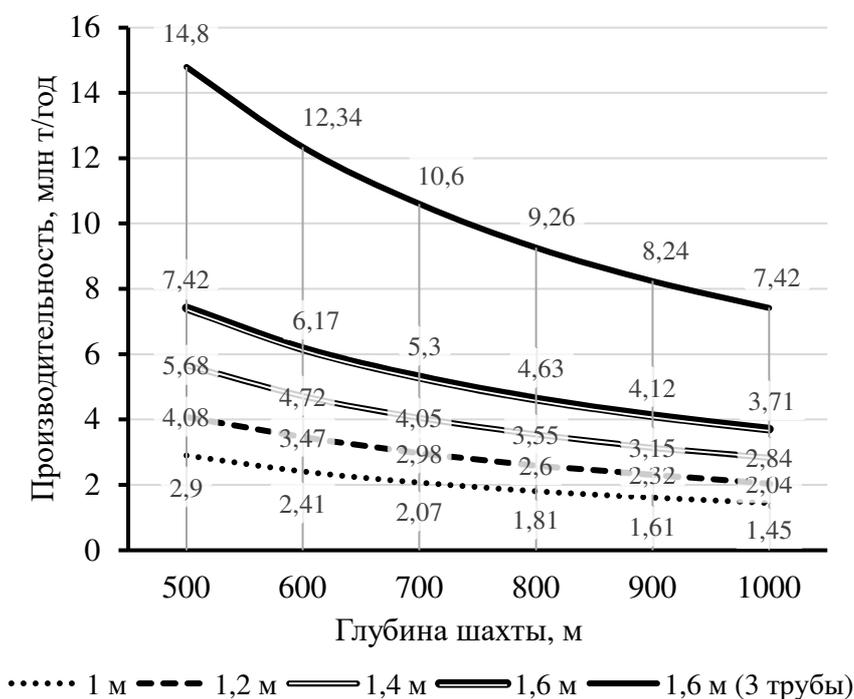


Рисунок 4 – Прогнозируемая производительность ППУ в зависимости от глубины шахты и диаметра трубопроводов

к воздухоудувке. Один из таких факторов состоит в существенном повышении температуры воздуха в роторе воздухоудувки.

В период перемещения гружёного сосуда по подъёмному трубопроводу ППУ замкнутой схемы температура воздуха падает, его плотность растёт, а объёмный расход уменьшается, вследствие чего снижается скорость подъёма. Решением задачи теплообмена потока с атмосферой через стенку трубы с привлечением модифицированного уравнения В. Г. Шухова стало уравнение (3), позволяющее определить необходимую подачу нагнетателя по заданной средней скорости гружёного сосуда:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{A^2}{4} + B} - \frac{A}{2}, \quad (3)$$

где параметры  $A$ ,  $B$  вычисляются по выражениям:

$$A = \left( \frac{273}{\Delta T_0} - 1 \right) \cdot \frac{k\pi dH}{\rho_t c_b \left[ 1 - \exp\left( -\frac{k\pi dH}{\rho_0 \bar{Q} c_b} \right) \right]}; \quad B = \frac{68,3\sqrt{k}\pi^2 d^3 H}{\Delta T_0 \rho_t c_b \left[ 1 - \exp\left( -\frac{k\pi dH}{\rho_0 \bar{Q} c_b} \right) \right]}. \quad (4)$$

$\Delta T_0$  – превышение температуры потока над температурой атмосферного воздуха во входном сечении (на выходе нагнетателя);  $H$  – длина трубопровода, примерно равная глубине ствола;  $\rho_t$  – плотность воздуха на выходе нагнетателя;  $k$  – коэффициент теплопередачи;  $c_b$  – удельная теплоёмкость воздуха в трубопроводе;  $\bar{Q}$  – условный объёмный расход, определяемый по средней скорости.

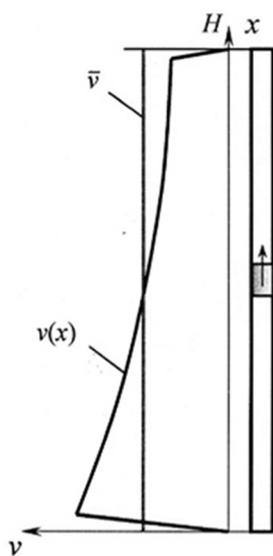


Рисунок 5 – Изменение скорости потока в трубопроводе

Решение уравнений теплопередачи позволило получить изменение скорости потока, т. е. скорости гружёного сосуда. Его характер иллюстрируется рисунком 5, где  $v(x)$  – зависимость скорости от координаты  $x$ ;  $\bar{v}$  – средняя скорость.

Процесс спуска порожнего сосуда под собственным весом также потребовал математического моделирования. В отличие от свободного падения движение сосуда по спускному трубопроводу сопряжено с линейным аэродинамическим сопротивлением магистрали и местным сопротивлением аппарата управления на её выходе. Решение уравнения (5) динамики порожнего скипа с учётом свойств вмещающей среды позволило получить выражения скорости  $v_c$  спуска (6) и перемещения  $x$  (8) в функции времени, а также формулу (9), позволяющую определить длительность  $t$  периода спуска на заданную глубину:

$$(m_c + m_b)a = G - F_c, \quad (5)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{B}{A}} \cdot \frac{\exp(2\sqrt{ABt}) - 1}{\exp(2\sqrt{ABt}) + 1}; \quad (6)$$

$$A = \frac{\pi d^2 \rho_0 \left( \lambda \frac{H}{d} + \xi \right)}{8(m_c + m_b)}; \quad B = \frac{m_c g}{m_c + m_b}, \quad (7)$$

$$x = \frac{1}{2A} \ln \frac{[\exp(2\sqrt{AB}t) + 1]^2}{4 \exp(2\sqrt{AB}t)}; \quad (8)$$

$$t = \sqrt{\frac{A}{B}} \cdot \frac{x}{2} + \frac{1}{2\sqrt{AB}} \ln \left\{ 2[\exp(Ax) + \sqrt{\exp(2Ax) - 1}] - 1 \right\}, \quad (9)$$

где  $a$  – ускорение скипа;  $G = m_c g$  – вес сосуда;  $m_b$  – масса столба воздуха высотой  $H$ ;  $F_c$  – сила сопротивления;  $\lambda$  – коэффициент Дарси – Вейсбаха;  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления;  $v_c$ ,  $x$ ,  $t$  – скорость, координата и время движения сосуда соответственно.

На рисунке 6 приведены графики расчётных зависимостей скорости спуска и перемещения сосуда от времени для следующих исходных данных:  $\rho_0 = 1,21 \text{ кг/м}^3$ ;  $d = 1,13 \text{ м}$  (площадь живого сечения трубы  $1 \text{ м}^2$ );  $m_c = 1\,500 \text{ кг}$ ;  $H = 1\,000 \text{ м}$ .

Кривые 1, 3, 5 – графики  $v_c(t)$  для  $\xi = 0; 10; 30$  соответственно; кривые 2, 4, 6 – графики  $x(t)$  при указанных  $\xi$ .

Особенностью начального этапа спуска порожнего сосуда в двухтрубной замкнутой схеме является движение по трубопроводу, выходное сечение которого перекрыто. Для расчёта рабочего цикла системы потребовалось определить зависимости скорости сосуда и избыточного давления под ним от времени спуска, что и сделано путём решения задачи адиабатического сжатия объёма воздуха под сосудом. Получены уравнения кинематики сосуда (10) – (12), а также избыточного давления (14).

Установлено, что движение сосуда представляет собой гармонические колебания с угловой частотой  $\omega$ , амплитудой

$$A = \frac{g}{\omega^2} = \frac{4m_c g H}{\pi d^2 c_{зв}^2 \rho_0}, \quad (10)$$

размахом, равным  $2A$ , и равновесным положением скипа (при котором  $F_p = G$ )  $x_{\text{рав}} = A$ .

Зависимость координаты  $x$  от угловой частоты:

$$x = \frac{g}{\omega^2} (1 - \cos \omega t), \quad (11)$$

а скорость порожнего скипа  $v_c$ :

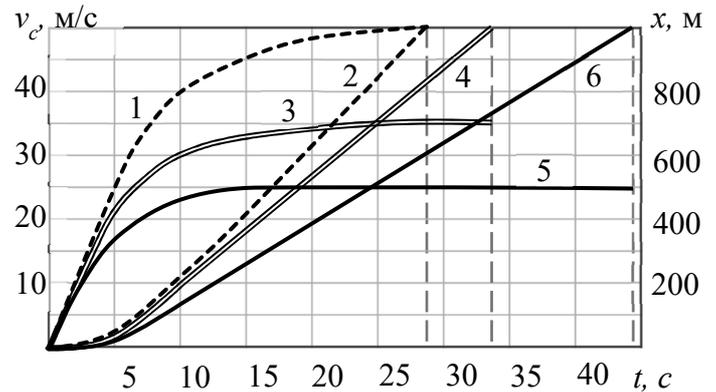


Рисунок 6 – Зависимостей скорости (1, 3, 5) и перемещения (2, 4, 6) скипа от времени при различных  $\xi$

$$v_c = \frac{dx}{dt} = \frac{g}{\omega} \sin \omega t. \quad (12)$$

Промежуток времени  $t_{\text{рав}}$ , по истечении которого движение сосуда становится равномерным:

$$t_{\text{рав}} = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{1}{c_{\text{зв}} d} \sqrt{\frac{\pi H m_c}{\rho_0}}, \quad (13)$$

где  $c_{\text{зв}}$  – скорость звука в сжимаемой среде.

Избыточное давление под сосудом описывается уравнением

$$\Delta p = \frac{\gamma p_0 g}{H \omega^2} (1 - \cos \omega t) = \frac{4 m_c g}{\pi d^2} (1 - \cos \omega t) \quad (14)$$

где  $p$  – атмосферное давление;  $\gamma$  – показатель адиабаты (для воздуха  $\gamma = 1,4$ ).

В течение разгона гружёного скипа воздухонагнетательный агрегат испытывает перегрузку, так как избыточное давление, которое он создаёт, определяется не только действующими на сосуд активными силами, но и силами инерции. Снизить или даже полностью устранить перегрузку возможно путём рекуперации кинетической энергии движущегося по спускному трубопроводу порожнего сосуда.

Идея способа: на конечном участке спуска порожнего сосуда по команде системы управления выходное сечение спускного трубопровода перекрывается. Кинетическая энергия сосуда и воздушного столба над ним переходит в потенциальную энергию сжатого воздуха, замкнутого в объёме под ним. По достижении расчётного значения избыточного давления в замкнутом объёме выходное сечение спускного трубопровода соединяется со входным окном воздуходувки, а её выходное окно – с входным сечением подъёмного трубопровода под гружёным сосудом. Таким образом, потенциальная энергия сжатого в спускном трубопроводе воздуха используется для создания необходимого для разгона гружёного сосуда избыточного давления, чем и обеспечивается снижение нагрузки на воздуходувку.

ММ движения порожнего сосуда на конечном участке замкнутого спускного трубопровода позволила получить уравнения (15), (16) зависимостей избыточного давления под скипом и скорости скипа от его координаты, необходимые для расчёта ускорения гружёного скипа:

$$\Delta p = p \left( \frac{x_T}{x_T - x} \right)^\gamma - p_0; \quad (15)$$

$$\Delta v_c = d \sqrt{\frac{\pi}{2(m_c + m_b)} \left\{ \frac{p x_T}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{x_T}{x_T - x} \right)^{\gamma-1} - 1 \right] - p_0 x \right\}}, \quad (16)$$

где  $p_0$  – статическое давление под сосудом;  $\Delta v_c$  – изменение скорости порожнего сосуда в функции координаты  $x$ ;  $x_T$  – длина участка торможения;  $x$  – координата порожнего скипа;  $p$  – текущее значение давления воздуха под сосудом.

Важная задача, которую необходимо решить в ходе проектирования ППУ, состоит в выборе типа уплотнения между сосудом и трубопроводом.

По наличию контакта уплотняющего элемента с подвижной поверхностью различают уплотнения бесконтактные, контактные и комбинированные.

Достоинства бесконтактных уплотнений по сравнению с контактными состоят в следующем:

- отсутствуют существенные потери на трение уплотняющих элементов о стенку трубопровода;
- нагрев и износ уплотняющих элементов в процессе эксплуатации незначительны.

Однако бесконтактные уплотнения имеют весьма серьёзный недостаток – снижение объёмного КПД  $\eta_{об}$  установки вследствие утечки через зазоры.

Во избежание существенного повышения энергозатрат следует ограничить объёмный КПД минимально допустимой величиной  $[\eta_{об}]$ . Тогда объёмные КПД незамкнутой и замкнутой схем должны удовлетворять условиям (17):

$$\eta_{об.н} \geq [\eta_{об}]; \quad \eta_{об.з} \geq [\eta_{об}]. \quad (17)$$

Получены формулы для определения коэффициентов  $\zeta_p, \zeta_z$  местного сопротивления бесконтактного уплотнения в разомкнутой и замкнутой схеме соответственно, при которых выполняются условия (17):

$$\zeta_p \geq 20 \frac{\Delta p}{\rho} \left( \frac{D\delta_0}{Q(1-[\eta_{об.п}])} \right)^2; \quad \zeta_z \geq 79 \frac{\Delta p}{\rho} \left( \frac{D\delta_0}{Q(1-[\eta_{об.з}])} \right)^2. \quad (18)$$

где  $D$  – внутренний диаметр трубопровода;  $\delta_0$  – зазор в уплотнении.

В качестве одного из возможных вариантов решения задачи обеспечения достаточной величины объёмного КПД одновременно с приемлемой работоспособностью уплотнений предложены устройства, названные адаптивными уплотнениями.

Идея адаптивного уплотнения состоит в автоматическом переходе из контактного устройства в бесконтактное и наоборот под влиянием какого-либо внешнего фактора.

Уплотнение нормально контактное с переходом в бесконтактное (НК) показано на рисунке 7, а. Манжета 5 изготовлена из упругого антифрикционного материала с таким расчётом, чтобы при перепаде давления под весом порожнего сосуда 1 её уплотняющий элемент контактировал со стенкой спускного трубопровода 3, а под действием перепада давления под весом гружёного сосуда 2 отходил от стенки подъёмного трубопровода 4 на расчётное расстояние  $\delta_0$  (на

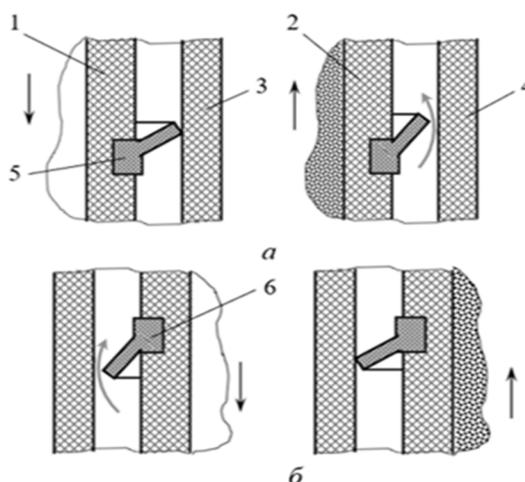


Рисунок 7 – Адаптивные уплотнения

рисунке 7 не показано). В результате в период подъёма манжета функционирует как бесконтактное уплотнение, а в период спуска – как контактное.

На рисунке 7, б показано уплотнение нормально бесконтактное с переходом в контактное (НБ). При перепаде давления под весом порожнего сосуда уплотняющий элемент манжеты б отстоит от стенки спускного трубопровода на расчётное расстояние  $\delta_0$ , а под действием перепада давления под весом гружёного сосуда входит в контакт со стенкой подъёмного трубопровода. В период подъёма манжета функционирует как контактное уплотнение, а в период спуска – как бесконтактное.

Адаптивные уплотнения позволят снизить утечку воздуха и облегчить условия эксплуатации контактирующих элементов.

Уплотнение НБ, подвергнувшись температурно-фрикционному воздействию в период подъёма, охлаждается в период спуска. Уплотнение НК не испытывает фрикционного воздействия в период подъёма, а в период спуска силы трения невелики и не препятствуют охлаждению контактирующего элемента.

**В третьей главе** описывается принцип разработки методики, алгоритма эксперимента, приводятся его результаты.

Физическое моделирование включало ряд последовательных этапов:

- 1) формулировка условий подобия физической модели образцу;
- 2) изготовление физической модели в соответствии с условиями подобия;
- 3) определение контрольных параметров, получаемых путём испытаний физической модели;
- 4) оценка результатов испытаний.

Важность физических экспериментов состоит в подтверждении адекватности ММ, практически полностью описываемой формулами раздела 2, а также в возможности проверки эффективности конструктивных решений, принимаемых на стадии проектирования.

На базе положений теории подобия выделен ряд критериев геометрического и аэродинамического подобия, в соответствии с которыми спроектирована и изготовлена физическая модель ППУ. Принципиальная схема модели приведена на рисунке 8, где 1 – нагнетатель; 2 – подъёмный трубопровод; 3 – сосуд; 4 – напорная магистраль; 5 – входной (измерительный) воздухопровод; 6 – задвижка;

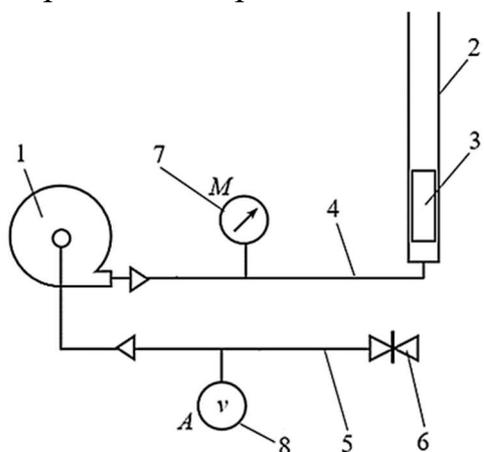


Рисунок 8 – Принципиальная схема модели

7 – манометр ( $M$ ), 8 – анемометр ( $A$ ).

Константы подобия модели: геометрическая  $k_L = 10$ , массовая  $k_m = 10^3$ , расхода  $k_Q = 10^3$ , давления  $k_p = 10$ .

В качестве нагнетателя применена турбовоздуходувка МТ 03-М1С-230 ERSTEVAK ( $p_{\max} = 12$  кПа;  $Q_{\max} = 80$  м<sup>3</sup>/ч); скорость воздуха измерялась анемометрами крыльчатými МЕГЕОН 11003 и Testo 416, статическое давление – манометром *b.Well* (0...350 гПа), временные интервалы – секундомером электронным «Интеграл С-01».

Нижняя секция подъёмного трубопровода длиной 1 м установлена на опоре. Воздуходувка 1, напорная магистраль 4, входной воздуховод 5, нижняя секция подъёмного трубопровода и измерительные приборы составляют нагнетательную станцию (рисунок 9).

Сосуд выполнен в двух вариантах: А – с комбинированным уплотнением, состоящим из лабиринта и разрезных пружинных колец, и Б – с контактным уплотнением в виде пружинных колец (рисунок 10). Лабиринт имеет расчётный коэффициент местного сопротивления  $\zeta = 11$ , которое соответствует теоретическому значению, полученному из условия  $[\eta_{об}] = 0,95$  при  $p_s = 10$  кПа;  $Q = 20$  м<sup>3</sup>/с.

Моделировались условия, соответствующие перемещению порожнего скипа, так как имитировать термодинамическую обстановку в подъёмном трубопроводе не представляется возможным.

Обобщённым параметром, характеризующим работоспособность ППУ, является её КПД. При вертикальном транспортировании величина механического КПД нерасчётная, поэтому в качестве критерия эффективности принят объёмный КПД  $\eta_{об}$ . С целью полного раскрытия связи  $\eta_{об}$  с типом уплотнения и нагрузкой на установку его значения определены для следующих вариантов:

- 1) сосуд А с лабиринтным уплотнением;
- 2) сосуд А с комбинированным уплотнением;
- 3) сосуд Б с уплотнением в виде пружинных колец.

В каждом из указанных вариантов масса сосуда  $m_m$ , кг, последовательно принималась по ряду: 1,00; 1,67; 2,03; 3,00; 3,70. Масса скипа модели А – 0,684 кг, модели Б – 0,522 кг. Величины масс приняты произвольно без какой-либо чёткой закономерности. С сосудом конкретной массы выполнена серия из пяти подъёмов (повторений).

Во всех испытаниях высота подъёма  $H_m = 4$  м. В исходные данные входили также аппроксимирующее уравнение статической характеристики нагнетательной станции, а также ММ периода разгона сосуда, выполненная в ходе подготовки к экспериментам.

Составлен алгоритм эксперимента, который предусматривает установление зависимости объёмного КПД модели от массы сосуда и вида уплотнения.

Результаты экспериментов были подвергнуты обработке с использованием методов математической статистики.



Рисунок 9 – Нагнетательная станция

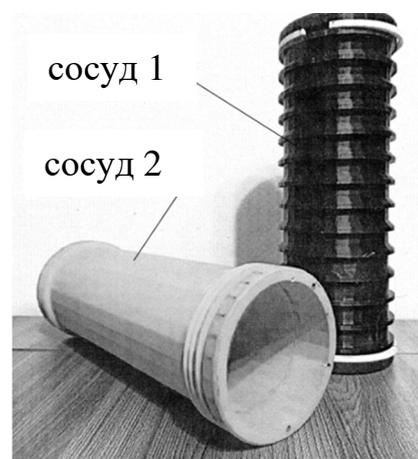
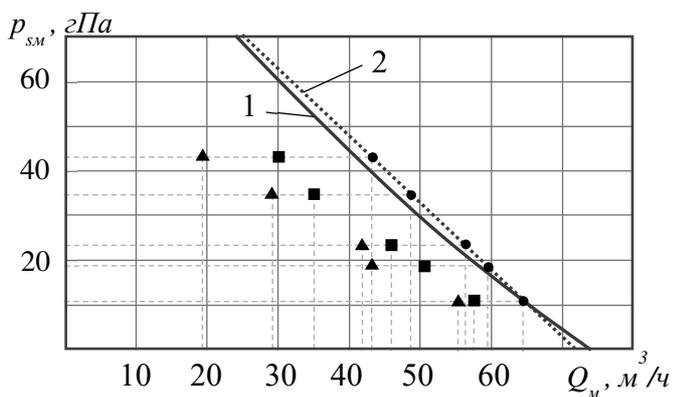
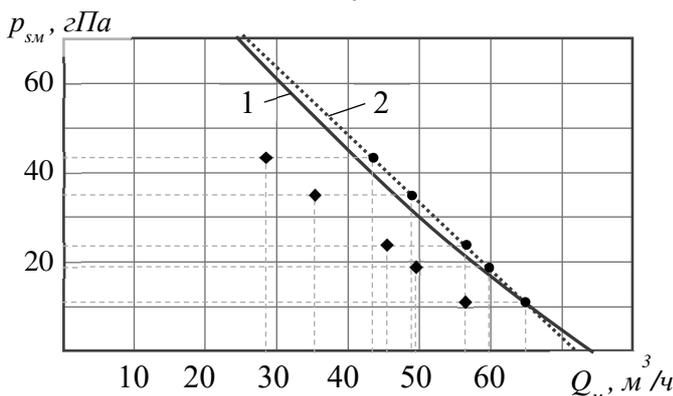


Рисунок 10 – Варианты модели сосуда



а) сосуд А



б) сосуд Б

- ▲ – рабочая точка при подъёме с лабиринтным уплотнением;
- – рабочая точка при подъёме с комбинированным уплотнением;
- ◆ – рабочая точка при подъёме с контактным уплотнением;
- – теоретическая рабочая точка

Рисунок 11 – Рабочие точки установки

По опытным данным построены рабочие точки установки, показанные на рисунке 11 (кривая 1 – характеристика установки, кривая 2 – аппроксимация характеристики).

С использованием критериев подобия координаты рабочих точек были пересчитаны на параметры экспериментального образца ППУ, имеющего реальные размеры, что позволило оценить взаимное соответствие параметров математической и физической моделей.

В результате исследований физической модели установлено:

- физическая модель адекватна экспериментальному образцу ППУ;

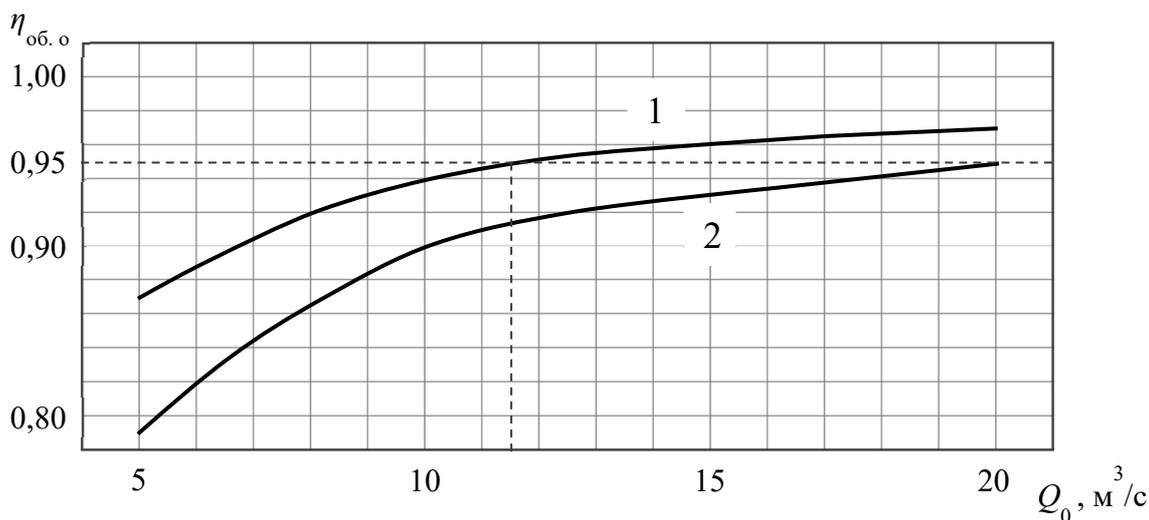
- объёмный КПД модели с бесконтактным уплотнением при давлении  $p_s = 1$  кПа составляет  $\eta_{об} = 0,81$ , что в пересчёте на параметры экспериментального образца соответствует  $p_s = 10$  кПа;  $\eta_{об} = 0,95$ ;

- объёмный КПД модели с контактным уплотнением при давлении  $p_s = 1$  кПа составляет  $\eta_{об} = 0,88$ , что в пересчёте на параметры экспериментального образца соответствует  $p_s = 10$  кПа;  $\eta_{об} = 0,97$ ;

- объёмный КПД модели с комбинированным уплотнением при давлении  $p_s = 1$  кПа составляет  $\eta_{об} = 0,89$ , что в пересчёте на параметры экспериментального образца соответствует  $p_s = 10$  кПа;  $\eta_{об} = 0,98$ ;

- расчётный объёмный КПД экспериментального образца в интервале расходов  $Q = 5 \dots 20$  м<sup>3</sup>/с находится в диапазоне: для сосуда с бесконтактным уплотнением  $\eta_{об} = 0,79 \dots 0,95$ ; для сосуда с контактным уплотнением  $\eta_{об} = 0,87 \dots 0,97$ .

Расчётные значения объёмного КПД экспериментального образца (рис. 12) подтвердили целесообразность использования в конструкции ППУ нормально бесконтактных уплотнений, описанных в разделе 2.



1 – контактное уплотнение; 2 – лабиринтное уплотнение

Рисунок 12 – Зависимость объемного КПД образца от расхода воздуха

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно обоснованные технические решения по обоснованию рациональных кинематических, динамических, геометрических и энергетических параметров трубопроводной пневмоподъемной установки при помощи разработки математической модели системы.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. На основе сравнения эффективности ППУ различных конструктивных схем установлено, что наивысших эксплуатационных показателей следует ожидать от двухтрубной четырёхскиповой замкнутой схемы.

3. Выведены соотношения для определения оптимальных по критериям производительности и энергопотребления основных геометрических и энергетических параметров ППУ с замкнутой схемой.

4. Выполнено теоретическое описание теплообменных процессов в подъемном трубопроводе ППУ и аэродинамический расчёт сопротивления спускного трубопровода, положенные в основу комплекса формул для определения кинематических характеристик гружёного и порожнего сосудов.

5. Выполнен теоретический анализ кинематики скипа в периоды неустановившегося движения.

6. Предложено два способа повышения энергоэффективности ППУ:

- снижение затрат на подъем собственной массы сосуда за счет подачи воздуха с повышенным давлением из спускного трубопровода во вход воздухоподводки;

- способ интенсификации разгона гружёного сосуда за счёт рекуперации кинетической энергии порожнего сосуда.

7. С целью обеспечения высокого объёмного КПД установки предложено использовать адаптивные уплотнения, преобразующиеся из контактных в бесконтактные (и наоборот) под воздействием расчётного перепада давления.

8. Достоверность результатов теоретического исследования подтверждена лабораторными экспериментами с физической моделью ППУ. С использованием критериев подобия выполнен прогноз значений объёмного КПД установки с различными типами уплотнений. Согласно прогнозу, бесконтактные уплотнения с коэффициентом местного сопротивления  $\zeta = 11$  обеспечат объёмный КПД  $\eta_{об} = 0,95$  при расходе воздуха  $Q \geq 20 \text{ м}^3/\text{с}$ , а контактные в виде разрезных пружинных колец –  $\eta_{об} = 0,87...0,97$  в диапазоне расходов  $Q = 5...20 \text{ м}^3/\text{с}$ .

9. Совокупность теоретических зависимостей, полученных в результате исследования, формирует математическую модель ППУ, пригодную для проективных расчётов.

10. Основные результаты работы получили одобрение и переданы для использования в ОАО «УГМК» (заключение от 26.05.2021 г.).

#### **Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:**

*Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК*

1. Теоретико-механический расчет устойчивости движения сосуда в шахтной скиповой пневмоподъемной установке / Таугер В. М., Волков Е. Б., Леонтьев А. А. // Изв. УГГУ, 2018. Вып. 1 (49). – С. 89–93.
2. Способ управления движением сосуда в системе рудничного пневмоподъема / В. М. Таугер, Ю. М. Казаков, Е. Б. Волков, А. А. Леонтьев // Изв. вузов. Горный журнал, 2018, № 5. – С. 111-116.
3. THE CALCULATION OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THE CONVEYING PIPE OF A SKIP PNEUMATIC WINDER (IN ENGLISH) / TAUGER VITALII M., LEONTIEV ALEKSANDR A. / Изв. вузов. Горный журнал, 2019, № 4. – С. 106-113.
4. Леонтьев А. А. Динамика гружёного скипа шахтной пневмоподъёмной установки в период разгона / А. А. Леонтьев, В. М. Таугер, Е. Б. Волков // Изв. вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 115-120
5. Леонтьев А. А. Физическое моделирование скиповой пневмоподъёмной установки / А. А. Леонтьев, В. М. Таугер, Е. Б. Волков [и др.] // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 4. С. 64-73 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-64-73.

#### *Патенты*

6. Скиповая пневмоподъёмная установка: пат. 2760713 Рос. Федерация. № 2021108827 / Таугер В. М., Леонтьев А. А. ; заявл. 01.04.2021 ; опубл. 29.11.2021. 13 с.

*Работы, опубликованные в других изданиях*

7. Расчет внутреннего диаметра трубопровода энергоэффективной скиповой пневмоподъемной установки / Таугер В. М., Волков Е. Б., Леонтьев А. А. // УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА – РЕГИОНАМ. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. 2018 Издательство: Уральский государственный горный университет (Екатеринбург). – С. 226-227.
8. Анализ теплообменных процессов в подъемном трубопроводе скиповой пневмоподъемной установки / Леонтьев А. А., Таугер В. М. // УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА – РЕГИОНАМ. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. 2019 Издательство: Уральский государственный горный университет (Екатеринбург). – С. 151-152.
9. Исследование влияния тепловых процессов на скорость подъема сосуда в скиповой пневмоподъемной установке / Леонтьев А. А., Таугер В. М. // УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА – РЕГИОНАМ. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. 2019 Издательство: Уральский государственный горный университет (Екатеринбург). – С. 153-154.
10. Повышение энергоэффективности скиповой пневмоподъемной установки / Леонтьев А. А., Таугер В. М. // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Математическое моделирование механических явлений». 2019 Издательство: Уральский государственный горный университет (Екатеринбург). – С. 28-31.
11. Бесконтактные уплотнения зазоров между скипом и трубопроводом пневмоподъемной установки / Леонтьев А. А., Таугер В. М. // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Математическое моделирование механических явлений». 2019 Издательство: Уральский государственный горный университет (Екатеринбург). – С. 79-82.

Подписано в печать 16.10.2023 г.  
Бумага писчая. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Times New Roman  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 111  
Типография «Печатное поле»  
620000, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 7