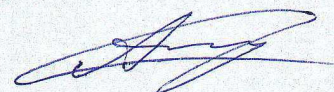


**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»**

На правах рукописи



Леонтьев Александр Анатольевич

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАХТНЫХ
ТРУБОПРОВОДНЫХ ПНЕВМОПОДЪЁМНЫХ УСТАНОВОК**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: к.т.н., доцент,
Таугер Виталий Михайлович

Екатеринбург
2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Перспективы совершенствования шахтного скипового подъёма.	
Постановка задач исследования	9
1.1. Современный уровень развития шахтных скиповых подъёмных установок.	9
1.2. Недостатки шахтных скиповых подъёмных установок в современных условиях.....	18
1.3. Пневмоподъёмные установки как перспективный вид шахтного скипового подъёма	23
1.4. Постановка задач исследования.....	26
2. Теоретические основы расчёта скиповых пневмоподъёмных установок	32
2.1. Конструкции и компоненты скиповых пневмоподъёмных установок	32
2.2. Теоретические основы расчёта скиповых пневмоподъёмных установок.....	48
2.3. Период разгона гружёного скипа.....	80
2.4. Уплотнения зазора между скипом и стенкой трубопровода.....	87
2.5. Выводы.....	94
3. Моделирование скиповой пневмоподъёмной установки.....	98
3.1. Задачи моделирования. Методика проведения экспериментов.....	98
3.2. Физическая модель	107
3.3. Результаты испытаний физической модели.....	120
3.4 Реализация результатов исследования	127
3.5. Выводы.....	128
Заключение	130
Публикации по теме диссертации	132

Список использованной литературы.....	134
Приложение А	147
Приложение Б.....	153
Приложение В.....	161
Приложение Г	172
Приложение Д.....	173

ВВЕДЕНИЕ

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 пневмоподъемной 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 пневмоподъемной установки замкнутой схемы;

получено теоретическое описание теплообменных процессов в подъемном трубопроводе, позволяющее аналитически определить среднюю скорость грузёного сосуда; получено теоретическое описание теплообменных процессов в подъемном трубопроводе, позволяющее аналитически определить среднюю скорость грузёного 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 грузёного 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 проектировочного 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.

1. ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ШАХТНОГО СКИПОВОГО ПОДЪЁМА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Современный уровень развития шахтных скиповых подъёмных установок

Шахтная подъёмная установка выполняет на горнодобывающем предприятии чрезвычайно важную функцию транспортирования ископаемого с горизонтов на поверхность. Бесперебойная ритмичная работа предприятия обеспечивается достаточно высокой эффективностью современных подъёмных установок.

В настоящее время наиболее распространённым является канатный скиповый и клетевой подъем. На многих горнодобывающих предприятиях широкое распространение получил многоканатный подъем, который по техническим возможностям значительно превосходит одноканатный [1].

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 [10-12, 36-38, 64, 65, 77-79, 81-92]. Большая работа выполнена Ю. В. Поповым, С. М. Кубаревым, В. Ю. Зверевым, Л. А. Двининым, Л. Б. Двининой и др. [15-23, 31-33, 41, 66-70, 74, 80].

Подъёмные установки предназначены для выдачи на поверхность добываемого угля и получаемой при проходке горных выработок породы, быстрого и безопасного спуска и подъема людей, транспортирования крепежного леса, горно-шахтного оборудования и материалов. При помощи подъёмной установки производятся также осмотр и ремонт армировки и крепления ствола шахты. На крупных шахтах, как правило, имеются две – три действующие подъёмные установки, и каждая из них предназначена для определенных целей (выдачи угля, спуска-подъема людей, выдачи породы и т. д.), а не является резервом другой. От

надежной, бесперебойной и производительной работы шахтного подъема зависит ритмичная работа всей шахты в целом, поэтому к подъемным установкам (из всего комплекса электромеханического оборудования шахты) предъявляют особые требования в отношении надежности и безопасности работы.

Подъемные машины относятся к наиболее мощным из всего стационарного оборудования шахты. Мощность электропривода подъемной машины достигает 2000 кВт и выше. Электропривод подъемных установок потребляет до 40 % всей электроэнергии, расходуемой шахтой.

Скорость движения подъемных сосудов в стволе может достигать 15-20 м/сек (54-72 км/ч), т. е. приближаться к скорости движения железнодорожных составов. Так как такая скорость развивается на коротких расстояниях (равных длине шахтного ствола), подъемные машины должны иметь надежное управление и безотказно действующие тормозные устройства.

Общее устройство основного оборудования подъемных установок и конструкция входящих в ее состав элементов весьма многообразны, что определяется в первую очередь разнообразием горнотехнических условий, в которых функционируют подъемные установки, а также многообразием конкретных функций, которые на них возлагаются. Среди последних особо выделяют характер поднимаемых и опускаемых шахтных грузов.

Второй фактор, определяющий разнообразие конструкций подъемных установок, связан с их основной эксплуатационной особенностью – цикличностью действия. Причем указанная цикличность является особой и характеризуется малой длительностью рабочего цикла, когда паузы между движениями соизмеримы с длительностью движения, а в общей продолжительности движения существенную долю занимают периоды неустановившегося движения, связанного с разгоном и остановом подъемной системы.

При таком режиме работы подъемной системы мощность ее привода, расход энергии, а следовательно, и экономика канатного подъема в значительной степени зависят от инерционных нагрузок, возникающих в периоды неустановившихся

движений. Стремление уменьшить отрицательное влияние указанных инерционных нагрузок на экономику канатного подъема, а также нагрузок от собственного веса элементов подъемной системы определяет во многих случаях выбор конструкций отдельных компонентов и общее устройство подъемной установки.

Описание канатных подъемных установок приведено в соответствии с [24].

Канатные подъемные установки классифицируют по следующим основным признакам.

Назначение подъемной установки. По этому признаку подъемные установки подразделяются на:

а) главные или грузовые, служащие для подъема полезного ископаемого на шахтах или обслуживающие основные грузопотоки вскрышных пород и полезного ископаемого на карьерах;

б) вспомогательные (людские и грузолюдские), служащие для подъема и спуска людей, материалов и оборудования, а также для подъема из шахты сопутствующих горных пород;

в) временные или проходческие, используемые только на период строительства шахтного ствола, а в ряде случаев и для проходки основных выработок околоствольного двора.

Расположение относительно земной поверхности. Выделяют два типа подъемных установок:

а) подземные, располагаемые в шахтных стволах;

б) открытые, располагаемые, как правило, на нерабочих бортах карьеров.

Угол наклона трассы подъемника. По величине угла наклона трассы подъемные установки подразделяются на два основных типа:

а) вертикальные, которые имеют преимущественное применение при подземной разработке месторождений и размещаются в вертикальных шахтных стволах;

б) наклонные, размещаемые на бортах карьеров или в наклонных шахтных стволах.

Среди наклонных подъемных установок особо выделяют крутонаклонные с углом наклона трассы 60° и более, а также пологие, угол наклона трассы которых не превышает 25° .

Тип подъемного сосуда. Данный признак в большой степени определяет характер взаимодействия канатного подъема с другими звеньями транспортного комплекса горного предприятия, а также вид погрузочно-разгрузочных операций на стыках транспортных звеньев. По этому признаку различают три типа подъемных установок:

- а) клетевые;
- б) скиповые;
- в) бадьевые.

При клетевом подъеме погрузочно-разгрузочные операции заключаются в простом обмене груженых и порожних транспортных сосудов (вагонеток, автосамосвалов) на перегрузочных пунктах.

При скиповом подъеме перегрузка горной массы из средств призабойного транспорта в скипы выполняется, как правило, через посредство бункеров, так же, как и разгрузка скипов на поверхности. Использование перегрузочных бункеров достаточно большой вместимости обеспечивает относительную независимость работы канатного подъема во взаимодействии с другими звеньями транспортного комплекса. Однако при этом имеет место увеличение общей высоты подъема, а также необходимы дополнительные капитальные затраты, связанные с сооружением бункеров.

Бадьи как подъемные сосуды используются только на проходческих подъемных установках при строительстве шахтных стволов.

Количество подъемных сосудов, приводимых в движение одной подъемной машиной. По количеству сосудов подъемные установки можно подразделить на три типа:

а) двухсосудные, которые предполагают приведение в движение одновременно двух сосудов одной подъемной машиной (груженный сосуд поднимается, порожний в это же время опускается);

б) однососудные без противовеса, когда подъемная машина приводит в движение одну ветвь каната с присоединенным к нему подъемным сосудом (рис.1.1, а);

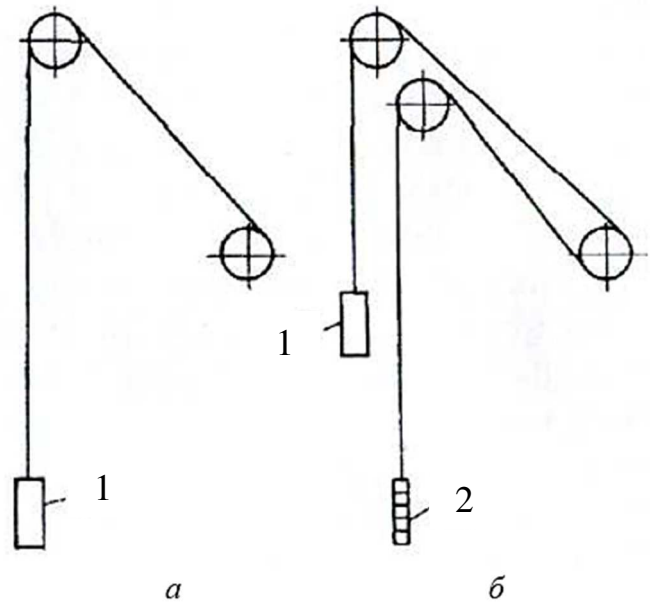


Рис. 1.1. Схемы подъемных установок:
а – однососудная; б – однососудная с противовесом;
1 – сосуд; 2 – противовес

в) однососудные с противовесом, в которых к концу одной из двух ветвей канатов вместо сосуда подвешивается противовес (рис. 1.1, б).

Тип канатопроводящего органа подъемной машины. По этому признаку, отражающему способ передачи движущего усилия канату, подъемные установки подразделяются на два класса:

а) барабанные, для которых характерна жесткая связь между канатом и навивочным органом (барабаном), а приведение каната в движение производится путем его навивки на поверхность барабана или свивки с указанной поверхности;

б) со шкивами трения, когда канат огибает канатопроводящий орган и не связан с ним жестко, а приводится в движение посредством сил трения между поверхностью шкива и поверхностью прижатого к шкиву каната.

В зависимости от формы навивочной поверхности барабаны могут быть постоянного радиуса навивки (цилиндрические барабаны) и переменного радиуса (двойные конические и бицилиндроконические). В свою очередь, шкивы трения подразделяют на одноканатные и многоканатные.

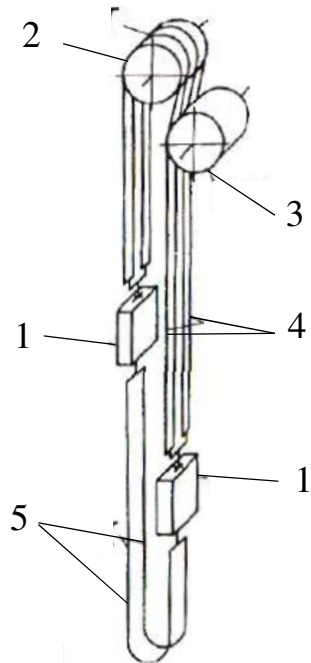


Рис. 1.2. Схема многоканатной подъемной установки:
1 – сосуд; 2 – шкивы трения; 3 – отклоняющие шкивы; 4 – головные канаты; 5 – хвостовые канаты

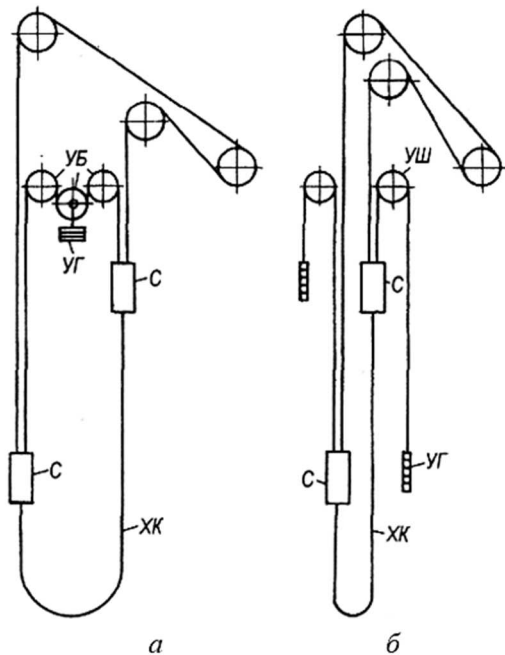


Рис. 1.3. Схемы частичной разгрузки головных канатов:
а – статически неуравновешенная система;
б – статически уравновешенная

В последнем случае подъемный сосуд подвешивается к комплексу из нескольких канатов, приводимых в движение одним многоканатным шкивом трения (рис. 1.2).

Степень загрузки головных канатов действием концевого усилия. По этому признаку можно выделить три типа подъемных установок:

а) *одноканатные с загруженным головным канатом,* когда концевой груз в виде грузевого подъемного сосуда полностью воздействует на головной канат, определяя основную долю формируемого в нем тягового усилия;

б) *одноканатные с частично разгруженным головным канатом* (рис. 1.3), когда в частном случае при помощи уравнивающего груза (противовеса) УГ через систему уравнивающих шкивов (УШ) и уравнивающего блока (УБ), а также уравнивающих, или хвостовых, канатов (ХК) головной канат разгружается от тягового усилия,

примерно равного 40 % от собственного веса подъемного сосуда;

в) многоканатные с концевой нагрузкой, равномерно распределенной между отдельными ветвями комплекта канатов, что достигается за счет соответствующих уравнивающих элементов в прицепном устройстве.

Степень уравниваемости на валу подъемной машины нагрузок, обусловленных массой элементов подъемной системы. По степени уравниваемости различают подъемные установки трех типов:

а) статически неуравновешенные, или просто неуравновешенные, когда на валу подъемной машины возникает дополнительная нагрузка, обусловленная неуравновешенными силами собственного веса поднимающейся (навиваемой) и опускающейся (свиваемой) ветвей головных канатов;

б) статически уравниваемые, в которых указанная выше дополнительная нагрузка снимается за счет применения хвостового каната, присоединяемого к днищам подъемных сосудов, или посредством использования навивочных органов (барабанов) переменного радиуса;

в) динамически уравниваемые, в которых крутящий момент, реализуемый приводом на валу подъемной машины, остается постоянным на любом этапе подъема.

Динамическое уравнивание как способ выравнивания нагрузок на валу подъемной машины и на поверхности навивочных органов впервые был предложен и исследован академиком М. М. Федоровым. В результате упомянутых исследований были разработаны теоретические основы *гармонического подъема*, суть которого сводится к нижеследующему.

Предлагается в двухсосудной подъемной системе использовать так называемый тяжелый хвостовой канат, то есть такой канат, линейная масса которого существенно выше, чем у головного тягового каната. При наличии такого хвостового каната, если соответствующим образом подобрать синусоидальный закон изменения скорости за цикл подъема, можно обеспечить постоянство

расчетного тягового усилия на поверхности навивочного органа в течение всей продолжительности подъема сосуда из шахты на поверхность.

Канатная подъемная установка состоит из *подъемного оборудования и горнотехнических сооружений*.

К подъемному оборудованию относятся подъемные машины, подъемные сосуды и канаты, разгрузочные и загрузочные устройства и др.

В состав горнотехнических сооружений входят:

1) сооружения, расположенные в околоствольном дворе (погрузочный бункер и камера для опрокидывателя при скиповом подъеме или приемная площадка при клетевом подъеме);

2) ствол шахты, оборудованный направляющими проводниками для клетей и скипов при вертикальном подъеме и рельсовыми путями для вагонеток и скипов при наклонном подъеме;

3) надшахтные сооружения, состоящие из копра и приемного бункера для разгрузки подъемных сосудов; при оборудовании подъема клетями вместо приемного бункера сооружается надшахтное здание с приемными площадками и откаточными путями.

На рис.1.4 показаны схемы подъемных установок для вертикальных стволов.

Над стволом шахты устанавливается надшахтный копер 1, на верхней площадке которого укреплены два направляющих (копровых) шкива 2.

Подъем и спуск клетей 3 (рис.1.4, а) и скипов 4 (рис.1.4, б) производится подъемной машиной 5, находящейся в отдельном здании 6, расположенном на расстоянии 20 – 40 м от копра. Подъемные канаты 7 перекинуты через направляющие шкивы и одним концом прикреплены к барабану подъемной машины, а другим – к шахтной клетке или скипу.

При вращении барабана подъемной машины один канат навивается на него, поднимая клетку из шахты, а другой свивается, опуская вторую клетку в шахту. Подъемные сосуды одновременно загружаются в шахте и разгружаются на поверхности на специальных приемных площадках.

В подъемных установках, оборудованных клетями, грузные вагонетки на нижней приемной площадке вкатываются в клеть, выталкивая из нее порожние вагонетки, и поднимаются по стволу до верхней приемной площадки в надшахтном здании, где грузные вагонетки выкатываются из клетки, а порожние вагонетки вкатываются в нее. Затем процесс обмена вагонеток на приемных площадках повторяется.

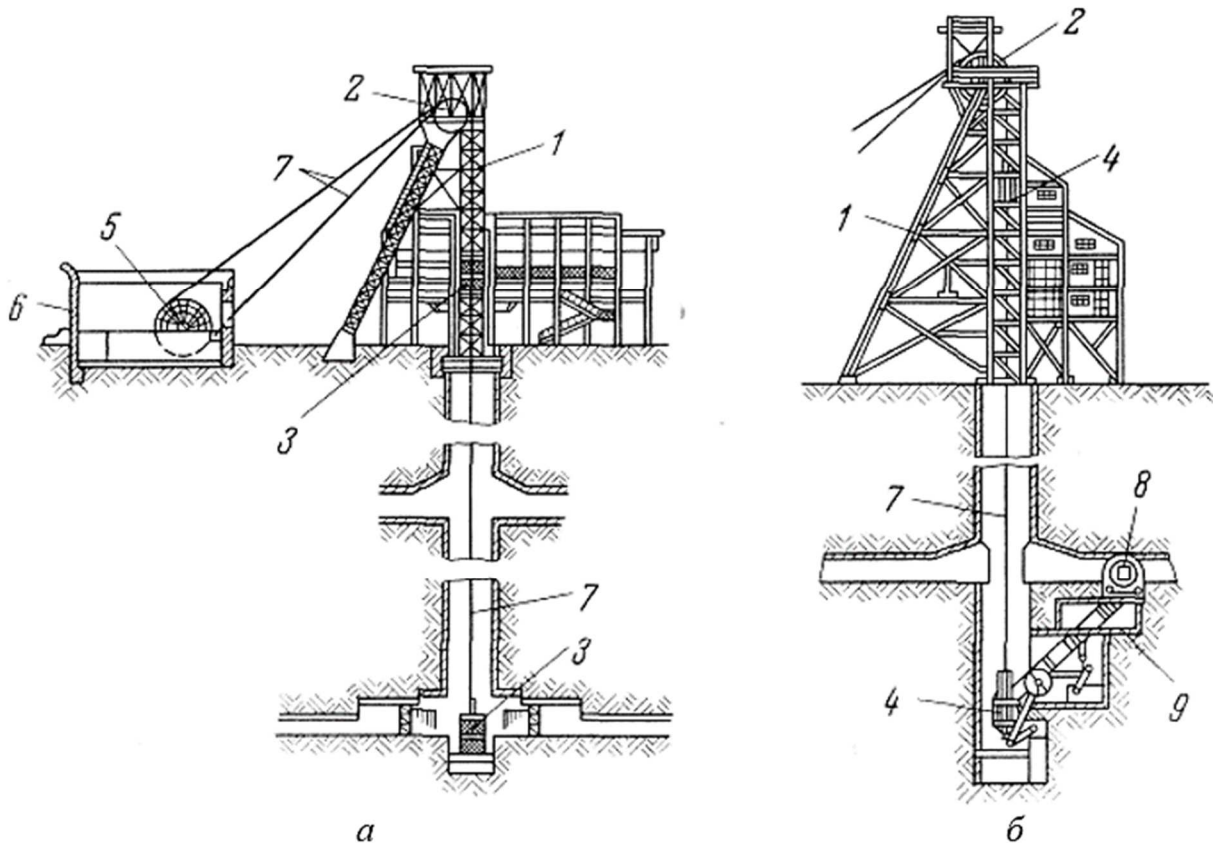


Рис. 1.4. Схемы подъемных установок для вертикальных стволов:
а – клетевой подъём; *б* – скиповой подъём;
 1 – надшахтный копер; 2 – копровые шкивы; 3 – клеть; 4 – скип;
 5 – подъемная машина; 6 – здание подъемной машины; 7 – подъемные канаты;
 8 – опрокидыватель; 9 – загрузочное устройство

В подъемных установках, оборудованных скипами, грузные вагонетки разгружаются в околоствольном дворе при помощи опрокидывателя 8 в загрузочное устройство 9, откуда уголь загружается в скипы. Затем скипы поднимаются по стволу на поверхность и в надшахтном здании автоматически

разгружаются в разгрузочное устройство. Скипы так же, как и клетки, движутся в стволе по направляющим проводникам.

Околоствольные сооружения наклонной скиповой подъемной установки состоят из камеры опрокидывателя и загрузочного бункера с затвором. Скипы движутся по наклонному стволу, а на поверхности – по эстакаде или станку копра. На поверхности скип входит в разгрузочные кривые и разгружается в приемный бункер. Опорой наклонной эстакады служит металлическая ферма с укрепленными на ней направляющими шкивами. Подъемная машина находится в отдельном здании.

1.2. Недостатки шахтных скиповых подъемных установок в современных условиях

Несмотря на ряд неоспоримых преимуществ, многоканатные подъемные установки также обладают и серьезными недостатками. Одним из наиболее значимых являются крупные финансовые и временные затраты на этапах строительства и эксплуатации. По большей части это обусловлено характерными особенностями расположения основного тягового органа канатной установки – подъемной машины, а именно необходимостью строительства и использования в процессе эксплуатации башенного копра. В значительной мере указанные недостатки устранены в установках с наземным расположением подъемной машины [70].

Однако и подъемные установки с наземным расположением подъемной машины также имеют свои слабые стороны:

- большее число перегибов подъемных канатов, чем при эксплуатации башенного копра;
- возможность возникновения наледи на подъемных канатах, расположенных вне помещения, и, как следствие, опасность проскальзывания канатов;

- большая площадь застройки с необходимостью отдельного строительства отклоняющего копра и здания подъемной машины.

Усилия проектировщиков направлены на устранение и этих недостатков. Проблема образования наледи на канатах, например, в практике проектирования подъемных комплексов с наземным расположением многоканатной подъемной машины решается либо расположением машины в одном здании с подъемным комплексом, либо закрытием канатов отапливаемыми галереями. Данные пути решения проблемы достаточно эффективны, однако предполагают немалые энергетические, а следовательно, и финансовые затраты на отопление в период эксплуатации [70].

Также следует отметить, что подъемные установки проектируют, исходя из необходимости обеспечения предполагаемой производительности с самого глубокого горизонта на конец отработки месторождения. Поэтому большую часть срока эксплуатации подъемная установка используется неэффективно, а изменить ее параметры довольно затруднительно, поскольку подъемные машины устанавливаются на весь срок эксплуатации шахты.

Однако все эти проблемы являются незначительными на фоне постоянного увеличения глубин разработки шахт и увеличения скоростей и масс скипов для обеспечения требуемой производительности. В современных условиях становится все более очевидным, что канатный скиповый подъем исчерпал свои возможности.

Основными свойствами систем канатного подъема, влияющими на эффективность их эксплуатации, являются:

- длительный рабочий цикл системы, связанный при прочих равных условиях с ёмкостью скипа;
- огромные движущиеся массы, вызывающие соответствующие по величине инерционные нагрузки на систему в периоды неустановившегося движения;
- большая масса подъемных канатов, увеличивающаяся с углублением шахт и повышением ёмкости сосуда, снижает долю полезной нагрузки;
- рост кинетической энергии движущихся масс, снижение КПД и расход

электроэнергии на преодоление сил инерции (следует иметь в виду, что величина кинетической энергии зависит от общей суммы движущихся масс и пропорциональна квадрату скорости, а основным поглотителем накопленной кинетической энергии для машин с асинхронным двигателем является тормозная система);

- увеличение кинетической энергии усложняет режим работы тормозной системы как при маневровом, так и предохранительном торможении;

- повышение скорости сосуда приводит к росту аэродинамического сопротивления его движению;

- повышение износа направляющих устройств, увеличение динамических усилий от толчков;

- увеличение пути предохранительного торможения.

Также стоит отметить проблемы, связанные с основным тяговым органом подъемных установок – канатом, которые становятся все более явными с постоянным увеличением глубин разработки шахт.

Важнейшей проблемой дальнейшего развития и использования канатного подъема на глубоких и сверхглубоких шахтах является тот факт, что при достигнутых на данный момент глубинах разработки (свыше 1000 м) начинает исчерпываться так называемая прочная длина каната, которая определяет предельную глубину, на которой канат разрывается под собственным весом [44].

Критическая длина каната L_0 (в метрах), при которой канат разрывается под собственным весом, равна

$$L_0 = \frac{\sigma_B}{m_{пб} \rho_0 g}, \quad (1.1)$$

где σ_B – временное сопротивление каната разрыву, МПа;

$m_{пб}$ – запас прочности каната по Правилам безопасности;

ρ_0 – условная плотность каната, кг/м³;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Например, для каната по ГОСТ 7668-80 с $\sigma_B = 1770 \text{ МПа}$; $\rho_0 = 9400 \text{ кг/м}^3$; при $m_{пб} = 8,5$ (для грузовых одноканатных установок)

$$L_0 = \frac{1770 \cdot 10^6}{8,5 \cdot 9400 \cdot 9,81} = 2258 \text{ м.}$$

Таким образом, при большой глубине значительная часть прочности каната расходуется на его собственный вес.

Погонная масса каната (кг/м) определяется по формулам:

- для одноканатных установок

$$P_k = \frac{m_{гр} + m_c}{L_0 - H_0}, \quad (1.2)$$

где $m_{гр}$ и m_c – соответственно масса груза и скипа, кг;

H_0 – высота подвеса, м.

- для многоканатных установок при равновесных хвостовых канатах

$$P_k = \frac{m_{гр} + m_c}{z(L_0 - H_0)}, \quad (1.3)$$

где z – количество головных канатов.

Как следует из приведенных формул, чем больше глубина подъема и поднимаемая масса полезного ископаемого, тем больше погонная масса канатов (как для одноканатных, так и для многоканатных установок). При этом критическая длина каната L_0 имеет определенное значение, зависящее лишь от вида каната и материала.

Вес полезного груза, который может поднимать установка, с увеличением глубины уменьшается. Многоканатные установки позволяют поднимать грузы с глубин свыше 1200 м за счет увеличения числа канатов (до 8), но проблемы с применением канатного подъема (разбалансировка канатов, их вытяжка в период начала эксплуатации и т. д.) усугубляются. Кроме этого, увеличивается приведенная масса установки на единицу массы груза, а масса канатов составляет до 50 % приведенной массы подъемной установки. Причем у современных машин, в том числе многоканатных, отношение массы концевой нагрузки к вращающимся массам не превышает 20-25 %.

Таким образом применение канатов накладывает жесткие ограничения на главные параметры подъемной системы – массу поднимаемого груза и глубину подъема. Многие исследователи считают наличие каната основным недостатком современных подъемных установок и говорят о необходимости отказа от использования каната [42].

Как можно заметить, дальнейший рост производительности канатных подъемных установок с увеличением высоты подъема связан со значительными трудностями технического и эксплуатационного характера.

Существенным минусом канатных подъемных установок является присущий им гигантизм: подъемные машины, шкивы и надшахтные сооружения обладают огромными размерами и массами, что выливается в высокую стоимость, сложность изготовления, монтажа и эксплуатации оборудования (приложение Д). В качестве иллюстрации: массы шахтных подъемных машин находятся в диапазоне 100...250 т, диаметры барабанов – 2...6,5 м, диаметры копровых шкивов – 3...6 м, а их массы – 3...15 т, высота копра может превышать 100 м, скип СНМП35-235-1,1 при грузоподъемности 34 т имеет собственную массу более 30 т и габаритные размеры $2,35 \times 1,9 \times 15,9$ м.

1.3. Пневмоподъёмные установки как перспективный вид шахтного скипового подъёма

Сокращение запасов полезных ископаемых, разрабатываемых на небольших глубинах, уменьшение содержания их в исходных рудах, постоянное ухудшение горно-производственных условий добычи на разрабатываемых месторождениях, связанных с углублением горных работ и необходимость освоения новых месторождений со сложными условиями залегания при высоком коэффициенте вскрышных пород обязывают обратить самое серьезное внимание на необходимость разработки новых технологий добычи полезных ископаемых, позволяющих при минимальных затратах материальных ресурсов и энергии поддерживать наиболее экономичный режим отработки месторождений на протяжении всего срока эксплуатации [58].

Поиски альтернативных способов и средств транспортирования ископаемого ведутся с конца прошлого века. Одним из направлений развития бесканатных подъемных установок является скиповой пневмоподъем.

С 1970-х гг. значительная научная работа была проделана учеными Ю. А. Николаевым, А. С. Сагиновым, Б. А. Жаутиковым [30, 49-57, 59-63, 73]. Большой объём исследовательских и внедренческих работ в области трубопроводного контейнерного пневмотранспорта выполнен сотрудниками ГП «ТРАНС-ПРОГРЕСС» А. В. Ильюшей, В. Я. Афанасьевым и др. (рис. 1.5) [2, 14, 39, 109].

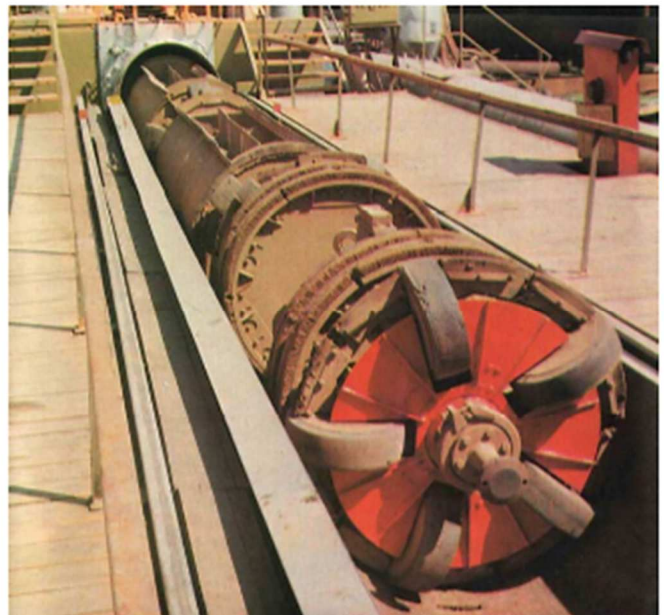


Рис. 1.5. Состав контейнеров в открытом жёлобе

В 1991 г. в Свердловском горном институте была защищена диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук Ю. А. Николаевым, в которой рассмотрена схема скиповой пневмоподъемной установки (ППУ) с гладким цилиндрическим скипом, перемещающимся по стволу, причём в стволе равномерно размещены направляющие и уплотнительные устройства, контактирующие с боковой поверхностью скипа.

Согласно работам Ю. А. Николаева [48], использование ППУ имеет ряд преимуществ: значительная грузоподъемность сосуда (скипа) (50...150 т) и производительность (3...5 млн т/год из шахт и 6...10 млн т/год из карьеров), причем масса груза не зависит от высоты подъема; кратчайший путь транспортирования горной массы без ее дробления; простота конструкции и небольшое давление сжатого воздуха в системе (Ю. А. Николаев указывает значение 0,05...0,15 МПа) позволяют обеспечить высокую работоспособность и безопасность эксплуатации установок, экологическую чистоту; работа установок не зависит от погодных условий.

Совокупность указанных достоинств позволит снизить капитальные затраты на создание этих установок, уменьшить эксплуатационные расходы и за счет этого получать значительный годовой экономический эффект при снижении удельных транспортных расходов.

На рисунке 1.6 приведена конструктивная схема шахтной скиповой пневмоподъемной установки, предложенная Ю. А. Николаевым [54].

Скип 4 загружается на нижней отметке шахты из дозатора 5 струей горной массы.

После загрузки скипа включается нагнетательная станция (воздуходувка) 1, и сжатый воздух начинает поступать под днище скипа. При достижении определенного избыточного давления скип получает ускорение и начинает разгоняться до установившейся скорости движения, определяемой производительностью воздуходувки. Основную часть пути к верхней отметке шахты скип движется с постоянной скоростью, а при подходе к верхнему упорному

устройству 6 тормозится за счет сброса части сжатого воздуха в атмосферу через воздушный затвор 9.

После ввода шахтного скипа 4 в упорное устройство 6 он разгружается через боковые стенки в бункер 7.

Все время разгрузки скипа 4 шахтной пневмоподъемной установки он поддерживается избыточным давлением в полости ствола 3. После разгрузки скипа 4 он под действием сил тяжести начинает опускаться вниз, сжимая под собой воздушную подушку. Скорость опускания скипа 4 и его посадка на нижнее посадочное устройство 8 регулируются воздушным затвором 2.

В 1970-1980 гг. на территории бывшей шахты № 38 ПО «Караганда-уголь» был создан экспериментальный центр исследования параметров и узлов скиповых пневмоподъемных установок и установлена экспериментальная пневмоподъемная установка (рис. 1.7), доказавшая возможность создания скиповых пневмоподъемных установок, их работоспособность и надежность.

За прошедший период выполнен значительный объем научно-исследовательских, конструкторских и экспериментальных работ, доказавших возможность создания данных машин, их надежность и долговечность в

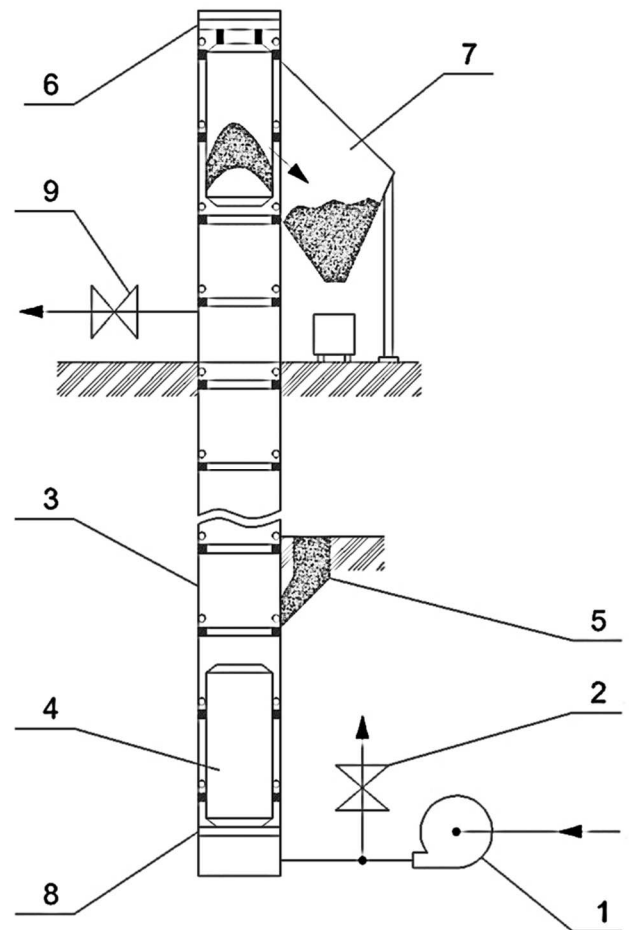


Рис. 1.6. Схема шахтной скиповой пневмоподъемной установки Ю. А. Николаева:

- 1 – нагнетательная станция;
- 2, 9 – воздушный затвор; 3 – ствол с направляющими и уплотнительными устройствами; 4 – скип; 5 – дозатор;
- 6 – упор верхний; 7 – бункер разгрузки;
- 8 – нижнее посадочное устройство

установка (рис. 1.7), доказавшая возможность создания скиповых пневмоподъемных установок, их

эксплуатации. Экономические исследования подтвердили эффективность нового вида транспорта.

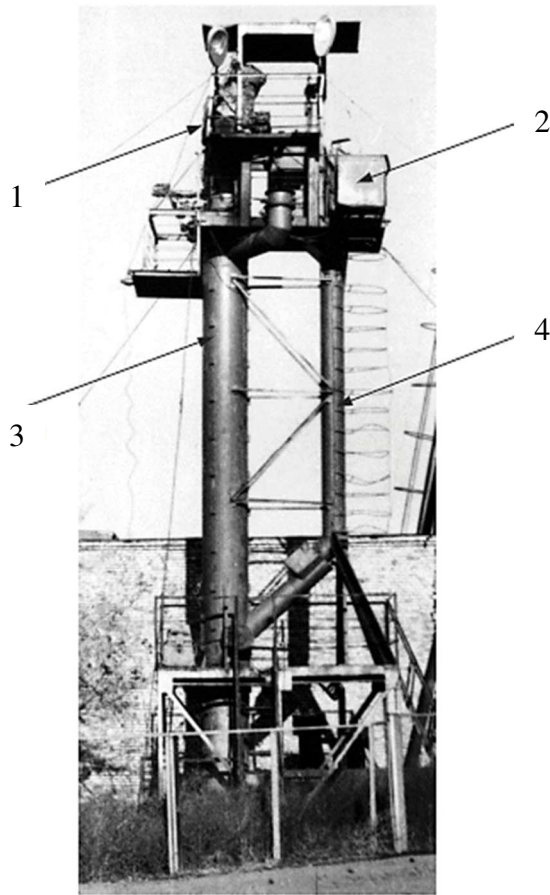


Рис. 1.7. – Экспериментальная установка ППУ Ю. А. Николаева: 1 – поворотная часть путепровода для разгрузки скипа; 2 – бункер для разгрузки скипа; 3 – ствол с направляющими и уплотнительными устройствами; 4 – трубопровод с устройством загрузки скипа

1.4. Постановка задач исследования

При всех своих преимуществах схема, предложенная Ю. А. Николаевым, обладает следующими серьёзными недостатками:

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

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

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

Следует добавить также такие отрицательные факторы, как:

- длительный рабочий цикл и низкий средневзвешенный КПД установки (см. разд. 2);

- большие размеры скипа обуславливают необходимость в высоком надшахтном сооружении (см. рис. 1.7) и значительном объёме приёмного бункера;

- конструкция скипа усложнена, так как должна предусматривать разгрузку через боковые стенки;

- загрузка скипа падающей с большой высоты массой ископаемого будет сопровождаться значительными динамическими нагрузками на его дно и стенки.

Отмеченных недостатков лишены трубопроводные ППУ, разработка которых активно ведётся в Уральском государственном горном университете с 2015 г.

На рис. 1.8 показана принципиальная схема трубопроводной ППУ.

Её отличие от установки конструкции Ю. А. Николаева состоит в том, что скипы 3 – 6, снабжённые направляюще-уплотнительными устройствами, перемещаются в трубопроводах 1 и 2, диаметр которых значительно меньше диаметра ствола. Один или несколько трубопроводов размещаются в стволе, занимая лишь часть его поперечного сечения.

Поток воздуха под повышенным давлением от нагнетательной станции 7 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 в поворотной секции, опорожняется в бункер, после чего подаётся

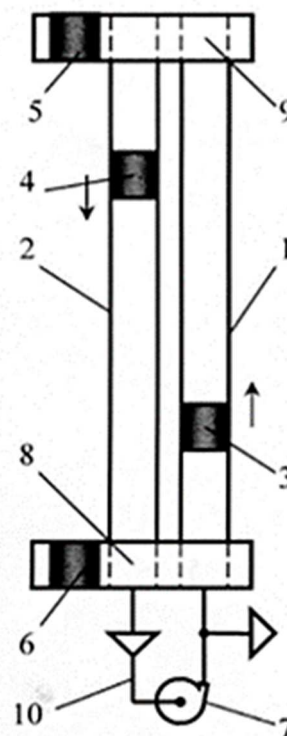


Рис. 1.8. Принципиальная схема трубопроводной ППУ:

- 1 – подъемный трубопровод;
- 2 – спускной трубопровод;
- 3-6 – скипы; 7 – нагнетательная станция (воздуходувка);
- 8 – загрузочная станция;
- 9 – разгрузочная станция;
- 10 – пневмораспределительная система

в трубопровод 2. Порожний скип на загрузочной станции 9 перемещается на позицию загрузки, а затем в трубопровод 1. Распределительная система 10 обеспечивает подачу воздуха из спускного трубопровода 2 на вход нагнетательной станции 7.

Трубопроводы и скипы предполагается выполнять из композитных материалов с высокими физико-механическими показателями и низким удельным весом. Прогноз, основанный на оценочных расчётах, показал перспективность использования подобных систем в качестве высокопроизводительного транспорта (табл. 1.1, 1.2) [105, 107].

Исходные данные:

- производительность 1 100 000 т/год;
- глубина 500 м;
- число рабочих дней в году – 300;
- число часов работы в сутки – 18 ч;
- ископаемое – руда с насыпной плотностью 2 т/м³.

Таблица 1.1

Параметры канатной скиповой установки

Параметр	Значение
Подъёмная машина:	
тип	ЦР-5×3/0,6
диаметр барабана, м	5
ширина барабана, м	3
число барабанов	1
масса*, т	94
Скорость подъёма, м/с	14
Мощность двигателя, кВт	1 000
Число двигателей	2
Скип:	
тип	с секторным затвором
марка	2СН9,5-1
грузоподъёмность, кН	78,5
габаритные размеры, мм	1 850 × 1 540 × 9 200
масса, т	6,9
Примечание. *Без электрооборудования	

Параметры скиповой пневмоподъёмной установки

Параметр	Значение
Число трубопроводов	2
Число скипов	4
Средняя скорость подъёма, м/с	16
Время цикла, с	31, 25
Диаметр трубопровода, м	1,0
Воздуходувка: тип марка диапазон производительности, м ³ /ч диапазон перепада давления, кПа масса, не более, т	центробежная <i>SIEMENS KA-66S(V)GL400</i> 28 000...55000 40...180 8
Мощность двигателя, кВт	2 000
Скип: грузоподъёмность номинальная, кН грузоподъёмность максимальная*, кН габаритные размеры кузова, мм толщина стенки, мм масса**, т	17,4 24,3 ∅ 900 × 2 240 30 0,4
Избыточное статическое давление в подъёмном трубопроводе, кПа: номинальное максимальное	27,1 36,0
<p>П р и м е ч а н и е. *Запас по отношению к номинальной – 1,4. **Материал – композит-реактопласт плотностью не более 2 кг/м³.</p>	

Параметры получены путём ориентировочного расчёта из условий равной производительности с канатной машиной, скорости подъёма 16 м/с и диаметра трубопровода 1 м (скорость принята произвольно).

Расчет приведен в приложении А.

Из табл. 1.2 видно, что воздуходувка бóльшую часть рабочего времени будет эксплуатироваться с недогрузкой (нижняя граница диапазона создаваемого ею перепада давления близка к максимальному расчётному перепаду, найденному по грузоподъёмности скипа). По-видимому, в данном случае целесообразна адаптация конструкции воздуходувки к расчётным параметрам.

Анализ существующих методов расчёта подобных транспортирующих устройств показал, что для обеспечения достоверности проектировочных расчётов необходим учёт специфики физических процессов в сложных системах, включающих порожний и гружёный скипы, спускной и подъёмный трубопроводы, нагнетательную станцию, а также воздушный поток в качестве энергоносителя.

Возникла настоятельная потребность в полноценной математической модели трубопроводной ППУ.

В дальнейшем под ППУ подразумевается трубопроводная установка.

Для достижения достоверности проектировочным расчётам ППУ необходимо провести исследования по следующим направлениям:

- выполнить сравнение различных схем ППУ по обобщённым критериям с целью выявления наиболее перспективной из них;

- установить соотношения между конструктивными и энергетическими параметрами ППУ, в которой предусматривается компенсация собственного веса скипа;

- теоретически описать кинематику порожнего и гружёного скипов с учётом аэродинамического сопротивления трубопровода и термодинамических явлений в несущей среде;

- вывести соотношения, описывающие преобразование кинетической энергии порожнего скипа в потенциальную сжатого воздуха на выходе нагнетателя (рекуперацию) с целью интенсификации разгона гружёного скипа;

- исследовать возможность использования в ППУ уплотнительных устройств различных типов;

- подтвердить достоверность полученных теоретических выводов экспериментальными исследованиями физической модели ППУ.

Изложенные выше рассуждения позволяют сформулировать задачи работы:

- систематизация возможных конструктивных схем трубопроводных ППУ и их оценка на основе обобщённых критериев;

- вывод зависимостей для определения оптимальных по критерию минимума энергозатрат геометрических и энергетических параметров ППУ;
- теоретическое описание теплообменных процессов в подъемном трубопроводе ППУ;
- получение комплекса формул для нахождения кинематических параметров скипа в подъемном и спускном трубопроводах;
- подтверждение адекватности полученных теоретических выкладок методами физического моделирования.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЁТА СКИПОВЫХ ПНЕВМОПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

2.1. Конструкции и компоненты скиповых пневмоподъемных установок

2.1.1. Разновидности скиповых пневмоподъемных установок

На рис. 2.1 приведена классификация ППУ.

Системы с нагнетательной станцией, различающиеся количеством трубопроводов и скипов, подробно рассмотрены ниже.

Включение в классификацию систем с всасывающей станцией, комбинированные и с распределёнными по трассе нагнетательными (всасывающими) станциями отражает принципиальную возможность их реализации.

Воздуходувки способны создавать пониженное давление (вакуум) со стороны входного окна. В частности, для агрегатов *SIEMENS* декларируется вакуум 0,4 бар [98], что позволяет перемещать сосуд за счёт разности между атмосферным давлением и давлением на входе воздуходувки. В варианте системы с всасывающей станцией воздуходувка располагается на поверхности и сообщается входным окном с подъёмным трубопроводом. Существенный недостаток варианта заключается в инерционности пневмосистемы: для создания вакуума в большом объёме требуется значительное время, и перемещение сосудов на загрузочной и разгрузочной станциях, а также любое переключение воздушного потока будут сопровождаться паузами, увеличивающими продолжительность рабочего цикла.

В классификацию также включен вариант, в котором подъём обеспечивается несколькими нагнетательными (всасывающими) станциями, распределёнными по трассе. На текущий момент целесообразность подобных схем обоснована недостаточно и вызывает некоторые сомнения.

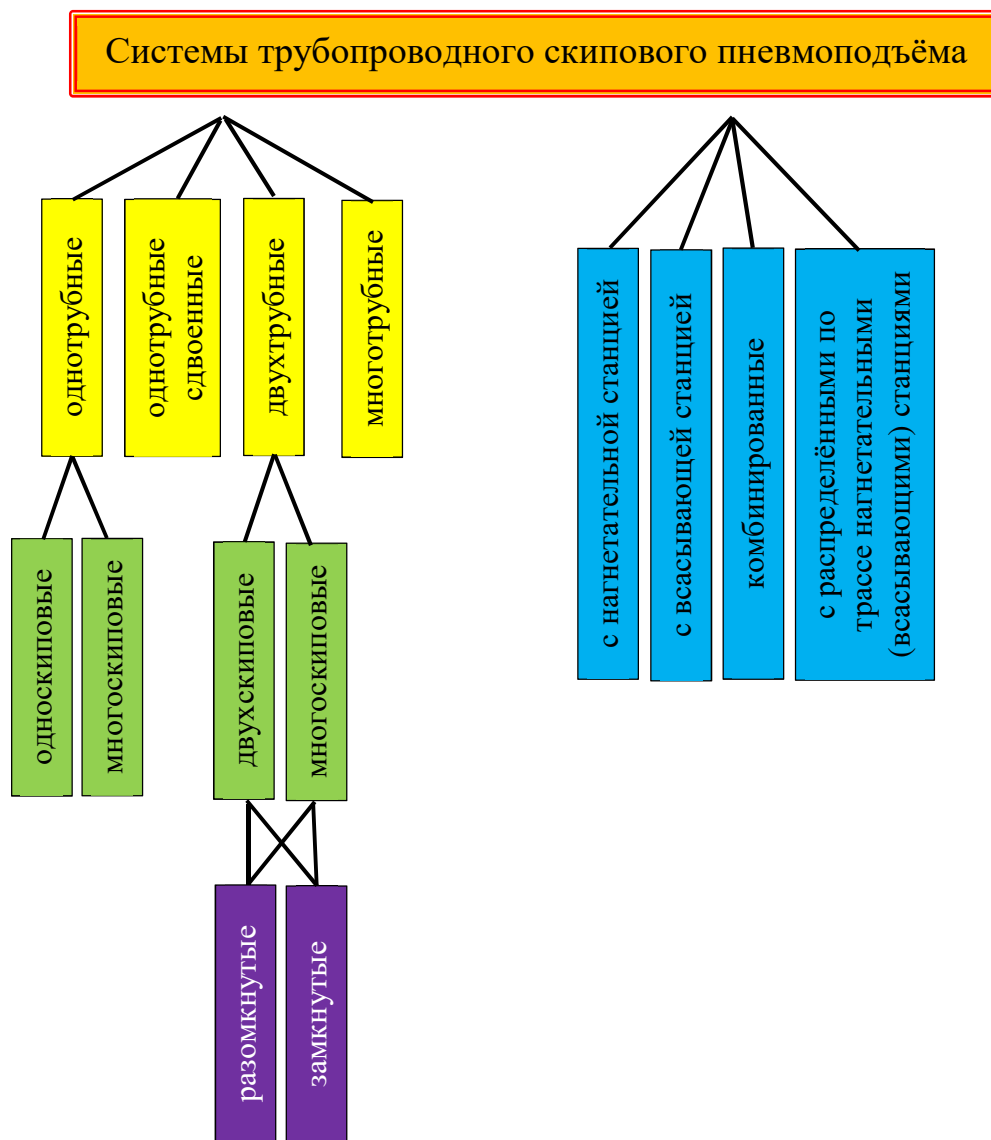


Рис. 2.1. Классификация скиповых пневмоподъёмных установок

На рис. 2.2 представлены варианты схем ППУ, различающиеся количеством трубопроводов и скипов.

Однотрубная односкиповая установка (рис. 2.2, а) содержит трубопровод 1, скип 2, нагнетательную станцию 3 с пневмосистемой 4, а также загрузочную 5 и разгрузочную 6 станции.

После загрузки скипа на станции 5 пневмосистема 4 подаёт воздух от нагнетательной станции в трубопровод. Грузёный скип поднимается на верхний горизонт, разгружается на станции 6 и спускается под собственным весом. Воздуходувка представляет собой мощный агрегат с большими инерционными

массами, остановка которого и последующий выход на расчётный режим требуют длительного времени и связаны с высокими нагрузками на систему питания. Поэтому в течение загрузки, разгрузки и спуска скипа нагнетательная станция не выключается, а работает вхолостую, причём воздушные потоки от неё и из-под опускающегося скипа выводятся пневмосистемой 4 в атмосферу.

Достоинством системы являются простота конструкции и минимальные затраты на изготовление, монтаж и обслуживание.

К недостаткам относятся низкая производительность и высокие энергозатраты. Причина первого недостатка состоит в длительности рабочего цикла. Второй же связан с невозвратными потерями электроэнергии. Больше половины времени цикла нагнетательная станция работает вхолостую, потребляя при этом энергию из сети. Кроме того, подъём не уравновешен и требует затрат энергии на перемещение не только ископаемого, но и собственной массы скипа.

Повышение производительности достигается в однетрубной сдвоенной системе. Прообразом данного варианта служит пневмоподъём, предложенный Ю. А. Николаевым [63]. Вариант содержит две однетрубных односкиповых системы, в которые воздух от воздуходувки подаётся поочередно. Рабочий цикл организован так, что во время подъёма гружёного скипа по одном из трубопроводов в другом происходит спуск порожнего. Пауза в работе воздуходувки сокращается до периода загрузки – разгрузки. Неуравновешенность же подъёма не устраняется.

Однетрубная многоскиповая установка показана на рис. 2.2, б (компонентам ППУ присвоены те же позиции, что и на рис. 2.2, а). Отличие её от односкиповой заключается в том, что выдача ископаемого производится двумя или более скипами, а в загрузочную 5 и разгрузочную 6 станции входят накопители. В накопителе станции 5 порожний скип ожидает загрузки и подъёма, а в накопителе станции 6 – спуска.

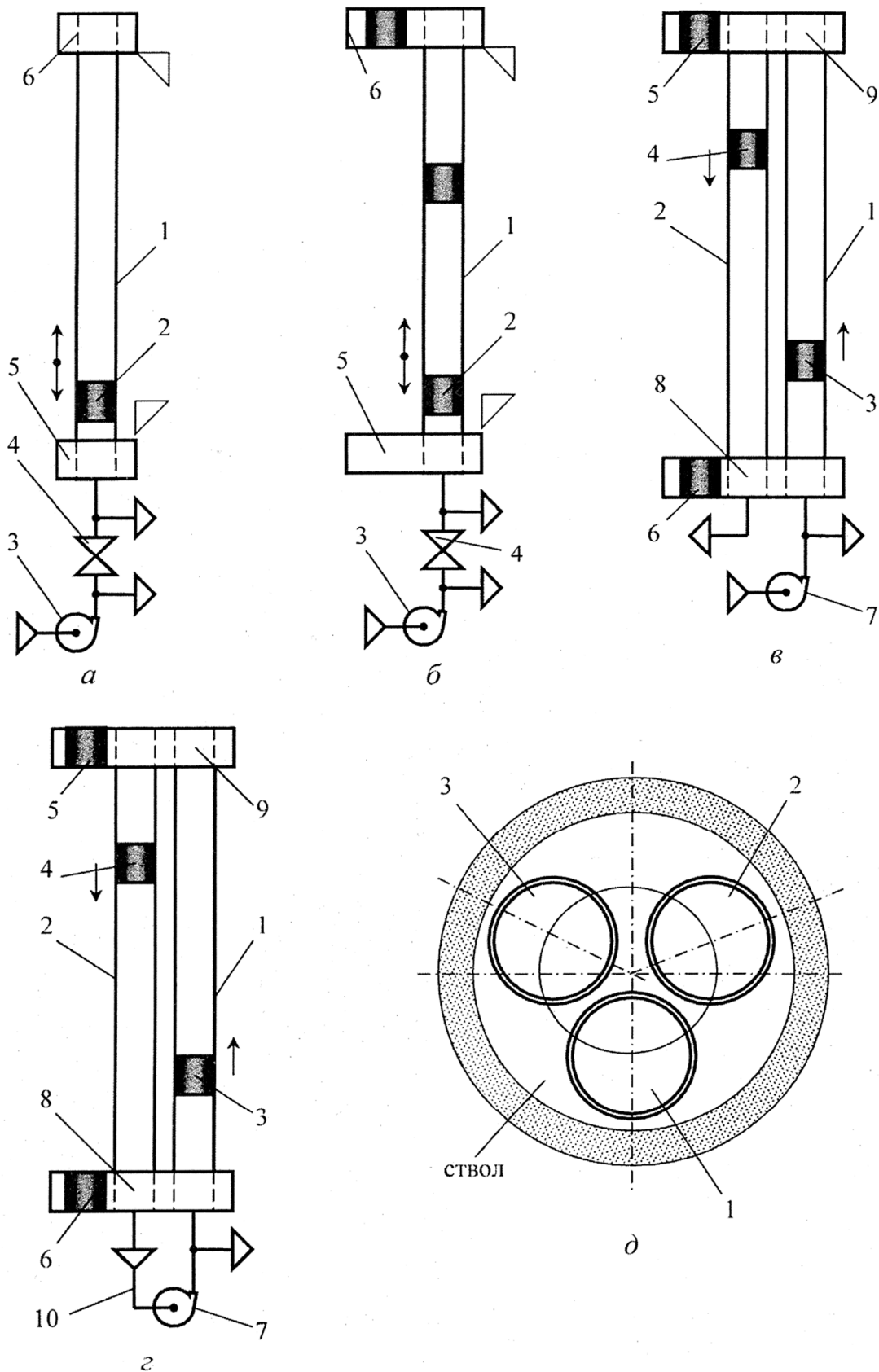


Рис. 2.2. Разновидности скиповых пневмоподъемных установок: *а* – однетрубная односкиповая; *б* – однетрубная многоскиповая; *в* – двухтрубная четырехскиповая с открытой схемой; *г* – двухтрубная четырехскиповая с замкнутой схемой; *д* – многотрубная

По сравнению с односкиповой ППУ многоскиповая имеет повышенную производительность и сокращённое время работы нагнетательной установки вхолостую. Последнее достигается за счёт совместного спуска опорожненных скипов (пакетом).

На разгрузочной станции из порожних скипов формируется пакет, который спускается под собственным весом и снова разделяется на загрузочной станции. Рабочий цикл трёхскиповой системы (рис. 2.3) организован таким образом, что период спуска и, соответственно, время холостой работы нагнетательной станции может составить не более 25 % продолжительности цикла.

В двухтрубной двухскиповой ППУ (на рис. 2.2 не показана) спуск порожнего и подъём гружёного скипов происходит одновременно, период спуска в состав цикла не входит, за счёт чего по сравнению с одностручными системами повышается производительность.

Ещё большей производительностью обладает двухтрубная четырёхскиповая ППУ (рис. 2.2, в). В неё входят подъёмный 1 и спускной 2 трубопроводы, скипы 3

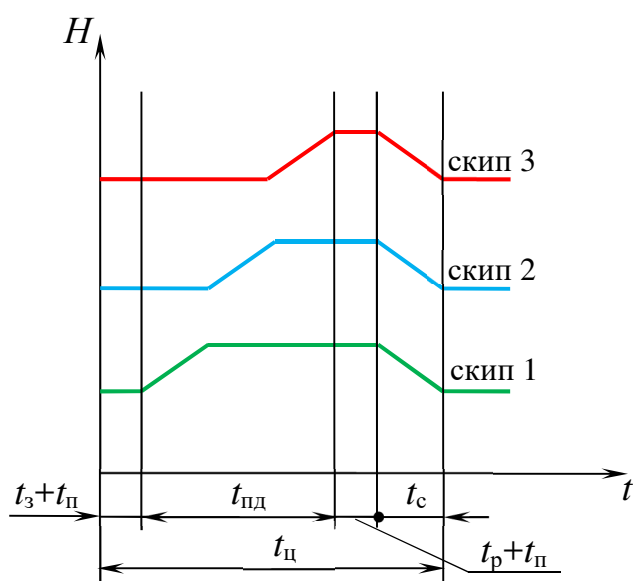


Рис. 2.3. Рабочий цикл однострубной трёхскиповой системы:

t_3 – время загрузки скипа 1; $t_{пд}$ – период подъема; $t_р$ – время разгрузки скипа 3; $t_п$ – пауза; $t_с$ – период спуска пакета; $t_ц$ – продолжительность цикла

– 6, нагнетательная станция 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.

В произвольно взятый момент времени скипы 3 и 4 перемещаются по трубопроводам, скип 5 разгружается на станции 9, а скип 6 загружается на станции 8. По прибытии скипа 3 на станцию 9

начинается спуск скипа 5 и подъём скипа 6.

Таким образом, наличие в системе четырёх скипов исключает из цикла периоды загрузки, разгрузки и пауз, которые реализуются во время подъёма (спуска), и, следовательно, двухтрубная четырёхскиповая ППУ способна, как уже было отмечено, обеспечить более высокую производительность при одних и тех же значениях скорости движения и ёмкости сосудов, чем однотрубные. Несмотря на усложнение конструкции с переходом с одного трубопровода на два, указанное преимущество в ряде случаев может оказаться решающим.

Неуравновешенность подъёма по-прежнему остаётся существенным недостатком системы по рис. 2.2, в.

С целью снижения невозвратных потерь энергии предложена двухтрубная система с замкнутой схемой, в которой вытесняемый порожним скипом воздух подаётся во входное окно воздухонагнетательного агрегата (рис. 2.2, з) [76]. К элементам, входящим в ППУ по рис. 2.2, в, в замкнутой схеме добавляется воздуховод 10, соединяющий нижнее сечение спускного трубопровода 2 со входом воздухонагнетательного агрегата (воздуходувки).

Под движущимся с постоянной скоростью порожним скипом 4 создаётся избыточное давление воздуха, определяющееся собственным весом скипа и площадью живого сечения трубы. Поток из-под скипа 4 входит в воздуходувку, в результате чего компенсируется часть затрат энергии на подъём гружёного скипа 3. Данный эффект возможен только в двухтрубной системе.

Энергетические характеристики воздуходувок [110] позволяют реализовать высокую производительность системы с трубами диаметром не более 2 м, что даёт возможность разместить в стволе шахты нескольких трубопроводов. На рис. 2.2, д представлено сечение ствола с тремя трубопроводами: 1 и 2 – подъёмные, 3 – спускной. Вариант ППУ предполагает спуск порожних скипов пакетом и их загрузку с последующим распределением гружёных скипов между подъёмными трубопроводами.

С целью сравнения установок, показанных на рис. 2.2, *a* – *г*, по производительности и энергозатратам выполнена ориентировочная оценка показателей по рекомендациям [25]. Длительность периодов, формирующих рабочий цикл, назначалась по аналогии с канатным подъёмом. Из всех потерь энергии учитывались только связанные с неуравновешенностью подъёма и холостым режимом работы воздуходувки.

Для определённости расчётов приняты следующие параметры:

- ископаемое – руда;
- ёмкость скипа (масса транспортируемого материала) m_m для всех систем одинаковая и находится в интервале от 5 до 6 т;
- собственная масса скипа $m_c = 0,3m_m$;
- максимальная скорость подъёма $v_{max} = 20$ м/с;
- ускорение и замедление скипа $a_p = a_z = 5$ м/с².

Режим работы для всех систем один и тот же.

Значения производительности получены по отношению к показателю однотрубной односкиповой ППУ с глубиной ствола 200 м, принятому за единицу (относительная производительность обозначена \bar{Q}).

На рис. 2.4 показаны графики зависимости $\bar{Q}(H)$ для рассматриваемых установок. Графики наглядно демонстрируют преимущество двухтрубной ППУ перед однотрубными. Переход с однотрубной односкиповой на трёхскиповую позволил повысить производительность в 1,8...1,6 раза, однако даже по сравнению с трёхскиповой двухтрубная четырёхскиповая ППУ позволяет достичь в 1,7...1,4 раза более высоких значений параметра.

Эффективность энергопотребления установки оценивалась величиной средневзвешенного КПД за цикл $\bar{\eta}$. Возможность уменьшения подачи воздуходувки в период холостой работы не учитывалась, поэтому значения $\bar{\eta}$ для однотрубных систем несколько занижены.

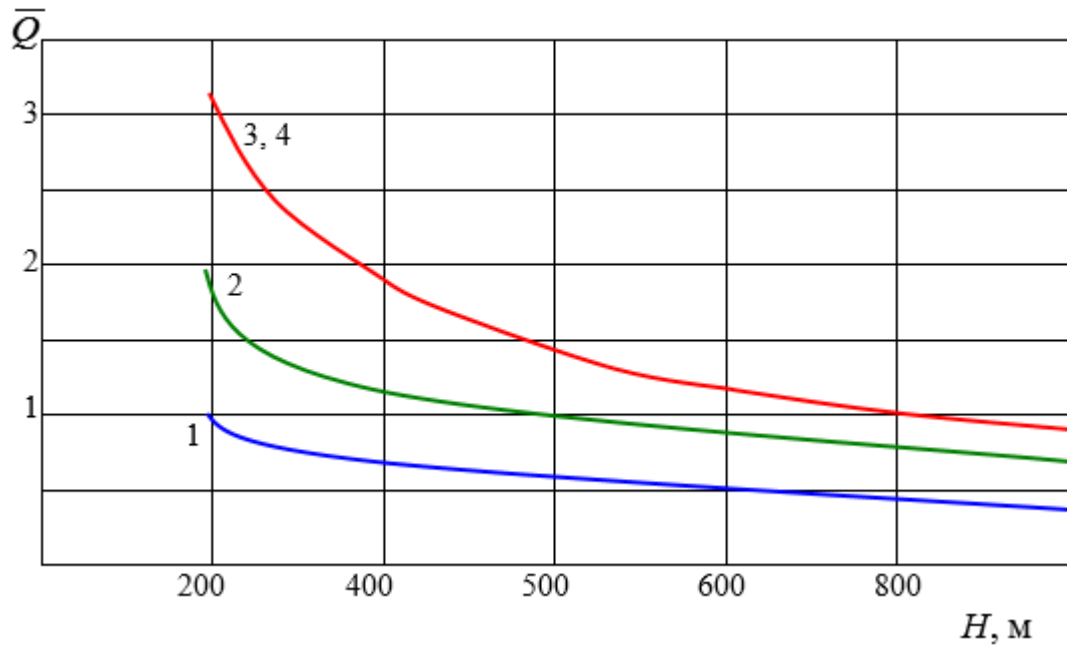


Рис. 2.4. Значения относительной производительности установок:
 1 – однотрубная односкиповая; 2 – однотрубная трёхскиповая; 3 – двухтрубная четырёхскиповая; 4 – двухтрубная четырёхскиповая с замкнутой схемой

Средневзвешенный КПД определялся по формуле

$$\bar{\eta} = \eta \frac{m_m t_{\Pi}}{(m_m + m_c) t_{\text{ц}}}, \quad (2.1)$$

где $\eta = 0,8$ – номинальный КПД воздуходувок *SIEMENS*;

t_{Π} – время подъёма;

$t_{\text{ц}}$ – длительность цикла.

В двухтрубных четырёхскиповых ППУ период разгрузки и пауза в состав цикла не входят. Кроме того, в замкнутой системе подъём уравновешен, и дробный член в правой части формулы (2.1) равен единице, следовательно, $\bar{\eta} = \eta = 0,8$.

Графики зависимости $\bar{\eta} = \eta(H)$ показаны на рис. 2.5.

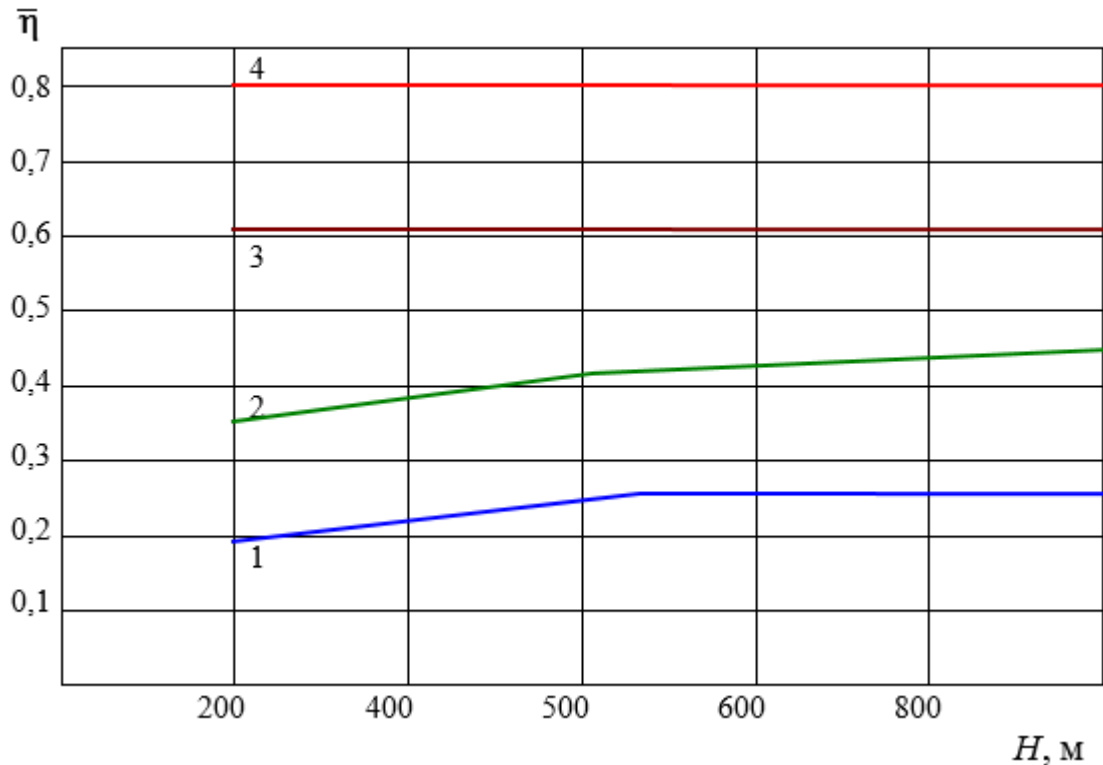


Рис. 2.5. Значения средневзвешенного КПД установок:

1 – однотрубная односкиповая; 2 – однотрубная трёхскиповая; 3 – двухтрубная четырёхскиповая; 4 – двухтрубная четырёхскиповая с замкнутой схемой

Сделанные выше предположения о производительности и энергозатратности основных систем полностью подтверждаются оценочными расчётами. Необходимо отметить, что на данном этапе исследований нет оснований для однозначного выбора какой-либо схемы в качестве наиболее целесообразной к внедрению на любом горнодобывающем предприятии, так как выбор той или иной конструкции должен осуществляться на основе технико-экономического сравнения.

Результаты расчётов, однако, являются вескими доводами в пользу предположения о том, что современным интенсивным производством наиболее востребованы будут двухтрубные схемы. Поэтому именно они и выбраны как объект дальнейшего исследования.

2.1.2. Вариант конструкции двухтрубной двухскиповой установки с замкнутой схемой

Итогом сравнительного анализа установок скипового пневмоподъёма наиболее эффективной были признаны двухтрубные, а из двухтрубных – четырёхскиповая ППУ. Установка, показанная на рис. 2.2, в, проще замкнутой (рис. 2, з) по конструкции и управлению, однако замкнутая ППУ имеет существенно более высокий средневзвешенный КПД. Более подробно будут представлены двухтрубные замкнутые системы.

Вариант конструкции двухскиповой ППУ поясняется рис. 2.6 – 2.9. Далее в качестве наименования системы используется термин *установка*.

Установка (рис. 2.6) содержит подъёмный 1 и спускной 2 трубопроводы, смонтированные в шахтном стволе (на рис. 2.6 не показан), разгрузочную 3 и загрузочную 4 станции, воздуходукку 5 и распределительную систему 6, в которую входят краны 7 – 11 [99].

Распределительная система подробно не рассматривается, т.к. не содержит новизны по сравнению с известными на текущий момент аналогами [71, 97].

Воздуходувка снабжена собственной системой управления, позволяющей снизить подачу до 45 % номинальной [112].

В разгрузочную станцию 3 (рис. 2.7) входят поворотная платформа 11, установленная на неподвижной опоре качения 12, привод вращения 13 поворотной

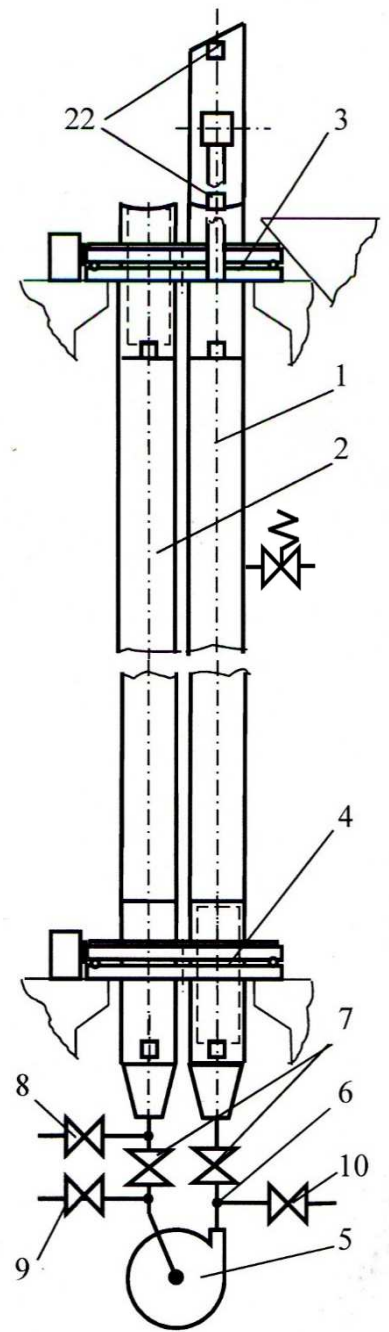


Рис. 2.6. Схема установки

платформы, прикреплённые к поворотной платформе и расположенные симметрично относительно оси её вращения верхние секции 14 и 15 трубопроводов 1 и 2.

На опоре качения 12 смонтированы стойки 16, на которых посредством осей 17 и 18 с возможностью вращения установлена опрокидывающая секция 19. В вертикальном положении опрокидывающая секция соосна верхней секции 14. Ось 17 соединена с выходным валом мотор-редуктора 20. В верхней секции 15 находится порожний скип 21, удерживаемый фиксаторами 22.

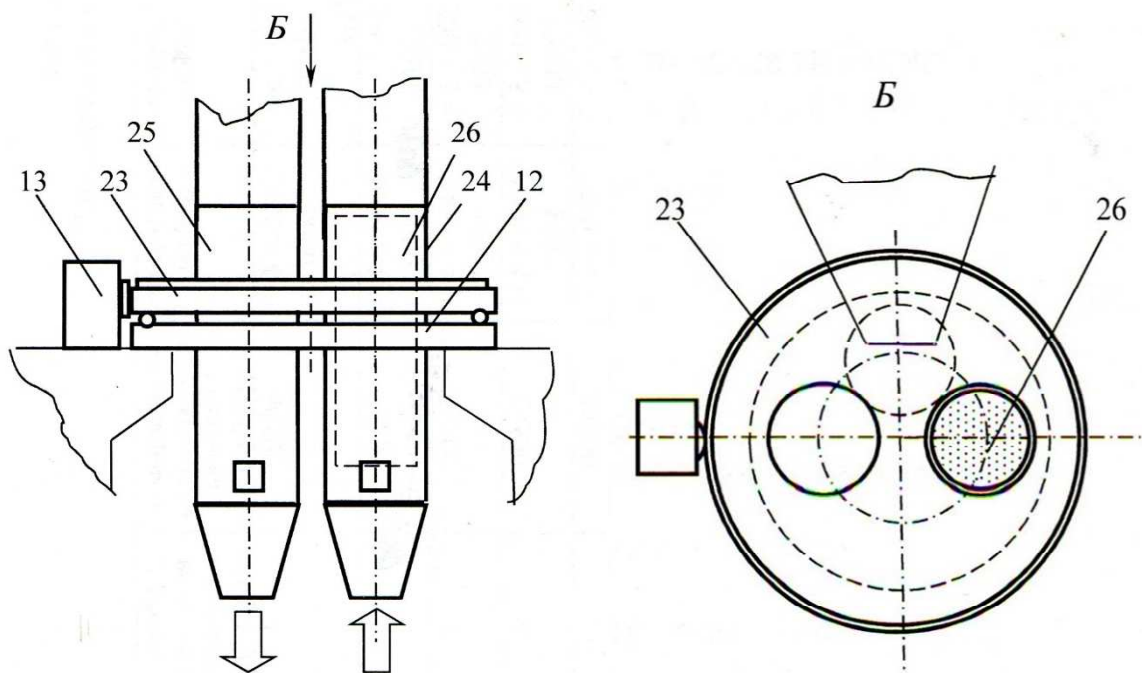


Рис. 2.7. Разгрузочная станция

Загрузочная станция (рис. 2.8) содержит поворотную платформу 23 с нижними секциями 24 и 25 трубопроводов 1 и 2. В нижней секции 24 находится грузёный скип 26.

На рис. 2.9 показан простейший из рассматриваемых вариантов подъёмного сосуда. Корпус скипа 27 имеет вид контейнера с направляюще-уплотнительными устройствами в виде колец 28, которые выполняют функции как бесконтактных уплотнений, так и вкладышей подшипников скольжения.

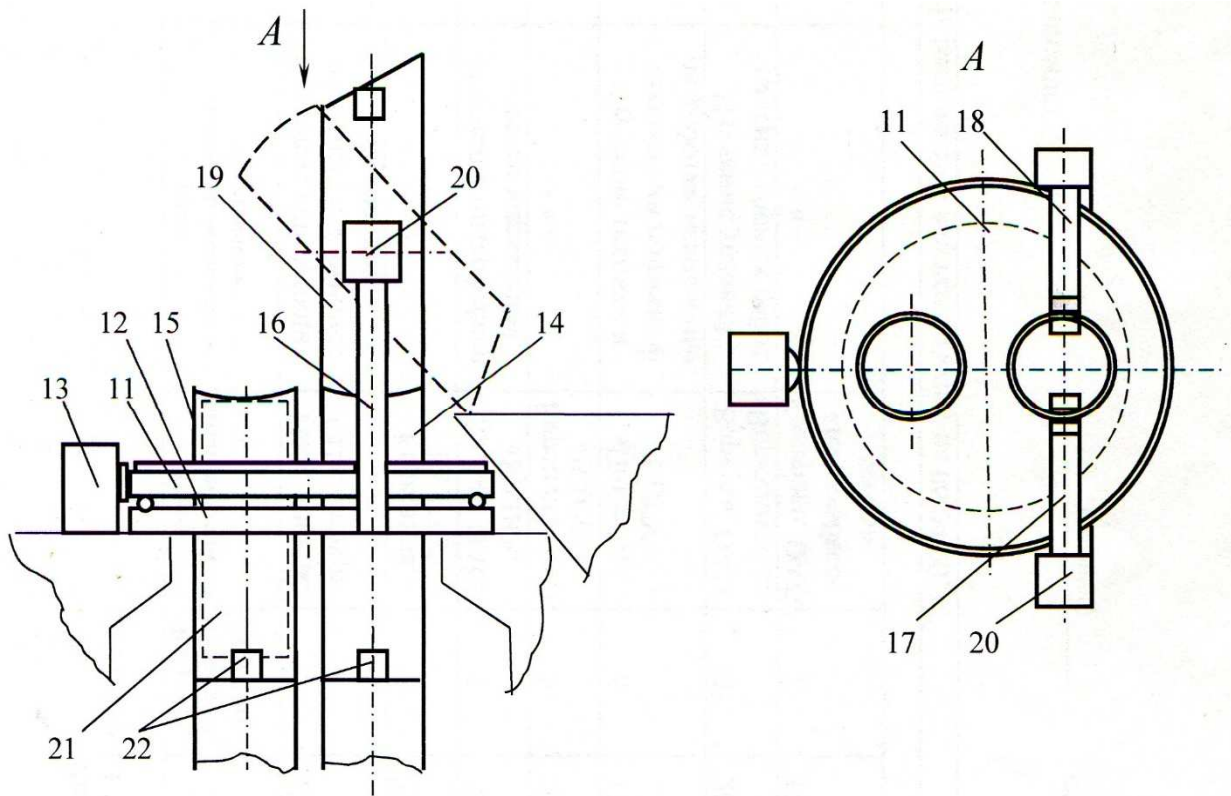


Рис. 2.8. Загрузочная станция

Между кольцами 28 и внутренней стенкой трубопровода имеются гарантированные зазоры, через которые будет проходить часть воздушного потока. Расчёты показывают, что за счёт увеличения количества колец потеря расхода может быть снижена до приемлемой величины.

Особо следует отметить, что трубопроводы со всеми секциями, корпуса скипов и направляюще-уплотнительные устройства выполнены из полимерных композиционных материалов (ПКМ), или композитов. Специально подобранные многослойные композиты по прочностным показателям сравнимы с низкоуглеродистыми, а в

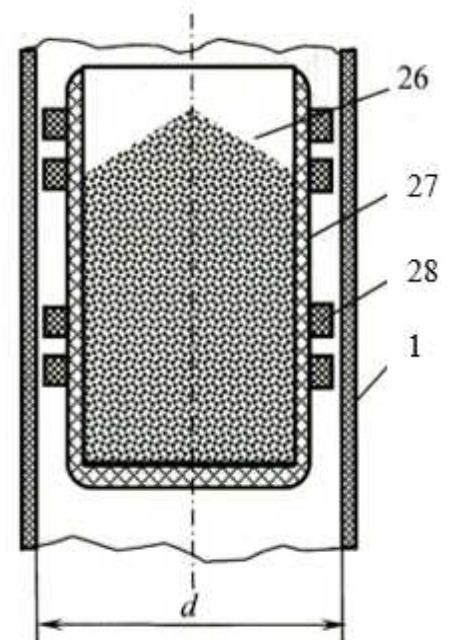


Рис. 2.9. Грузённый скип

особых случаях – и с легированными сталями и имеют плотность в 4 – 5 раз меньше [75].

Существует также реальная возможность изготовления колец 28 из композита с графитовым наполнителем, обеспечивающим минимизацию сил трения между кольцами и стенками трубопроводов.

Предложенная установка работает следующим образом.

В исходный момент времени воздуходувка 5 включена, краны 7 и 8 закрыты, 9 и 10 открыты, воздуходувка установлена на минимальную подачу и работает в режиме паузы с нулевым избыточным давлением на выходе.

Затем начинается спуск порожнего скипа 21 под собственным весом, краны 7 открываются, краны 9 и 10 закрываются, подача воздуходувки увеличивается, и воздух начинает поступать из спускного трубопровода во входное окно воздуходувки, а из её выходного окна – в подъёмный трубопровод под гружёный скип 26. Пауза в работе воздуходувки заканчивается, начинается период неустановившегося движения скипов.

По мере разгона скипов подача воздуходувки повышается до расчётной величины, и скипы приобретают заданные постоянные скорости, т.е. наступает период установившегося движения.

В спускном трубопроводе развивается избыточное давление, определяемое весом порожнего скипа 21, поэтому при подаче воздуха из спускного трубопровода во входное окно воздуходувки электроэнергия расходуется только на транспортирование ископаемого.

В момент приближения на расчётное расстояние гружёного скипа к разгрузочной станции, а порожнего скипа – к загрузочной станции начинается постепенное закрывание кранов 7, открывание кранов 9 и 10 и уменьшение подачи воздуходувки. Скорости скипов снижаются, и к моменту полного закрытия кранов 7 и открытия кранов 9 и 10 гружёный скип с минимальной скоростью прибывает в опрокидывающую секцию 19 разгрузочной станции, а порожний скип – в концевую

секцию 25 загрузочной станции. Воздуходувка 5 возвращается в режим паузы с минимальной подачей.

Кран 8 играет вспомогательную роль. Он открывается в случае рассогласования движения скипов, когда гружёный скип прибыл в опрокидывающую секцию, а порожний ещё не достиг концевой секции.

Мотор-редуктор 20 (рис. 2.7) наклоняет опрокидывающую секцию 19, а привод вращения 13 поворотной платформы 23 (рис. 2.8) перемещает концевую секцию 25 в положение загрузки (показано штриховыми линиями).

Выполняются операции разгрузки гружёного и загрузки порожнего скипов. Затем мотор-редуктор возвращает опрокидывающую секцию в вертикальное положение, и опорожненный скип опускается в концевую секцию 14. Приводы вращения устанавливают концевую секцию 14 с порожним скипом соосно спускному трубопроводу 2, концевую секцию 25 с загруженным скипом соосно подъёмному трубопроводу 1, и цикл подъёма завершается.

Равенство средних скоростей гружёного и порожнего скипов обеспечивается при значении внутреннего диаметра d трубопроводов (рис. 2.9), которое определяется по формуле, приведённой в подразделе 2.2.

Соединение спускного трубопровода с входным окном воздуходувки и установка направляюще-уплотнительных устройств на скипы позволят добиться экономии энергозатрат установки за счёт устранения невозвратных затрат энергии на подъём собственной массы скипа и снижения аэродинамического сопротивления трассы.

2.1.3. Структура рабочего цикла двухтрубной четырёхскиповой установки

К особенностям двухтрубной четырёхскиповой установки относятся:

- наличие четырёх сосудов;

- периодическое местонахождение на загрузочной и разгрузочной станциях двух сосудов одновременно.

Структура рабочего цикла установки поясняется рис. 2.10. Обозначения: 1 – подъёмный трубопровод; 2 – спускной трубопровод; 3 – 6 – скипы; 7 – загрузочная станция; 8 – разгрузочная станция.

В начальный момент (рис. 2.10, *а*) гружёные скипы 3 и 6 находятся на загрузочной станции 7, а порожние 4 и 5 – на разгрузочной станции 8.

Начинается подъём скипа 3 и спуск скипа 5 (рис. 2.10, *б*). Скипы 4 и 6 перестановочными устройствами перемещаются к трубопроводам 2 и 1 соответственно.

Скип 3 прибывает на разгрузочную станцию, скип 5 – на загрузочную станцию, скип 4 готов к спуску, скип 6 – к подъёму (рис. 2.10, *в*).

Начинается подъём скипа 6 и спуск скипа 4 (рис. 2.10, *г*). Скип 3 перестановочным устройством станции 8 устанавливается на разгрузку, а после опорожнения перемещается к трубопроводу 2; скип 5 – перестановочным устройством станции 7 на загрузку, а после загрузки перемещается к трубопроводу 1.

Скип 6 прибывает на разгрузочную станцию, скип 4 – на загрузочную станцию, скип 3 готов к спуску, скип 5 – к подъёму (рис. 2.10, *в*).

Система пришла к состоянию, аналогичному рис. 2.10, *в*, и с этого момента устанавливается непрерывный рабочий цикл, при котором она не возвращается к положению по рис. 2.10, *а*. При рациональной организации операций загрузка, опорожнение и перестановка двух скипов на станциях выполняются в течение периода движения двух других по трубопроводам.

Таким образом, длительность цикла подъёма становится равной времени, которое скип затрачивает на движение от станции 7 к станции 8.

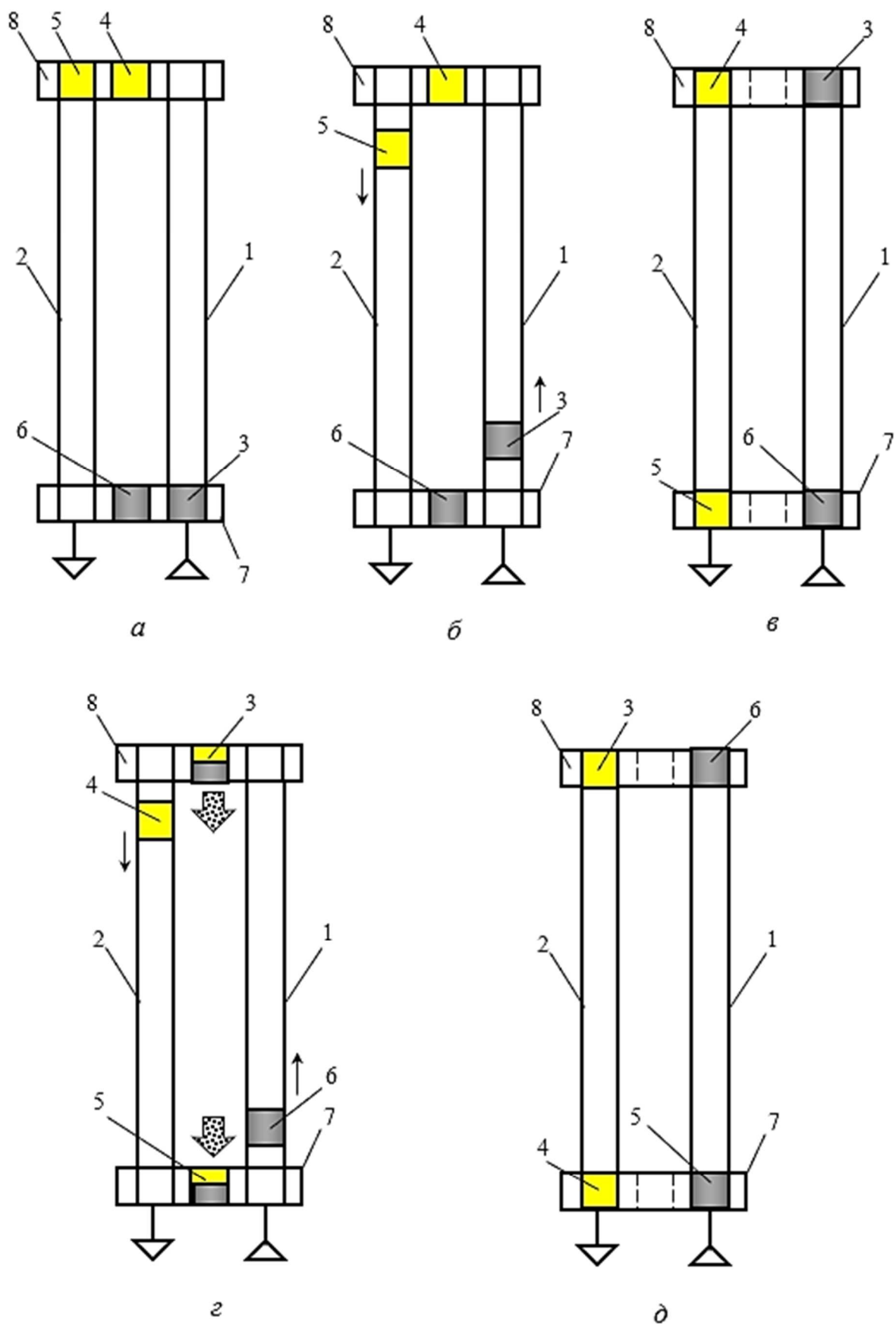


Рис. 2.10. Рабочий цикл двухрубной четырёхскиповой установки

В четырёхскиповой установке в полной мере реализуется такое техническое преимущество пневмоподъёма как отсутствие механической связи между сосуда́ми. Если в канатном двухконцевом подъёме положение одного из скипов строго определяется положением другого, то в пневмоподъёме такой обусловленности не существует. Данное обстоятельство даёт определённую свободу манипулирования числом и скоростью сосудов. Например, изъятие при необходимости одного скипа из системы приведёт к снижению её производительности, но не к перебою в функционировании.

2.2. Теоретические основы расчёта скиповых пневмоподъёмных установок

2.2.1. Теплообменные процессы в подъёмном трубопроводе

Воздухонагнетательная станция подаёт в подъёмный трубопровод поток, температура которого существенно выше температуры окружающего воздуха. Данный факт объясняется потерями энергии при создании избыточного давления активными элементами ротора воздуходувки. Современные воздуходувки производства *SIEMENS* обладают КПД 80 – 85 % [110], причём его величина снижается с повышением напорной способности агрегата. И хотя он достаточно высок для турбомашин, около 20 % мощности агрегата расходуется на нагревание газа.

Нагретый воздух под давлением поступает в подъёмный трубопровод и осуществляет транспортировку гружёного скипа на поверхность. В результате теплообмена трубопровод нагревается, а воздух под скипом охлаждается. Процесс изобарический, снижение температуры сопровождается увеличением плотности воздуха и уменьшением скорости подъёма.

Исследование теплообменных процессов между нагретым потоком со стенкой трубы и стенки трубы с атмосферой предполагает решение двух задач:

- установление температурного режима эксплуатации трубопровода;
- оценка влияния охлаждения воздуха на скорость движения скипа.

Первая задача актуальна потому, что необходимо установить, способны ли трубы из ПКМ и конкретно из стеклопластика выполнять свои функции при расчётных температурах.

Охлаждение потока по мере подъёма скипа приводит к увеличению плотности воздуха и соответственному снижению расхода, что отражается на скорости сосуда. Определение зависимости скорости гружёного скипа от его координаты позволит рассчитать среднюю скорость подъёма и цикл работы установки.

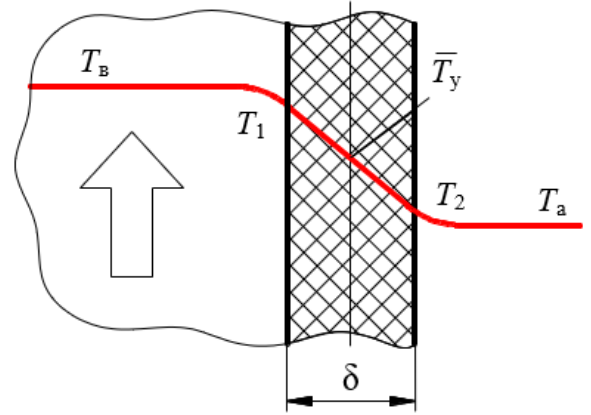


Рис. 2.11. К определению температуры стенки трубы

На рис. 2.11 показан фрагмент стенки трубы. Обозначения: T_B – температура воздушного потока на выходе воздуходувки; T_1 , T_2 – температура на внутренней и внешней поверхностях стенки соответственно; T_a – температура атмосферного воздуха; T_y – температура стенки; δ – толщина стенки.

Стенка трубы цилиндрическая, но, поскольку её толщина гораздо меньше внутреннего диаметра d , расчёт без существенных погрешностей можно выполнять по формулам для плоской стенки.

Плотность теплового потока через стенку равна [7]

$$q = k(T_B - T_a), \quad (2.2)$$

где k – коэффициент теплопередачи.

Величина коэффициента теплопередачи определяется по формуле

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \right)^{-1}, \quad (2.3)$$

где α_b – коэффициент теплоотдачи внутреннего потока к стенке;

α_a – коэффициент теплоотдачи от стенки в атмосферу;

λ – коэффициент теплопроводности ПКМ.

Температуры внутренней и наружной поверхностей стенки

$$\begin{aligned} T_1 &= T_b - \frac{q}{\alpha_b}; \\ T_2 &= T_a + \frac{q}{\alpha_a}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Формулы (2.4) дают значение наивысшей температуры T_1 , воздействию которой подвергается материал на входном участке трубопровода, и позволяют вычислить среднюю температуру \bar{T}_y нагрева стенки в режиме установившегося теплообмена:

$$\bar{T}_y = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (2.5)$$

Интерес представляет время нагрева, по истечении которого процесс теплообмена на начальном участке трубы станет установившимся.

Задача расчёта нестационарного теплообмена достаточно трудоёмка [6]. Учитывая, что на текущем этапе исследований высокие требования к точности не предъявляются, ограничимся ориентировочной оценкой.

Примем допущения:

- теплоотдача от внешней поверхности трубы в атмосферу отсутствует ($\alpha_a = 0$);

- труба по всей толщине прогревается до температуры \bar{T} .

Подход к решению задачи основан на законе сохранения энергии. К внутренней поверхности стенки трубы подводится тепловая энергия нагретого до

высокой температуры потока, часть энергии идёт на нагрев стенки, остаток передаётся через наружную поверхность в атмосферу. Изначально разность температур наружной поверхности и атмосферы равна нулю, разность температур горячего воздуха и стенки максимальная, кроме того, внутренний горячий поток движется с высокой скоростью, а атмосферный воздух неподвижен. Действие этих факторов приводит к тому, что теплоотдача от наружной стенки в атмосферу гораздо ниже теплоотдачи от горячего воздуха к стенке. Поэтому принято, что часть энергии, отдаваемой стенкой в атмосферу, равна нулю. Допущение приводит к занижению времени нагрева стенки, но расчёт носит оценочный характер и на точность не претендует.

Тогда для малого фрагмента массой m и площадью внутренней поверхности s трубы вблизи входного сечения справедливо равенство

$$cmd\Delta T' = \alpha_b s \Delta T' dt, \quad (2.6)$$

где c – удельная теплоёмкость ПКМ;

$\Delta T' = T_b - \bar{T}$ – разность температур потока и трубы в данный момент времени;

$d\Delta T'$ – приращение температуры трубы за время dt .

Соотношение $\delta \ll d$ между толщиной и внутренним диаметром d трубы означает, что внутренний и наружный диаметры трубы близки по величине, следовательно,

$$m \cong \rho s \delta, \quad (2.7)$$

где ρ – плотность ПКМ.

Подстановка (2.7) в (2.6) устраняет из формулы (2.6) неопределённые параметры m и s :

$$c\rho\delta d\Delta T' = \alpha_b \Delta T' dt, \quad (2.8)$$

откуда

$$\frac{d\Delta T'}{\Delta T'} = \frac{\alpha_B}{c\rho\delta} dt. \quad (2.9)$$

Интегрирование (2.9) позволяет найти зависимость разности температур от времени для начальных условий ($t = 0; \Delta T' = \Delta T_0 = T_B - T_a$):

$$\Delta T' = \Delta T_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha_B t}{c\rho\delta}\right) \right). \quad (2.10)$$

Выразив t из (2.10), получим искомую длительность t_y нагрева трубы до средней температуры \bar{T}_y :

$$t_y = -\frac{c\rho\delta}{\alpha_B} \ln\left(1 - \frac{T_B - \bar{T}_y}{\Delta T_0}\right). \quad (2.11)$$

Формулы (2.10), (2.11) дают представление о динамике процесса нагревания стенки.

Построить ориентировочную зависимость температуры потока от координаты произвольно взятого поперечного сечения трубы позволяет уравнение В. Г. Шухова [72], преобразованное в вид

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp\left(-\frac{k\pi d}{Mc_B} x\right), \quad (2.12)$$

где ΔT – превышение температуры потока над температурой атмосферного воздуха на высоте x от входного сечения трубы;

ΔT_0 – то же во входном сечении (на выходе воздухоудвки);

M – массовый расход воздуха под грузёным скипом;

c_B – удельная теплоёмкость воздуха в трубопроводе;

x – расстояние между входным и произвольно взятым сечениями трубы.

Используя закон Гей-Люссака [47] и формулу (2.12), получим зависимости объёмного расхода Q и скорости v воздуха в трубопроводе от координаты x :

$$Q = Q_0 \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} \left(1 - \exp \left(- \frac{k\pi d}{Mc_B} x \right) \right) \right]; \quad (2.13)$$

$$v = v_0 \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} \left(1 - \exp \left(- \frac{k\pi d}{Mc_B} x \right) \right) \right]; \quad (2.14)$$

$$v_0 = \frac{4Q_0}{\pi d^2}, \quad (2.15)$$

где Q_0, v_0 – значения расхода и средней скорости во входном сечении трубопровода.

Не принимая во внимание периоды разгона и торможения скипа, получим среднюю по глубине ствола скорость потока:

$$\bar{v} = \frac{v_0}{H} \int_0^H \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} \left(1 - \exp \left(- \frac{k\pi d}{Mc_B} x \right) \right) \right] dx; \quad (2.16)$$

откуда

$$\bar{v} = v_0 \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} + \frac{\Delta T_0 Mc_B}{273 k\pi d H} \left(1 - \exp \left(- \frac{k\pi d H}{Mc_B} \right) \right) \right], \quad (2.17)$$

где H – длина трубопровода, примерно равная глубине шахтного ствола.

По (2.17) удобно определять среднюю скорость подъёма скипа при расчёте рабочего цикла установки.

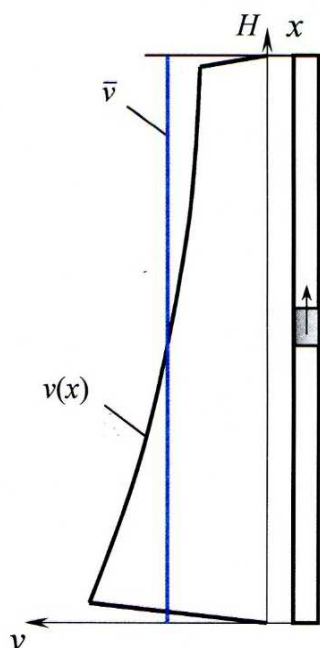


Рис. 2.12. Изменение скорости потока в трубопроводе: $v(x)$ – зависимость скорости от координаты; \bar{v} – средняя скорость

Рис. 2.12 иллюстрирует изменение скорости подъёма скипа, обусловленное охлаждением воздушного потока.

Массовый расход воздуха под грузёным скипом равен

$$M = \rho_t Q_0. \quad (2.18)$$

В (2.18) ρ_t – плотность воздуха на выходе воздуходувки, равная

$$\rho_t = \rho_{0t} \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} = \rho_{0t} \left(1 + \frac{\Delta p_{\Gamma}}{p_0} \right), \quad (2.19)$$

где ρ_{0t} – плотность воздуха при атмосферном давлении и температуре, которую воздух приобретает, пройдя через воздуходувку [47];

p_0 – атмосферное давление;

Δp_{Γ} – избыточное давление под грузёным скипом.

Избыточное давление Δp_{Γ} находится по формуле

$$\Delta p_{\Gamma} = \frac{4(m_n + m_c)g}{\pi d^2}, \quad (2.20)$$

где m_n, m_c – масса ископаемого и собственная масса скипа соответственно;

g – ускорение свободного падения;

d – внутренний диаметр трубопроводов.

Формула В. Т. Шухова получена для горизонтально ориентированной трубы, поэтому возникает вопрос о применимости её к случаю вертикального трубопровода. В [46] показан вид зависимости коэффициента теплоотдачи α_a от координаты точки на стенке вертикальной трубы. Начиная с некоторой высоты, величина α_a стабилизируется и остаётся практически постоянной. Таким образом, применимость (2.12) к рассматриваемому случаю является вполне обоснованной.

Становится возможным также решение обратной задачи, необходимой для проектировочного расчёта установки: вычисление производительности Q_0 воздухоподогревательной станции, которая необходима для обеспечения расчётного значения средней скорости \bar{v} .

Подстановка (2.15) и (2.18) в (2.17) даёт возможность получить выражение

$$\bar{v} = \frac{4Q_0}{\pi d^2} \left[1 - \frac{\Delta T_0}{273} + \frac{\Delta T_0 \rho_t Q_0 c_B}{273 k \pi d H} \left(1 - \exp \left(- \frac{k \pi d H}{\rho_t Q_0 c_B} \right) \right) \right], \quad (2.21)$$

которое при заданной \bar{v} является уравнением относительно Q_0 .

Сложность решения уравнения (2.21) возникает из-за того, что неизвестная входит в показатель степени экспоненты. С учётом приближённого характера вычислений целесообразно считать, что выполняется равенство

$$- \frac{k \pi d H}{\rho_t Q_0 c_B} \approx - \frac{k \pi d H}{\rho_0 \bar{Q} c_B}, \quad (2.22)$$

где \bar{Q} – условный объёмный расход, определяемый по средней скорости:

$$\bar{Q} = \bar{v} \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2.23)$$

Тогда (2.21) после алгебраических преобразований запишется в виде уравнения

$$Q_0^2 + AQ_0 - B = 0 \quad (2.24)$$

с положительным корнем

$$Q_0 = \sqrt{\frac{A^2}{4} + B} - \frac{A}{2}, \quad (2.25)$$

где

$$A = \left(\frac{273}{\Delta T_0} - 1 \right) \cdot \frac{k\pi dH}{\rho_l c_b \left[1 - \exp\left(-\frac{k\pi dH}{\rho_0 \bar{Q} c_b} \right) \right]}; \quad (2.26)$$

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

Выражения (2.25), (2.26) позволяют найти подачу воздухоудвки, соответствующую расчётной средней скорости подъёма скипа и, таким образом, обеспечить заданные значения продолжительности цикла и производительности установки.

2.2.2. Определение диаметров трубопроводов в установке с двухтрубной замкнутой схемой

Задача расчёта состоит в вычислении такого значения диаметра трубопроводов, при котором масса воздуха, вытесненного из спускного трубопровода порожним скипом при его перемещении от разгрузочной станции к загрузочной, равна массе воздуха, заполнившего подъёмный трубопровод при его перемещении от загрузочной станции к разгрузочной. В работе [76] диаметр определён оценочно – без учёта охлаждения воздуха в подъёмном трубопроводе. Полученные в п. 2.2.1 выражения позволяют уточнить расчёт.

Приняты следующие допущения:

- 1) порожний скип прибывает на загрузочную станцию одновременно с прибытием гружёного скипа на разгрузочную станцию;
- 2) потери расхода через направляюще-уплотнительные устройства отсутствуют;
- 3) потери энергии на трение и аэродинамическое сопротивление при движении скипов отсутствуют;
- 4) плотность атмосферного воздуха в спускном трубопроводе не зависит от продольной координаты.

Масса воздуха, поданного воздуходувкой в подъёмный трубопровод за время перемещения гружёного скипа от загрузочной станции до разгрузочной:

$$m_{\text{под}} = Q_0 \rho_t \frac{H}{\bar{v}}. \quad (2.27)$$

Масса воздуха, вытесненная порожним скипом из спускного трубопровода за время перемещения скипа от разгрузочной станции до загрузочной:

$$m_{\text{сп}} = \rho_0 \frac{\pi d^2}{4} H. \quad (2.28)$$

Поскольку $m_{\text{под}} = m_{\text{сп}}$, то справедливо равенство

$$\frac{Q_0 \rho_t}{\bar{v}} = \rho_0 \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2.29)$$

С учётом (2.19) и (2.20) выражение (2.29) преобразуется в уравнение

$$\frac{Q_0}{\bar{v}} \rho_{0r} \left[1 + \frac{4(m_n + m_c)g}{\pi d^2 \rho_0} \right] = \rho_0 \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.30)$$

которое алгебраическими преобразованиями видоизменяется в биквадратное

$$d^4 - \frac{4Q_0\rho_{0f}}{\pi\rho_0\bar{v}}d^2 - \frac{16Q_0\rho_{0f}(m_n + m_c)g}{\pi^2\bar{v}\rho_0\rho_0} = 0. \quad (2.31)$$

Физический смысл имеют только положительные значения корней, поэтому решением (2.31) является

$$d = \sqrt{\frac{2Q_0\rho_{0f}}{\pi\rho_0\bar{v}} + \sqrt{\left(\frac{2Q_0\rho_{0f}}{\pi\rho_0\bar{v}}\right)^2 + \frac{16Q_0\rho_{0f}(m_n + m_c)g}{\pi^2\bar{v}\rho_0\rho_0}}}. \quad (2.32)$$

Формула (2.32) позволяет определить диаметр трубопроводов, при котором обеспечивается синхронное прибытие гружёного и порожнего скипов на верхний и нижний горизонты соответственно в замкнутой схеме.

В реальной конструкции через зазоры между элементами направляюще-уплотнительных устройств и стенками трубопроводов возможны утечки воздуха. Потеря расхода в таком случае компенсируется расчётным увеличением производительности нагнетательной станции.

2.2.3. Кинематика порожнего сосуда

2.2.3.1. Движение скипа в спускном трубопроводе в установке с незамкнутой схемой

На движение сосуда в трубопроводе влияет целый ряд факторов, обусловленных как взаимодействием сосуда со стенками трубы, так и характером вмещающей и транспортирующей среды.

От конструкции скипа зависит его соосность с трубой. В том случае, когда скип имеет ходовые ролики, функции его ориентирования в трубе и уплотнения

разделены. Ролики «ответственны» за соосность, а задача колец 28 (см. рис. 2.9) – ограничение потерь транспортирующей среды заданным пределом. Механическое сопротивление движению скипа состоит из трения качения роликов по поверхности трубы и потерь в опорах осей роликов.

В настоящий момент представляется возможным совмещение направляющей и уплотняющей функций в одном устройстве, как показано на рис. 2.9. В данном варианте кольца 28 работают в качестве уплотнений и вкладышей подшипников скольжения. Между кольцами и поверхностью трубы предусмотрен гарантированный зазор. Труба играет роль направляющей, и механическое сопротивление возникает при контакте кольца со стенкой как результат трения скольжения.

Исследования трубопроводного пневмоподъёма находятся в стадии решения общих вопросов, касающихся принципов построения и проектирования систем. Рассматривать на этой стадии конкретные конструктивные исполнения компонентов установок преждевременно. Конструирование, безусловно, будет связано со специфическими трудностями, однако каких-либо непреодолимых препятствий не предвидится.

С учётом вышеизложенного механическое сопротивление перемещению скипов и утечка воздуха через зазоры уплотнений из дальнейшего рассмотрения исключены.

При расчётах систем с газообразной транспортирующей средой возникают проблемы с определением влияния её физических свойств, в частности, сжимаемости на параметры системы. Особую сложность представляет математическое описание установок с напряжённым режимом работы, когда цикл движения строго детерминируется. Системы рудничного пневмоподъёма должны функционировать ритмично с высокой энергетической нагрузкой, и длина трубопроводов составляет сотни метров. Поэтому учёт физических эффектов, связанных со свойствами воздуха как вмещающей и транспортирующей среды, в математической модели системы необходим.

Выделим следующие аэродинамические эффекты, сказывающиеся на кинематике скипа:

- аэродинамическое сопротивление участка трубопровода перед скипом;
- аэродинамическое сопротивление участка трубопровода позади скипа;
- изменение плотности воздуха в трубопроводе в связи с аэродинамическими сопротивлениями;
- упругое сжатие воздушного столба порожним скипом в двухтрубной замкнутой схеме.

Для незамкнутой схемы последнее явление нехарактерно.

Необходимо отметить, что учесть одновременное действие всех факторов пока не представляется возможным, так как уравнение динамики, описывающее их влияние, не имеет аналитического решения. В подобных случаях выделяют наиболее значимые факторы, а остальные во внимание не принимают.

С целью упрощения расчётов принято следующее допущение: плотность

воздуха под скипом и над ним незначительно отличается от плотности атмосферного воздуха.

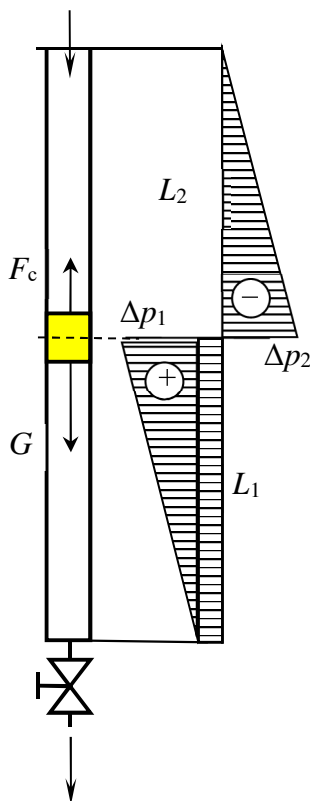


Рис. 2.13. Спуск скипа в разомкнутой схеме

Под скипом возникает избыточное давление Δp_1 (рис. 2.13), т. е. абсолютное давление в произвольной точке больше атмосферного p_0 , соответственно и плотность воздуха выше плотности ρ_0 при нормальных условиях. Над скипом, наоборот, создаётся разрежение Δp_2 , абсолютное давление становится меньше атмосферного, и плотность воздуха ниже, чем ρ_0 . Однако попытка скорректировать расчётные формулы с учётом переменной плотности приводит к их неоправданному усложнению. По сути, принятое допущение означает, что воздух рассматривается как несжимаемая среда.

Избыточное давление на нижнем участке Δp_1 и разрежение на верхнем участке Δp_2 трубопровода (рис. 2.13):

$$\Delta p_1 = \lambda \frac{L_1}{d} \rho_0 \frac{v_c^2}{2} + \xi \rho_0 \frac{v_c^2}{2}; \quad (2.33)$$

$$\Delta p_2 = \lambda \frac{L_2}{d} \rho_0 \frac{v_c^2}{2}, \quad (2.34)$$

где λ – коэффициент Дарси – Вейсбаха [40];

ξ – коэффициент местного сопротивления;

L_1, L_2 – длина нижнего и верхнего участка трубопровода соответственно;

v_c – скорость скипа.

Местное аэродинамическое сопротивление создаётся аппаратом, входящим в систему управления, например, шаровым краном [104].

Сила аэродинамического сопротивления равна

$$F_c = (\Delta p_1 + \Delta p_2) \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi d^2}{8} \rho_0 \left(\lambda \frac{H}{d} + \xi \right) v_c^2, \quad (2.35)$$

где $H = L_1 + L_2$ – длина трассы.

Коэффициент λ определяется следующим образом.

Необходимо вычислить число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v_c d}{\nu}, \quad (2.36)$$

где $\nu = 1,51 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематическая вязкость воздуха при нормальных условиях.

Скорость спуска неизвестна, поэтому Re нужно найти ориентировочно, подставив в (2.36) условную величину $v_c = 30 \text{ м/с}$.

Затем установить зависимость потерь энергии от скорости. Если выполняется условие

$$20 \frac{d}{\Delta_s} < \text{Re} \leq 500 \frac{d}{\Delta_s}, \quad (2.37)$$

где Δ_s – эквивалентная шероховатость внутренней поверхности трубы (стеклопластиковые трубы имеют $\Delta_s = 0,05 \dots 0,10$ мм [107]), то зависимость *доквадратическая*.

В этом случае справедлива формула Альтшуля

$$\lambda = 0,114 \sqrt{\frac{\Delta_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}}}. \quad (2.38)$$

Предварительные расчёты показывают, что условие (2.37) выполняется в широком диапазоне скоростей и диаметров.

Сумма проекций сил на продольную ось трубопровода

$$(m_c + m_b)a = G - F_c, \quad (2.39)$$

где a – ускорение скипа;

$G = m_c g$ – вес скипа;

m_b – масса столба воздуха высотой H , равная по величине

$$m_b = \rho_0 \frac{\pi d^2}{4} H. \quad (2.40)$$

Подстановка (2.35), (2.40) и $a = \frac{d^2 x}{dt^2}$ в (2.39) даёт выражение

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\pi d^2 \rho_0 \left(\lambda \frac{H}{d} + \xi \right)}{8(m_c + m_B)} v_c^2 = \frac{m_c}{m_c + m_B} g \quad (2.41)$$

для интервала $0 \leq x \leq H$.

Приняты обозначения:

$$A = \frac{\pi d^2 \rho_0 \left(\lambda \frac{H}{d} + \xi \right)}{8(m_c + m_B)}; \quad (2.42)$$

$$B = \frac{m_c g}{m_c + m_B},$$

тогда (2.41) принимает вид

$$\frac{dv_c}{dt} + Av_c^2 = B. \quad (2.43)$$

После разделения переменных

$$\frac{dv_c}{B - Av_c^2} = dt \quad (2.44)$$

и интегрирования (2.44) получается следующее выражение:

$$\frac{1}{2\sqrt{AB}} \ln \frac{\sqrt{B} + v_c \sqrt{A}}{\sqrt{B} - v_c \sqrt{A}} = t + C. \quad (2.45)$$

Из начальных условий ($t = 0$; $v = 0$) следует, что $C = 0$.

Уравнение (2.45) может быть преобразовано так:

$$\frac{\sqrt{B} + v_c \sqrt{A}}{\sqrt{B} - v_c \sqrt{A}} = \exp(2\sqrt{ABt}), \quad (2.46)$$

откуда

$$v_c = \sqrt{\frac{B}{A}} \cdot \frac{\exp(2\sqrt{ABt}) - 1}{\exp(2\sqrt{ABt}) + 1}. \quad (2.47)$$

Из (2.47) следует, что при $t \rightarrow \infty$ скорость скипа $v_c \rightarrow \sqrt{\frac{B}{A}}$, следовательно, скорость асимптотически приближается к значению для установившегося движения

$$v_{c,y} = \sqrt{\frac{B}{A}} = \sqrt{\frac{8m_c g}{\pi d^2 \rho_0 \left(\lambda \frac{H}{d} + \xi \right)}}. \quad (2.48)$$

Замена в (2.47) $v = \frac{dx}{dt}$ и разделение переменных дают уравнение

$$dx = \sqrt{\frac{B}{A}} \cdot \frac{\exp(2\sqrt{ABt}) - 1}{\exp(2\sqrt{ABt}) + 1} dt, \quad (2.49)$$

интегрирование которого позволяет найти выражение для перемещения скипа:

$$x = \frac{1}{2A} \ln \frac{\exp[(2\sqrt{ABt}) + 1]^2}{\exp(2\sqrt{ABt})} + C_1. \quad (2.50)$$

Согласно начальным условиям ($t = 0; x = 0$)

$$\frac{1}{2A} \ln 4 + C_1 = 0; \quad (2.51)$$

$$C_1 = -\frac{1}{2A} \ln 4.$$

Окончательно

$$x = \frac{1}{2A} \ln \frac{[\exp(2\sqrt{ABt}) + 1]^2}{4 \exp(2\sqrt{ABt})}. \quad (2.52)$$

Для проектирования системы подъёма нужно знать время t_c периода спуска сосуда. Его значение является корнем уравнения (2.52) для заданной глубины ствола $x = H$.

Из (2.52) следует, что

$$\frac{[\exp(2\sqrt{ABt}) + 1]^2}{4 \exp(2\sqrt{ABt})} = \exp(2Ax). \quad (2.53)$$

После введения обозначения $y = \exp(2\sqrt{ABt})$ и алгебраических преобразований формулы (2.53) получается квадратное уравнение

$$y^2 - 2[2 \exp(2Ax) - 1]y + 1 = 0, \quad (2.54)$$

Откуда

$$y = 2 \exp(2Ax) \pm \sqrt{[2 \exp(2Ax) - 1]^2 - 1} = 0. \quad (2.55)$$

В результате подстановки в (2.55) вместо y заменяемого им выражения и ряда преобразований получается зависимость $t(x)$:

$$t = \sqrt{\frac{A}{B}} \cdot \frac{x}{2} + \frac{1}{2\sqrt{AB}} \ln \left\{ 2[\exp(Ax) + \sqrt{\exp(2Ax) - 1}] - 1 \right\} \quad (2.56)$$

Для $x = H$ по (2.56) получается длительность периода спуска t_c .

Формулы (2.42), (2.47), (2.52) и (2.56) дают представление о кинематике порожнего скипа.

На рис. 2.14 приведены графики расчётных зависимостей скорости спуска и перемещения скипа от времени для следующих исходных данных: $\rho_0 = 1,21 \text{ кг/м}^3$; $d = 1,13 \text{ м}$ (площадь живого сечения трубы 1 м^2); $m_c = 1500 \text{ кг}$; $H = 1000 \text{ м}$. Кривые 1, 3, 5 – графики $v_c(t)$ для $\xi = 0$; 10; 30 соответственно; кривые 2, 4, 6 – графики $x(t)$ при указанных ξ .

Наиболее благоприятно выглядит вариант с коэффициентом $\xi = 30$ (кривые 5 и 6). Приблизительно после 15 с движения устанавливается скорость $v_{c,y} = 24,6 \text{ м/с}$, время спуска составляет $t_c = 44 \text{ с}$, средняя скорость скипа равна $22,7 \text{ м/с}$.

Использование представленной математической модели имеет ограничения, причиной которых является невозможность учёта на текущем этапе исследований всех физических характеристик вмещающей среды. Одно из таких ограничений состоит в неточности определения скорости сосуда по (2.69) для значения t близкого к нулю.

Непосредственно после старта порожнего скипа проявляется сжимаемость воздуха, вследствие которой воздух в трубопроводе обладает существенным временем отклика на воздействие и вовлекается в движение постепенно. Сопротивление со стороны среды перемещению скипа в начале движения практически отсутствует, и скип начинает спуск с ускорением свободного падения.

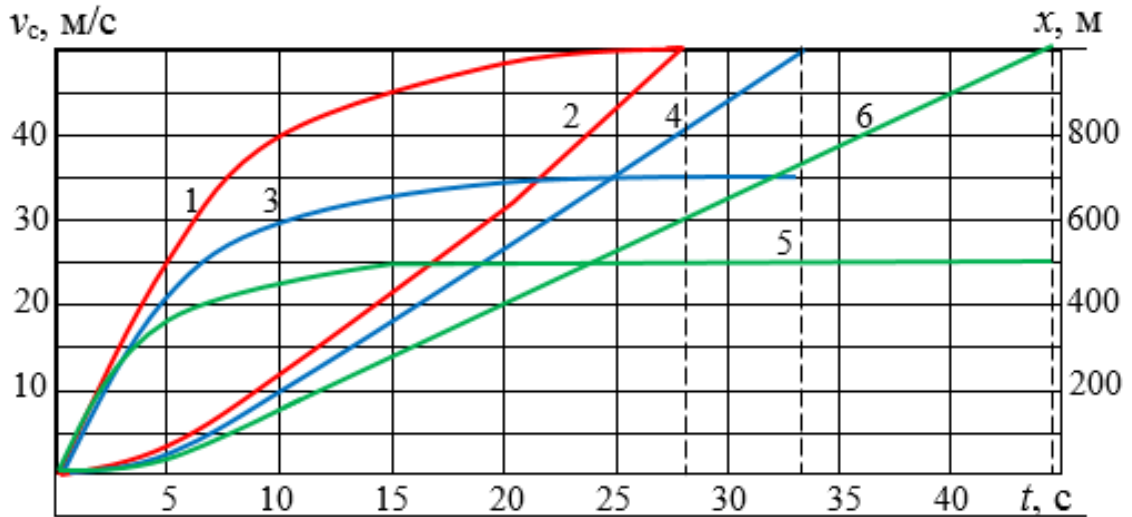


Рис. 2.14. Графики зависимостей скорости (1, 3, 5) и перемещения (2, 4, 6) скипа от времени при различных ξ

Другое следствие сжимаемости воздуха, также влияющее на время отклика, проявляется в том, что для создания разностей давления Δp_1 и Δp_2 (рис. 2.13) скип должен на соответствующую величину уменьшить объём нижнего участка и увеличить объём верхнего участка столба, т.е. в течение некоторого времени спуск сосуда сопровождается нарастанием давления на Δp_1 и снижением на Δp_2 .

Резюмируя изложенное, следует признать, что математическая модель неприменима к начальному периоду спуска с момента старта порожнего сосуда.

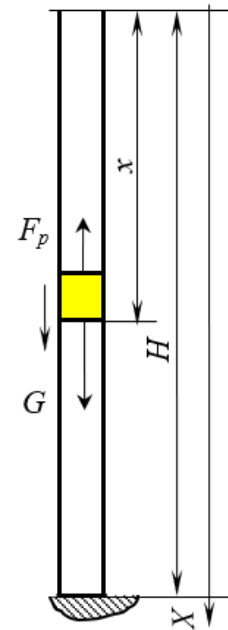


Рис. 2.15. Спуск скипа в замкнутой схеме

2.2.3.2. Движение скипа в спускном трубопроводе установки с замкнутой схемой

Расчётная схема системы трубопровод – скип показана на рис. 2.15.

Порожний скип стартует в спускной трубопровод, нижний конец которого перекрыт. Грузёный скип прибыл на разгрузочную станцию, воздуходувка работает в режиме короткой паузы

Приняты следующие допущения:

- теплообмен через стенку трубы отсутствует;
- механическое и аэродинамическое сопротивления движению равны нулю;
- утечка среды через неплотности направляюще-уплотнительных устройств не учитываются.

Уравнение движения скипа:

$$m_c \frac{d^2 x}{dt^2} = G - F_p, \quad (2.57)$$

где x – координата;

F_p – сила сопротивления, вызванная повышением давления в столбе воздуха, сжимаемого скипом.

Сила F_p определяется таким образом.

При адиабатическом сжатии (без отвода тепла) выполняется соотношение [5]

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \frac{p_0}{\rho_0^\gamma}, \quad (2.58)$$

где p , ρ – текущие значения давления и плотности воздуха под скипом;

γ – показатель адиабаты (для воздуха $\gamma = 1,4$).

Из (2.58) следует, что

$$p = \frac{p_0}{\rho_0^\gamma} \rho^\gamma; \quad (2.59)$$

$$\frac{dp}{d\rho} = \gamma \frac{p_0}{\rho_0^\gamma} \rho^{\gamma-1}. \quad (2.60)$$

Заменой дифференциалов конечными приращениями формула (2.60) может быть преобразована в выражение

$$\Delta p = \gamma \frac{p_0 \rho^{\gamma-1}}{\rho_0 \rho_0^{\gamma-1}} \Delta \rho, \quad (2.61)$$

где Δp – избыточное давление под скипом; $\Delta \rho$ – изменение плотности воздуха.

Изменение плотности воздуха имеет порядок 0,1 бар, поэтому можно считать, что

$$\frac{\rho^{\gamma-1}}{\rho_0^{\gamma-1}} \approx 1. \quad (2.62)$$

Тогда избыточное давление равно

$$\Delta p = \gamma \frac{p_0}{\rho_0} \Delta \rho. \quad (2.63)$$

Относительное изменение плотности выражается формулой

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{x}{H}, \quad (2.64)$$

где ΔV – изменение объёма воздуха под скипом в результате перемещения скипа на расстояние x (рис. 2.14);

V_0 – начальный объём воздуха в трубопроводе.

Таким образом, сила сопротивления

$$F_p = \Delta p \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi d^2}{4} \gamma \rho_0 \frac{x}{H}. \quad (2.65)$$

С учётом того, что

$$\frac{\gamma \rho_0}{\rho_0} = c_{зв}^2, \quad (2.66)$$

где $c_{зв}$ – скорость звука в сжимаемой среде, формула (2.65) принимает вид

$$F_p = \frac{\pi d^2 c_{зв}^2 \rho_0}{4H} x. \quad (2.67)$$

Подстановка (2.67) в (2.57) даёт

$$m_c \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\pi d^2 c_{зв}^2 \rho_0}{4H} x = m_c g, \quad (2.68)$$

или

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\pi d^2 c_{зв}^2 \rho_0}{4H m_c} x = g. \quad (2.69)$$

Решением (2.69) является выражение

$$x = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t + \frac{g}{\omega^2}, \quad (2.70)$$

где угловая частота равна

$$\omega = \sqrt{\frac{\pi d^2 c_{\text{зв}}^2 \rho_0}{4 H m_c}} = \frac{d c_{\text{зв}}}{2} \sqrt{\frac{\pi \rho_0}{H m_c}}. \quad (2.71)$$

Константы C_1 и C_2 определяются из начальных условий ($t = 0$; $x = 0$; $dx/dt = 0$): $C_1 = 0$; $C_2 = -\frac{g}{\omega^2}$.

Окончательно

$$x = \frac{g}{\omega^2} (1 - \cos \omega t). \quad (2.72)$$

Характер движения – гармонические колебания с амплитудой

$$A = \frac{g}{\omega^2} = \frac{4 m_c g H}{\pi d^2 c_{\text{зв}}^2 \rho_0}, \quad (2.73)$$

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

Скорость скипа равна

$$v_c = \frac{dx}{dt} = \frac{g}{\omega} \sin \omega t. \quad (2.74)$$

Промежуток времени $t_{\text{рав}}$, за который скип пройдет расстояние $x_{\text{рав}}$, определяется из условия $\omega t_{\text{рав}} = \frac{\pi}{2}$:

$$t_{\text{рав}} = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{1}{c_{\text{зв}} d} \sqrt{\frac{\pi H m_c}{\rho_0}}. \quad (2.75)$$

Избыточное давление под скипом описывается уравнением

$$\Delta p = \frac{\gamma P_0 g}{H \omega^2} (1 - \cos \omega t) = \frac{4 m_c g}{\pi d^2} (1 - \cos \omega t) \quad (2.76)$$

и при $t = 2t_{\text{рав}}$ достигает максимального теоретического значения

$$\Delta p_{\text{max}} = \frac{8 m_c g}{\pi d^2}. \quad (2.77)$$

2.2.3.3. Повышение ускорения гружёного скипа в установке с незамкнутой схемой

В конце периода спуска порожнего скипа его скорость должна быть снижена, что целесообразно осуществить постепенным закрыванием крана (рис. 2.13). Давление воздуха под скипом повышается, сила F_c увеличивается, и происходит торможение сосуда путём перехода кинетической энергии его массы и массы столба воздуха над ним в работу аэродинамического сопротивления крана и в конечном итоге в теплоту.

В конструктивном отношении процесс торможения данным способом реализуется просто, однако накопленная движущимися массами кинетическая энергия расходуется непроизводительно.

В двухтрубной схеме существует возможность рекуперации кинетической энергии движущихся масс с целью снижения нагрузки на воздухоподогреватель в период разгона гружёного скипа.

На рис. 2.16 показана схема, позволяющая достичь указанной цели.

Установка содержит спускной 1 и подъёмный 2 трубопроводы, воздухоподогреватель 3, краны 4 – 8, порожний 9 и гружёный 10 скипы.

Рекуперация энергии осуществляется следующим образом.

Скип 9 опускается с постоянной скоростью v_c , кран 4 открыт и выпускает воздух из-под скипа в атмосферу; краны 5 и 7 закрыты; краны 6 и 8 открыты и обеспечивают работу воздухоудвки в режиме короткой паузы. Рабочий цикл установки организован так, что к моменту начала торможения скипа 9 скип 10 загружен и готов стартовать.

По достижении скипом 9 расстояния от загрузочной станции, равного расчётному тормозному пути x_T , кран 4 закрывается. Давление воздуха под скипом 9 начинает расти, и в определённый момент краны 5 и 7 открываются, краны 6 и 8 закрываются, воздух из спускного трубопровода 1 под избыточным давлением поступает во входное окно воздухоудвки, а из её выходного окна – в подъёмный трубопровод 2 под скип 10. Грузённый скип получает заданное ускорение, причём энергетическая нагрузка на воздухоудвку оказывается ниже по сравнению с вариантом подачи на её вход атмосферного воздуха. Скип 10 разгоняется на участке x_p в течение времени до технологически обусловленной скорости $v_{п}$. Затем краны 5 и 8 закрываются, 4, 6 и 7 открываются. Скип 10 продолжает подъём только за счёт воздухоудвки, а скип 9 поступает на загрузочную станцию.

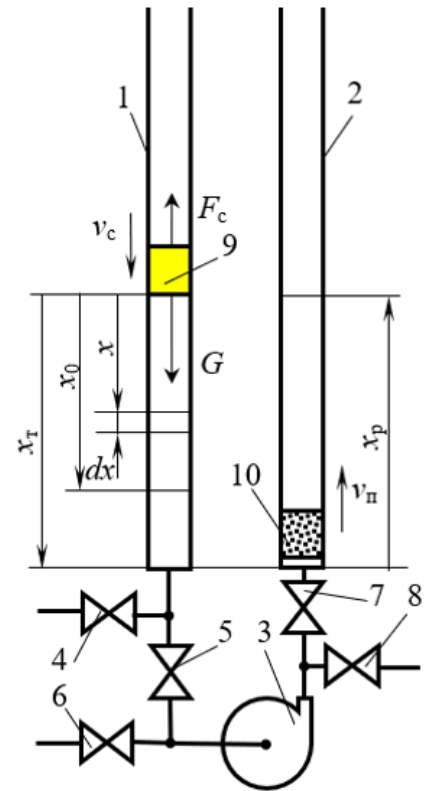


Рис. 2.16. Схема с рекуперацией энергии

Необходимо аналитически оценить величину избыточного давления под скипом 9 и влияние на него длины участка x_T .

Приняты допущения:

- сжатие воздуха под скипом 9 адиабатическое;
- к концу разгона скипа 10 скип 9 прибывает на разгрузочную станцию;
- механические и аэродинамические сопротивления в системе равны нулю, утечки воздуха отсутствуют.

Из системы

$$\begin{cases} p_{\tau} = p \left(\frac{\rho_{\tau}}{\rho} \right)^{\gamma} \\ \rho_{\tau} = \rho \frac{x_{\tau}}{x_{\tau} - x} \end{cases} \quad (2.78)$$

получается зависимость давления под порожним скипом после закрытия крана 4 от текущей координаты x (рис. 2.15) в виде

$$p_{\tau} = p \left(\frac{x_{\tau}}{x_{\tau} - x} \right)^{\gamma}. \quad (2.79)$$

В (2.78), (2.79) p_{τ} , ρ_{τ} – давление и плотность воздуха под скипом 9 в период торможения.

Избыточное давление под скипом 9 на координате x равно

$$\Delta p = p \left(\frac{x_{\tau}}{x_{\tau} - x} \right)^{\gamma} - p_0. \quad (2.80)$$

Сила сопротивления на координате x и элементарная работа силы сопротивления на перемещении dx :

$$F_c = \Delta p \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi d^2}{4} \left[p \left(\frac{x_{\tau}}{x_{\tau} - x} \right)^{\gamma} - p_0 \right]; \quad (2.81)$$

$$dA_c = F_c dx = \frac{\pi d^2}{4} \left[p \left(\frac{x_{\tau}}{x_{\tau} - x} \right)^{\gamma} - p_0 \right] dx. \quad (2.82)$$

Для нахождения работы силы сопротивления на перемещении x нужно проинтегрировать выражение (2.82). Удобно предварительно записать его в виде

$$dA_c = \frac{\pi d^2}{4} [px_T^\gamma (x_T - x)^{-\gamma} - p_0] dx. \quad (2.83)$$

Результатом интегрирования и алгебраических преобразований является формула

$$A_c = p \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{x_T^\gamma}{\gamma - 1} (x_T - x)^{1-\gamma} - p_0 \frac{\pi d^2}{4} x + C. \quad (2.84)$$

Постоянная C , определяемая из начальных условий ($x = 0$; $A_c = 0$), равна

$$C = -p \frac{\pi d^2}{4(\gamma - 1)} x_T. \quad (2.85)$$

После подстановки (2.85) в (2.84):

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4} \left\{ \frac{px_T}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{x_T}{x_T - x} \right)^{\gamma-1} - 1 \right] - p_0 x \right\}. \quad (2.86)$$

Интерес представляет определение максимального избыточного давления под скипом 9. Решение данной задачи основано на том, что на расстоянии x_0 от начальной точки торможения скорость v_c становится равной нулю, и кинетическая энергия масс скипа 9 и воздуха над ним целиком переходит в потенциальную энергию столба сжатого воздуха высотой $(x_T - x_0)$.

Для координаты x_0 справедливо уравнение

$$A_{c0} = (m_c + m_B) \frac{v_c^2}{2}, \quad (2.87)$$

или, с учётом того, что $\gamma = 1,4$,

$$\frac{\pi d^2}{4} \left\{ 2,5 p x_T \left[\left(\frac{x_T}{x_T - x_0} \right)^{0,4} - 1 \right] - p_0 x_0 \right\} = (m_c + m_B) \frac{v_c^2}{2}. \quad (2.88)$$

Согласно принятым допущениям, вредные сопротивления в системе отсутствуют, поэтому левая часть формулы (2.88) есть потенциальная энергия сжатого газа.

Окончательно после алгебраических преобразований получается уравнение относительно x_0 :

$$\left(\frac{x_T}{x_T - x_0} \right)^{0,4} - 0,4 \frac{p_0 x_0}{p x_T} = 1 + 0,8 \frac{(m_c + m_B) v_c^2}{\pi d^2 p x_T}. \quad (2.89)$$

Физический смысл A_c – доля кинетической энергии, перешедшая в потенциальную, поэтому текущая скорость $v_c(x)$ скипа 9 может быть найдена так:

$$\frac{\pi d^2}{4} \left\{ \frac{p x_T}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{x_T}{x_T - x} \right)^{\gamma-1} - 1 \right] - p_0 x \right\} = (m_c + m_B) \frac{\Delta v_c^2}{2}; \quad (2.90)$$

$$\Delta v_c = d \sqrt{\frac{\pi}{2(m_c + m_B)} \left\{ \frac{p x_T}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{x_T}{x_T - x} \right)^{\gamma-1} - 1 \right] - p_0 x \right\}}; \quad (2.91)$$

$$v_c(x) = v_c - \Delta v_c, \quad (2.92)$$

где Δv_c – изменение скорости скипа 9.

По (2.87), (2.89), (2.91) и (2.92) получены зависимости $\Delta p(x)$, $v_c(x)$, а также значения x_0 и Δp_0 (при $x = x_0$) для исходных данных $\rho_0 = 1,21 \text{ кг/м}^3$; $d = 1,13 \text{ м}$; $m_c = 1500 \text{ кг}$; $H = 1000 \text{ м}$; $x_T = 50 \text{ м}$; $v_c = 24,6 \text{ м/с}$. Зависимости приведены в виде графиков на рис. 2.17.

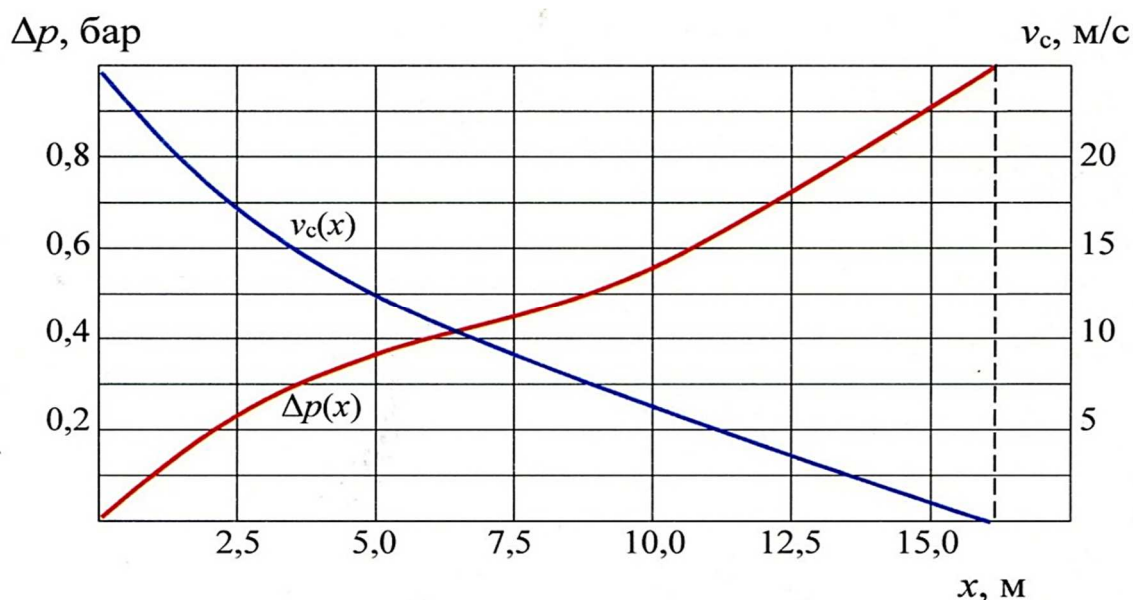


Рис. 2.17. Графики $\Delta p(x)$, $v_c(x)$

Рабочий цикл установки с рекуперацией кинетической энергии порожнего скипа представлен на рис. 2.18.

В исходный момент (рис. 2.18, а) скип 6 находится на загрузочной станции 7 под загрузкой, порожние скипы 3 – 5 – на разгрузочной станции 8, скип 3 подан в спускной трубопровод 2 и начинает спуск.

Краны 11 и 14 закрыты, 10, 12 и 13 открыты, воздуходувка 9 работает в режиме паузы.

К моменту приближения скипа 3 на расстояние x_T к разгрузочной станции (рис. 2.18, б) скип 6 полностью загружен и перемещён в подъёмный трубопровод 1. Кран 10 закрывается. Давление воздуха под скипом 3 начинает расти, и в расчётный момент краны 11 и 14 открываются, краны 12 и 13 закрываются, воздух из спускного трубопровода 2 поступает во входное окно воздуходувки, а из её выходного окна – в подъёмный трубопровод под скип 6, который получает заданное ускорение. Скип 4 начинает спуск.

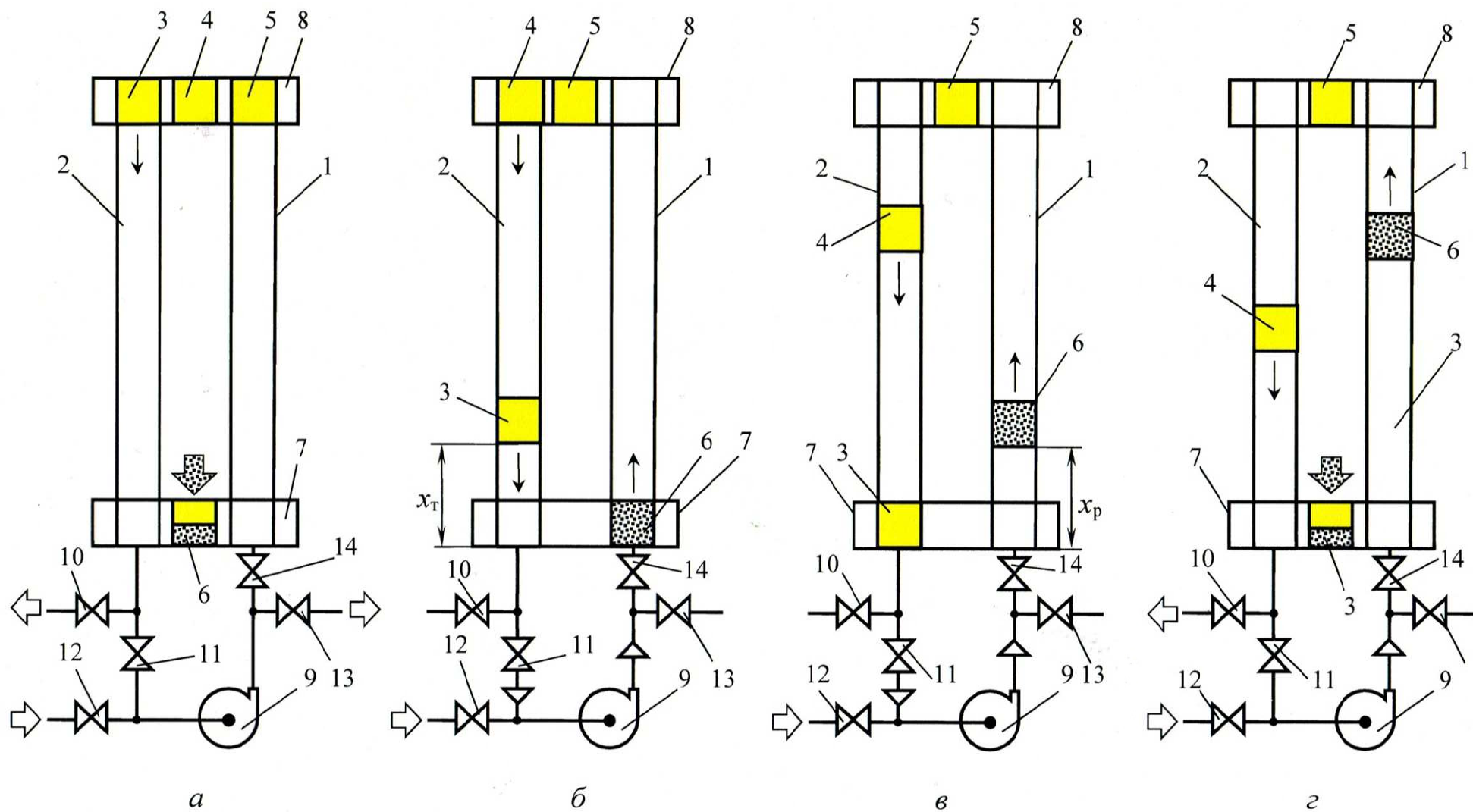


Рис. 2.18. Рабочий цикл в установке с рекуперацией энергии торможения

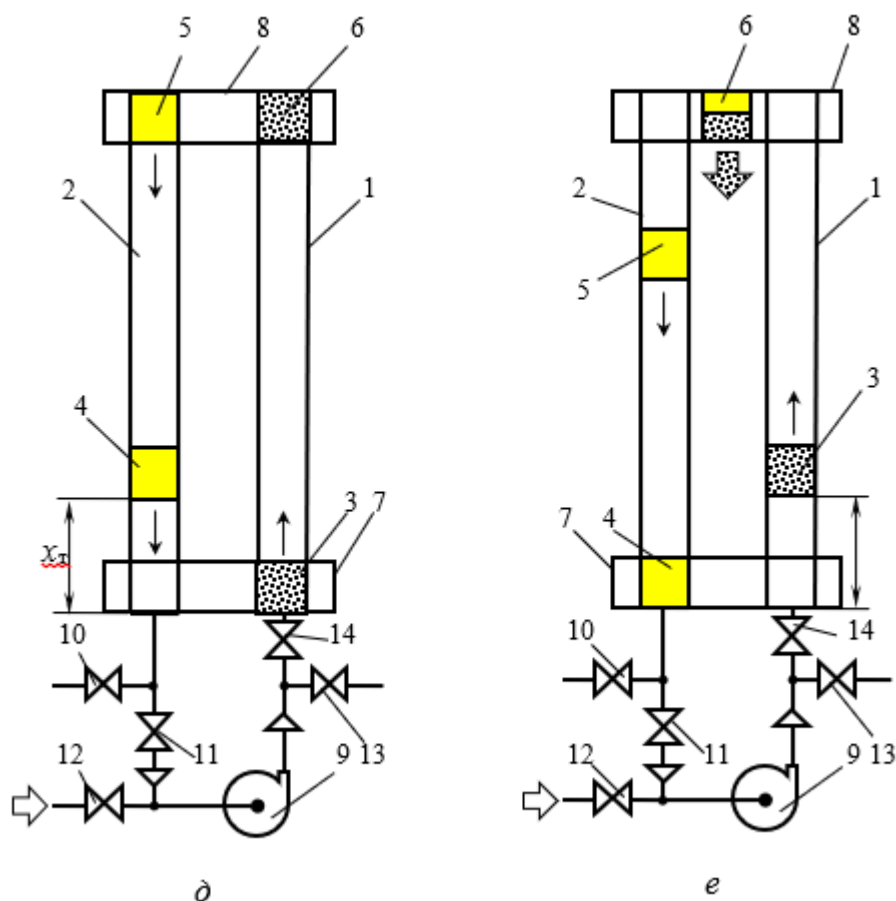


Рис. 2.18. Рабочий цикл в установке с рекуперацией энергии торможения
(окончание)

Пройдя отрезок x_p , скип 6 достигает технологически обусловленной скорости v_n (рис. 2.18, *в*). Скип 3 прибывает на загрузочную станцию. Краны 11 и 13 закрываются, 10, 12 и 14 открываются. Скип 6, таким образом, продолжает подъём только за счёт воздухоподушки.

Скипы 4 и 6 продолжают движение, скип 3 перемещается под загрузку (рис. 2.18, *з*).

Скип 6 поступает на разгрузочную станцию (рис. 2.18, *д*), загруженный скипы 3 и 5 перемещаются в подъёмный и спускной трубопроводы соответственно, скип 4 подходит на расстояние x_T к разгрузочной станции. Краны 10, 12 и 13

закрываются, краны 11 и 14 открываются, и скип 3 стартует с загрузочной станции. Скип 5 начинает спуск.

Скип 3 завершает разгон (рис. 2.18, *е*), скип 4 прибывает на загрузочную станцию, скип 6 поступает на разгрузку. Краны 11 и 13 закрываются, 10, 12 и 14 открываются. Скип 5 продолжает спуск.

Единственное отличие состояния системы в момент, показанный на рис. 2.18, *е*, от состояния по рис. 2.18, *в* в том, что на рис. 2.18, *е* скип 6 разгружается, а на рис. 2.18, *в* скип 5 порожний, так как ППУ ещё не полностью вошла в рабочий режим. Данное обстоятельство означает, что с момента по рис. 2.18, *е* ППУ не возвращается к первым двум состояниям (рис. 2.18, *а*, *б*), и устанавливается технологический цикл, иллюстрируемый положениями рис. 2.18, *в* – рис. 2.18, *е*.

2.3. Период разгона гружёного скипа

Для расчёта составляющих рабочего цикла ППУ необходимо получить соотношения, позволяющие вычислить ускорение и скорость гружёного скипа в начале движения, т. е. выполнить динамический расчёт сосуда в период разгона.

Процесс разгон скипа воздушным потоком, поступающим в трубопровод от нагнетательного агрегата, обладает спецификой вследствие «мягкой» аэродинамической характеристики (далее – *характеристики*) воздуходувки [110].

Характеристикой турбомашин называется зависимость

$$p = f(Q), \quad (2.93)$$

где p – избыточное давление потока на выходе;

Q – производительность турбомашин, или расход в её выходном патрубке.

Различают теоретическую и действительную характеристики. Характеристика может строиться как для полного, так и для статического давления.

Интерес представляет действительная зависимость статического давления от расхода, поэтому в дальнейших выкладках буквой p обозначено избыточное статическое давление.

Величина давления определяет приложенную к скипу активную силу, а производительность воздуходувки при её нерегулируемом подключении к трубопроводу однозначно связана со скоростью движения скипа. Зависимостью давления от расхода обуславливается непостоянство ускорения скипа в период разгона.

На рис. 2.19 показана расчётная схема установки. Обозначения: 1 – скип, 2 – трубопровод, 3 – воздуходувка; x , y – оси координат.

Примем следующие допущения:

- силы трения между скипом и стенкой трубопровода, а также силы аэродинамического сопротивления движению скипа отсутствуют;

- утечка воздуха между скипом и стенкой трубопровода отсутствует;

- температура воздуха в трубопроводе в течение периода разгона остаётся постоянной;

- время создания воздуходувкой давления под скипом бесконечно мало.

Первое и второе допущения означают, что КПД системы считается равным единице. Третье допущение позволяет не учитывать термодинамические процессы. Последнее допущение может быть представлено как работа воздуходувки на трубопровод, запёртый скипом, который принудительно удерживается в положении $y = 0$.

В исходный момент скип расположен в нижнем положении, воздуходувка развивает давление под скипом, однако скип неподвижен, поэтому производительность воздуходувки $Q = 0$.

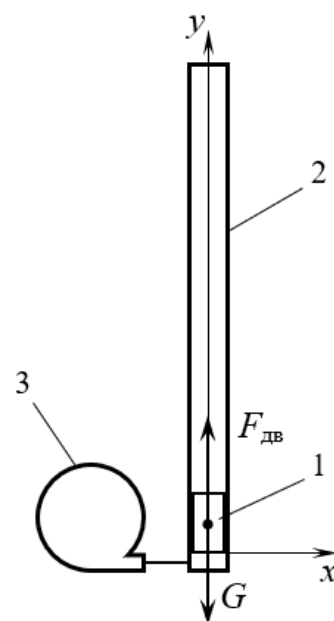


Рис. 2.19. Расчётная схема

Затем скип освобождается, начинается подъём. Уравнение динамики скипа в общем виде [45]:

$$m\ddot{y} = F_{\text{дв}} - G, \quad (2.94)$$

или

$$\ddot{y} = \frac{F_{\text{дв}}}{m} - g, \quad (2.95)$$

где \ddot{y} – ускорение скипа;

m – масса гружёного скипа;

$F_{\text{дв}}$ – проекция движущей силы на ось y ;

G – вес гружёного скипа;

g – ускорение свободного падения.

Выразим движущую силу как произведение давления на площадь сечения трубопровода:

$$F_{\text{дв}} = f(Q) \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \varphi(\dot{y}), \quad (2.96)$$

где D – внутренний диаметр трубопровода;

\dot{y} – скорость скипа.

Из выражений (2.95) и (2.96) получаем неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка вида [45]

$$\ddot{y} + \psi(\dot{y}) + g = 0, \quad (2.97)$$

решение которого зависит от вида функции $\psi(\dot{y})$.

Промышленные воздуходувки, как было указано выше, имеют действительную характеристику в виде наклонной кривой. Функция (1) должна быть получена методом аппроксимации [100], после чего уравнение (2.97) может быть решено. Рассмотрим частный случай, когда функция $f(Q)$ близка к линейной. Подобные характеристики имеют воздуходувки небольших типоразмеров

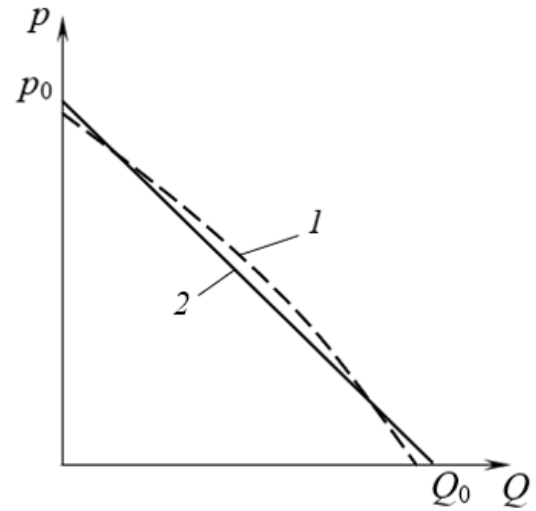


Рис. 2.20. Аппроксимация характеристики

[108]. Характеристика (линия 1) и аппроксимирующая прямая (линия 2) показаны на рис. 2.20. Решение уравнения (2.97) для данного случая актуально при физическом моделировании.

Аппроксимирующую функцию удобно представить уравнением

$$p = p_0 \left(1 - \frac{Q}{Q_0} \right), \quad (2.98)$$

или в виде

$$p = p_0 \left(1 - \frac{\dot{y}}{\dot{y}_0} \right), \quad (2.99)$$

где p_0 – давление при $Q = 0$; Q_0 – расход при $p = 0$;

Q – текущее значение расхода;

\dot{y}_0 – скорость, соответствующая расходу Q_0 :

$$\dot{y}_0 = \frac{4Q_0}{\pi D^2}. \quad (2.100)$$

После алгебраических преобразований с учётом выражений (2.97) и (2.100) уравнение (2.97) принимает такой вид:

$$\ddot{y} + a\dot{y} - b = 0, \quad (2.101)$$

где a, b – постоянные коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\pi D^2 p_0}{4m\dot{y}_0}; \\ b &= \frac{\pi D^2 p_0}{4m} - g. \end{aligned} \quad (2.102)$$

Решение уравнения (2.101) с начальными условиями ($t = 0; p = p_0$); ($t = 0; Q = 0$) позволяет найти зависимости перемещения, скорости и ускорения скипа от времени:

$$y = \frac{b}{a}t - \frac{b}{a^2}[1 - \exp(-at)]; \quad (2.103)$$

$$\dot{y} = \frac{b}{a}[1 - \exp(-at)]; \quad (2.104)$$

$$\ddot{y} = b \exp(-at). \quad (2.105)$$

Графиками функций (2.103) – (2.105) являются кривые, бесконечно приближающиеся к соответствующим асимптотам (рис. 2.21).

Ордината точки A соответствует максимальной величине ускорения скипа $\ddot{y}_{\max} = b$.

Ордината точки B

$$\dot{y}_B = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{y}(t) = \frac{b}{a}. \quad (2.106)$$

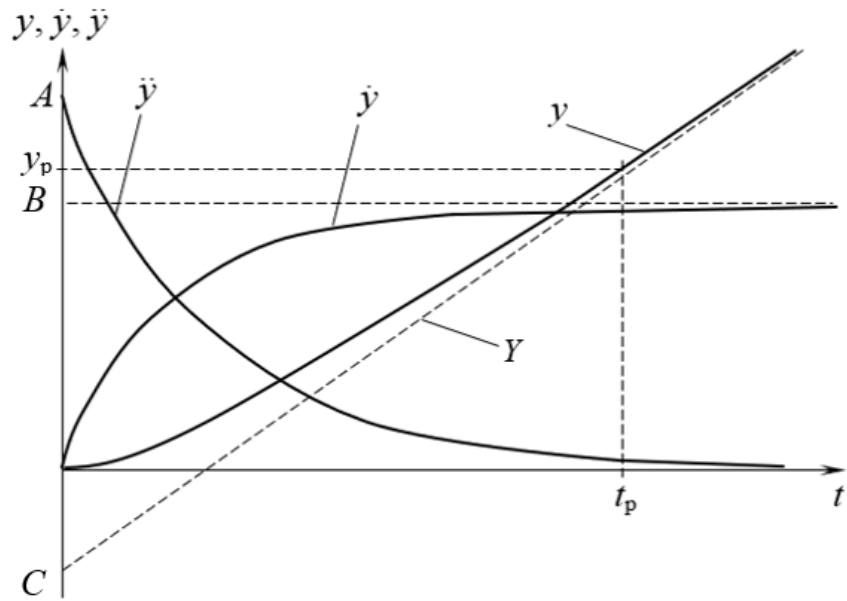


Рис. 2.21. Графики функций (2.103) – (2.105)

Уравнение асимптоты Y , к которой стремится график функции $y(t)$, получается при $t \rightarrow \infty$ в виде выражения

$$Y = \frac{b}{a}t - \frac{b}{a^2}, \quad (2.107)$$

а ордината точки C – из уравнения (2.107) при $t = 0$:

$$y_c = -\frac{b}{a^2}. \quad (2.108)$$

Для расчёта продолжительности периода разгона решим уравнение (2.104) относительно времени:

$$t = -\frac{1}{a} \ln \left(1 - \frac{a\dot{y}}{b} \right) = -\frac{1}{a} \ln \left(1 - \frac{\dot{y}}{\dot{y}_A} \right). \quad (2.109)$$

Теоретически процесс разгона бесконечен, поэтому целесообразно считать его завершённым, когда текущее значение скорости достигнет величины, мало отличающейся от \dot{y}_A . Будем считать период разгона законченным при $\dot{y} = 0,95\dot{y}_A$. Подстановка граничной величины скорости в формулу (2.109) даёт длительность периода разгона:

$$t_p = -\frac{1}{a} \ln 0,05 = \frac{2,996}{a} \approx \frac{3}{a}, \quad (2.110)$$

с учётом формулы (2.102) для коэффициента a :

$$t_p = \frac{12m\dot{y}_0}{\pi D^2 p_0}. \quad (2.111)$$

Подстановка величины t_p в формулу (2.103) позволяет получить перемещение скипа y_p в течение периода разгона:

$$y_p = 2,05 \frac{b}{a^2}. \quad (2.112)$$

Координаты t_p, y_p показаны на рис. 2.21.

В реальной ППУ будут возникать механическое и аэродинамическое сопротивления. Их величина в период разгона не остаётся постоянной, изменяясь достаточно сложным образом, и в настоящее время затруднительно предложить для их описания аналитические зависимости, которые можно было бы ввести в уравнение динамики скипа. Однако качественно оценить влияние нерасчётных сопротивлений вполне возможно: интенсивность изменения ускорения и скорости скипа понизится, зависимость данных параметров от времени утратит

асимптотический характер, а наибольшие регистрируемые значения будут ниже теоретических.

Приблизительный расчёт динамики скипа в период разгона выполняется в три этапа:

- вывод аппроксимирующей формулы для аэродинамической характеристики нагнетательного агрегата;
- подстановка аппроксимирующей формулы в уравнение динамики скипа;
- получение кинематических параметров разгона скипа путём решения уравнения динамики.

В частном случае, когда аппроксимирующая формула представляет собой линейную зависимость статического давления от производительности нагнетательного агрегата, расчёт динамики скипа рекомендуется выполнять по формулам (2.103) – (2.109).

2.4. Уплотнения зазора между скипом и стенкой трубопровода

2.4.1. Коэффициент аэродинамического сопротивления бесконтактных уплотнений

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

По наличию контакта уплотняющего элемента с подвижной поверхностью различают уплотнения бесконтактные, контактные и комбинированные [8]. Пример бесконтактных уплотнений – направляюще-уплотнительные кольца, упомянутые в п. 2.1.2.

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 незначителен.

Вследствие отсутствия трения применение бесконтактных уплотнений не приводит к снижению механического КПД установки. Второе из указанных достоинств также является следствием исключения механического взаимодействия уплотнения со стенкой.

Однако бесконтактные уплотнения имеют весьма серьёзный недостаток – утечку воздуха через зазоры (щели). Негативное влияние утечки заключается в снижении объёмного КПД $\eta_{об}$ установки, что, в свою очередь, приводит к завышенным энергозатратам.

В комбинированных уплотнениях бесконтактный компонент применяется, как правило, для защиты контактного от воздействия загрязнений в окружающей среде или на поверхности. В дальнейшем рассматриваются первые два типа уплотнений.

Наиболее приемлемой для использования в скиповом пневмоподъёме разновидностью бесконтактных уплотнений представляется лабиринт, показанный на рис. 2.22.

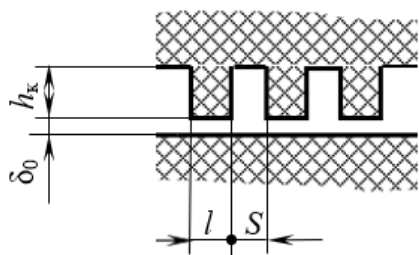


Рис. 2.22. Простейший лабиринт предусмотрен гарантированный зазор δ_0 .

Под действием перепада давления под скипом и над ним воздух по зазору δ_0 и через ряд камер шириной S и высотой h_k каждая перетекает через уплотнение. Лабиринт функционирует как местное аэродинамическое сопротивление, характеризующееся коэффициентом ζ , который определяется по методике [35]. В разделе 3 выполнен расчёт ζ лабиринта физической модели скипа.

В том случае, если перепад давления Δp не приводит к существенному изменению плотности среды ρ , скорость течения в зазоре определяется по формуле

$$v_y = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho\zeta}}, \quad (2.113)$$

а проходящий через уплотнение расход

$$\Delta Q = F_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho\zeta}}, \quad (2.114)$$

где F_0 – площадь зазора, которую удобно получить в виде

$$F_0 \approx \pi D \delta_0. \quad (2.115)$$

Формулы (2.113), (2.114) приближённые, так как не учитывают перемещение лабиринта относительно стенки (или стенки относительно лабиринта).

Из выражения (2.114) видно, что при фиксированном Δp величина утечки зависит от значений F_0 (т. е. от δ_0) и ζ , но не связана со скоростью установившегося движения скипа. Следовательно, с увеличением скорости подъёма (спуска) $\eta_{об}$ будет возрастать.

Пусть производительность нагнетательной станции равна Q , тогда объёмный КПД однетрубного скипового подъёма или двухтрубного с разомкнутой схемой определяется по формуле

$$\eta_{об.р} = 1 - \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (2.116)$$

двухтрубного с замкнутой схемой –

$$\eta_{об.з} = 1 - \frac{\Delta Q_{п} + \Delta Q_{с}}{Q}, \quad (2.117)$$

где $\Delta Q_{п}$, $\Delta Q_{с}$ – утечка при подъёме и спуске скипа соответственно.

Для системы, диаметры трубопроводов в которой определены по рекомендациям п. 2.2.2, справедливо равенство

$$\Delta Q_{п} = \Delta Q_{с} = \Delta Q, \quad (2.118)$$

следовательно,

$$\eta_{об.з} = 1 - \frac{2\Delta Q}{Q}. \quad (2.119)$$

Подстановка выражений (2.114), (2.115) в формулы (2.117), (2.119) после алгебраических преобразований позволяет получить такие соотношения:

$$\begin{aligned} \eta_{об.п} &= 1 - \frac{4,44D\delta_0}{Q} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho\zeta_p}}; \\ \eta_{об.з} &= 1 - \frac{8,89D\delta_0}{Q} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho\zeta_з}}, \end{aligned} \quad (2.120)$$

где ζ_p , $\zeta_з$ – коэффициент сопротивления уплотнения в разомкнутой и замкнутой схеме соответственно.

Во избежание существенного повышения энергозатрат следует ограничить объёмный КПД минимально допустимой величиной $[\eta_{об}]$. Тогда из условий

$$\begin{aligned} \eta_{об.п} &\geq [\eta_{об}]; \\ \eta_{об.з} &\geq [\eta_{об}] \end{aligned} \quad (2.121)$$

и формул (2.120) следует, что коэффициент сопротивления лабиринта должен удовлетворять требованиям (2.122):

$$\zeta_p \geq 20 \frac{\Delta p}{\rho} \left(\frac{D\delta_0}{Q(1-[\eta_{об.р}])} \right)^2; \quad (2.122)$$

$$\zeta_3 \geq 79 \frac{\Delta p}{\rho} \left(\frac{D\delta_0}{Q(1-[\eta_{об.з}])} \right)^2.$$

Несмотря на приближённый в целом характер выражений (2.122), они позволяют не только оценить эффективность, но и предварительно подобрать параметры бесконтактных уплотнений для разомкнутой и замкнутой систем пневмоподъёма.

2.4.2. Адаптивные уплотнения

Из формул (2.122) видно, что в замкнутой схеме к бесконтактным уплотнениям предъявляются значительно более жёсткие требования, чем в разомкнутой. Предварительные расчёты для $[\eta_{об}] = 0,95$ показали, что обеспечить необходимое значение ζ_p достаточно просто с конструктивной точки зрения. Теоретически возможно выполнение лабиринта и для замкнутой схемы при том, что коэффициент сопротивления ζ_3 в четыре раза больше (при прочих равных условиях). Однако практическое исполнение такого уплотнения может потребовать сплошного оребрения боковой поверхности скипа, т. е. серьёзно усложнить изготовление. Следует учитывать и такой фактор эксплуатации как влажность и загрязнённость поверхностей, который приведёт к забиванию каналов лабиринта и снижению его уплотняющей способности. Замена или очистка лабиринта с большим числом каналов становятся сложными и трудоёмкими операциями.

Применению контактных уплотнений, весьма желательному для устранения утечки воздуха, препятствуют тяжёлые условия эксплуатации в подъёмном трубопроводе, заключающиеся в высокой скорости скольжения уплотняющего элемента по поверхности при изначально повышенной температуре как поверхности, так и окружающей среды. Наиболее приемлемыми в трубопроводах с большими погрешностями формы и размеров поперечного сечения представляются уплотнения типа манжетных по ГОСТ 6678, выполненные из материала с заданными физико-механическими характеристиками. Но и такие устройства требуют всемерного смягчения условий эксплуатации.

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.

Прототипом адаптивного уплотнения явились упомянутые выше манжеты для пневматических устройств по ГОСТ 6678; фактор, к которому адаптируется уплотнение, – перепад давления воздуха.

Рис. 2.23 поясняет принцип работы адаптивного уплотнения.

Уплотнение нормально контактное с переходом в бесконтактное (НК) показано на рис. 2.23, *а*.

Манжета 5 изготовлена из упругого антифрикционного материала с таким расчётом, чтобы при перепаде давления под весом порожнего скипа 1 её уплотняющий элемент контактировал со стенкой спускного трубопровода 3, а под действием перепада давления под весом гружёного скипа 2 отходил от стенки подъёмного трубопровода на расчётное расстояние δ_0 (на рис. 2.23 не показано). В результате в период подъёма манжета функционирует как бесконтактное уплотнение, а в период спуска как контактное.

На рис. 2.23, б показано уплотнение нормально бесконтактное с переходом в контактное (НБ). При перепаде давления под весом порожнего скипа уплотняющий элемент манжеты б отстоит от стенки спускного трубопровода на расчётное расстояние δ_0 , а под действием перепада давления под весом гружёного скипа входит в контакт со стенкой подъёмного трубопровода. В период подъёма манжета функционирует как контактное уплотнение, а в период спуска как бесконтактное.

Использование адаптивных уплотнений позволяет снизить утечку воздуха и облегчить условия эксплуатации контактирующих элементов. Уплотнение НБ, подвергшееся температурно-фрикционному воздействию в период подъёма, охлаждается в период спуска. Уплотнение НК не испытывает фрикционного воздействия в период подъёма, а в период спуска интенсивность данного воздействия невелика и в силу большой разности температур манжеты и стенки не препятствует охлаждению контактирующего элемента.

На текущем этапе исследования применение уплотнений НК выглядит предпочтительным. Можно предположить, что на экспериментальном образце скипа манжета будет входить как контактный компонент комбинированного уплотнения. Перспективность использования адаптивных уплотнений должна быть подтверждена в ходе углублённого изучения.

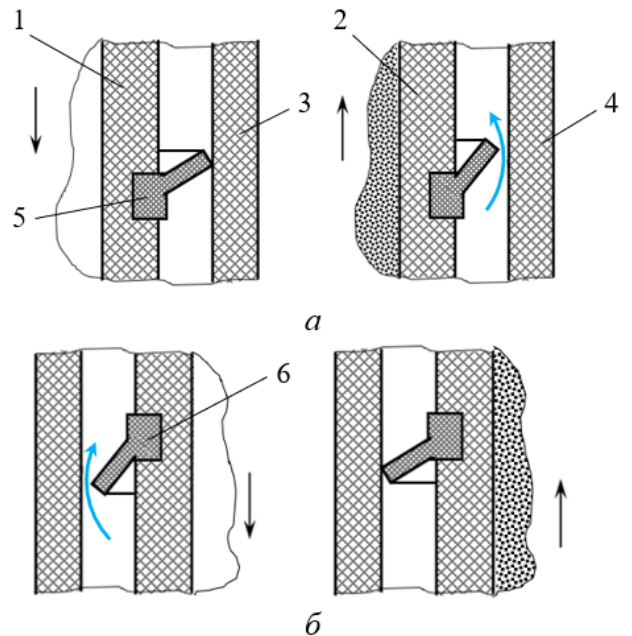


Рис. 2.23. Адаптивные уплотнения:
 а – нормально контактное; б – нормально бесконтактное;
 1 – порожний скип; 2 – гружёный скип;
 3 – спускной трубопровод;
 4 – подъёмный трубопровод;
 5 – манжета НК; 6 – манжета НБ

2.5. Выводы

Принцип трубопроводного пневмоподъёма предоставляет возможность создания разнообразных систем, обеспечивающих широкий диапазон производительностей и максимально адаптированных к конкретным условиям эксплуатации. Любая из рассмотренных в п. 2.3.1 схем имеет право на реализацию.

В конструктивном плане наибольшей простотой при значимой производительности обладает однострубная многоскиповая схема. Спуск порожних скипов пакетом позволяет свести к минимуму длительность паузы в работе воздухонагнетательного агрегата и соответственно повысить его энергоэффективность. Существенным недостатком схемы является невозвратная потеря энергии на подъём собственной массы скипа.

В двухтрубной двухскиповой разомкнутой схеме длительность паузы дополнительно уменьшена до времени, потребного для выполнения операций загрузки-разгрузки и перестановки скипов из одного трубопровода в другой.

Наконец, пауза практически устраняется, а производительность достигает наибольшего для двухтрубных систем значения в четырёхскиповой разомкнутой схеме. Однако затраты энергии на подъём собственной массы скипа характерны и для двухтрубных разомкнутых схем.

Двухтрубная замкнутая схема свободна от указанного недостатка. Рекуперация энергии порожнего скипа путём подачи воздуха из спускного трубопровода во входное окно воздухонагнетательного агрегата в период спуска позволит устранить затраты энергии на подъём собственной массы гружёного скипа и добиться максимальной энергоэффективности ППУ. Выполнение диаметра трубопроводов в соответствии с формулой (2.32) обеспечит синхронность прибытия порожнего скипа на загрузочную, а гружёного – на разгрузочную станции.

Оценочные расчёты подтверждают перспективность ППУ как высокопроизводительного транспортного средства. На рис. 2.24 приведены

графики, иллюстрирующие зависимость прогнозируемой производительности от глубины шахты и диаметра трубопроводов для следующих исходных параметров: средняя скорость подъёма 20 м/с; избыточное рабочее статическое давление, развиваемое воздухоподувкой, 50 кПа; ряд диаметров трубопроводов, м: 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; схема двухтрубная четырёхскиповая. Кроме того, дан прогноз производительности трёхтрубной 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 математической модели ППУ связана с многообразием факторов, влияющих на кинематику сосудов и определяющих требования к воздухонагнетательному агрегату. Один из таких факторов состоит в существенном повышении температуры воздуха при прохождении его через воздухоподувку.

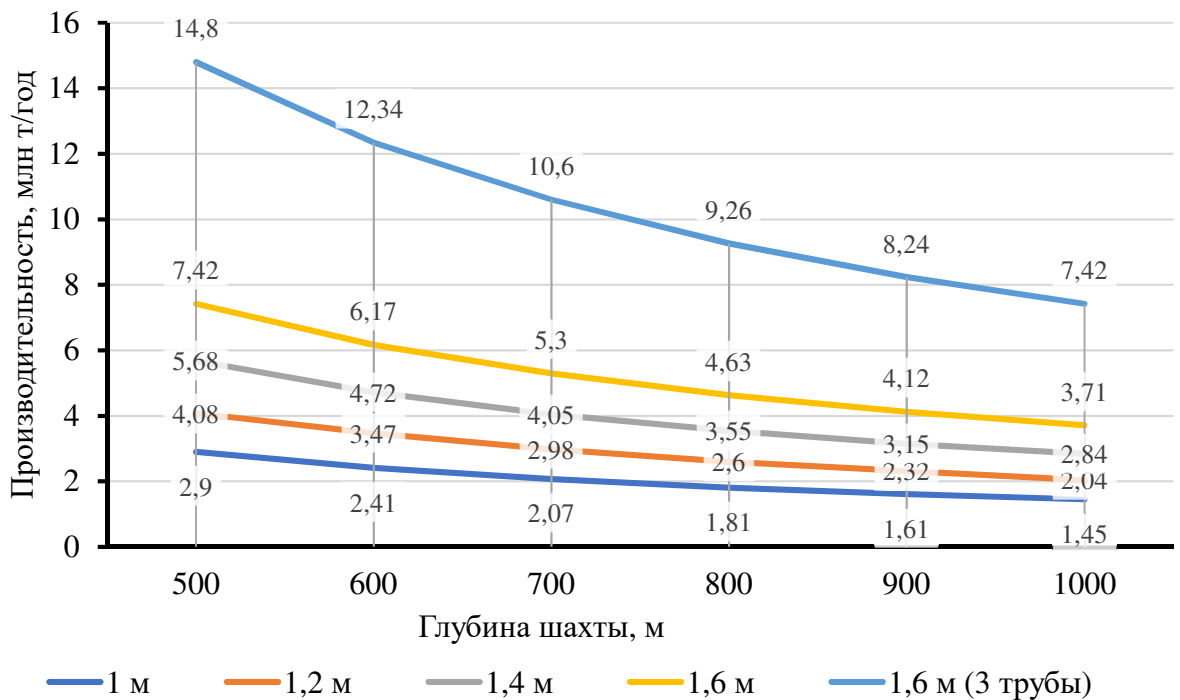


Рис. 2.24. Прогнозируемая производительность ППУ в зависимости от глубины шахты и диаметра трубопроводов

В период перемещения гружёного скипа по подъёмному трубопроводу 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. Т. Шухова стало уравнение (2.25), позволяющее определить необходимую подачу воздухонагнетательного агрегата по заданной средней скорости гружёного скипа.

Процесс спуска порожнего скипа 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 (2.39) динамики порожнего скипа с учётом свойств вмещающей среды позволило получить выражения скорости спуска (2.47) и перемещения (2.52) в функции времени, а также формулу (2.56), позволяющую определить длительность периода спуска на заданную глубину.

Особенностью начального этапа спуска порожнего скипа 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 скипом. Получены уравнения кинематики сосуда (2.72), (2.74) и (2.75), а также избыточного давления (2.76).

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

Идея способа заключается в том, что на конечном участке спуска порожнего скипа по команде системы управления нижнее (выходное) сечение спускного

трубопровода перекрывается. Кинетическая энергия скипа 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 нижним (входным) сечением подъёмного трубопровода под гружёным скипом. Таким образом, потенциальная энергия сжатого в спускном трубопроводе воздуха используется для создания необходимого для разгона гружёного скипа избыточного давления, чем и обеспечивается снижение нагрузки на воздуходувку.

Математическая модель движения порожнего скипа на конечном участке замкнутого спускного трубопровода позволила получить уравнения (2.80), (2.91) зависимостей избыточного давления под скипом и скорости скипа от его координаты, необходимые для расчёта ускорения гружёного скипа. Разработан вариант технологического цикла ППУ с рекуперацией кинетической энергии масс в спускном трубопроводе.

Полученные в результате исследования соотношения дают возможность рассчитать динамику скипа в период разгона с учётом аэродинамической характеристики нагнетательного агрегата, что необходимо для определения времени рабочего цикла пневмоподъёмной установки.

Большое практическое значение имеет обоснованный выбор типа уплотнения зазора между стенкой скипа и внутренней поверхностью трубопровода. Предложены адаптивные уплотнительные устройства, которые под действием расчётного перепада давления преобразуются из контактных в бесконтактные (или наоборот). Их применение даст возможность получить объёмный КПД установки не ниже допустимого и повысить долговечность рабочих элементов уплотнения.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СКИПОВОЙ ПНЕВМОПОДЪЁМНОЙ УСТАНОВКИ

3.1. Задачи моделирования. Методика проведения экспериментов

3.1.1. Задачи моделирования

Физическое моделирование включает 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.

Математическая модель практически полностью описывается полученными в разделе 2 теоретическими зависимостями, однако для подтверждения её адекватности необходимы эксперименты с физической моделью. Важность физических экспериментов состоит также в возможности проверки эффективности конструктивных решений, принимаемых на стадии проектирования.

Один из серьёзных вопросов, которые предстоит решить проектировщику ППУ, заключается в выборе способа устранения или ограничения утечки воздуха через зазор между скипом и стенкой трубопровода. Важность правильного выбора уплотнения показана в подразделе 2.4. На основании анализа эксплуатационных качеств различных типов уплотнений и физических воздействий на их элементы в трубопроводах ППУ сделан вывод о перспективности адаптивных уплотнительных устройств, которые в одном из трубопроводов выступают в качестве контактных, а в другом – бесконтактных. Физическое моделирование даёт возможность проверить на практике действенность того или иного уплотнительного средства. В классе бесконтактных уплотнений большой интерес представляет наиболее простой и долговечный лабиринт (см. п. 2.4.1), применимость которого

обусловлена строгим ограничением утечки среды через гарантированный зазор. Из контактных традиционных (неадаптивных) уплотнений предпочтительным выглядит разрезное пружинное кольцо, изготовление и замена которого не связаны с большими трудностями [103].

Задачи физического моделирования ППУ на данном этапе исследований формулируются следующим образом:

- подтвердить применимость математической модели для расчёта параметров экспериментального образца (далее – образца) ППУ;
- установить целесообразность применения лабиринта и разрезных пружинных колец в образце.

3.1.2. Методика экспериментального исследования

3.1.2.1. Критерии подобия

Физическая модель адекватна образцу, если между ними существует геометрическое подобие и равенство аэродинамических и термодинамических критериев [34]. Рассматривается установившееся движение модели скипа, следовательно, подобие по условию времени обеспечено.

Условия подобия по аэродинамическим критериям те же, что и для вентиляторных установок [9]. По аналогии с вентиляторами при малых числах Маха ($M \leq 0,6$) пренебрегают влиянием числа Рейнольдса и принимают расход основным и единственным определяющим критерием подобия.

К отличиям физических процессов в образце от вентиляторной установки относятся:

- более высокая разность (перепад) статического давления под скипом и над ним и связанное с ней изменение плотности воздуха;
- сложная термодинамика потока в подъёмном трубопроводе, оказывающая существенное влияние на физические свойства воздуха.

С учётом невозможности на данной стадии исследований смоделировать термодинамические процессы принято решение ограничиться испытаниями при

условиях спускного трубопровода ППУ, в котором перепады температуры невелики, и их влиянием на аэродинамику можно пренебречь.

Согласно предварительным расчётам, перепад статического давления в образце с площадью поперечного сечения трубопровода 1 м^2 (внутренним диаметром $D_0 = 1,128 \text{ м}$):

- в спускном трубопроводе $p'_{so} = 0,1 \text{ бар}$ (10 кПа);
- в подъёмном трубопроводе $p''_{so} = 0,5 \text{ бар}$ (50 кПа).

Однако, вследствие повышенной температуры воздуха на выходе нагнетательной станции, его плотность при давлении p''_{so} близка к значению, определяемому по выражению

$$\rho_n = \rho_0 \frac{p_0 + p'_{so}}{p_0}, \quad (3.1)$$

где ρ_0, p_0 – плотность и давление воздуха на входе в спускной трубопровод.

Таким образом, при $p_0 = 1 \text{ бар}$ (100 кПа) плотность воздуха под скипом в образце $\rho = 1,1\rho_0$. Изменение плотности при перетекании воздуха через зазоры в лабиринте невелико, поэтому принято допущение, что воздух является несжимаемой средой с плотностью в образце ρ_0 и модели ρ_m , равными плотности на входе в спускной трубопровод, т. е. $\rho_0 = \rho_m = \rho_0$.

Следствие из данного допущения состоит в низкой интенсивности термодинамических процессов как в образце, так и в модели, и в несущественности их влияния на результаты экспериментов.

Константа подобия определяющего критерия (расхода)

$$k_Q = \frac{Q_o}{Q_m} = \frac{4v_o \pi D_o^2}{4v_m \pi D_m^2} = \frac{H_o t D_o^2}{H_m t D_m^2} = k_L^3, \quad (3.2)$$

где Q – производительность нагнетательной;

v – скорость воздуха в подъёмном трубопроводе;

D – внутренний диаметр трубопровода;

H – высота подъёма в период установившегося движения;

t – время подъёма скипа на высоту H при герметичном уплотнении;

k_L – геометрическая константа подобия; индекс «о», «м» относится к параметру образца и модели соответственно (здесь и далее по тексту).

Испытания проводились в реальном времени, поэтому параметр t в случае геометрического подобия для натурального образца и модели один и тот же.

Определяемые константы подобия:

- геометрическая

$$k_L = \frac{D_o}{D_m} = \frac{H_o}{H_m} = \frac{\delta_{0o}}{\delta_{0m}} = \frac{D_{c.o}}{D_{c.m}} = \frac{l_{c.o}}{l_{c.m}}, \quad (3.3)$$

где δ_0 – зазор в лабиринте;

D_c – наружный диаметр скипа;

l_c – длина скипа;

- массовая

$$k_m = \frac{m_o}{m_m} = k_L^3, \quad (3.4)$$

где m – масса скипа;

- перепада статического давления

$$k_p = \frac{p_{so}}{p_{sm}} = \frac{4 m_o g \pi D_m^2}{\pi D_o^2 4 m_m g} = \frac{k_m}{k_L^2} = k_L; \quad (3.5)$$

- объёмного КПД

$$k_{\eta} = \frac{\eta_{об.о}}{\eta_{об.м}} = \frac{(Q_o - \Delta Q_o)Q_m}{(Q_m - \Delta Q_m)Q_o}, \quad (3.6)$$

где ΔQ – утечка через уплотнение.

Особо следует рассмотреть вопрос влияния коэффициента местного сопротивления ζ лабиринта на величину объёмного КПД $\eta_{об}$ ППУ.

Для нахождения k_{η} выделены два варианта. Первый основан на принятии равенства КПД модели и образца, т. е. $\eta_{об.м} = \eta_{об.о}$. В этом случае $k_{\eta} = 1$, и формула (3.6) преобразуется в уравнение

$$\left(Q_o - \sqrt{\frac{2p_{so}}{\rho\zeta_o}} \pi D_o \delta_{0o} \right) Q_m = \left(Q_m - \sqrt{\frac{2p_{sm}}{\rho\zeta_m}} \pi D_m \delta_{0m} \right) Q_o, \quad (3.7)$$

откуда

$$Q_o - \sqrt{\frac{2p_{so}}{\rho\zeta_o}} \pi D_o \delta_{0o} = Q_m k_Q - \sqrt{\frac{2p_{sm}}{\rho\zeta_m}} \pi D_m \delta_{0m} k_Q, \quad (3.8)$$

или, после алгебраических преобразований,

$$\sqrt{\frac{p_{so}}{\zeta_o}} D_o \delta_{0o} = \sqrt{\frac{p_{sm}}{\zeta_m}} D_m \delta_{0m} k_Q. \quad (3.9)$$

Уравнение (3.9) позволяет найти константу подобия коэффициента сопротивления лабиринта:

$$k_{\zeta} = \frac{\zeta_o}{\zeta_m} = \frac{p_{so} D_o^2 \delta_{0o}^2}{p_{sm} D_m^2 \delta_{0m}^2 k_Q^2} = \frac{k_p k_L^4}{k_Q^2}. \quad (3.10)$$

Согласно второму варианту, коэффициенты местного сопротивления образца и физической модели равны: $\zeta_o = \zeta_m = \zeta$, в результате чего выражение (3.6) принимает такой вид:

$$k_\eta = \frac{Q_o - \sqrt{\frac{2p_{so}}{\rho\zeta}} \cdot \pi D_o \delta_{0o}}{\left(Q_m - \sqrt{\frac{2p_{sm}}{\rho\zeta}} \cdot \pi D_m \delta_{0m} \right) k_Q}, \quad (3.11)$$

или

$$k_\eta = \frac{Q_o - \sqrt{\frac{2p_{so}}{\rho\zeta}} \cdot \pi D_o \delta_{0o}}{Q_o - \sqrt{\frac{2p_{so}}{\rho k_p \zeta}} \cdot \pi \frac{D_o \delta_{0o}}{k_L^2} k_Q} \neq \text{const}. \quad (3.12)$$

По второму варианту константы подобия k_η не существует. Коэффициент k_η зависит от параметров образца.

Введём условие

$$\eta_{об.о} \leq [\eta_{об}]. \quad (3.13)$$

Тогда выражение (2.120) принимает вид:

$$[\eta_{об}] = 1 - \frac{\pi D_o \delta_{0o}}{Q_o} \sqrt{\frac{2p_{so}}{\rho\zeta}}, \quad (3.14)$$

откуда наименьшее значение коэффициента сопротивления лабиринта, обеспечивающее выполнение условия (3.13):

$$\zeta = \frac{2p_{so}}{\rho} \left[\frac{\pi D_o \delta_{0o}}{Q_o (1 - [\eta_{об}])} \right]^2. \quad (3.15)$$

Использование найденного по выражению (3.15) коэффициента ζ даёт возможность найти объёмный КПД модели по второму варианту:

$$\eta_{об.м} = 1 - \frac{4,44 D_m \delta_{0m}}{Q_m} \sqrt{\frac{p_{sm}}{\rho \zeta}}. \quad (3.16)$$

Подстановка в выражение (3.15) значений ориентировочных параметров образца даёт для $[\eta_{об}] = 0,95$ значение коэффициента сопротивления лабиринта $\zeta \approx 10$.

Утечка через зазор лабиринта в модели составит

$$\Delta Q_m = \sqrt{\frac{2 p_{sm}}{\rho \zeta}} \cdot \pi D_m \delta_{0m}. \quad (3.17)$$

При разработке физической модели принято значение геометрической константы $k_L = 10$. Получены значения: $k_Q = 10^3$; $k_m = 10^3$; $k_p = 10$.

3.1.2.2. Алгоритм эксперимента

Обобщённым параметром, характеризующим работоспособность ППУ, является её КПД. При вертикальном транспортировании величина механического КПД аналитически неопределима, 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) скип-А с лабиринтным уплотнением;
- 2) скип-А с комбинированным уплотнением;
- 3) скип-Б с уплотнением в виде пружинных колец.

В каждом из указанных вариантов масса скипа m_m , кг, последовательно принималась по ряду: 1,00; 1,67; 2,03; 3,00; 3,70. Величины масс приняты

произвольно без какой-либо чёткой закономерности. Со скипом 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 (см. п. 3.2.2 и рис. 3.9), а также математическая модель периода разгона скипа (см. п. 3.2.4).

Алгоритм определения $\eta_{об.м}$ в серии показан на рис. 3.1.

Рассмотрим методику проведения серии повторений на примере испытаний скипа-А с лабиринтным уплотнением (вариант 1).

1. Загрузить скип материалом: $m_M = 1$ кг.
2. Определить длительность периода разгона t_p и путь разгона y_p по формулам (3.31), (3.32) или графикам рис. 3.12, 3.13.
3. Определить избыточное статическое давление по формуле

$$p_{см} = \frac{4m_M g}{\pi D_{с.м}^2}, \quad (3.18)$$

где g – ускорение свободного падения.

4. Найти производительность нагнетательной станции Q_M , используя значение $p_{см}$ и выражение (3.28):

$$Q_M = \frac{108 - p_{см}}{1,51}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (3.19)$$

5. Выполнить серию из пяти подъёмов скипа ($i = 1, 2, \dots, 5$) и определить ряд значений времени подъёма $t_{п1}, t_{п2}, \dots, t_{п5}$.
6. Найти математическое ожидание времени подъёма $\bar{t}_{п}$.

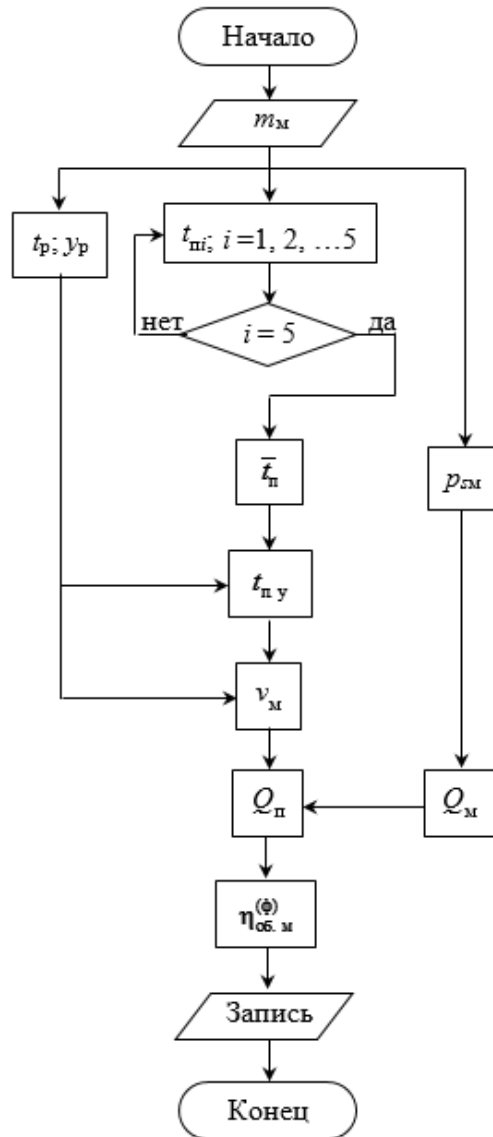


Рис. 3.1. Алгоритм определения объёмного КПД в серии испытаний

7. Определить продолжительность периода установившегося движения $t_{п.у}$ и скорость v_m установившегося движения скипа по формуле (3.33) с подстановкой в неё значения \bar{t}_π .

8. Найти полезный расход Q_π нагнетательной станции по формуле

$$Q_\pi = 900\pi v_m D_{с.м}^2, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (3.20)$$

9. Вычислить фактический объёмный КПД модели в серии по формуле

$$\eta_{\text{об. м}}^{(\phi)} = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{м}}}. \quad (3.21)$$

10. Записать значение $\eta_{\text{об. м}}^{(\phi)}$.

Затем загрузить скип материалом до следующего по ряду значения $m_{\text{м}} = 1,67$ кг и выполнить процедуры согласно данному алгоритму.

По описанному алгоритму проведены также испытания скипа-А с комбинированным уплотнением (вариант 2) и скипа-Б (вариант 3).

3.2. Физическая модель

3.2.1. Конструкция физической модели

Принципиальная схема модели показана на рис. 3.2.

В модели использована вихревая воздуходувка МТ 03-М1С-230 *ERSTEVAK* (рис. 3.3), техническая характеристика которой представлена в табл. 3.1 [96].

Измерение избыточного статического давления выполнялось манометром *b. Well*, предназначенным для давления в диапазоне 0...300 мм рт. ст. (0...395 мбар), цена деления 2 мм рт. ст. (2,63 мбар), класс точности 4.

Для измерения расхода использовались крыльчатые анемометры МЕГЕОН 11003 и *Testo* 416 (рис. 3.4). Их технические характеристики приведены в табл. 3.2 [93, 94].

Анемометр МЕГЕОН 11003 использовался для настройки модели и при пробных запусках скипа. Анемометр *Testo* 416, имеющий датчик с крыльчаткой малого диаметра, применялся для определения расхода в экспериментах.

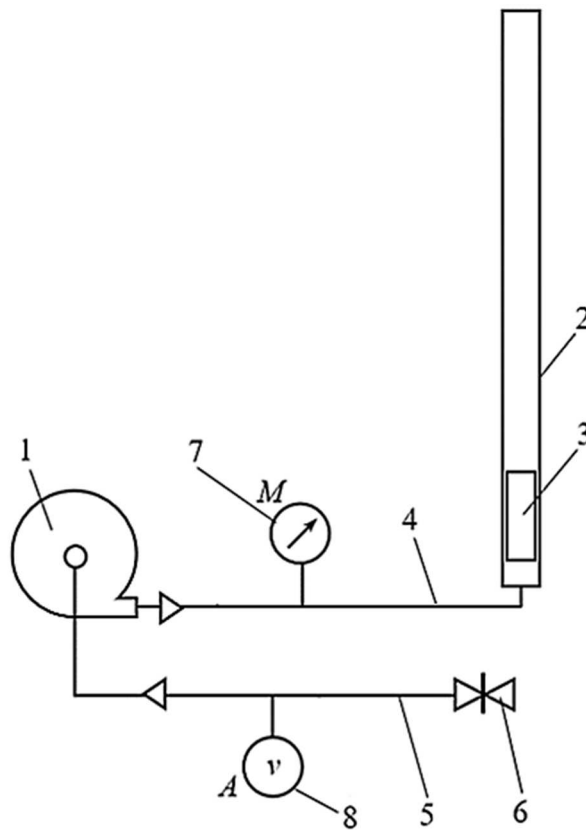


Рис. 3.2. Принципиальная схема модели ППУ:
 1 – воздуходувка; 2 – подъёмный трубопровод; 3 – скип; 4 – напорная магистраль; 5 – входной (измерительный) воздуховод; 6 – задвижка;
 7 – манометр (M), 8 – анемометр (A)

Измерение времени подъёма скипа осуществлялось по секундомеру электронному «Интеграл С-01». Его диапазон измерений 0...9 ч 59 мин, дискретность интервалов измерения 0,01 с, погрешность $\pm 9,6 \cdot 10^{-6} \cdot T_x$, где T_x – измеряемый интервал, с.



Рис. 3.3. Воздуходувка МТ 03-М1С



a



б

Рис. 3.4. Анемометры крыльчатые:
a – МЕГЕОН 11003; *б* – Testo 416

Таблица 3.1

Техническая характеристика воздуходувки МТ 03-М1С

Параметр	Значение
Максимальное избыточное полное давление, мбар (кПа)	120 (12)
Максимальная производительность, м ³ /ч (м ³ /с)	80 (0,022)
Питание:	
- напряжение входное однофазное, В	230
- ток, А	2,7
- частота, Гц	50
Потребляемая мощность, кВт, не более	0,37
Уровень шума, дБ	53
Габаритные размеры, мм:	
- длина	219
- ширина	246
- высота	247
Масса, кг	9 (11)

Таблица 3.2

Технические характеристики анемометров

Параметр	Тип анемометра	
	МЕГЕОН 11003	<i>Testo</i> 416
Диапазон измерения скорости, м/с	0...30	0,6...40
Разрешение, м/с	0,1	0,2
Погрешность измерения, м/с	0,1	+ 1,5 % от измеряемого значения
Габаритные размеры, мм:		
- длина	160	182
- ширина	52,5	64
- высота (толщина)	35,5	40
Диаметр крыльчатки, мм	30	16
Масса, кг	0,185	0,325

Напорная магистраль 4 (см. рис. 3.2) и соединение входного воздуховода 5 со входом воздуходувки выполнены из полипропиленовой трубы $40 \times 1,8$ мм, входной воздуховод и подъёмный трубопровод 2 – из полипропиленовой трубы $110 \times 2,2$ мм. В стенке входного воздуховода выполнено отверстие для ввода крыльчатки анемометра 8 в поток. В стенке магистрали 4 – отверстие для установки манометра 7. Задвижка 6 позволяла перекрывать входной воздуховод для установки скипа в подъёмный трубопровод и открывать входной воздуховод для подъёма скипа без выключения двигателя воздуходувки. Таким образом удалось избежать затрат времени на разгон двигателя.

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 (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Нагнетательная станция

Трубы выполнены с раструбами и манжетными уплотнениями, что позволяет обеспечивать герметичное соединение их участков, а также наращивать подъёмный трубопровод до длины (высоты), предусмотренной планом экспериментов.

Модель скипа выполнена в двух вариантах – основном (скип-А) и дополнительном (скип-Б), различающихся устройством уплотнений.

Основной вариант скипа (скип-А) поясняется рис. 3.6, 3.7, поз. 1.

Бесконтактное уплотнение представляет собой лабиринт, образованный внутренней стенкой подъёмного трубопровода и пятнадцатью кольцевыми камерами: двумя сечением 5×5 мм (канавками под пружинные кольца) и тринадцатью сечением 5×16 мм, которые ограничиваются кольцевыми рёбрами. Разность между внутренним диаметром трубопровода и наружным диаметром капсулы равна 1,6 мм, т. е. расчётный зазор в лабиринте составляет 0,8 мм.

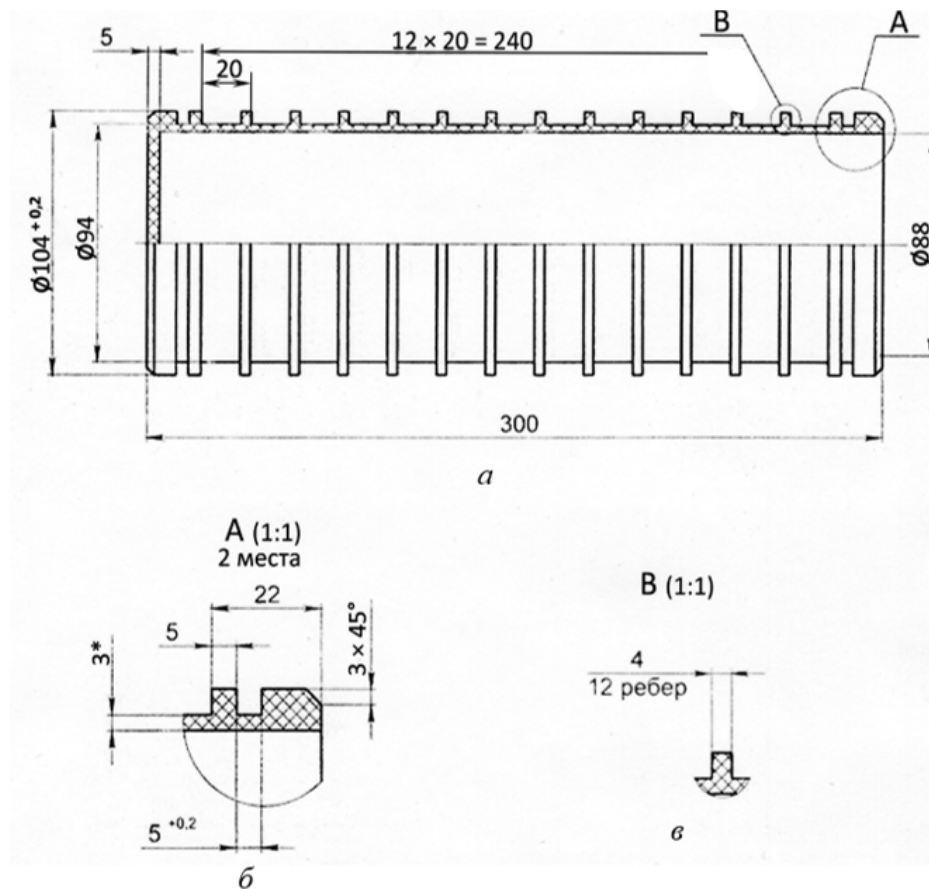


Рис. 3.6. Основной вариант модели скипа (скип-А):
a – главный вид; *б* – канавка под пружинное кольцо; *в* – кольцевое ребро

Конструкция скипа-А предусматривает испытания с бесконтактным и комбинированным уплотнениями.

В комбинированное уплотнение входят:

- два контактных уплотнения в виде пластиковых пружинных колец поперечным сечением $4,8^{+0,1} \times 5$ мм, устанавливаемых в канавки шириной $5^{+0,2}$ мм (которые в бесконтактном уплотнении играют роль кольцевых камер);
- бесконтактное уплотнение в виде тринадцати кольцевых камер (см. ниже).

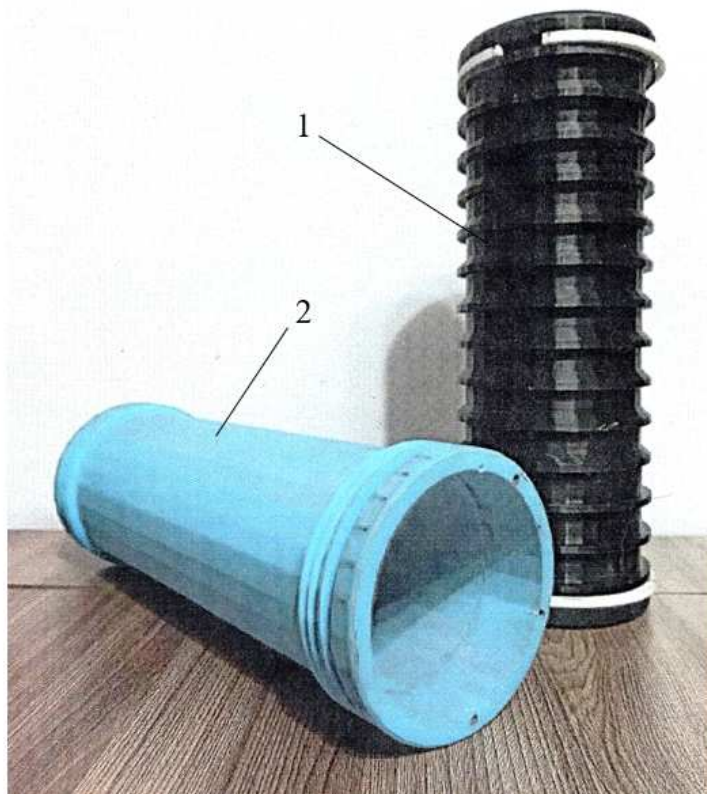


Рис. 3.7. Варианты модели скипа:
1 – скип-А; 2 – скип-Б

Сечение пружинного кольца в канавке выглядит так, как показано на рис. 3.8. Схема лабиринта, реализованного в основном варианте, приведена на рис. 3.9.

Коэффициент местного сопротивления лабиринта

$$\zeta = 1 + \zeta' + \zeta_1 + \zeta_2, \quad (3.22)$$

где ζ' – коэффициент сопротивления входу потока в лабиринт (в данном случае $\zeta' = 0,5$);

ζ_1 – коэффициент сопротивления двух камер шириной 5 мм;

ζ_2 – коэффициент сопротивления тринадцати камер шириной 16 мм.

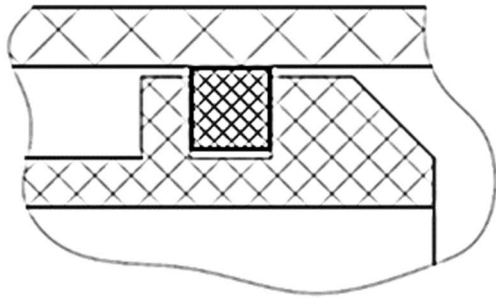


Рис. 3.8. Установка пружинного кольца

Расчётные параметры: $\delta_{0M} = 0,8$ мм; $S_1 = 5$ мм; $S_2 = 16$ мм; $h_k = 5$ мм; площадь поперечного сечения зазора $F_{0M} \approx 263$ мм².

В соответствии с расчётом, коэффициент местного сопротивления лабиринта $\zeta = 10,87 \approx 11$, что хорошо согласуется с запланированной величиной.

Скип-Б показан на рис. 3.6, поз. 2 и предназначен для испытаний бесконтактного уплотнения. В его корпусе так же, как в основном варианте, выполнены две канавки под пружинные кольца. Кольцевые рёбра отсутствуют. Остальные размеры те же, что и скипа-А. Массы: модели А – 0,684 кг, модели Б – 0,522 кг.

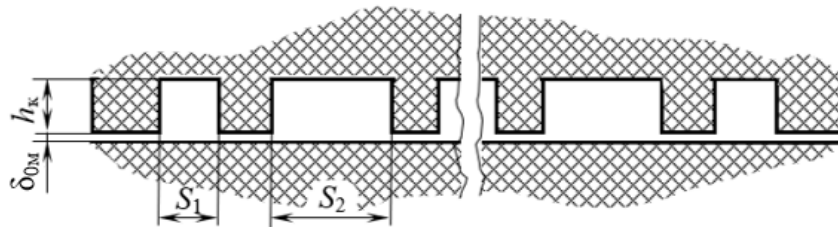


Рис. 3.9. Схема лабиринта

3.2.2. Статическая характеристика нагнетательной станции

Эксперименты предполагают работу со статической аэродинамической характеристикой нагнетательной станции, которая построена с учётом ГОСТ 10921 [1]. Однако, поскольку конструкция станции не позволяет подключить её к

измерительному стенду, методика определения рабочих точек отличалась от стандартной.

Рабочие точки определены следующим образом:

- измерено статическое давление в напорной магистрали при полностью закрытой задвижке 6 (см. рис. 3.1) и получена точка ($Q_M = 0$; $p_{SM} = 110$ гПа);

- измерена скорость воздуха во входном трубопроводе при полностью открытой задвижке и получена точка ($Q_M = 74$ м³/ч; $p_{SM} = 0$);

- измерены значения скорости воздуха во входном трубопроводе для ряда значений статического давления в подъёмном трубопроводе в период подъёма соответственно загруженного скипа и получены точки ($Q_M = 50,4$ м³/ч; $p_{SM} = 27$ гПа); ($Q_M = 44,1$ м³/ч; $p_{SM} = 41$ гПа); ($Q_M = 37,5$ м³/ч; $p_{SM} = 45$ гПа);

- по полученным пяти точкам построена плавная кривая, обозначенная позицией 1 на рис. 3.10 (рабочие точки не показаны) и представляющая собой статическую аэродинамическую характеристику нагнетательной станции.

Материальная часть, реализующая схему по рис. 3.2, и статическая аэродинамическая характеристика по рис. 3.10 составляют физическую модель ППУ в масштабе 1:10.

3.2.3. Утечка воздуха через бесконтактное уплотнение

Влияние перепада давления Δp на входе и выходе лабиринта на плотность воздуха ρ малó, поэтому скорость v_y среды в зазоре δ_0 правомерно определить по формуле для текучей среды с постоянной плотностью:

$$v_y = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho\zeta}}, \quad (3.23)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления потоку, оказываемого уплотнением.

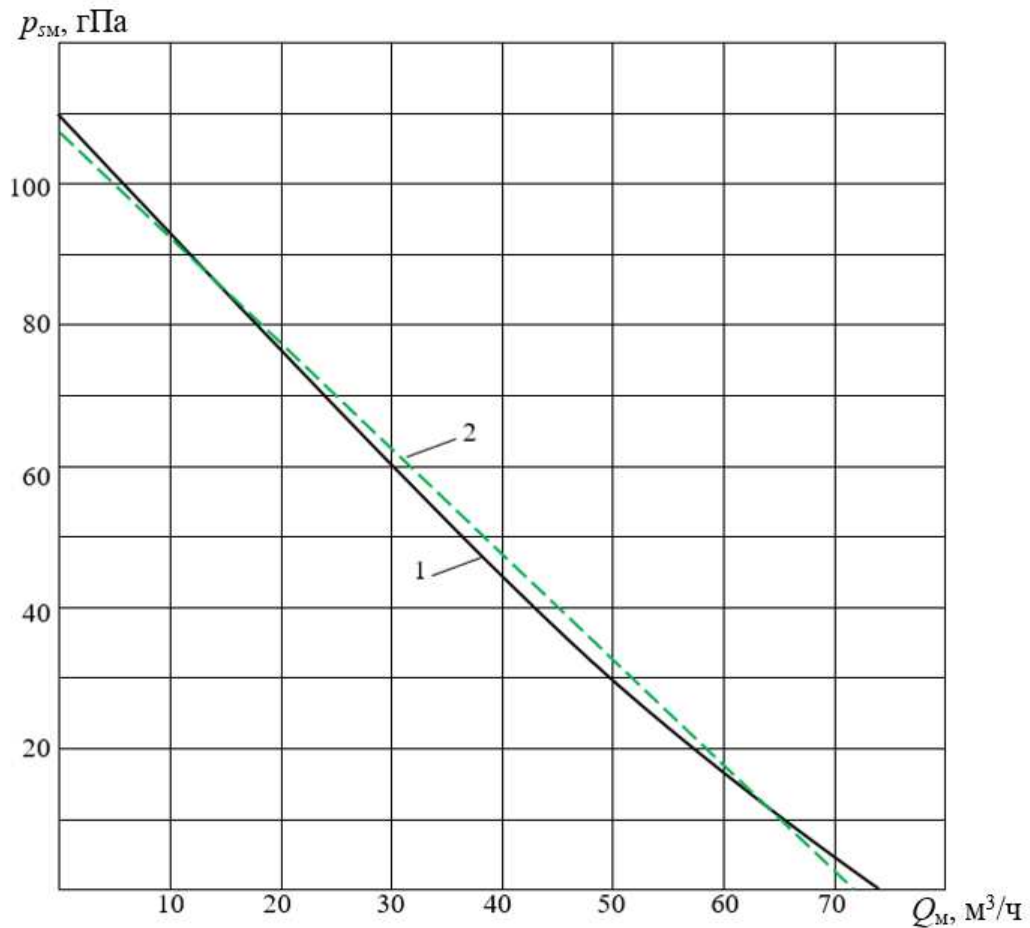


Рис. 3.10. Аэродинамические характеристики модели:
1 – фактическая; 2 – аппроксимация

Утечка воздуха через уплотнение определяется по формуле (3.17), записанной в виде

$$\Delta Q = F_0 v_y = F_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \zeta}}. \quad (3.24)$$

С учетом того, что перепад давлений обусловлен в основном весом скипа и равен p_{SM} , в результате подстановки числовых значений и алгебраических преобразований получаем формулу

$$\Delta Q_M = 12,5 \sqrt{m_M}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (3.25)$$

График функции $\Delta Q_M = f(m_M)$ приведён на рис. 3.11.

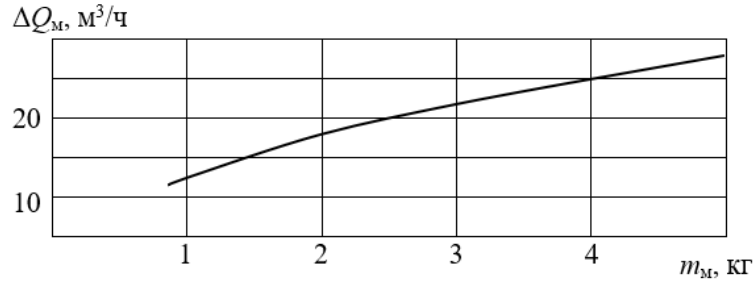


Рис. 3.11. Утечка через бесконтактное уплотнение

3.2.4. Математическое моделирование процесса разгона

В разделе 2 получены теоретические зависимости, которые позволяют рассчитать кинематические параметры периода разгона скипа и могут быть использованы в математическом моделировании. Особо рассмотрен случай, когда аэродинамическая характеристика воздуходувки близка к линейной.

На рис. 3.10, кроме статической характеристики 1, приведен график аппроксимирующей функции (прямая 2).

Аппроксимирующая зависимость статического давления p_s на выходе воздуходувки от производительности Q_M (рис. 3.10)

$$p_{sm} = A Q_M + B \quad (3.26)$$

получена методом наименьших квадратов [43], в соответствии с которым коэффициенты A и B следует определить по формулам

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n (p_{smi} Q_{Mi}) - \sum_{i=1}^n p_{smi} \sum_{i=1}^n Q_{Mi}}{n \sum_{i=1}^n Q_{Mi}^2 - \left(\sum_{i=1}^n Q_{Mi} \right)^2}; \quad (3.27)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n p_{smi} - A \sum_{i=1}^n Q_{Mi}}{n},$$

где p_{smi} , Q_{mi} – координаты i -ой точки на фактической характеристике;
 n – число точек, использованных для аппроксимации.

Выполнена аппроксимация по пяти точкам, их координаты приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

i	1	2	3	4	5
p_{smi} , гПа	0	27,5	55	82,5	110
Q_{mi} , м ³ /ч	74	50	33	17	0

Подстановка координат в формулы (3.26) и вычисления дают значения коэффициентов: $A = -1,51$ гПа/(м³/ч); $B = 108$ м³/ч. Таким образом, уравнение (3.26) принимает вид

$$p_{sm} = -1,51Q_m + 108, \text{ гПа.} \quad (3.28)$$

Для определения продолжительности периода разгона с помощью уравнения (3.28) найдём давление при $Q_m = 0$: $p_{sm0} = 108$ гПа = $1,08 \cdot 10^4$ Па и расход в трубе при $p_s = 0$

$$Q_{m0} = \frac{108}{1,51} \approx 72 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.29)$$

Скорость потока в трубе при расходе Q_{m0}

$$v_{m0} = \frac{4Q_{m0}}{\pi D_m^2} = \frac{4 \cdot 0,02}{3,14 \cdot 0,1056^2} = 2,28 \text{ м/с}, \quad (3.30)$$

где D_m – внутренний диаметр подъёмного трубопровода ($D_m = 0,1056$ м).

Тогда по формуле (2.111) время разгона скипа

$$t_p = \frac{12 \cdot 2,28}{3,14 \cdot 0,1056^2 \cdot 1,08 \cdot 10^4} m_M = 0,072 m_M, \text{ с,}$$

где m_M – масса гружёного скипа, кг.

Зависимость $t_p(m_M)$ проиллюстрирована графиком на рис. 3.12.

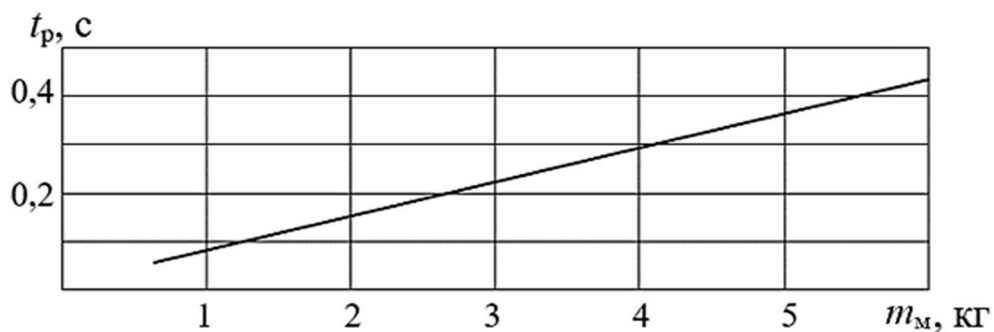


Рис. 3.12. Зависимость $t_p(m_M)$

В соответствии с формулами (2.100, 2.102, 2.112) за время t_p скип поднимется на высоту

$$y_p = 0,012 m_M (9,64 - m_M), \text{ м.} \quad (3.31)$$

График функции $y_p(m_M)$ показан на рис. 3.13.

Полученные выражения (2.111), (3.31) дают возможность уточнить величину скорости движения скипа по подъёмному трубопроводу с учетом переходного процесса.

Пусть время подъёма скипа массой m_M на высоту H_M равно $t_{п.}$. Тогда скорость установившегося движения скипа с поправкой на период разгона может быть найдена по формуле

$$v_M = \frac{H_M - y_p}{t_{п.} - t_p} = \frac{H_M - y_p}{t_{п.у}}, \quad (3.32)$$

где y_p, t_p – перемещение в период разгона и время разгона при данном m_M ;

$t_{п.у}$ – длительность период установившегося движения.

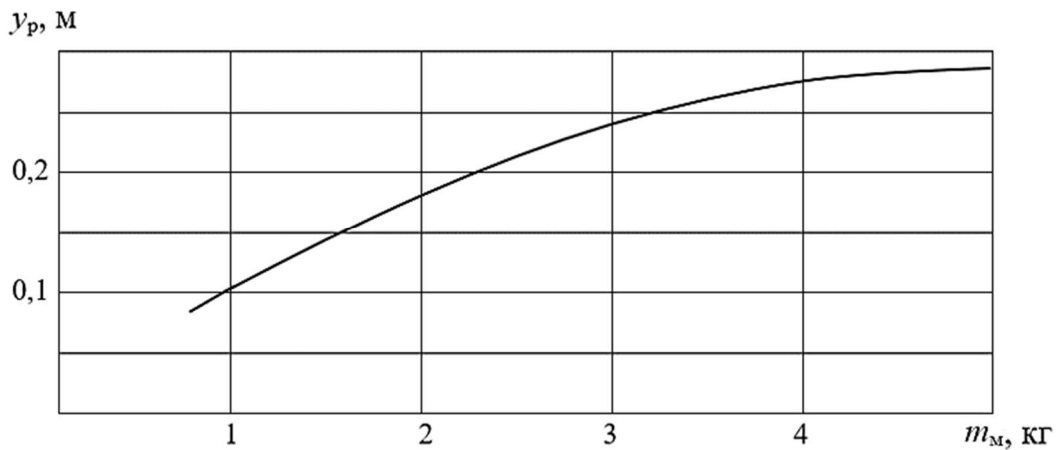


Рис. 3.13. График зависимости $y_p(m_M)$

3.3. Результаты испытаний физической модели

3.3.1. Определение фактического объёмного КПД и положения рабочих точек установки

В табл. 3.4 – 3.6 приведены результаты измерения $t_{п.}$, математическое ожидание $\bar{t}_{п.}$ и среднее квадратическое отклонение (СКО) в зависимости от варианта и массы скипа. СКО определено по рекомендации [13]. Далее, в соответствии с алгоритмом (подп. 3.1.2.2), для каждого варианта и массы скипа найдены параметры $p_{зм}, t_p, y_p, Q_M, t_{п.у}, v_M, Q_{п}$ и $\eta_{об.м.}^{(\phi)}$. Значения параметров сведены в табл. 3.7 – 3.9.

Таблица 3.4

Результаты измерения $t_{п}$, с, скипа-А (уплотнение лабиринтное)

i	Масса скипа m_M , кг				
	1,00	1,67	2,03	3,00	3,70
1	2,17	2,78	2,93	4,31	6,15
2	2,26	2,71	3,05	4,32	6,28
3	2,31	2,90	3,03	4,18	6,10
4	2,16	2,85	2,82	4,15	6,30
5	2,26	2,92	2,80	4,24	6,19
$\bar{t}_{п}$	2,23	2,83	2,93	4,24	6,20
СКО	$\pm 0,06$	$\pm 0,09$	$\pm 0,10$	$\pm 0,08$	$\pm 0,05$

Таблица 3.5

Результаты измерения $t_{п}$, с, скипа-А (уплотнение комбинированное)

i	Масса скипа m_M , кг				
	1,00	1,67	2,03	3,00	3,70
1	2,12	2,39	2,72	3,47	3,95
2	2,23	2,48	2,61	3,50	4,00
3	2,20	2,53	2,63	3,51	4,09
4	2,12	2,42	2,75	3,53	3,98
5	2,09	2,55	2,74	3,48	4,07
$\bar{t}_{п}$	2,15	2,47	2,69	3,50	4,02
СКО	$\pm 0,06$	$\pm 0,05$	$\pm 0,06$	$\pm 0,04$	$\pm 0,06$

Таблица 3.6

Результаты измерения $t_{п}$, с, скипа-Б (уплотнение пружинными кольцами)

i	Масса скипа m_M , кг				
	1,0	1,67	2,03	3,0	3,7
1	2,24	2,48	2,76	3,58	4,26
2	2,26	2,45	2,69	3,50	4,34
3	2,13	2,50	2,69	3,62	4,36
4	2,15	2,59	2,75	3,48	4,22
5	2,14	2,55	2,78	3,57	4,22
$\bar{t}_{п}$	2,18	2,51	2,73	3,55	4,28
СКО	$\pm 0,06$	$\pm 0,06$	$\pm 0,04$	$\pm 0,06$	$\pm 0,07$

Таблица 3.7

Определение объёмного КПД скипа-А (уплотнение лабиринтное)

Параметр	Масса скипа m_M , кг				
	1,00	1,67	2,03	3,00	3,70
p_{SM} , гПа	11,5	19,3	23,4	34,6	42,7
t_p , с	0,07	0,12	0,15	0,22	0,27
y_p , м	0,104	0,154	0,185	0,239	0,264
H_y , м	3,896	3,846	3,817	3,761	3,736
$t_{п. у.}$, с	2,16	2,71	2,78	4,02	5,93
v_M , м ³ /с	1,80	1,42	1,37	0,94	0,63
$Q_{п.}$, м ³ /ч	55,2	43,5	41,9	28,8	19,3
Q_M , м ³ /ч	64,2	59,9	56,2	48,6	43,2
$\eta_{об. M}^{(\phi)}$	0,86	0,73	0,75	0,59	0,45
$\eta_{об. M}$	0,81	0,73	0,68	0,55	0,44
$\delta\eta$	0,06	0	0,09	0,07	0,02
$\overline{\delta\eta}$	0,05				
СКО	$\pm 0,03$				

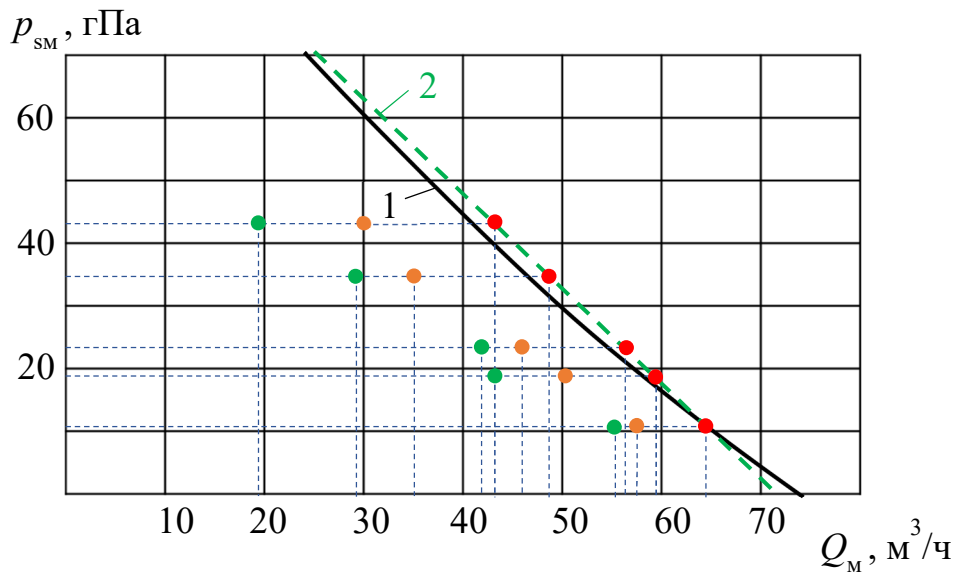
Таблица 3.8

Определение объёмного КПД скипа-А (уплотнение комбинированное)

Параметр	Масса скипа m_M , кг				
	1,00	1,67	2,03	3,00	3,70
p_{SM} , гПа	11,5	19,3	23,4	34,6	42,7
t_p , с	0,07	0,12	0,15	0,22	0,27
y_p , м	0,104	0,154	0,185	0,239	0,264
H_y , м	3,896	3,846	3,817	3,761	3,736
$t_{п. у.}$, с	2,08	2,35	2,54	3,28	3,75
v_M , м ³ /с	1,87	1,64	1,50	1,15	1,00
$Q_{п.}$, м ³ /ч	57,2	50,1	45,8	35,1	30,5
Q_M , м ³ /ч	64,2	59,9	56,2	48,6	43,2
$\eta_{об. M}^{(\phi)}$	0,89	0,83	0,81	0,72	0,71
$\zeta_{КОМБ}$	35,0	30,1	32,3	28,4	36,0
$\overline{\zeta_{КОМБ}}$	32,4				
СКО	$\pm 3,2$				

Определение объёмного КПД скипа-Б (уплотнение пружинными кольцами)

Параметр	Масса скипа m_M , кг				
	1,00	1,67	2,03	3,00	3,70
p_{SM} , гПа	11,5	19,3	23,4	34,6	42,7
t_p , с	0,07	0,12	0,15	0,22	0,27
u_p , м	0,104	0,154	0,185	0,239	0,264
H_y , м	3,896	3,846	3,817	3,761	3,736
$t_{п. y}$, с	2,11	2,39	2,58	3,33	4,01
v_M , м ³ /с	1,85	1,61	1,48	1,13	0,93
$Q_{п}$, м ³ /ч	56,5	49,2	45,3	34,6	28,5
Q_M , м ³ /ч	64,2	59,9	56,2	48,6	43,2
$\eta_{об.м}^{(ф)}$	0,88	0,82	0,81	0,71	0,66
$\zeta_{КОИТ}$	29,0	25,2	29,4	26,4	29,5
$\bar{\zeta}_{КОИТ}$	27,9				
СКО	± 2,0				



- – рабочая точка при подъеме с лабиринтным уплотнением;
- – рабочая точка при подъеме с комбинированным уплотнением;
- – теоретическая рабочая точка

Рис. 3.14. Рабочие точки установки (скип-А):

1 – характеристика установки; 2 – аппроксимация характеристики

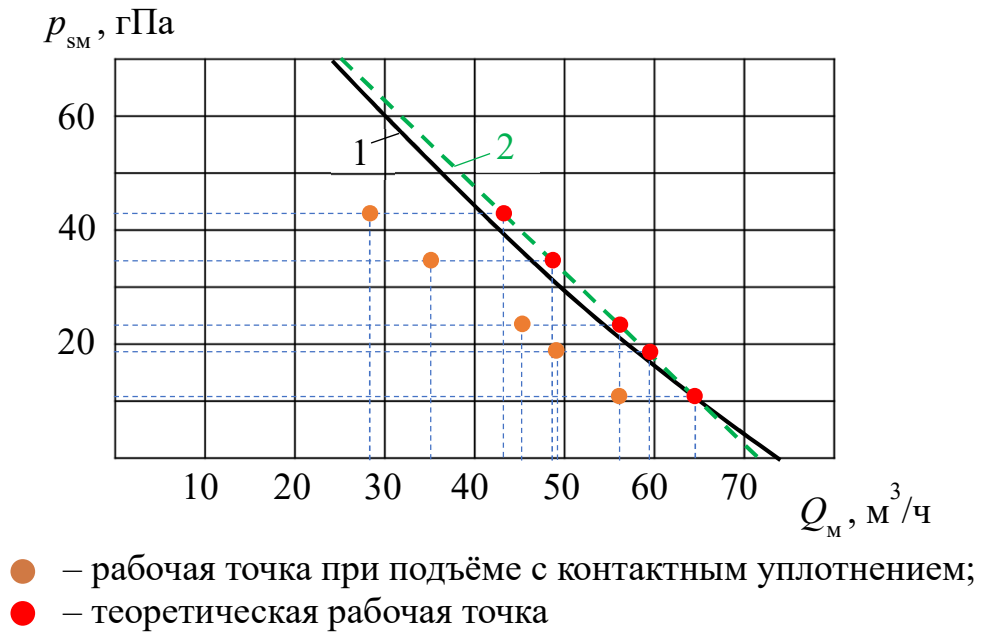


Рис. 3.15 Рабочие точки установки (скип-Б):
1 – характеристика установки; 2 – аппроксимация характеристики

В системе координат $Q_m - p_{sm}$ построены фактическая характеристика физической модели и её аппроксимация, а также точки с координатами $(Q_{pi}; p_{smi})$, которые называются рабочими точками (рис. 3.14, 3.15).

3.3.2. Оценка адекватности математической модели

Адекватность математической модели установки оценена сравнением фактического и расчётного значений объёмного КПД в испытаниях скипа-А с лабиринтным уплотнением. Расчётный объёмный КПД определён по выражению

$$\eta_{об.м} = 1 - \frac{\Delta Q_m}{Q_m}, \quad (3.33)$$

где ΔQ_m – см. формулу (3.25).

Величины $\eta_{об.м}$ внесены в табл. 3.7. Относительное отклонение $\delta\eta$ расчётного значения от фактического

$$\delta\eta_i = \frac{|\eta_{об. Mi} - \eta_{об. Mi}^{(\Phi)}|}{\eta_{об. Mi}^{(\Phi)}}, \quad (3.34)$$

составило диапазон $0 \leq \delta\eta \leq 0,09$, а его средняя арифметическая величина $\overline{\delta\eta}$ оказалась равной 0,05, или 5 %.

В четырёх сериях из пяти фактический объёмный КПД оказался выше расчётного, что означает бóльшую эффективность уплотнения по сравнению с теоретической.

Учитывая приближённый характер аэродинамических расчётов, следует считать математическую модель адекватной физической модели.

3.3.3. Эффективность бесконтактных уплотнений

Несмотря на неплотное прилегание пружинных колец к внутренней поверхности трубы, герметичность уплотнений, содержащих пружинные кольца, существенно выше, чем лабиринтного. Уменьшение утечек проявляется в повышении объёмного КПД (см. табл. 3.7 – 3.9) и приближении рабочих точек к теоретическим положениям (см. рис. 3.14, 3.15).

Оценить уплотняющую способность комбинированного и контактного уплотнений удобно с помощью условного коэффициента местного сопротивления:

$$\zeta_{комб} (\zeta_{конт}) = \frac{2p_{SM} F_0^2}{\rho(Q_M - Q_{II})^2}, \quad (3.35)$$

где $\zeta_{комб}$, $\zeta_{конт}$ – коэффициент местного сопротивления комбинированного и контактного уплотнения соответственно.

Значения параметров, входящих в формулу (3.35), содержатся в табл. 3.8, 3.9.

Из расчётов следует, что математические ожидания коэффициентов местного сопротивления $\bar{\zeta}_{\text{комб}} = 32,4$; $\bar{\zeta}_{\text{конт}} = 27,9$. Сопоставление коэффициентов местного сопротивления и объёмного КПД комбинированного и контактного уплотнений свидетельствует о слабом влиянии лабиринта на герметизирующую способность комбинированного уплотнения.

3.3.4. Возможность применения рассмотренных типов уплотнений в экспериментальном образце

Прогноз эффективности лабиринтного и комбинированного уплотнений в реальной ППУ выполнен путём расчёта ожидаемого объёмного КПД образца на основе констант подобия. Из формулы (3.13) следует, что

$$\eta_{\text{об.о}} = 1 - \frac{4,44 D_o \delta_{0o}}{Q_o} \sqrt{\frac{p_{so}}{\rho \zeta(\bar{\zeta}_{\text{конт}})}} = 1 - \frac{4,44 D_m \delta_{0m} k_L^2}{Q_o} \sqrt{\frac{p_{so}}{\rho \zeta(\bar{\zeta}_{\text{конт}})}}. \quad (3.36)$$

После подстановки в формулу (3.36) числовых значений физической модели, а также $k_L = 10$; $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$; $p_{so} = 10^4 \text{ Па}$, получены величины объёмного КПД, приведённые в табл. 3.10. Построены зависимости $\eta_{\text{об.о}}(Q_o)$ (рис. 3.16).

Таблица 3.10

Расчётные значения $\eta_{\text{об.о}}(p_{so} = 10 \text{ кПа})$

Вид уплотнения	Производительность Q_o , м ³ /с			
	5	10	15	20
Лабиринтное	0,79	0,90	0,93	0,95
Контактное	0,87	0,94	0,96	0,97

В том случае, если введено условие $\eta_{об.о} \geq [\eta_{об}] = 0,95$, контактное уплотнение обеспечит его выполнение для $Q_o \geq 11,5 \text{ м}^3/\text{с}$, а лабиринт – для $Q_o \geq 20 \text{ м}^3/\text{с}$.

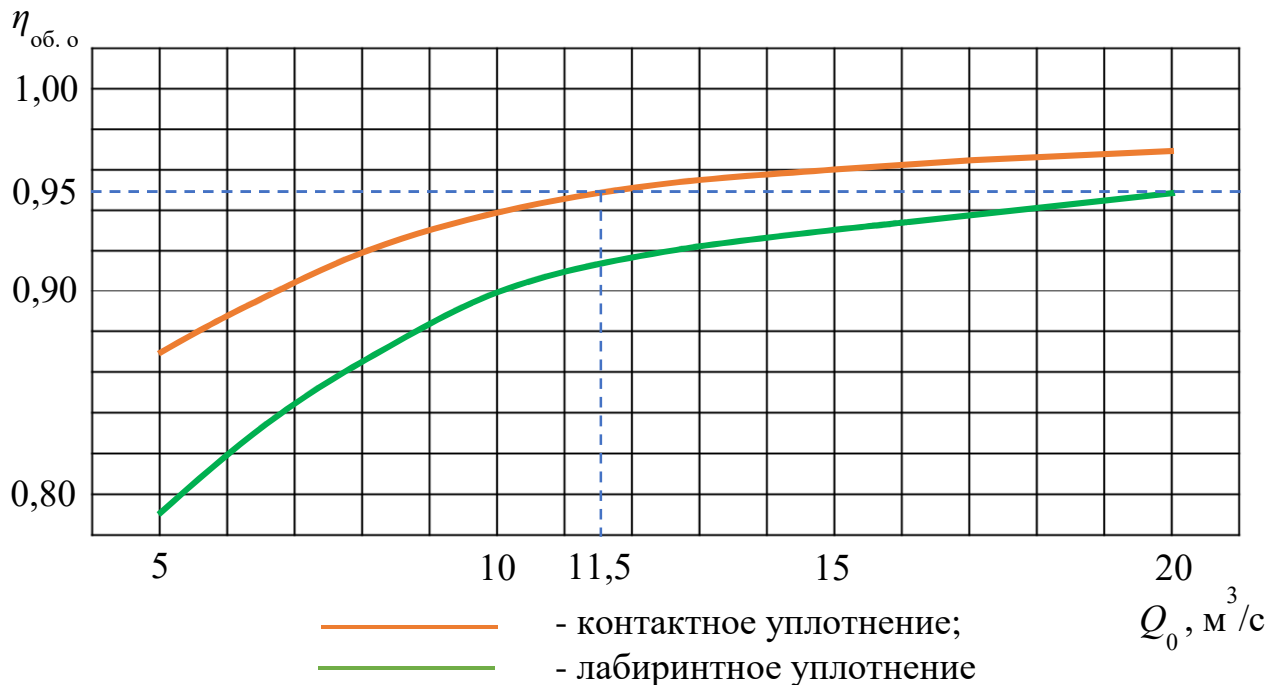


Рис. 3.16. Зависимость объёмного КПД образца от расхода воздуха

3.4 Реализация результатов исследования

Результаты диссертационной работы были переданы в ОАО «Уральская горно-металлургическая компания». Заключение специалистов компании от 26.05.2021 г. представлено в приложении 1. В нём указано, что схемы и математическая модель ППУ представляют практический интерес. После проектно-конструкторской проработки ППУ может быть рассмотрена как вариант подъёмной установки нового рудника.

В оценке результатов отделом контроля рудничной атмосферы указано, что, кроме выполнения своей основной функции, ППУ позволит:

- предотвратить выделение пыли в воздушный поток в стволе вследствие изолированности скипа от внешней атмосферы;

- интенсифицировать местное проветривание на горизонте размещения нагнетательной станции;
- повысить общий расход воздуха, участвующий в проветривании рудника, за счёт тепловой тяги.

Тезис о влиянии ППУ на расход воздуха в руднике нуждается в пояснении.

Функционирование оптимальной ППУ (с синхронным прибытием гружёного и порожнего скипов на разгрузочную и загрузочную станции) связано с повышенной температурой воздуха в подъёмном трубопроводе. Вследствие теплопередачи через стенку трубопровода повышается температура воздуха в стволе, что приводит к возникновению температурной депрессии. Перепад между давлением на нижнем горизонте и в устье ствола понижается, что способствует движению воздуха от нижнего горизонта к устью. Таким образом, размещение ППУ в стволе с исходящим потоком равноценно появлению дополнительного источника тяги в системе вентиляции рудника.

3.5. Выводы

На основе критериев геометрического и аэродинамического подобия изготовлена физическая модель ППУ, включающая нагнетательную станцию, трубопровод, скип с комбинированным уплотнением, состоящим из лабиринта и разрезных пружинных колец, и скип с контактным уплотнением в виде пружинных колец. Лабиринт имеет расчётный коэффициент местного сопротивления $\zeta = 11$, которое соответствует теоретическому значению, полученному из условия $[\eta_{об}] = 0,95$ при $p_s = 10$ кПа; $Q = 20$ м³/с.

Построены действительная статическая аэродинамическая характеристика нагнетательной станции модели и её аппроксимация в виде графика линейной зависимости. Аналитически рассмотрен период разгона скипа и получены выражения, позволяющие определить начало установившегося движения в функции массы скипа. Составлен алгоритм эксперимента, который

предусматривает установление зависимости объёмного КПД модели от массы скипа и вида уплотнения.

Проведены эксперименты со скипами варьируемой массы с использованием следующих видов уплотнения:

- лабиринтным (бесконтактным);
- комбинированным (лабиринтным и пружинными кольцами);
- пружинными кольцами (контактным).

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 $\eta_{об. м} = 0,81$, что в пересчёте на параметры экспериментального образца соответствует $p_s = 10$ кПа; $\eta_{об. о} = 0,95$;
- объёмный КПД модели с контактными уплотнениями при давлении $p_s = 1$ кПа составляет $\eta_{об. м} = 0,88$, что в пересчёте на параметры экспериментального образца соответствует $p_s = 10$ кПа; $\eta_{об. о} = 0,97$;
- объёмный КПД модели с комбинированным уплотнением при давлении $p_s = 1$ кПа составляет $\eta_{об. м} = 0,89$, что в пересчёте на параметры экспериментального образца соответствует $p_s = 10$ кПа; $\eta_{об. о} = 0,98$;
- расчётный объёмный КПД экспериментального образца в интервале расходов $Q = 5...20$ м³/с находится в диапазоне: для скипа с бесконтактным уплотнением $\eta_{об. о} = 0,79...0,95$; для скипа с контактными уплотнениями $\eta_{об. о} = 0,87...0,97$.

Полученные с использованием методов подобия расчётные значения объёмного КПД экспериментального образца подтвердили целесообразность использования в конструкции ППУ нормально бесконтактных уплотнений, описанных в п. 2.4.2.

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 воздуходувки;

- 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 проектировочных расчётов.

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

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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 V. M., Leontiev A. 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 пневмоподъемной 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 10921-2017. Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний. – М.: Стандартиформ, 2018.
2. Методические рекомендации по применению и проектированию трубопроводного контейнерного пневмотранспорта на угольных предприятиях. – М.: Центрогипрошахт, 1973. — 57 с.
3. Строительные нормы и правила: СНиП 2.05.07 – 91 Промышленный транспорт / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2007 – 111 с.
4. Укрупненные нормативы цены строительства. НЦС-2017. Сборник 10. Объекты метрополитена : НЦС 81-02-10-2017 : [утверждены: приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 01.06.2017 г. № 838/пр : издание официальное]. - Москва : Стройинформиздат, 2017. - [3], 41 с. : табл.; 29 см.; ISBN 978-5-91418-134-2.
5. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика. Т.1: Учеб. рук-во для вузов. / Г. Н. Абрамович. – М.: Наука, 1991. – 600 с.
6. Александров, В. Ю. Математическая модель расчёта процесса нестационарного прогрева стенок теплообменного аппарата / В. Ю. Александров, А. П. Королёва, Н. В. Кукшинов [и др.]. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 4-14.
7. Байгалиев, Б. Е. Теплообменные аппараты: Учеб. пособие / Б. Е. Байгалиев, А. В. Щелчков, А. Б. Яковлев [и др.]. – Казань; Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2021. – 180 с.
8. Березин, С. Е. Управление воздуходувками – действенная мера энергосбережения в инфраструктуре водоотведения. Водоснабжение и санитарная техника / С. Е. Березин. – 2012. – №3. – С. 55-58.
9. Брусиловский, И. В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. / И. В. Брусиловский. – М.: Недра, 1978. – 198 с.

10. Герман, А.П. Горная механика. Ч. 1. Шахтный подъем. / А. П. Герман. – Л.; М.: ОНТИ, 1935. – 320 с.
11. Герман, А. П. Рудничные подъемные установки / А. П. Герман [и др.]. – М.: Углетехиздат, 1947. – 350 с.
12. Герман, А. П. Шахтный подъем / А. П. Герман. – Ленинград: Кубуч, 1931. – 373 с.
13. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
14. Давыдов, С.Я. Условия и эффективность применения контейнерного пневмотранспорта. / С. Я. Давыдов, И. Д. Кашеев, О. М. Исаков. // Новые огнеупоры. – 2008. – № 6. – С. 29-34.
15. Двинин, Л. А. Критерии подобия динамических режимов шахтного подъема / Л. А. Двинин, Л. Б. Двинина, С. А. Ляпцев. // Нетрадиционные технологии и оборудование для разработки сложно-структурных месторождений полезных ископаемых: материалы Международной научно-технической конференции – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. – С. 83-87.
16. Двинин, Л. А. Математическое моделирование устройства для контроля натяжения подъемного каната / Л. А. Двинин, С. А. Ляпцев. // Математическое моделирование механических явлений: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. – С. 75-77.
17. Двинин, Л. А. Повышение эффективности работы рудничных подъемных установок: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.05.06 / Л. А. Двинин. – Екатеринбург, 2013. – 140 с.
18. Двинин, Л. А. Показатели динамического режима шахтного подъема / Л. А. Двинин, Л. Б. Двинина, С. А. Ляпцев. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: материалы Международной

- научно-технической конференции. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. – С. 249-252.
19. Двинин, Л. А. Теоретическое определение импульсов усилий шахтных подъемных установок / Л. А. Двинин, Л. Б. Двинина, С. А. Ляпцев. // Изв. вузов. Горный журнал. – 2006. – № 6. – С. 139-146.
20. Двинина, Л. Б. Обоснование динамических режимов при проектировании шахтных подъемных установок / Л. Б. Двинина. // дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург: УГГУ, 2008. – С. 70-96.
21. Двинина, Л. Б. Определение критериев подобия в динамическом уравнении шахтного подъема / Л. Б. Двинина, С. А. Ляпцев. // Математическое моделирование механических явлений: материалы Всероссийской научно-технической конференции – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – С. 14-16.
22. Двинина, Л. Б. Применение методов статистической динамики при оценке расчетных характеристик нагружения деталей шахтных подъемных машин / Л. Б. Двинина. // Математическое моделирование механических явлений: материалы Всероссийской научно-технической конференции — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2004. – С. 16-18.
23. Дмитриев, В. Т. Обоснование скорости движения сосуда шахтной подъемной установки. / В. Т. Дмитриев, Ю. В. Попов, Д. С. Дмитриев. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 3. – С. 108-110.
24. Дроздова, Л. Г. Стационарные машины: Учеб. пособие. / Л. Г. Дроздова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 157 с.
25. Еланчик, Г. М. Выбор оптимальных параметров проектируемых шахтных подъемных установок с двигателями постоянного тока / Г. М. Еланчик. – М.: МГИ, 1971. – 91 с.
26. Еланчик, Г. М. Кинематика шахтного подъема / Г. М. Еланчик. – М.: МГИ, 1968. – 122 с.

27. Еланчик, Г. М. Рудничные подъемные установки / Г. М. Еланчик. – М.; Л.: Гостехиздат, 1941. – 648 с.
28. Еланчик, Г. М. Уравновешенные системы рудничного подъема / Г. М. Еланчик. – М.: Углетехиздат, 1953. – 566 с.
29. Еланчик, Г. М. Шахтные подъемные установки / Г. М. Еланчик. – М.: МГИ, 1968. – 95 с.
30. Жаутиков, Б. А. О необходимости внедрения нового вида транспорта на шахтах и карьерах Казахстана / Б. А. Жаутиков, Ю. А. Николаев. // Индустрия Казахстана. – 2006. – №6. – С. 19-22.
31. Зверев, В. Ю. Анализ динамических нагрузок, действующих на канаты шахтных подъемных установок / В. Ю. Зверев, Г. Д. Трифанов, М. А. Стрелков. // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2015. – Т. 1. – С. 26-32.
32. Зверев, В. Ю. Математическая модель взаимодействия подъемного сосуда с проводниками. / В. Ю. Зверев. // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 464-467.
33. Зверев, В. Ю. Обоснование параметров тахограммы скиповых подъемных установок, обеспечивающих снижение динамических нагрузок в головных канатах: дисс. ... канд. технических наук: 05.05.06 / В. Ю. Зверев. – Пермь, 2018. – 152 с.
34. Иванов, И. Е. Методы подоби́я физических процессов: Учеб. пособие / И. Е. Иванов, В. Е. Ерещенко. – М.: МАФИ, 2015. – 144 с.
35. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. / И. Е. Идельчик. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 466 с.
36. Ильин, С. Р. Комплексные экспериментальные исследования динамики скипов рудоподъемного ствола. / С. Р. Ильин, Г. Д. Трифанов, С. В. Воробель. // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 5. – С. 30-35.

37. Ильичев, А. С. Рудничные пневматические установки: Утв. ГУУЗ НКТП СССР в качестве учебника для горных вузов / А. С. Ильичев. – М., Л.: ОНТИ, 1935. – 1 т.
38. Ильичев, А. С. Рудничные подъемные машины / А. С. Ильичев. – М.: Углетехиздат, 1933. – 267 с.
39. Использование трубопроводной пневмотранспортной системы для перевозки грузов и пассажиров на горных предприятиях. / С. Я. Давыдов, Н. П. Косарев, Н. Г. Валиев, А. В. Дружинин, В. С. Шварев, М. С. Филатов, А. С. Юсупова, Ю. А. Яшин, В. А. Курочкин. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 103-113.
40. Коваль, П. В. Гидравлика и гидропривод горных машин: учебник для вузов по специальности «Горные машины и комплексы». / П. В. Коваль. – М.: Машиностроение, 1979. – 319 с.
41. Кубарев, С. М. Механическое оборудование наклонных скиповых подъемников: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / С. М. Кубарев. – Свердловск: СГИ, 1970. – 19 с.
42. Кускильдин, Р. Б. Использование установок непрерывного транспорта в качестве шахтного подъема / Р. Б. Кускильдин, А. Д. Кольга. // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2013. – №4. – С. 196-203.
43. Линник, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений – 2-е изд. / Ю. В. Линник – М., 1962. – 349 с.
44. Литвинский, Г. Г. Перспективные научные направления развития горной техники и технологии. / Г. Г. Литвинский. // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – 2009. – Вип.10(151). – С. 3-12.
45. Ломакина О. В. Теоретическая механика. Общее уравнение динамики. Уравнения Лагранжа: Метод. указания / О. В. Ломакина, В. И. Галаев. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 24 с. – 100 экз.

46. Михеев, Н. А. Основы термопередачи. Изд. 2-е, стереотип. / Н. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
47. Николаев, Г. П. Техническая термодинамика. / Г. П. Николаев, А. Э. Лойко. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2013. – 213 с.
48. Николаев, Ю. А. Вклад академика Национальной академии наук Республики Казахстан А. С. Сагинова в создание нового вида транспорта для шахт и карьеров / Ю. А. Николаев, А. Д. Мехтиев. // Известия вузов. Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 135-141.
49. Николаев, Ю. А. Влияние теплообмена на работу пневмоподъемной установки / Ю. А. Николаев. // Механизация трудоемких процессов в строительном-дорожном производстве: Сб. – Караганда: КарПТИ, 1982. – С. 59-61.
50. Николаев, Ю. А. Горнодобывающим отраслям - новый вид транспорта / Ю. А. Николаев. // Изв. вузов. Горный журнал. – 1999. – № 3-4. – С. 14-17.
51. Николаев, Ю. А. Имитационное моделирование динамических процессов при движении скипов шахтных и карьерных пневмоподъемных установок / Ю. А. Николаев [и др.]. // Наука и образование – ведущий фактор стратегии "Казахстан-2030": труды Международной научной конференции (27-28 июня 2006 г.). – Караганда, 2006. – Вып. 2. – С. 311-313.
52. Николаев, Ю. А. К вопросу выбора параметров уплотняющих устройств шахтных скипов пневмоподъемных установок / Ю. А. Николаев, Б. А. Жаутиков, А. А. Айкеева. // Инновационная роль науки в подготовке современных технических кадров: труды Международной научно-практической конференции, посвященной светлой памяти Героя Социалистического Труда, академика А.С. Сагинова и 55-летию Университета (18-19 декабря 2008 г.). – Караганда, 2008. – Вып. 2. – С. 359-362.

53. Николаев, Ю. А. Коэффициент полезного действия шахтных пневматических подъемных установок / Ю. А. Николаев. // Изв. вузов. Горный журнал. – 1982. – № 11. – С. 86-89.
54. Николаев, Ю. А. Методические основы расчета скипов шахтных и карьерных пневмоподъемных установок / Ю. А. Николаев, Б. А. Жаутиков. // Уголь. – 2006. – № 1. – С. 51-53.
55. Николаев, Ю. А. Новый вид транспорта для шахт и карьеров / Ю. А. Николаев, А. С. Сагинов, Ш. А. Болгожин. // Вестник АН КазССР. – 1978. – № 7. – С. 3-8.
56. Николаев, Ю. А. Определение экономической эффективности шахтных скиповых пневматических подъемных установок / Ю. А. Николаев, Я. Б. Гольдберг. // Экономика и управление угольной промышленностью: Реф. сб. ЦНИЭИ Уголь. – 1979. – № 3. – С. 7-12.
57. Николаев, Ю. А. Основы расчета карьерных пневматических подъемных установок / Ю. А. Николаев, А. С. Сагинов. // Механизация и автоматизация производственных процессов горнодобывающей промышленности: Сб. ст. – Караганда: КарПТИ, 1977. – Вып. VI. – С. 91-94.
58. Николаев, Ю. А. Перспектива применения различных видов транспортных средств на глубоких карьерах в XXI веке / Ю. А. Николаев, Н. Т. Жилкибаев, В. П. Старостин. // Горный журнал Казахстана. – 2012. – № 2. – С. 22-26.
59. Николаев, Ю. А. Пневматические подъемные установки для шахт и карьеров / Ю. А. Николаев, А. С. Сагинов, А. Г. Лазуткин. // Изв. вузов. Горный журнал. – 1978. – № 5. – С. 94-97.
60. Николаев, Ю. А. Регулирование движением подъемного сосуда шахтной пневматической подъемной установки / Ю. А. Николаев, Р. И. Рудая. // Совершенствование управления в транспортных системах: Темат. сб. – Караганда: КарПТИ, 1981. – С. 6-11.

61. Николаев, Ю. А. Термодинамические зависимости параметров сжатого воздуха в подсосудной полости ствола скипового пневмоподъема / Ю. А. Николаев. // Изв. вузов. Горный журнал. – 1990. – № 5. – С. 92-96.
62. Николаев, Ю. А. Экспериментальная шахтная пневматическая подъемная установка / Ю. А. Николаев. // Горный журнал. – 1978. – № 2. – С. 49-51.
63. Николаев, Ю.А. Теория и методы расчета скиповых пневмоподъемных установок для шахт и карьеров: автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Ю. А. Николаев, А. С. Сагинов; Государственный комитет РСФСР по делам науки и высшей школы, Свердловский ордена трудового Красного Знамени горный ин-т им. В.В. Вахрушева. Всесоюзный научно-исследовательский ин-т горной механики им. М.М. Федорова. – Защищена 25.10.1991. – Свердловск, 1991. – 45 с.
64. Носырев, Б. А. Проектирование подъемных установок: Учеб. пособие / Б. А. Носырев; Урал. гос. горно-геол. акад. – Екатеринбург: УГГГА, 1994. – 129 с.
65. Носырев, Б. А. Скиповые карьерные наклонные подъемные установки: основы теории, методы расчета, конструктивная реализация: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.00.00 / Б. А. Носырев. – Свердловск, 1972. – 423 с
66. Попов, Ю. В. Исследование конструкций и разработка оптимальных параметров скипов мощных карьерных подъемников: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Ю. В. Попов. – Свердловск, 1980. – 169 с.
67. Попов, Ю. В. Исследования нагрузок на основные элементы многоканатных наземных подъемных установок / Ю. В. Попов. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2009. – № 6. – С. 73-76.
68. Попов, Ю. В. Наземное расположение многоканатных подъемных машин: особенности расчета и проектирования / Ю. В. Попов, В. В. Неволин. // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 10. – С. 48-50.

69. Попов, Ю. В. Новые возможности наклонных карьерных подъемников / Ю. В. Попов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S16. – С. 328-331.
70. Попов, Ю. В. Повышение эффективности комплексов многоканатных подъемов с наземным расположением подъемных машин: дисс ... д-ра тех. наук: 05.05.06: защищена 17.06.2010 / Ю. В. Попов. – Екатеринбург, 2010. – 205 с.
71. Портнов, В. В. Воздухоснабжение промышленного предприятия: Учеб. пособие / В. В. Портнов. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. – 228 с.
72. Рабинович, Е. З. Гидравлика: Учеб. пособие для нефт. спец. вузов / Е. З. Рабинович. – М.: Недра, 1980. – 278 с.
73. Сагинов, А. С. К проблеме создания нового вида транспорта для шахт и карьеров / А. С. Сагинов [и др.]. // Вестник АН КазССР. – 1979. – № 10. – С. 3-7.
74. Скип наклонного карьерного подъемника. Труды / С. М. Кубарев, Б. А. Носырев, И. В. Удачин, Ю. А. Чеснов, В. Б. Ухин. – Свердловск: СГИ, 1972. – № 97. – С. 29-34.
75. Таугер, В. М. Прогрессивные технологии производства композитных изделий. / В. М. Таугер, Ю. В. Холодников, Л. Альшиц. – Саарбрюккен (ФРГ): *LAMBERT Academic Publishing*, 2014. – 110 с.
76. Таугер, В. М. Скиповая пневмоподъемная установка повышенной энергоэффективности. / В. М. Таугер, Е. Б. Волков, Ю. В. Холодников. // Изв. вузов. Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 77-83.
77. Трифанов, Г. Д. Динамика каната рудничных подъемных установок при предохранительном торможении в загрузке скипов и повышение эффективности их работы: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Г. Д. Трифанов. – Пермь, 1984. – 150 с.

78. Трифанов, Г. Д. Повышение срока службы канатов и эффективности эксплуатации шахтных подъемных установок: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Г. Д. Трифанов; [Место защиты: ГОУВПО "Уральский государственный горный университет"]. – Екатеринбург, 2013. – 200 с.
79. Трифанов, Г. Д. Повышение эффективности эксплуатации шахтных подъемных установок, оборудованных системами мониторинга плавности движения скипов / Г. Д. Трифанов, А. Ю. Микрюков. – М.: Горная книга, 2016. – 13 с.
80. Трифанов, Г. Д. Экспериментальные исследования влияния режима работы шахтных подъемных установок на динамические нагрузки в канате. / Г. Д. Трифанов, В. Ю. Зверев, М. А. Стрелков. // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 6 (115). – С. 21-25.
81. Уманский, В. Б. Теоретические основы шахтной подъемной машины / В. Б. Уманский [и др.]. // Вопросы управления и защиты – Харьков; Днепропетровск: Гостехиздат, 1933. – Ч. 1. – 227 с.
82. Уманский, В. Б. Шахтные подъемные установки / В. Б. Уманский. // Сб. статей. – М.; Л.: Углетехиздат, 1949. – 210 с.
83. Уманский, В. Б. Электрические подъемные установки / В. Б. Уманский. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 370 с.
84. Федоров, М. М. Вредные сопротивления при рудничном подъеме / М. М. Федоров. – Киев: АН УССР, 1957. – Т. 1. – 275 с.
85. Федоров, М. М. Избранные труды / М. М. Федоров. – Киев: АН УССР, 1960. – Т. 2. – 463 с.
86. Федоров, М. М. Наивыгоднейший динамический режим в некоторых типах рудничных подъемных установок / М. М. Федоров. – Киев: АН УССР, 1957. – Т. 1. – 275 с.
87. Федоров, М. М. Подъемные установки для проходки стволов / М. М. Федоров, Е. М. Федоров. – М.: Недра, 1988. – 198 с.

88. Федоров, М. М. Теория и расчет гармонического подъема / М. М. Федоров. – Киев: АН УССР, 1957. – Т. 1. – 275 с.
89. Федоров, М. М. Шахтные подъемные установки / М. М. Федоров. – М.: Недра, 1979. – 309 с.
90. Шклярский, Ф. Н. Динамика рудничного подъема с постоянным радиусом навивки на основе трапецеидальной диаграммы скорости / Ф. Н. Шклярский. – М.: ЦК ВСТ, 1924. – 75 с.
91. Шклярский, Ф. Н. К вопросу о выборе скоростей и ускорений для рудничного подъема / Ф. Н. Шклярский. – М.: Моспечать, 1922. – 40 с.
92. Шклярский, Ф. Н. Физико-механические основы электрического рудничного подъема / Ф. Н. Шклярский. – М.: Углетехиздат, 1956. – 384 с.
93. Анемометр с крыльчаткой «testo 416». Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <https://kiptm.ru/images/Production/Testo/anemometers/testo-416-rukovodstvo.pdf> (дата обращения: 24.03.2021).
94. Анемометр цифровой МЕГЕОН 11003 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.megeon-pribor.ru/katalog/anemometry/megeon-11003> (дата обращения: 24.03.2021).
95. Башенные копры скиповых и клетевых стволов шахт [Электронный ресурс]. URL: <http://stroy-spravka.ru/article/bashennye-kopry-skipovykh-i-kletevykh-stvolov-shakht> (дата обращения: 20.09.2023).
96. Вихревая воздуходувка МТ 03-М1С [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vozduhoduvkin.ru/proekty/9-801.html> (дата обращения: 24.03.2021).
97. Воздуховодные станции – ООО «Цемент-Навал» [Электронный ресурс]. URL: http://zement-naval.ru/spravochnik_po_pnevmooborudovaniu/10-4-vozduhoduvnye-stancii/ (дата обращения: 28.06.2018).
98. Воздуходувка центробежная высокопроизводительная со встроенным редуктором SIEMENS KA-66S(V)GL400 [Электронный ресурс].

- URL: <https://promportal.su/goods/3653563/vozduhoduvka-centrobezhnaya-visokoproizvoditelnaya.htm> (дата обращения: 08.12.2017).
99. Газопроводная арматура [Электронный ресурс]. URL: <https://infoks.ru/produkty/tekhnicheskaya-uceba-material/31-gazoprovodnaya-armatura> (дата обращения: 26.05.2019).
100. Дифференциальные уравнения неустановившегося течения [Электронный ресурс]. URL: <https://cwetochki.ru/ref-statia-differentsialnye-uravneniia-neustanovivshegosia-dvizheniia-vozdukha-po-rudnichnym-vozdukhovodam.html?page=4&per-page=30> (дата обращения: 16.04.2019).
101. Инфляция в России, калькулятор инфляции [Электронный ресурс]. URL: <https://calcus.ru/inflyaciya> (дата обращения: 24.09.2023).
102. Калькулятор расчета стоимости здания из металлоконструкций [Электронный ресурс]. URL: <https://injstroys.ru/kalkulyator-bystrovozvodimogo-zdaniya> (дата обращения: 26.09.2023).
103. Контактные уплотнения (сальники, манжеты, кольца) [Электронный ресурс]. URL: <https://inzhener-info.ru/razdely/konstruirovanie/uplotnenie-podviznykh-soedinenij/kontaktnye-uplotneniya-salniki-manzhety-koltsa.html> (дата обращения: 23.04.2020).
104. Краны шаровые для газопроводов [Электронный ресурс]. URL: <https://armtorg.ru/articles/item/665/> (дата обращения: 13.08.2021).
105. Машина подъема ЦР-5х3/0,6 [Электронный ресурс]. URL: <https://rudf.ru/46-oborud/mashiny-pod-ema/260-mashina-pod-ema-tsr-5kh3-0-6> (дата обращения: 30.09.2019).
106. Скипы для угольных шахт [Электронный ресурс]. URL: <https://zavantag.com/docs/index-19254659-1.html?page=22> (дата обращения: 30.09.2019).
107. Сравнение стеклопластиковых труб с трубами из других материалов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.s-kompozit.ru/production/comparison/> (дата обращения: 16.04.2019).

108. Схема воздуходувной станции [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vodalos.ru/spravochniki-stroitelya/spravochnik-proektirovshika/7/3/1> (дата обращения: 12.09.2020).
109. Трубопроводный контейнерный пневмотранспорт [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/37305992-Truboprovodnyu-konteynernyu-pnevmotransport.html> (дата обращения: 24.02.2019).
110. Управляемое воздуходувное оборудование компании Siemens turbomachinery equipment [Электронный ресурс]. URL: <https://pump.ru/information/publications/196-2010/public2010-10/> (дата обращения: 12.10.2018).
111. Эксплуатация уплотнений насосов [Электронный ресурс]. URL: https://vuzlit.ru/748964/ekspluatatsiya_uplotneniy_nasosov (дата обращения: 23.04.2020).
112. User manual | STC-GO (66x-GL400) Technical Data Sheet [Электронный ресурс]. URL: <https://manualzz.com/doc/11885063/stc-go--66x-gl400--technical-data-sheet> (дата обращения: 28.06.2018).

ПРИЛОЖЕНИЕ А*(справочное)***РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ СКИПОВОЙ ПНЕВМОПОДЪЁМНОЙ УСТАНОВКИ****1 Исходные данные**

Схема скиповой пневмоподъёмной установки (ППУ) – двухтрубная четырёхскиповая разомкнутая.

Характеристики рудника:

- производительность $Q_p = 1\,100\,000$ т/год;
- глубина $H = 500$ м;
- число рабочих дней в году $n_p = 300$;
- число смен в сутки $n_{см} = 3$;
- число часов работы в сутки $n_ч = 18$ ч;
- ископаемое – руда с насыпной плотностью $\rho_m = 2$ т/м³.

2 Режим работы ППУ. Грузоподъёмность скипа

Часовая производительность

$$Q_ч = \frac{Q_p}{n_p n_ч} = \frac{1100000}{300 \cdot 18} = 203,7 \text{ т/ч.} \quad (\text{А.1})$$

Предварительно принятая средняя скорость гружёного скипа $\bar{v} = 16$ м/с.

Время цикла (в четырёхскиповой схеме равно времени подъёма скипа)

$$t_{\text{ц}} = \frac{H}{\bar{v}} = \frac{500}{16} = 31,25 \text{ с.} \quad (\text{A.2})$$

Число подъёмов в час

$$n_{\text{под}} = \frac{3600}{t_{\text{ц}}} = \frac{3600}{31,25} \approx 115. \quad (\text{A.3})$$

Грузоподъёмность скипа номинальная (вес ископаемого в кузове)

$$G_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{ч}} g}{n_{\text{под}}} = \frac{203,7 \cdot 9,81}{115} = 17,4 \text{ кН}, \quad (\text{A.4})$$

где g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Грузоподъёмность скипа максимальная при коэффициенте резерва производительности $k_p = 1,4$

$$G_{\text{н.макс}} = G_{\text{н}} k_p = 17,4 \cdot 1,4 = 24,4 \text{ кН}. \quad (\text{A.5})$$

3 Размеры и масса кузова скипа. Вес гружёного скипа

Внутренний диаметр трубопровода принят $d = 1,0 \text{ м}$.

Кузов скипа (рис. А.1) представляет собой цилиндрическую ёмкость с наружным диаметром $D_{\text{к}} = 0,9 \text{ м}$ (диаметр трубопровода за вычетом высоты направляюще-уплотнительных элементов). Габаритный диаметр скипа D считается равным внутреннему диаметру трубопровода, т. е. $D = 1,0 \text{ м}$.

Толщина днища кузова $\delta_{\text{д}} = 0,06 \text{ м}$.

Часть объёма ископаемого в форме цилиндра:

$$V_{\text{ц}} = \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{4} h, \quad (\text{A.6})$$

где d_k – внутренний диаметр кузова ($d_k = 0,84$ м);

h – высота цилиндрического объёма, м;

часть объёма ископаемого в форме конуса:

$$V_k = \frac{\pi d_k^3}{24} \operatorname{tg} \alpha_m = \frac{3,14 \cdot 0,84^2}{24} \cdot \operatorname{tg} 45^\circ = 0,092 \text{ м}^3, \quad (\text{A.7})$$

где α_m – угол естественного откоса материала ($\alpha_m = 45^\circ$ [3]).

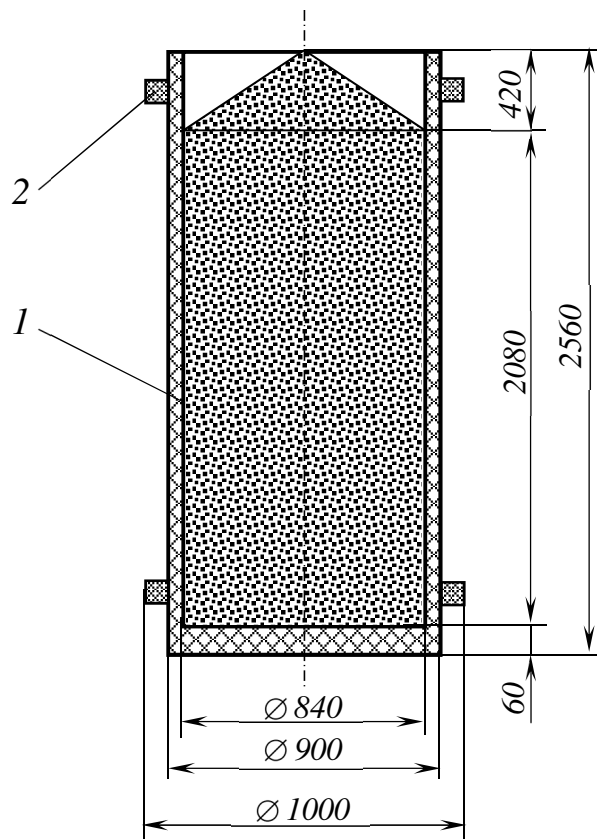


Рисунок А.1 – Размеры скипа:

1 – кузов; 2 – направляюще-уплотнительное устройство

Ёмкость скипа

$$V = \frac{G_{и.маx}}{\rho_m g} = V_{ц} + V_k, \quad (\text{A.8})$$

откуда

$$\frac{G_{и.маx}}{\rho_м g} = \frac{\pi \cdot 0,84^2}{4} h + 0,092; \quad (A.9)$$

$$h = \frac{4}{\pi \cdot 0,84^2} \left(\frac{G_{и.маx}}{\rho_м g} - 0,092 \right) = \frac{4}{3,14 \cdot 0,84^2} \left(\frac{24,4}{2 \cdot 9,81} - 0,092 \right) = 2,08 \text{ м.}$$

Габаритный размер кузова (он же габаритный размер скипа) $L = 2,56$ м.

Масса скипа (без направляюще-уплотнительных устройств)

$$m_c = \rho_k \frac{\pi}{4} [(D_k^2 - d_k^2)L + d_k^2 \delta_d] = \quad (A.10)$$

$$= 1,8 \cdot \frac{3,14}{4} \cdot [(0,9^2 - 0,84^2) \cdot 2,56 + 0,84^2 \cdot 0,06] = 0,44 \text{ т,}$$

где ρ_k – плотность композита, из которого изготовлен кузов ($\rho_k = 1,8 \text{ т/м}^3$ [75]).

Вес гружёного скипа:

номинальный –

$$G_c = G_{и} + m_c g = 17,4 + 0,44 \cdot 9,81 = 21,7 \text{ кН}; \quad (A.11)$$

максимальный –

$$G_{с.маx} = G_{и.маx} + m_c g = 24,4 + 0,44 \cdot 9,81 = 28,7 \text{ кН.} \quad (A.12)$$

4 Подбор воздуходувки

Средний объёмный расход воздуха гружёным под скипом

$$\bar{Q} = \bar{v} \frac{\pi D_k^2}{4} = 16 \cdot \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 12,56 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (A.13)$$

Номинальное и максимальное избыточное статическое давление, развиваемое воздуходувкой (без учёта сопротивления):

$$\begin{aligned}\Delta p &= \frac{4G_c}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 21,7}{3,14 \cdot 1^2} = 27,6 \text{ кПа}; \\ \Delta p_{\max} &= \frac{4G_{c.\max}}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 28,7}{3,14 \cdot 1^2} = 36,6 \text{ кПа}.\end{aligned}\tag{A.14}$$

Средний номинальный объёмный расход воздуха на входе воздуходувки (влияние повышения температуры не учитывается, так как схема разомкнутая и воздуходувка снабжена концевым воздухоохладителем):

$$\bar{Q}_v = \bar{Q} \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} = 12,56 \cdot \frac{107,3 + 27,6}{107,3} = 15,79 \text{ м}^3/\text{с} \approx 56,8 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч},\tag{A.15}$$

где p_0 – давление воздуха на глубине 500 м ($p_0 = 107,3$ кПа).

Принята центробежная воздуходувка *SIEMENS KA-66S(V)GL400*, диапазон производительности $(28...55) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$, диапазон избыточного давления 40...180 кПа [98, 110].

Относительное превышение расчётного значения расхода над максимальной производительностью $Q_{v.\max} = 55 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ составляет

$$\delta Q_v = \frac{\bar{Q}_v - Q_{v.\max}}{Q_{v.\max}} \cdot 100\% = \frac{(56,8 - 55) \cdot 10^3}{55 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 3,27\%.\tag{A.16}$$

С учётом недогрузки воздуходувки по давлению относительное превышение расчётного расхода над производительностью принято допустимым.

Результаты расчёта сведены в таблицу А.1.

Параметры скиповой пневмоподъёмной установки

Параметр	Значение
Число трубопроводов	2
Число скипов	4
Средняя скорость подъёма, м/с	16
Время цикла, с	31, 25
Диаметр трубопровода, м	1,0
Воздуходувка: тип марка диапазон производительности, м ³ /ч диапазон перепада давления, кПа масса, не более, т	центробежная <i>SIEMENS KA-66S(V)GL400</i> 28 000...55000 40...180 8
Мощность двигателя, кВт	2 000
Скип: грузоподъёмность номинальная, кН грузоподъёмность максимальная, кН габаритные размеры кузова, мм толщина стенки, мм масса, т	17,4 24,4 Ø 900 × 2 560 30 0,44
Избыточное статическое давление в подъёмном трубопроводе, кПа: номинальное максимальное	27,6 36,6

ПРИЛОЖЕНИЕ Б*(справочное)*

Заявка № 2017125669/11(044209)

МПК В66 В17/08

Скиповая пневмоподъёмная установка

Изобретение относится к подъёмным устройствам, а именно, к оборудованию подъёмного отделения ствола рудничными скиповыми подъёмниками.

Известна скиповая пневмоподъёмная установка (Николаев Ю.А. Горнодобывающим отраслям – новый вид транспорта. – Изв. вузов. Горный журнал, 1999, № 3-4. – С. 14 – 17), включающая два скипа, имеющих гладкую цилиндрическую часть, трассу, выполненную в виде подъёмного и спускного трубопроводов, внутри каждого трубопровода расположены направляюще-уплотнительные устройства с шагом, равным половине высоты цилиндрической части скипа, воздуходувку, загрузочную и разгрузочную станции. Подъём гружёного скипа осуществляется за счёт потока воздуха, подаваемого воздуходувкой в ствол, спуск порожнего скипа происходит под собственным весом с выпуском воздуха в нижней части ствола в атмосферу.

Недостатком указанной установки являются повышенные затраты энергии воздуходувкой из-за значительного аэродинамического сопротивления трассы, вызванного многочисленными направляюще-уплотнительными устройствами, а также из-за подъёма, кроме массы транспортируемого материала, собственной массы скипа.

Известна скиповая пневмоподъёмная установка (Таугер В.М., Волков Е.Б., Холодников Ю.В. Скиповая пневмоподъёмная установка повышенной эффективности. – Изв. вузов. Горный журнал, 2017, №2. – С. 77 – 83), включающая два скипа, имеющих гладкую цилиндрическую часть и снабженных направляюще-

уплотнительными устройствами, трассу, выполненную в виде подъёмного и спускного трубопроводов, воздуходувку, загрузочную и разгрузочную станции. Подъём гружёного скипа осуществляется за счёт потока воздуха, подаваемого воздуходувкой в ствол, спуск порожнего скипа происходит под собственным весом с выпуском воздуха под повышенным давлением на вход воздуходувки.

Недостатком указанной установки являются повышенные затраты энергии воздуходувкой из-за значительного аэродинамического сопротивления перемещению столба воздуха над скипом в подъёмном трубопроводе.

Целью изобретения является снижение затрат энергии воздуходувкой.

Указанная цель достигается тем, что в стенке трубы подъёмного трубопровода с расчётным шагом по её высоте выполнены нормально открытые люки.

Сущность изобретения заключается в том, что при подъеме скипа происходит выпуск воздуха через люки, находящиеся выше скипа, в атмосферу, что позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление перемещению столба воздуха над скипом и снизить таким образом затраты энергии воздуходувкой.

На фиг.1, 2, 5 показана схема подъёмного трубопровода предлагаемой скиповой пневмоподъёмной установки, на фиг.3 – крышка люка в открытом состоянии, на фиг.4 – поперечное сечение крышки люка в закрытом состоянии.

Подъёмный трубопровод содержит трубу 1 и воздуходувку 3 (фиг.1). В стенке трубы 1 с расчётным шагом, равным l , выполнены нормально открытые люки 4 с крышками 5 (фиг.5). Общее число люков равно n . По трубе 1 перемещается скип 2. Крышка 5 люка 4 (фиг.3) шарнирно закреплена на стенке трубы 1 и посредством тяги 7 и поворотного рычага 8 связана с выходным валом мотор-редуктора 6, также смонтированного на стенке трубы 1. Крышка 5 имеет внутреннюю цилиндрическую поверхность с радиусом кривизны, равным внутреннему радиусу трубы 1 (фиг.4). При закрытой крышке 5 её внутренняя поверхность является частью внутренней поверхности трубы 1 и не препятствует движению скипа.

Сигналы на включение и выключение мотор-редуктора поступают от системы управления установкой (на фиг.1, 2 не показана).

Предлагаемая установка работает следующим образом.

На фиг.1 показано начало подъёма скипа 2. Скип находится в нижнем положении, крышки 5 всех люков 4 повернуты в положение, соответствующее открытому люку.

Затем под скип 2 от воздуходувки 3 подаётся воздух под давлением, и начинается подъём скипа. При приближении скипа к первому люку 4 система управления установкой включает мотор-редуктор 6 на закрывание, поворотный рычаг 8 поворачивается против часовой стрелки, и посредством тяги 7 крышка 5 закрывает люк 4. Скип проходит мимо закрытого люка 4 (фиг.2), и на протяжении всего дальнейшего подъёма этот люк остаётся закрытым. Аналогичным образом последовательно закрываются (и остаются закрытыми) все люки, мимо которых проходит поднимающийся скип. К моменту прибытия скипа на верхнюю приёмную площадку (на фиг. 1, 2 не показана) все люки будут закрыты.

Скип 2 прибывает на верхнюю приёмную площадку, после чего система управления установкой включает мотор-редукторы 6 на открывание. Поворотные рычаги 8 поворачиваются по часовой стрелке, и посредством тяг 7 крышки 5 открывают люки 4.

Снижение затрат энергии воздуходувкой, которое достигается с помощью предлагаемого технического решения, можно оценить следующим образом.

Расход воздуха, подаваемый в трубу 1 воздуходувкой 3, равен Q_0 (фиг.1).

Скип 2 начинает движение, и над ним на отрезке трубы до первого люка 4 устанавливается расход, также равный Q_0 .

Через первый ($i = 1$) люк 4 часть расхода воздуха Q_0 , равная ΔQ_1 , выходит из трубы в атмосферу, и, таким образом, расход выше первого люка 4 становится равным

$$Q_1 = Q_0 - \Delta Q_1.$$

Расход воздуха Q_i выше i -ого люка равен

$$Q_i = Q_{i-1} - \Delta Q_i.$$

Расход Q_i позволяет получить среднюю скорость воздуха в сечении над i -ым люком:

$$v_i = \frac{4}{\pi d^2} (Q_{i-1} - \Delta Q_i),$$

где v_i – средняя скорость воздуха в сечении над i -ым люком;

d – внутренний диаметр трубы 1.

Плотность воздуха по высоте трубы 1 изменяется незначительно, поэтому для определения сопротивления Δp_i отрезка l между люками $i - 1$ и i в случае равномерного распределения люков 4 по длине трубы 1 справедлива формула Дарси (Бибенина Т.П. Гидромеханика. Конспект лекций. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – 224 с.)

$$\Delta p_i = \lambda_i \frac{l}{d} \rho \frac{v_i^2}{2} = \lambda_i \frac{8lp}{\pi^2 d^3} (Q_{i-1} - \Delta Q_i)^2,$$

где λ_i – коэффициент гидравлического (аэродинамического) сопротивления трубы 1 на i -ом участке;

ρ – плотность воздуха в потоке над скипом 2.

Полное аэродинамическое сопротивление трубы 1 со всеми открытыми люками 4 для нижнего расположения скипа 2 (фиг.1)

$$\Delta p' = \frac{8lp}{\pi^2 d^3} \sum_{i=1}^n \lambda_i (Q_{i-1} - \Delta Q_i)^2,$$

где n – номер последнего люка.

Сопротивление движению воздуха в трубе со сплошной стенкой (без люков 4) равно

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \rho \frac{v_0^2}{2} = \lambda \frac{8L\rho Q_0^2}{\pi^2 d^3},$$

где λ – коэффициент гидравлического (аэродинамического) сопротивления трубы длиной L , примерно равной глубине шахтного ствола;

v_0 – средняя скорость в сечении трубы при расходе воздуха Q_0 .

Снижение аэродинамического сопротивления в трубе 1 подъёмного трубопровода приведёт к уменьшению мощности, потребляемой воздуходувкой 3, когда скип 2 находится на начальном участке трубы 1, равному

$$\Delta P = \frac{(\Delta p - \Delta p') Q_0}{\eta} = \frac{8\rho Q_0}{\pi^2 d^3 \eta} [\lambda L Q_0^2 - l \sum_{i=1}^n \lambda_i (Q_{i-1} - \Delta Q_i)^2],$$

где ΔP – уменьшение мощности, потребляемой воздуходувкой 3;

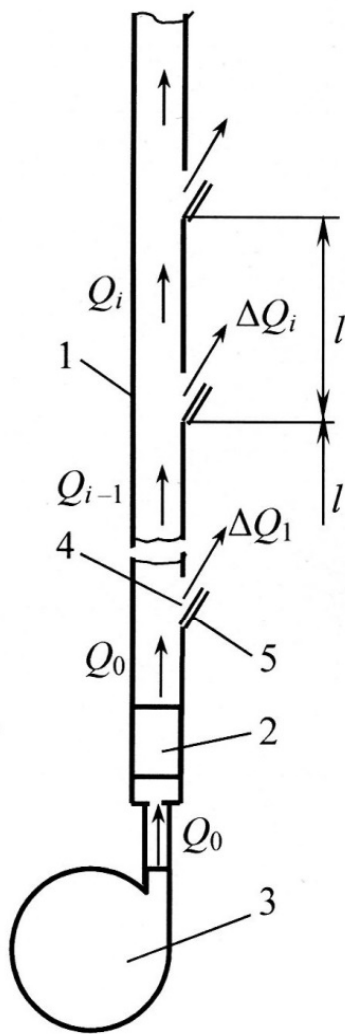
η – КПД воздуходувки.

Таким образом, выполнение в стенке трубы подъемного трубопровода нормально открытых люков, крышки которых снабжены приводами закрывания, с расчётным шагом по высоте позволит снизить скорость воздуха в трубе за счёт сброса части воздушного потока через люки и уменьшить аэродинамическое сопротивление движению скипа. Следовательно, заявляемое техническое решение приведёт к снижению затрат энергии воздуходувкой.

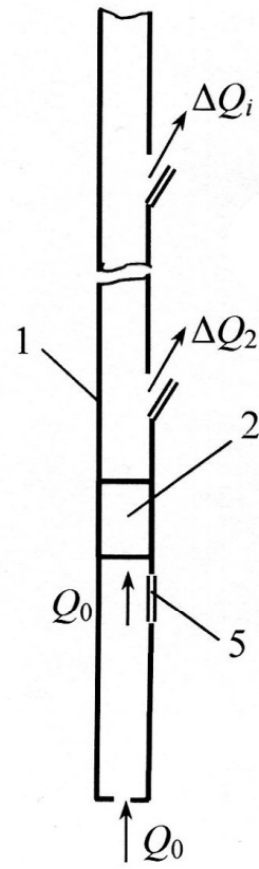
Формула изобретения

1 Скиповая пневмоподъёмная установка, включающая выполненный из трубы подъёмный трубопровод, скип, воздухоудку и систему управления, отличающаяся тем, что в стенке трубы подъёмного трубопровода по его высоте выполнены люки, каждый люк снабжён крышкой, шарнирно закреплённой на внешней поверхности стенки трубы и кинематически связанной тягой и поворотным рычагом с выходным валом мотор-редуктора, также смонтированного на внешней поверхности стенки трубы и подключенного к системе управления, причём каждая крышка имеет внутреннюю цилиндрическую поверхность с радиусом кривизны, равным внутреннему радиусу трубопровода.

Авторы: Леонтьев А. А.
Таугер В. М.

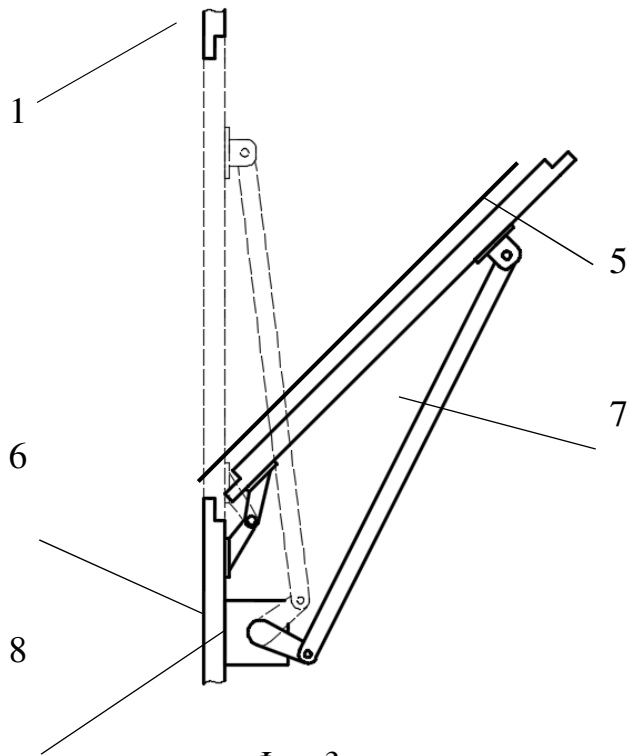


Фиг.1

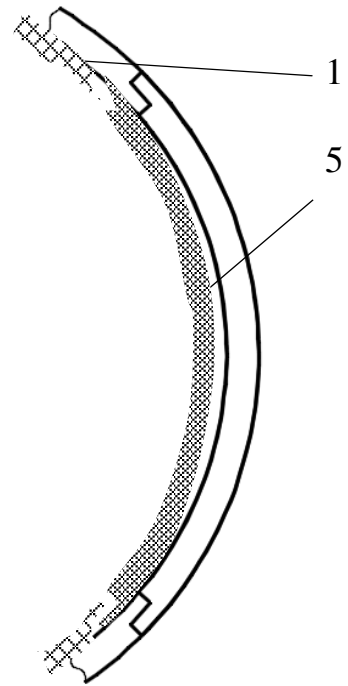


Фиг.2

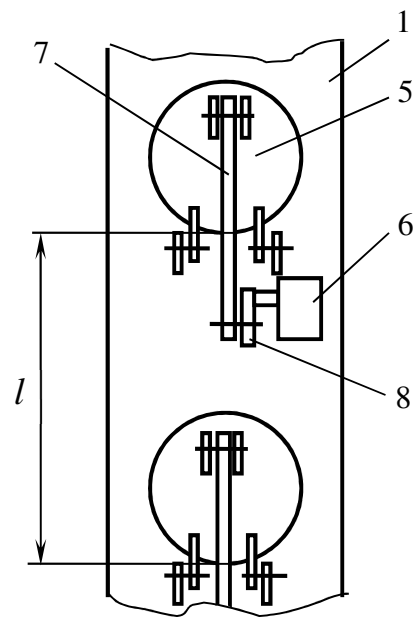
Скиповая пневмоподъёмная установка



Фиг.3



Фиг.4



Фиг.5

ПРИЛОЖЕНИЕ В*(справочное)*

МПК В66В 9/04; В66В 17/08

Скиповая пневмоподъёмная установка

Изобретение относится к подъёмным устройствам, а именно, к оборудованию подъёмного отделения ствола рудничными скиповыми подъёмниками.

Известна скиповая пневмоподъёмная установка (Патент РК № 3343. Карьерный скиповой пневматический подъёмник. Николаев Ю.А. – Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 10.06.1996), включающая скип с гладкой цилиндрической частью, трассу в виде шахтного ствола с направляюще-уплотнительными устройствами, расположенными в стволе с шагом, равным половине высоты цилиндрической части скипа, воздуходувку, загрузочную и разгрузочную станции. Подъём гружёного скипа осуществляется за счёт потока воздуха, подаваемого воздуходувкой в ствол, спуск порожнего скипа происходит под собственным весом с выпуском воздуха в нижней части ствола в атмосферу.

Недостатком указанной установки является необходимость в высоком давлении воздуха, создаваемом воздуходувкой, из-за значительного аэродинамического сопротивления, вызванного многочисленными направляюще-уплотнительными устройствами.

Известна также скиповая пневмоподъёмная установка, включающая трассу с подъёмным трубопроводом, скип, имеющий цилиндрическую часть с закреплёнными на ней направляюще-уплотнительными устройствами и верхний открытый торец, и разгрузочную станцию (Таугер В. М., Волков Е. Б., Леонтьев А. А. Теоретико-механический расчёт устойчивости движения сосуда в шахтной скиповой пневмоподъёмной установке. – Изв. УГГУ, 2018, № 1 (49). – С. 89-93.). В

разгрузочную станцию входит опрокидывающая секция, снабжённая фиксаторами скипа и установленная соосно с подъёмным трубопроводом с возможностью вращения на стойках посредством оси, соединённой с выходным валом мотор-редуктора, и приёмный бункер.

Гружёный скип по подъёмному трубопроводу поступает в опрокидывающую секцию разгрузочной станции. В крайнем верхнем положении опрокидывающей секции скип удерживается фиксаторами. Затем производится поворот опрокидывающей секции со скипом посредством мотор-редуктора в сторону приёмного бункера. Опрокидывающая секция и скип занимают наклонное положение над приёмным бункером, вследствие чего транспортируемый материал под собственным весом пересыпается в приёмный бункер. После опорожнения скипа путём реверсирования двигателя мотор-редуктора опрокидывающая секция со скипом возвращается в соосное с подъёмным трубопроводом положение. Спуск порожнего скипа происходит под собственным весом.

Недостаток известного технического решения состоит в наличии конструктивно сложного дорогостоящего мотор-редуктора и необходимости его технического обслуживания и ремонтов.

Целью изобретения является упрощение конструкции разгрузочной станции.

Указанная цель достигается тем, что поворот опрокидывающей секции осуществляется за счёт собственного веса гружёного скипа.

Сущность изобретения заключается в том, что в скиповой пневмоподъёмной установке, включающей подъёмный трубопровод, скип, имеющий цилиндрическую часть с закреплёнными на ней направляюще-уплотнительными устройствами и верхний открытый торец, и разгрузочную станцию, содержащую стойки, опрокидывающую секцию с фиксаторами скипа и приёмный бункер, опрокидывающая секция снабжена противовесом и тормозом-замедлителем вращения и установлена на стойках так, что центр тяжести опрокидывающей секции с гружёным скипом расположен между осью вращения опрокидывающей секции и приёмным бункером, а центр тяжести опрокидывающей секции с

порожним скипом расположен относительно оси вращения опрокидывающей секции по другую сторону от приёмного бункера, причём обеспечивается выполнение неравенств:

$$\begin{aligned} G_1 \cdot a &> M_1; \\ G_2 \cdot b &> M_2, \end{aligned}$$

где G_1 – суммарный вес опрокидывающей секции и грузёного скипа;

G_2 – суммарный вес опрокидывающей секции и порожнего скипа;

a – эксцентриситет веса G_1 относительно оси вращения опрокидывающей секции;

b – эксцентриситет веса G_2 относительно оси вращения опрокидывающей секции;

M_1 – момент сопротивления вращению опрокидывающей секции с грузёным скипом;

M_2 – момент сопротивления вращению опрокидывающей секции с порожним скипом.

Разгрузочная станция предлагаемой скиповой пневмоподъёмной установки показана на фиг. 1 – 5. Опрокидывающая секция 1 (фиг. 1, 2), выполненная из отрезка трубы, внутренний диаметр которой равен внутреннему диаметру подъёмного трубопровода 5, установлена с возможностью вращения на стойках 2 не соосно с подъёмным трубопроводом с эксцентриситетом, равным e . К нижней части опрокидывающей секции 1 прикреплён противовес 14. Функцию фиксаторов скипа выполняют закреплённая на внешней поверхности опрокидывающей секции катушка 6 электромагнита (система питания электропитания катушки 6 не показана) с помещённым внутрь её с возможностью продольного перемещения подпружиненным стопором 7 и упор 10 (фиг. 2), прикреплённый к внутренней поверхности опрокидывающей секции в её верхней части. Тормоз-замедлитель вращения состоит из двух смонтированных на стойках 2 пневмоцилиндров 3 одностороннего действия, штоки 13 которых шарнирно соединены с опрокидывающей секцией 1, штоковые полости сообщаются с атмосферой

непосредственно, а поршневые полости – через дистанционно управляемый кран 4. Система управления крана 4 на фиг. 1 – 5 не показана.

Скип 11 (фиг. 3) выполнен в виде цилиндрического контейнера с верхним открытым торцом, снабжённого направляюще-уплотнительными устройствами в виде колец 12. Показанный на фиг. 3 скип 11 заполнен транспортируемым материалом 9. Вблизи концевого участка подъёмного трубопровода 5 расположен приёмный бункер 15 (фиг. 4). На фиг. 1 – 4 приёмный бункер 15 не показан.

Работает скиповая пневмоподъёмная установка следующим образом.

В период подъёма скипа 11 по подъёмному трубопроводу 5 опрокидывающая секция 1 расположена соосно с подъёмным трубопроводом 5 (фиг. 1). Штоки 13 пневмоцилиндров 3 полностью выдвинуты, краны 4 закрыты. Катушка 6 обесточена, и стопор 7 полностью выдвинут из неё (фиг. 2).

В конце подъёма (фиг. 3) заполненный материалом 9 скип 11 входит в опрокидывающую секцию 1, воздействует кольцом 12 на стопор 7 и вдвигает его в катушку 6. В дальнейшем движении скипа 11 кольцо 12 освобождает стопор 7, который выдвигается из катушки 6 в исходное положение. Кольцо 12 входит в контакт с упором 10, и на этом подъём скипа 11 завершается. В крайнем верхнем положении скип 11 зафиксирован относительно опрокидывающей секции 1 стопором 7 и упором 10.

Общий вес опрокидывающей секции 1, скипа 11 и материала 9 показан на фиг. 3 в виде силы G_1 , приложенной в точке A , которая расположена на расстоянии a от оси $O-O$ (фиг. 2) вращения поворотной секции относительно опор 2.

Вес противовеса 14 и эксцентриситет e подобраны такими, что выполняется неравенство

$$G_1 \cdot a > M_1,$$

где G_1 – суммарный вес опрокидывающей секции 1 и скипа 11 с материалом 9;

M_1 – момент сопротивления вращению опрокидывающей секции 1 со скипом 11, заполненным материалом 9.

Величина момента M_1 обусловлена трением в парах вращения опрокидывающей секции 1 относительно стоек 2 и поршней 13 по внутренним поверхностям пневмоцилиндров 3.

Система дистанционного управления открывает краны 4, и поршневые полости пневмоцилиндров 3 сообщаются с атмосферой. Момент силы G_1 на плече a преодолевает момент M_1 , штоки 13 пневмоцилиндров 3 начинают выдвигаться, обеспечивая вращение опрокидывающей секции 1 с расчётной угловой скоростью по часовой стрелке. После того как штоки 13 полностью выдвинутся, опрокидывающая секция 1 занимает положение разгрузки, показанное на фиг. 4, и система дистанционного управления закрывает краны 4.

В положении разгрузки материал 9 под собственным весом пересыпается в приёмный бункер 15. После опорожнения скипа 11 суммарный вес опрокидывающей секции 1 и скипа 11 становится равным G_2 . Он показан на фиг. 4 в виде силы, приложенной в точке B , которая расположена на расстоянии b от оси $O-O$ вращения опрокидывающей секции 1 относительно стоек 2 (фиг. 2). Вес противовеса 14 и эксцентриситет e подобраны такими, что выполняется неравенство

$$G_2 \cdot b > M_2,$$

где G_2 – суммарный вес опрокидывающей секции 1 и скипа 11;

M_2 – момент сопротивления вращению опрокидывающей секции 1 со скипом 11.

Система дистанционного управления открывает краны 4. Момент силы G_2 на плече b преодолевает момент M_2 , штоки 13 пневмоцилиндров 3 начинают выдвигаться, обеспечивая вращение опрокидывающей секции 1 с расчётной угловой скоростью против часовой стрелки. После того как штоки 13 полностью выдвинутся, опрокидывающая секция 1 занимает положение, соосное с подъёмным

трубопроводом 5 (фиг. 5), и система дистанционного управления закрывает краны 4.

Штоки 13 пневмоцилиндров 3 полностью выдвинуты и предотвращают дальнейшее вращение опрокидывающей секции 1.

Система электропитания подаёт электроэнергию на катушку 6, и под воздействием магнитного поля стопор 7 вдвигается в катушку 6, освобождая кольцо 12 скипа 11. Скип 11 под собственным весом начинает движение (на фиг. 5 – вниз) вдоль опрокидывающей секции 1 и далее по подъёмному трубопроводу 5. Система дистанционного управления закрывает краны 4, и устройство для разгрузки скипа возвращается в исходное положение, показанное на фиг. 1.

Оснащение опрокидывающей секции противовесом и тормозом-замедлителем вращения и установка её на стойках с расчётным эксцентриситетом обеспечит поворот опрокидывающей секции из исходного положения в положение разгрузки за счёт собственного веса опрокидывающей секции и гружёного скипа, а из положения разгрузки в исходное положение за счёт собственного веса опрокидывающей секции и порожнего скипа, что позволит упростить конструкцию разгрузочной станции путём исключения мотор-редуктора из её состава.

Формула изобретения

Скиповая пневмоподъёмная установка, включающая подъёмный трубопровод, скип, имеющий цилиндрическую часть с закреплёнными на ней направляюще-уплотнительными устройствами и верхний открытый торец, и разгрузочную станцию, содержащую стойки, опрокидывающую секцию с фиксаторами скипа и приёмный бункер, отличающаяся тем, что опрокидывающая секция снабжена противовесом и тормозом-замедлителем вращения и установлена на стойках так, что центр тяжести опрокидывающей секции с гружёным скипом расположен между осью вращения опрокидывающей секции и приёмным бункером, а центр тяжести опрокидывающей секции с порожним скипом расположен относительно оси вращения опрокидывающей секции по другую сторону от приёмного бункера, причём обеспечивается выполнение неравенств:

$$\begin{aligned} G_1 \cdot a &> M_1; \\ G_2 \cdot b &> M_2, \end{aligned}$$

где G_1 – суммарный вес опрокидывающей секции и гружёного скипа;

G_2 – суммарный вес опрокидывающей секции и порожнего скипа;

a – эксцентриситет веса G_1 относительно оси вращения опрокидывающей секции;

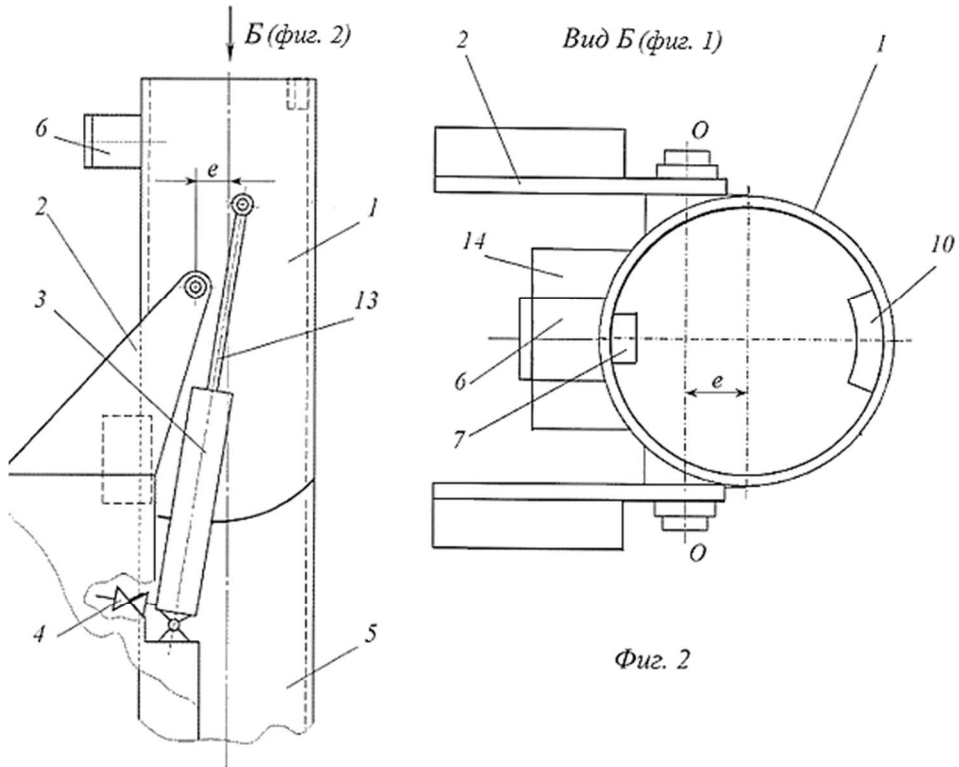
b – эксцентриситет веса G_2 относительно оси вращения опрокидывающей секции;

M_1 – момент сопротивления вращению опрокидывающей секции с гружёным скипом;

M_2 – момент сопротивления вращению опрокидывающей секции с порожним скипом.

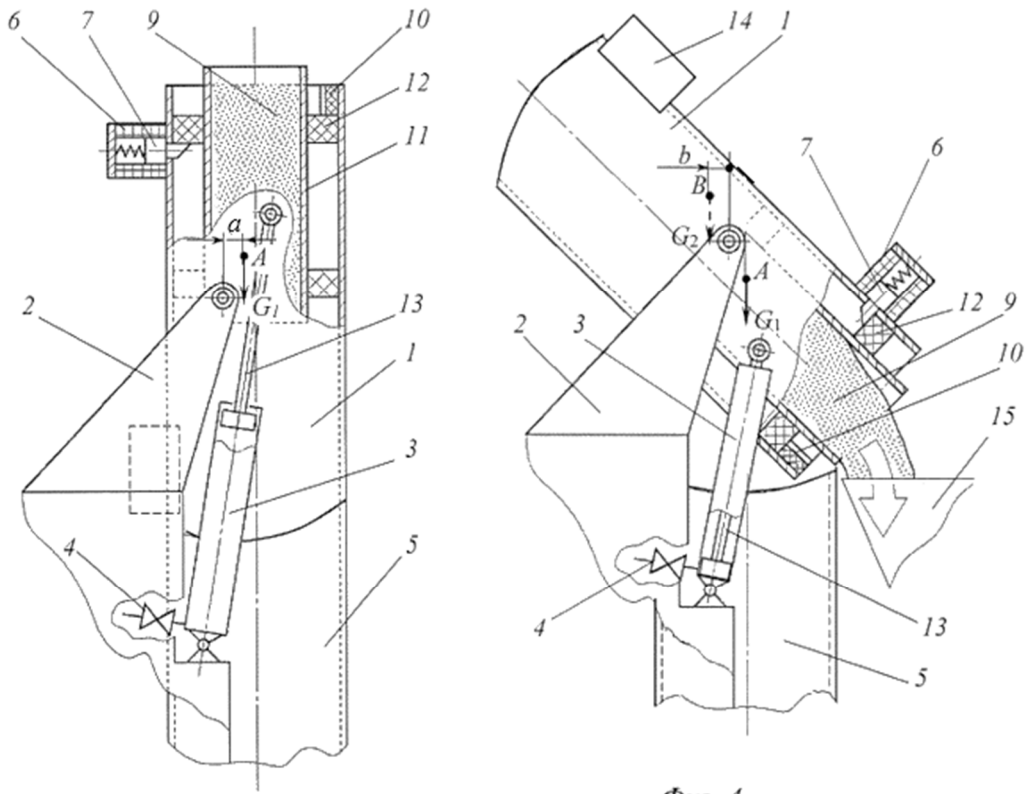
Авторы: Леонтьев А. А.,
Таугер В.М.

Скиповая пневмоподъёмная установка



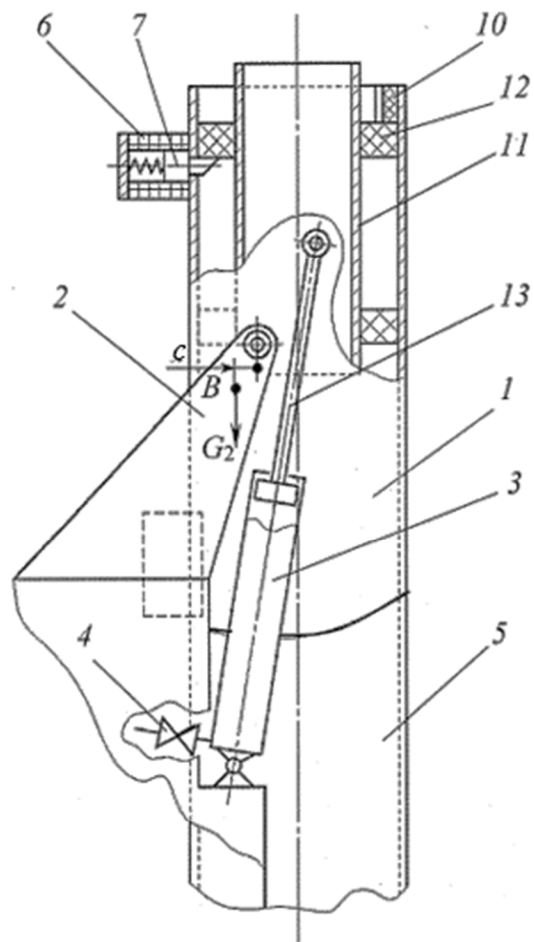
Фиг. 1

Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 4



Фиг. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2760713

Скиповая пневмоподъёмная установка

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный горный университет" (RU)*

Авторы: *Таугер Виталий Михайлович (RU), Леонтьев Александр Анатольевич (RU)*

Заявка № 2021108827

Приоритет изобретения 01 апреля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 ноября 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 01 апреля 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 760 713** (13) **C1**(51) МПК
B66B 17/08 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B66B 17/08 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021108827, 01.04.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
01.04.2021Дата регистрации:
29.11.2021Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 01.04.2021

(45) Опубликовано: 29.11.2021 Бюл. № 34

Адрес для переписки:
620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул.
Куйбышева, 30, ФГБОУ ВО "УГГУ", Чуркин
Василий Алексеевич(72) Автор(ы):
Таутер Виталий Михайлович (RU),
Леонтьев Александр Анатольевич (RU)(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Уральский государственный
горный университет" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: ТАУБЕР В. М., ВОЛКОВ Е. Б.,
ЛЕОНТЬЕВ А. А. Теоретико-механический
расчёт устойчивости движения сосуда в
шахтной скиповой пневмоподъемной
установке. - Изв. УГГУ, 2018. RU 2003621 C1,
30.11.1993. SU 899450 A1, 23.01.1982. US
20100276253 A1, 04.11.2010.

(54) Скиповая пневмоподъемная установка

(57) Реферат:

Изобретение относится к оборудованию подъемного отделения ствола рудничными скиповыми подъемниками. Скиповая пневмоподъемная установка включает подъемный трубопровод, скип, имеющий цилиндрическую часть с закрепленными на ней направляюще-уплотнительными устройствами и верхний открытый торец, а также разгрузочную станцию. Разгрузочная станция содержит стойки, опрокидывающую секцию с фиксаторами скипа

и приемный бункер. Опрокидывающая секция снабжена противовесом и тормозом-замедлителем вращения и установлена на стойках так, что размещение в ней груженого скипа приводит к её повороту из исходного положения в положение разгрузки скипа в приемный бункер, а опорожнение скипа - к возвращению из положения разгрузки в исходное положение. Изобретение обеспечивает упрощение конструкции разгрузочной станции. 5 ил.

RU 2 760 713 C1

RU 2 760 713 C1

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)



ОАО «УРАЛЬСКАЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ»

Успенский пр., 1, г. Верхняя Пышма, Свердловская обл., Россия, 624091

Тел.: (34368) 9-62-00, (343) 379-48-36, факс: (34368) 4-60-51, e-mail: info@ugmk.com, www.ugmk.com

ИНН 6606013640 / КПП 668601001, ОКПО 52306330, ОГРН 1026600727713

На № С/Н от 26 мая 2021г

Проректору по научной работе
ФГБОУ ВО «УГГУ»
проф.д.х.н. Апакашеву Р. А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о потенциале реализации результатов работы «Теоретическое исследование физических процессов в трубопроводных скиповых пневмоподъёмных установках» аспиранта Леонтьева А. А.

Представленные в работе трубопроводные скиповые пневмоподъёмные установки (СППУ) представляют интерес для скипового подъёма. Аспирантом Леонтьевым А. А. на основе теоретического исследования и моделирования получен комплекс формул, составляющих базовую математическую модель установки и позволяющих рассчитать параметры СППУ на предпроектной стадии создания конструкции.

Помимо выполнения своей основной функции – транспортирования ископаемого – СППУ могут повлиять на эффективность проветривания рудников ОАО «УГМК»:

- повысить изолированность вентиляционные пути свежего воздуха от окружающего пространства, снизит запыленность свежего воздуха в стволе при транспортировании полезного ископаемого;
- расположенная на самом глубоком горизонте нагнетательная станция может использоваться для местного проветривания труднопроветриваемых горных выработок;
- при этом, схема с размещением трубопроводов в стволе с исходящей струей, позволяет максимизировать подачу воздуха в рудник за счёт тепловой естественной тяги.

Таким образом, после детальной проработки, схемы СППУ и математическая модель могут быть рассмотрены при предпроектных технических решениях подземного горнодобывающего предприятия в качестве одного из вариантов рудничного подъёма после выполнения опытно-промышленных испытаний, согласно п. 26 Федеральных норм и правил.

Начальник отдела контроля
рудничной атмосферы,
кандидат технических наук

Минин Вадим Витальевич

ОАО «УГМК» 624091, Свердловская область, г. Верхняя Пышма, Успенский проспект, д. 1
E-mail: v.minin@ugmk.com, ел.: +7 929 214 79 41

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(справочное)

РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ УМЕНЬШЕНИЯ ДИАМЕТРА ШАХТНОГО СТВОЛА И ВЫСОТЫ НАДШАХТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

1 Общая информация

Для трубопроводного пневмоподъема, по сравнению с канатным подъемом, при равной производительности можно использовать шахтный ствол меньшего диаметра, кроме того, не требуется строительство башенного копра, достаточно построить небольшое надшахтное здание, в котором будет расположена разгрузочная станция.

2 Уменьшение диаметра шахтного ствола

Для расчета стоимости выполнения ствола были приняты следующие исходные данные:

- диаметр ствола для канатного подъема – 8,5 м;
- диаметр ствола для пневмоподъема – 6 м;
- глубина ствола (H_c) – 1000 м.

Расчет стоимости выполнения ствола проводился по укрупненным нормам цен строительства [4].

Для расчета стоимости выполнения ствола для канатного подъема был использован норматив 10-01-002-03: общая стоимость строительства 287 364,50 тыс.руб. на шахту 55 м глубиной. В пересчете на 1 п.м. глубины ствола:

$$C_{ств.к} = 287\ 364,50 / 55 = 5\ 224,81 \text{ тыс.руб.} \quad (\text{Д.1})$$

где $C_{ств.к}$ – стоимость выполнения 1 п.м. ствола диаметром 8,5 м.

Для расчета стоимости выполнения ствола для канатного подъема был использован норматив 10-01-002-02: общая стоимость строительства 239 083,33 тыс.руб. на шахту 72 м глубиной. В пересчете на 1 п.м. глубины ствола:

$$C_{ств.н} = 239\,083,33 / 72 = 3\,320,60 \text{ тыс.руб.} \quad (\text{Д.2})$$

где $C_{ств.н}$ – стоимость выполнения 1 п.м. ствола диаметром 6 м.

Полученные стоимости выполнения шахты на 1 п.м. следует пересчитать на текущие цены, т.к. нормативы справочника даны на 01.01.2017 г.

Согласно [101], инфляция с января 2017 г. по август 2023 г. составила 45,41 %.

С учетом инфляции, стоимость выполнения 1 п.м. ствола диаметром 8,5 м по текущим ценам составляет

$$C_{ств.н} = 5\,224,81 \cdot 1,4541 = 7\,597,40 \text{ тыс.руб.} \quad (\text{Д.3})$$

Стоимость выполнения 1 п.м. ствола диаметром 6 м по текущим ценам составляет

$$C_{ств.н} = 3\,320,60 \cdot 1,4541 = 4\,828,48 \text{ тыс.руб.} \quad (\text{Д.4})$$

Итоговая стоимость выполнения ствола глубиной 1000 м для канатного подъема равна

$$Z_{ств.н} = 7\,597,40 \cdot 1000 = 7\,597\,400 \text{ тыс.руб.} \quad (\text{Д.5})$$

для пневмоподъема –

$$Z_{ств.н} = 4\,828,48 \cdot 1000 = 4\,828\,480 \text{ тыс.руб.} \quad (\text{Д.6})$$

2 Уменьшение высоты надшахтных сооружений

Для канатного скипового подъема требуются единовременные капитальные затраты на строительство башенного копра. Для расчета ориентировочной стоимости были приняты следующие исходные данные:

- высота копра (h_k) – 114 м;
- сечение в плане – прямоугольное;
- ширина копра (W_k) – 18 м;
- длина копра (L_k) – 24 м.

Согласно данным Центрогипрошахта на 1980 г., стоимость 1 м³ здания монолитного железобетонного башенного копра круглой, квадратной и прямоугольной формы соответственно составляет 14,4; 12,0 и 12,5 руб. [95].

Для пересчета данной нормы на текущие цены применим поправочный коэффициент роста цен:

$$C_k = k_{инф} \cdot C_{прям} = 200 \cdot 12,5 = 2500 \text{ руб./м}^3 = 2,5 \text{ тыс.руб./м}^3, \quad (\text{Д.7})$$

где C_k – стоимость 1 м³ здания копра прямоугольной формы на текущий год;

$k_{инф}$ – поправочный коэффициент, учитывающий рост цен с 1980 по 2023 г.;

$C_{прям}$ - стоимость 1 м³ здания копра прямоугольной формы на 1980 г.

Общий объем копра по исходным данным равен

$$V_k = W_k \cdot L_k \cdot h_k = 18 \cdot 24 \cdot 114 = 49248 \text{ м}^3 \quad (\text{Д.8})$$

Итоговая стоимость копра равна

$$\Sigma_k = C_k \cdot V_k = 2,5 \cdot 49248 = 123\ 120 \text{ тыс.руб.} \quad (\text{Д.9})$$

В свою очередь, для системы трубопроводного пневмоподъема требуется строительство надшахтного здания, в котором будет расположена разгрузочная станция.

Расчет стоимости строительства проводился при помощи сервиса для расчетов металлокаркасных зданий [102] по следующим исходным данным:

- высота надшахтного здания – 15 м (с кровлей – 17 м), ширина сторон здания – 15х15 м;
- крыша – двухскатная;
- снеговой и ветровой район – 4, 3 соответственно;
- ограждающие конструкции стен и материал кровли – сэндвич-панель с базальтовым утеплителем 150 мм;
- полы бетонные толщиной 150 мм с основанием – песок и щебень 250 мм;
- армирование – однослойное, сетка 200х200х10 мм;
- общая площадь остекления – 20 м²;
- ворота – 7х7 м;
- отмостка по периметру шириной 150 мм.

Результаты расчета приведены в таблице Д.1.

Таблица Д.1

Стоимость строительства надшахтного здания ППУ

Статья затрат	Стоимость, тыс.руб.
Ограждающие конструкции стен	3 402,95
Доборные элементы (в т.ч. примыкание к ростверку)	21,45
Материал кровли	1 127,06
Полы бетонные	607,37
Выравнивание грунта	50,63
Освещение и электрика	112,50
Окна	110,00
Ворота	1 078,00
Фундамент	86,40
Отмостка	121,50
Металлокаркас	1 595,24
Крепеж стен	69,25
Крепеж кровли	23,29
Уплотнители	6,00
ИТОГО:	8 411,64

3 Амортизационные отчисления

Амортизационные отчисления были рассчитаны для компенсации капитальных затрат на строительство вспомогательных сооружений и выполнения ствола. Срок эксплуатации шахты был принят равным 50 лет. Соответственно, норма амортизации в год равна

$$N_a = 1 / T_{\text{эксн}} \cdot 100 \% = 1 / 50 \cdot 100 \% = 2 \% \quad (\text{Д.10})$$

Рассчитаем амортизационные отчисления на выполнения ствола диаметром 8,5 м:

$$Z_{\text{ам.ств1}} = 7\,597\,400 \cdot 2 \% / 100 \% = 151\,948 \text{ тыс.руб./год} \quad (\text{Д.11})$$

Аналогично, для ствола диаметром 6 м:

$$Z_{\text{ам.ств2}} = 4\,828\,480 \cdot 2 \% / 100 \% = 96\,569,60 \text{ тыс.руб./год} \quad (\text{Д.12})$$

Рассчитаем амортизационные отчисления на строительство башенного копра:

$$Z_{\text{ам.зд1}} = 123\,120 \cdot 2 \% / 100 \% = 2\,462,40 \text{ тыс.руб./год} \quad (\text{Д.13})$$

Аналогично, для надшахтного здания ППУ:

$$Z_{\text{ам.зд2}} = 8\,411,60 \cdot 2 \% / 100 \% = 168,23 \text{ тыс.руб./год} \quad (\text{Д.14})$$

4 Заключение

Сравнительная таблица, отражающая экономический эффект от уменьшения диаметра шахтного ствола и высоты надшахтных сооружений, приведена ниже.

Единовременная расчетная экономия средств при внедрении – 2 883 628,40 тыс.руб.

Ежегодная расчетная экономия средств – 57 672,57 тыс.руб./год.

Таблица Д.2

Расчетный экономический эффект

Затраты	Объект				Экономия
	Шахтный ствол		Надшахтные сооружения		
	Диаметр 8,5 м	Диаметр 6 м	Башенный копер	Надшахтное здание	
Капитальные затраты, тыс.руб.	7 597 400	4 828 480	123 120	8 411,60	2 883 628,40
Амортизационные отчисления, тыс.руб./год	151 948	96 569,60	2 462,40	168,23	57 672,57