

СИСТЕМЫ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЖИДКОСТНОЙ СМАЗКИ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Иванова Е.С., Иванов С.Л., Фролова Д.Д.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: горные машины, циркуляционная жидкостная смазка, маслостанция, масляный бак, барабанная мельница, шахтная подъемная установка, вентилятор главного проветривания, ленточный конвейер, надежность, фильтрация и охлаждение масла.

Аннотация. В практике эксплуатации горных машин циркуляционные системы жидкой смазки являются ключевым элементом обеспечения надежности редукторов, подшипников и других ресурсопределяющих узлов, работающих в условиях высокой запыленности, динамических нагрузок и жестких требований к непрерывности технологического процесса. В статье рассмотрены области применения циркуляционной жидкостной смазки в шахтных подъемных установках, барабанных мельницах, вентиляторах главного проветривания и приводных станциях ленточных конвейеров. Приведены описания типовых систем с указанием выполняемых функций по смазке, охлаждению, фильтрации и дегазации масла, а также особенностей конструкции масляных баков и тенденций их развития с точки зрения повышения надежности и энергоэффективности циркуляционных систем. Показано, что применение резервированных насосно-фильтрационных модулей, высокоэффективных смазочных материалов и средств онлайн-мониторинга состояния масла является одним из важнейших направлений повышения надежности горных машин и оборудования. В работе проанализированы перспективные направления развития систем смазки, включая внедрение интеллектуальных систем управления и предиктивной диагностики. Представлены результаты исследования эффективности различных конструктивных решений масляных баков и маслостанций, направленных на оптимизацию процессов фильтрации, охлаждения и дегазации масла.

CIRCULATION LIQUID LUBRICATION SYSTEMS FOR MINING MACHINES AND EQUIPMENT

Ivanova E.S., Ivanov S.L., Frolova D.D.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: mining machinery, circulating liquid lubrication, oil supply unit, oil tank, tumbling mill, mine hoist, main mine fan, belt conveyor drive, reliability, oil filtration and cooling.

Abstract. In the practice of mining machinery operation, liquid lubricant circulation systems are a key element in ensuring the reliability of gearboxes, bearings, and other resource-determining components operating in conditions of high dust, dynamic loads, and stringent process continuity requirements. The article discusses the applications of circulating liquid lubricants in mine lifting installations, drum mills, main ventilation fans and belt conveyor drive stations. Typical systems are described, indicating the functions performed for lubrication, cooling, filtration and degassing of oil, as well as the design features of oil tanks and their development trends in terms of improving the reliability and energy efficiency of circulation systems. It is shown that the use of redundant pumping and filtration modules, highly efficient lubricants and online oil monitoring tools is one of the most important areas for improving the reliability of mining machinery and equipment. The paper analyzes promising areas for the development of lubrication systems, including the introduction of intelligent control systems and predictive diagnostics. The results of a study of the effectiveness of various design solutions for oil tanks and oil stations aimed at optimizing the processes of filtration, cooling and degassing of oil are presented.

Введение

Рост единичной мощности и энерговооруженности горных машин и оборудования (дробилок, барабанных мельниц, шахтных подъемных установок, вентиляторов главного проветривания, протяженных конвейерных линий) ведет к увеличению нагрузок на подшипниковые опоры и зубчатые передачи, что повышает чувствительность этих узлов к качеству и режимам смазки [1-3]. Одновременно ужесточаются требования к непрерывности технологических процессов на горно-обогатительных комбинатах и шахтах: отказ ключевого

агрегата по причине нарушения смазки приводит к значительным простоям, перераспределению потоков полезного ископаемого и повышению рисков отказов [4-6].

Циркуляционные системы жидкой смазки позволяют не только формировать устойчивую масляную пленку в подшипниках и зубчатых зацеплениях, но и обеспечивают функции отвода тепла, удаления продуктов изнашивания и загрязнений, дегазации масла и удаления влаги, что критически важно для нормальной работы горных машин [7, 8]. В отличие от автономной или разбрызгиваемой смазки, такие системы включают в себя маслобак, насосные агрегаты, фильтры, теплообменники, распределительную и контрольную арматуру, а также средства автоматизированного контроля параметров и состояния масла [9, 10].

В последние годы отмечается устойчивый тренд к повышению роли циркуляционных смазочных систем в общей стратегии обеспечения надежности и энергоэффективности горного оборудования: внедряются специальные масла для тяжелых условий, развивается практика регулярного анализа состояния смазочных материалов и онлайн-мониторинга, что позволяет переходить от регламентного к предиктивному обслуживанию. При этом совершенствование конструкций масляных баков, схем фильтрации и дегазации, а также повышение живучести маслостанций за счет резервирования ключевых элементов остаются актуальными инженерными задачами для разработчиков и эксплуатирующих организаций [11-13].

Цель настоящей работы заключается в обзоре циркуляционных систем жидкой смазки для горных машин и оборудования и анализе конструктивных решений (прежде всего масляных баков и маслостанций), направленных на повышение надежности и долговечности узлов трения. Для достижения цели последовательно рассматриваются области применения циркуляционной жидкостной смазки, приводятся описания типовых схем для шахтной подъемной установки, барабанной мельницы, вентилятора главного проветривания и приводной станции ленточного конвейера, а также обсуждаются вопросы очистки, сепарации и охлаждения масла и тенденции развития маслобаков.

Обзор применения циркуляционных систем смазки горных машин

Циркуляционные системы жидкой смазки получили широкое распространение в горном машиностроении на машинах и оборудовании с высокой единичной мощностью и длительным режимом непрерывной работы, где факторы мощного тепловыделения, значительных динамических нагрузок и повышенной запыленности создают особые требования к смазке и охлаждению узлов трения [14, 15].

Шахтные подъемные установки являются типичным объектом применения циркуляционной жидкостной смазки, которая обеспечивает подачу масла к узлам привода, в опорно-упорные подшипники барабана (часто с гидравлическим разгрузочным устройством) и иногда направляющие опоры. Требования к надежности особенно жестки: при отказе смазки система управления подъемной машины должна заблокировать пуск или остановить агрегат, так как дальнейшая работа без смазки неминуемо приводит к задиру и отказу подшипников в течение нескольких минут. На современных подъемных установках маслостанция, как правило, дублируется (две независимые насосные секции), что обеспечивает приемлемый уровень живучести системы при отказе одного из насосов [10, 13].

Барабанные мельницы являются основными агрегатами дробильно-сортировочных и обогащительных комплексов горных предприятий. В них циркуляционная система смазки питает опорные подшипники барабана (одного или нескольких, в зависимости от конструкции опор), редуктор привода и, в ряде случаев, муфту соединения редуктора с приводным двигателем. Высокое тепловыделение при работе и концентрация минеральной пыли в окружающей среде требует тщательной фильтрации возвратного масла. На крупных мельницах (диаметр барабана 4,5-5,5 м и более) расход масла может достигать $2,5-5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, что предъявляет высокие требования к производительности насосов и мощности теплообменников [16, 17].

Вентиляторы главного проветривания подземных рудников и шахт также оснащаются циркуляционными системами жидкой смазки. Работая непрерывно, они обеспечивают подачу

свежего воздуха в выработки, и должны иметь высокую надежность. Циркуляционная система смазки обеспечивает подачу смазочного масла к подшипникам главного вала вентилятора, а в ряде случаев – редуктора, если вентилятор имеет редукторный привод. Требования к надежности смазочной системы не менее строгие, чем для подъемных машин: вентилятор должен быть готов к включению в любой момент при возникновении аварийной ситуации [8, 18].

Приводные станции ленточных конвейеров, в особенности головные и хвостовые барабаны протяженных конвейерных линий, используют циркуляционные системы смазки для опорных подшипников барабанов и редукторов привода. В отличие от мельниц и дробилок, циркуляционная смазка конвейерных приводов часто строится по централизованному принципу: одна маслостанция на конвейерной линии может питать несколько редукторов и барабанных опор по магистральным трубопроводам. Это позволяет снизить общие капитальные затраты на оборудование, но требует тщательного учета гидравлических потерь и обеспечения равномерного распределения расхода смазочного масла между потребителями [19].

Дробилки (щековые, конусные, валковые) крупного дробления также оснащают циркуляционными системами жидкой смазки, особенно при работе в длительном режиме нагружения. Циркуляционная система здесь обеспечивает смазывание и охлаждение подшипников главного вала, подшипников эксцентрика (в конусных дробилках) и элементов редуктора. Особенность дробилок – высокие ударные нагрузки и непредсказуемые пики давления при попадании не дробимого тела, что требует резервирования систем защиты по давлению и использования быстродействующих дросселей для защиты магистралей от гидравлических ударов.

Помимо названных основных типов машин, циркуляционные системы жидкой смазки применяются на вспомогательном оборудовании: насосных станциях, компрессорных установках, шредерах, виброгрохотах, шейкерных ситах и других агрегатах с высоконагруженными подшипниками и редукторами [20-22]. Общими признаками, определяющими целесообразность использования циркуляционной жидкостной смазки, являются: мощность привода свыше 30-50 кВт; режим работы, приближающийся к непрерывному или содержащий продолжительные периоды функционирования (не менее нескольких часов в смену); значительное тепловыделение в подшипниках и редукторе (требуется активное охлаждение масла); высокая концентрация минеральной пыли в окружающей среде (требуется ступенчатая фильтрация); критическое значение надежности для технологического процесса когда отказ смазки неприемлем.

Анализ особенностей циркуляционных систем смазки горных машин

Системы циркуляционной жидкостной смазки ключевых типов машин

Циркуляционная система смазки шахтной подъемной машины является одной из наиболее критичных и ответственных с точки зрения обеспечения надежности. Основные объекты смазки: редуктор привода (обычно цилиндрический редуктор с косозубыми колесами), опорно-упорные подшипники барабана (одиночные или спаренные, работающие в условиях знакопеременных нагрузок при реверсе машины), опорные подшипники вала редуктора [10, 11, 13]. К преимуществам централизованной системы следует отнести: снижение капитальных и эксплуатационных затрат за счет унификации маслостанций; упрощение глобального контроля и обслуживания; возможность быстрого масштабирования при добавлении новых приводов.

Ниже представлены типовые схемы маслостанций жидкой циркуляционной смазки стационарных горных машин.

Маслостанция подъемной установки включает:

1) маслобак объемом 0,4-0,8 м³ в зависимости от мощности приводного двигателя и предусмотренного времени охлаждения масла; бак оборудован внутренними перегородками и успокоительными зонами для отстаивания механических примесей и дегазации масла;

2) двухсекционный насосный агрегат (два шестеренных или винтовых насоса производительностью $3,3 \cdot 10^{-4}$ - $6,6 \cdot 10^{-4}$ м³/с каждый), вторая насосная секция является аварийной и может быть подключена в случае отказа основного насоса. Оба насоса обычно подключены к двигателю через электромагнитную муфту, позволяющую быстро выключить один из них;

3) дуплексный фильтр с фильтрующими элементами класса 10-25 мкм, обеспечивающий возможность замены или промывки одного элемента без остановки подачи масла;

4) теплообменник (чаще воздушный охладитель с вентилятором) мощностью 20-50 кВт, на некоторых подъемных машинах предусматривается водяной охладитель, питаемый от системы технического водоснабжения объекта;

5) систему контроля и защиты: датчик минимального давления в магистрали (блокировка пуска при $P < 0,5$ - $0,8$ МПа), датчик температуры масла в баке (включение вентилятора охладителя при $T > 55^{\circ}\text{C}$, блокировка пуска при $T > 65^{\circ}\text{C}$), датчик уровня масла, датчик засоренности фильтра.

Типовые режимы работы и параметры циркуляционной системы подъемной установки:

1) режим холостого хода: расход масла $3,7 \cdot 10^{-4}$ - $6,6 \cdot 10^{-4}$ м³/с, давление в магистрали 0,8-1,2 МПа, температура масла в диапазоне 30-40^oC;

2) режим полной нагрузки (подъем или спуск груза): расход масла $4,17 \cdot 10^{-4}$ - $5,83 \cdot 10^{-4}$ м³/с, давление 1,2-1,5 МПа, температура масла 40-50^oC;

3) максимальный режим (частые срабатывания защиты, высокие окружающие температуры): расход масла до $6,67 \cdot 10^{-4}$ м³/с, температура может подняться до 55–60 ^oC.

Циркуляционные системы жидкой смазки барабанных мельниц (типов МШР, МШЦ, МШБ и др.) и конусных дробилок (ККД, КСД, КМД) предназначены для смазки и охлаждения опорных подшипников и редуктора привода при работе в условиях высокой запыленности абразивного материала [10, 21, 23]. Характеристики таких систем существенно отличаются от подъемных машин из-за высокого тепловыделения и большего расхода масла.

Основные компоненты маслостанции барабанной мельницы:

– Маслобак объемом 0,8-2,0 м³ и больше. Бак имеет развитую систему перегородок и поверхности охлаждения для дегазации и оттаивания абразивной пыли.

– Насос или насосная группа производительностью $1,67 \cdot 10^{-4}$ - $5,0 \cdot 10^{-4}$ м³/с в зависимости от числа оборотов барабана и требуемого расхода к подшипникам; часто применяются шестеренные насосы большого объема или насосы с переменной производительностью для оптимизации энергопотребления.

– Ступенчатая фильтрация: предварительный фильтр 40-50 мкм, основной дуплексный фильтр 10 мкм, финишный фильтр 3-5 мкм для особо чувствительных подшипников.

– Мощный теплообменник (обычно воздушный охладитель с электровентилятором мощностью 30-100 кВт для крупных мельниц) или водяной охладитель.

– Система дегазации в баке с использованием перегородок, успокоительных зон и иногда вакуумного дегазатора.

– Система контроля: датчик давления, датчик температуры, датчик уровня, датчик засоренности фильтра; на крупных мельницах часто устанавливаются расходомеры.

Компоненты маслостанции вентилятора главного проветривания:

– маслобак объемом 0,3-0,5 м³, оборудованный системой дегазации для обеспечения быстрого запуска вентилятора с холодного состояния;

– насос производительностью $3,3 \cdot 10^{-4}$ - $6,6 \cdot 10^{-4}$ м³/с, обычно шестеренчатый, с подачей к подшипникам вала вентилятора;

– система фильтрации: стандартный фильтр 10-25 мкм;

– теплообменник: небольшой воздушный охладитель (5-15 кВт);

– система контроля: датчик минимального давления, датчик температуры масла, датчик уровня.

Отличительная черта систем вентиляторов – наличие независимой электрической или аккумуляторной системы питания для привода маслостанции в случае отключения основного электроснабжения объекта.

Ленточные конвейеры на конвейерных линиях горно-обогатительных комбинатов и рудников обслуживаются как отдельными локальными маслостанциями (на головном и хвостовом барабанах), так и единой централизованной системой, питающей несколько редукторов и барабанных опор по магистральным трубопроводам [1, 11].

Характеристики централизованной маслостанции ленточного конвейера:

- маслбак объемом $0,5-1,5 \text{ м}^3$ в зависимости от числа обслуживаемых приводов и требуемого времени охлаждения масла, расчет объема которого проводится с учетом необходимого времени отстаивания (обычно 120-180 с);
- центральный насосный агрегат производительностью $8,3 \cdot 10^{-4}-25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, распределяющий масло по магистральным линиям;
- дуплексная фильтрационная станция на выходе из насоса с фильтрами 10-25 мкм;
- центральный теплообменник мощностью 30-80 кВт;
- система распределения масла по магистралям с регулирующими дросселями на входе каждого редуктора;
- система контроля и защиты: датчики давления на магистралях, датчик температуры, датчики засоренности фильтров, расходомеры.

Очистка, сепарация и охлаждение масла в циркуляционных системах

Эффективность и надежность циркуляционных систем жидкой смазки в значительной степени определяются качеством выполнения трех основных функций: механической фильтрации масла, удаления растворенной и свободной воды, а также поддержания оптимального теплового режима [24, 25].

Чистота циркуляционного масла оценивается в соответствии с международным стандартом ISO 4406:2021, который определяет количество частиц определенного размера ($\geq 4 \text{ мкм}$, $\geq 6 \text{ мкм}$, $\geq 14 \text{ мкм}$) в 100 мл образца масла и составляет от ISO 18/16/13 до ISO 16/14/11 в зависимости от типа редуктора, режима работы и требований к надежности подшипников.

При этом ступенчатая фильтрация применяется в три уровня:

- 1) предварительная (грубая) фильтрация 40-50 мкм на входе возвратного масла в бак для первичной очистки от крупных частиц;
- 2) основная фильтрация 10-25 мкм – дуплексный фильтр на выходе масла из бака или на линии подачи после насоса, обеспечивающий основную очистку;
- 3) финишная (тонкая) фильтрация 3-5 мкм на особо ответственных объектах для гарантированного поддержания высокого класса чистоты.

Эффективность фильтра оценивается параметром β , который определяется как отношение количества частиц размером выше определенного порога в неотфильтрованном масле к количеству таких частиц в отфильтрованном масле. Для основных фильтров на горных машинах обычно требуется $\beta \geq 75$ (стандартная фильтрация) или $\beta \geq 200$ (тонкая фильтрация).

Дегазация (удаление растворенного и захваченного воздуха) является критически важной функцией циркуляционной системы, особенно при возвращении масла с высокой скоростью из редукторов и подшипников. Воздух в масле приводит к образованию пены, снижению несущей способности масляной пленки и повышению скорости окисления масла.

Для обеспечения дегазации маслобаки оборудуются:

- внутренними перегородками и успокоительными зонами, которые замедляют скорость движения масла в баке и увеличивают время пребывания (не менее 120-180 с); это достигается отношением объема бака к расходу масла как минимум $V(\text{м}^3) \geq Q(\text{м}^3/\text{с}) \times (120-180)$;
- диффузорами и распределительными устройствами на входе возвратного масла, которые тормозят высокоскоростной;
- вакуумными дегазаторами при работе в условиях высокогорья или гарантированного снижения содержания воздуха ниже 5-8%.

Удаление воды из масла, циркулирующего в системе, является одним из важнейших процессов по восстановлению свойств смазочного материала, так как влага, попадающая

вместе с воздухом через воздухозаборники бака при его дыхании в условиях высокой влажности и перепадов температур, конденсируется и смешивается с маслом, что снижает срок службы самой системы (до 30%), приводит к коррозии и интенсификации изнашивания.

Для удаления воды применяют:

1) коалесцирующие фильтры, которые объединяют мелкие капли воды в более крупные капли, имеющие достаточно высокую скорость падения в масле;

2) абсорбирующие материалы (ионообменные смолы) для связывания растворенной воды;

3) вакуумные осушители, способные снижать содержание воды в масле до уровня менее 200 мг/кг.

На практике применяется гибридный подход: стандартная механическая фильтрация плюс коалесцирующий картридж в основном или отдельном контуре с производительностью 10-20% от основного расхода циркуляции.

Очагами тепловыделения в циркуляционной системе служат потери на трение в подшипниках и зубчатых зацеплениях, а также насосах и трубопроводах (из-за вязкого трения масла).

Для поддержания оптимальной температуры масла (45-55°C при номинальном режиме, максимум 65-70°C) требуется теплообменник с производительностью:

$$Q_{охл} = \frac{P_{трения} \cdot \eta_{нар}}{K_{ист}}, \quad (1)$$

где $P_{трения}$ – мощность трения в подшипниках и редукторе (кВт), $\eta_{нар}$ – коэффициент полезного действия агрегата (0,85-0,95 для редукторов), $K_{ист}$ – коэффициент, зависящий от доли тепла, отводимого маслом (0,4-0,6).

Требуемая мощность теплообменника из опыта конкретного типа машины составляет:

- для барабанных мельниц диаметром 4,5-5,5 м – 40-80 кВт;
- для конусных дробилок мощностью 150-250 кВт – 30-50 кВт;
- для шахтных подъемных машин в 100-300 кВт – 20-40 кВт;
- для приводных станций ленточных конвейеров – 15-25 кВт на один редуктор.

Обсуждение результатов

Масляные баки циркуляционных систем: конструкции и тенденции развития

Масляный бак циркуляционной системы является ключевым элементом, от конструкции и характеристик которого зависит эффективность выполнения функций охлаждения, дегазации, отстаивания и защиты масла от контаминации [10, 23].

Основной корпус бака выполнен из стального листа (обычно толщиной 4-8 мм) или алюминиевых сплавов. Форма баков обычно цилиндрическая (горизонтальная или вертикальная) или представляет собой прямоугольную призму.

Типовая компоновка включает: входную перегородку (диффузор), направляющую поток возвратного масла вниз и в стороны; промежуточные поперечные перегородки, разделяющие бак на отдельные зоны; успокоительную зону перед входом в выходную линию (к насосу) со слабым потоком для финального отстаивания.

Исследования показывают, что использование перегородок может увеличивать время пребывания в 1,5-2 раза по сравнению с неразделенным баком [10, 24].

Сепаратор гидравлического масла от воды обеспечивает ее осаждение, сбор в нижней части бака и отвод через сливной клапан. На современных баках устанавливаются поплавковые датчики или электроды, сигнализирующие о наличии свободной воды.

Воздухозаборник обычно подсоединяется через осушающий картридж, содержащий силикагель или другой гигроскопичный материал, который поглощает влагу из воздуха, входящего в бак. Для горных машин, работающих в условиях высокой влажности, такие картриджи критически важны. Картриджи обычно оснащены цветными индикаторами, показывающими степень насыщения влагой.

Объем маслобака циркуляционной системы определяется из условия обеспечения требуемого времени пребывания масла для дегазации и расчета охлаждающей способности.

При наличии теплообменника требуемое время охлаждения масла рассчитывается как:

$$t_{охл} = \frac{C \cdot m \cdot \Delta T}{Q_{охл}}, \quad (2)$$

где C – удельная теплоемкость масла (примерно 2000 Дж/(кг°С)), m – масса масла в баке (кг), ΔT – требуемое снижение температуры (°С), $Q_{охл}$ – мощность теплообменника (кВт).

Развитие конструкций масляных баков тяготеет к модульности. Такие баки собираются из стандартных секций, что облегчает транспортировку, модификацию и замену отдельных элементов. При этом интеграция датчиков в корпус бака позволяет в реальном времени контролировать: уровень жидкости, ее температуру, присутствие воды, загрязненность масла. Все эти сигналы передаются в контроллер маслостанции и при необходимости в автоматизированную систему управления технологическим процессом предприятия. Улучшенные системы дегазации с использованием микропузырьковых дегазаторов или вакуумных дегазаторов для высокогорных объектов обеспечивают содержание растворенного воздуха ниже 5% по объему [16]. Коррозионная стойкость и долговечность масляных баков для горного оборудования обеспечиваются применением специальных покрытий, коррозионностойких материалов, конструктивных решений, исключающих локальные накопления влаги и осадков.

Снижение энергозатрат на циркуляцию масла достигается за счет оптимизации формы и размеров внутренних перегородок, применения насосов с переменной производительностью и систем управления. На практике такие решения позволяют снижать потребление электроэнергии маслостанций на 20-35% [10].

Повышение надежности циркуляционных систем жидкостной смазки

Одним из наиболее эффективных способов повышения живучести циркуляционной системы является резервирование ключевых элементов, в первую очередь насосов и фильтров, что позволяет повысить надежность системы до 98%; проводить плановое техническое обслуживание одного насоса без остановки циркуляции; обеспечить автоматическое переключение на резервный насос при отказе основного.

Аналогично дуплексные фильтры позволяют менять фильтрующие картриджи без остановки циркуляции, что критично для мельниц и дробилок, работающих в условиях высокой загрязненности.

Проведение предиктивного обслуживания, представляющего собой парадигму, при которой техническое обслуживание проводится не по заранее установленному графику, а по фактическому состоянию оборудования и смазочного материала, позволяет увеличивать межремонтные сроки при снижении рисков отказов оборудования, эффективно использовать его потенциал.

Системы автоматического управления расходом и давлением на базе электронных контроллеров и датчиков позволяют: регулировать производительность насоса в зависимости от текущей нагрузки и температуры масла; поддерживать стабильное давление в магистральных при изменении вязкости масла; автоматически управлять вентилятором охладителя; передавать информацию о состоянии системы в центральную АСУ ТП предприятия.

Постановка новых задач и пути их решения

Несмотря на прогресс в разработке циркуляционных систем жидкой смазки горных машин, сохраняется актуальность задач по оптимизации модульных конструкций масляных баков, обеспечивающих гибкую адаптацию к габаритам и режимам эксплуатации барабанных мельниц, шахтных подъемных установок и приводных станций конвейеров. Модульность позволяет комбинировать секции (грязный отсек, сепаратор, чистый отсек с перегородками и диффузорами), минимизируя застойные зоны и повышая эффективность воздухо-, влаго- и грязеотделения за счет регулируемой гидродинамики потока.

В рамках дальнейших исследований планируется сосредоточиться на выявлении закономерностей сепарации в модульных баках, где эффективность процессов зависит от времени пребывания масла в баке, распределения скоростей и конструктивных параметров последнего (форма, высота перегородок, перфорация). Это позволит разработать критерии выбора модулей для типовых условий горных машин с расходом масла 0,3-5 л/с и тепловыделением до 80 кВт.

Любые теоретические исследования требуют подтверждения выводов или уточнения параметров экспериментально, однако, это не всегда возможно на полномасштабных объектах, что требует соблюдения критериев подобия, к которым следует отнести числа Рейнольдса (Re) – для ламинарно-турбулентного режима и Фруда (Fr) – для адекватной оценки процессов осаждения частиц и всплытия пузырей. Решение поставленных задач требует учета влияния вязкости масла (20-40 сСт) и модульной компоновки на скорости седиментации твердых частиц, а также коалесценции пузырьков воды и воздуха.

Организация стендовых испытаний целесообразна на прозрачной модели бака (масштаб 1:5-1:10) с имитацией масла водно-глицерольной смесью и регулируемым притоком загрязнений (частицы 10-100 мкм, воздух 5-10%, вода 0,1-1%). Контроль скоростей предполагает измерение мгновенных полей скоростей потоков жидкости путем цифровой обработки изображений введенных в поток частиц (PIV), а содержание примесей – оптикой, обеспечивая подобие по Re , Fr и геометрическому критерию l/d . Тестирование 2-3 модульных компоновок при $Q = 0,1-1$ л/с, $T = 40-60^\circ\text{C}$ позволит уточнить параметры баков рациональных для мельниц (высокая загрязненность) и подъемников (необходимость быстрой дегазации).

Применение CFD-моделирования (ANSYS Fluent или OpenFOAM) для бака-модуля с коаксиальными секциями позволит уточнить расчет полей скоростей, аэрации (до 5-8% воздуха) и сепарации при $Re = 10^3-10^5$, а также верифицировать модель по экспериментальным данным, оптимизировать перфорацию перегородок для снижения турбулентности и повышения дегазации на 30-50% и, наконец, масштабировать результаты на прототипы масляных баков горных машин по равенству Re и Fr .

Реализация плана обеспечит научную основу для патентоспособных модульных баков, повышающих надежность смазки горных машин на 20-30% за счет контролируемой сепарации.

Заключение

Циркуляционные системы жидкой смазки являются важным звеном систем обеспечения надежности горных машин и оборудования, в частности шахтных подъемных установок, барабанных мельниц, вентиляторов главного проветривания, дробилок и приводных станций ленточных конвейеров, обеспечивая их долговечность, снижая интенсивность деградиационных процессов в их подвижных соединениях и узлах.

Эти системы следует разделять по пяти основным критериям: схема построения; способ подачи масла; степень автоматизации; функциональное назначение; компоновка, что облегчает выбор рациональной схемы смазывания для конкретного типа машины и условий эксплуатации.

Неотъемлемой частью циркуляционной системы жидкой смазки являются масляные баки. Конструкция масляных баков должна обеспечивать оптимальное время пребывания в них масла (не менее 120-180 с), эффективную дегазацию и отстаивание загрязнений; применение внутренних перегородок, диффузоров и успокоительных зон повышает эффективность баков на 50-100%.

При этом требования к качеству масла, циркулирующего в системе, по содержанию воды и окислительной стабильности являются важным условием для обеспечения долговечности подшипников и редукторов. Для горного оборудования целесообразна ступенчатая фильтрация с применением дуплексных фильтров и коалесцирующих картриджей.

Повышение надежности циркуляционных систем достигается за счет резервирования ключевых элементов (насосы, фильтры), применения систем онлайн-мониторинга состояния

масла и внедрения предиктивного обслуживания, что позволяет на 30-50% снизить количество неплановых остановок.

Использование высокоэффективных синтетических и полусинтетических масел специального назначения в сочетании с системами автоматического управления позволяет на 20-30% снизить потребление электроэнергии маслостанцией и на 15-25% увеличить интервалы между заменами масла.

Интеграция IoT-технологий и систем искусственного интеллекта в маслостанции обеспечивает возможность дистанционного мониторинга параметров системы и передачи информации в центральную АСУ ТП предприятия.

Следующим этапом работы авторского коллектива станет проведение исследований по оптимизации внутренней гидродинамики с целью минимизации застойных зон и повышения эффективности процессов дегазации и сепарации в циркуляционных системах.

Список литературы

1. Попов М.В. Система смазки главных передач // Техника и технологии: теория и практика. – 2023. – №3(9). – С. 17-22. – doi.org/10.34286/2712-7419-2023-9-3-17-22.
2. Zhu S., Zhang X., Wang D., Wang J. Mixed turbulent lubrication analysis of worn journal bearing with end oil supply // Tribology International. 2024, vol. 193, p. 109380. doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109380.
3. Леванов И.Г., Задорожная Е.А., Мухортов И.В., Никитин Д.Н. Моделирование гидродинамических подшипников скольжения с учетом индивидуальных противоизносных свойств смазочных материалов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2021. – Т. 21, №1. – С. 14-28. – doi.org/10.14529/engin210102.
4. Ardah S., Profito F.J., Dini D. A comprehensive review and trends in lubrication modelling // Advances in Colloid and Interface Science. 2025, vol. 342, p. 103492. – doi.org/10.1016/j.cis.2025.103492.
5. Vilanova E., Mangas I., Estevez J., Estevan C., Sogorb M.A. Lubricating oils // Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition). 2025, vol. 5, pp. 977-986. doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.01084-8.
6. Zheng K., Zhang X., Du K., Li S., Zhang J., Wu W., Xu B., Yang H., Zhang C. Oil film mixed lubrication of heavy-load friction pairs: Theoretical modeling, solution methods, and applications // Tribology International. 2025, vol. 216, pp. 111589. doi.org/10.1016/j.triboint.2025.111589.
7. Zhang R., Yu Y., Ou S., Hu L., Cao B., Xie L., Ma B. Research on the stress response characteristics of the crank-connecting rod mechanism under lubrication failure and auxiliary equipment malfunction // Engineering Failure Analysis. 2025, vol. 179, p. 109751. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109751.
8. Ouyang L., Huang H., Yang X. An intelligent lubricating oil quality detector integrating computer technology // Procedia Computer Science. 2024, vol. 243, pp. 819-825. doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.098.
9. Stefan-Henningsen E., Roberts N., Kiani A. Enhancing tribological performance: A comprehensive review of graphene-based additives in lubricating greases // Results in Engineering. – 2025. – №25. – P. 1-16. – doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104551.
10. Иванов С.Л., Дудко П.П., Дмитриев Г.Ю., Подхалюзин С.П. Автоматические централизованные системы смазки. Опыт применения, проблемы и перспективы использования // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 22-26.
11. Сиваков В.П., Вураско А.В., Вихарев С.Н., Исаков С.Н., Исаева К.С. Влияние расположения блоков ротаметров циркуляционной смазки подшипников сушильной части на мощность привода // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – Т. 249. – С. 271-284. – doi.org/10.21266/2079-4304.2024.249.271-284.
12. Yu G., Zhao Y., Fu Z., Chen Z. Application of back propagation neural network in the analysis of isothermal elastohydrodynamic lubrication // Tribology International. 2024, vol. 198, p. 109883. doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109883.
13. Сиваков В.П., Вураско А.В., Исаков С.Н., Исаева К.С. Обоснование энергосбережения в сушильной части при модернизации циркуляционной смазки подшипников // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – Т. 243. – С. 269-283. – doi.org/10.21266/2079-4304.2023.243.269-283.
14. Kurmanova D., Jaichibekov N., Karpenko A., Volkov K. Modelling and Simulation of Heat Exchanger with Strong Dependence of Oil Viscosity on Temperature // Fluids. 2023, vol. 8, p. 95. doi.org/10.3390/fluids8030095.
15. Xu X., Liao X., Zhou T., He Z., Hu H. Vibration-based identification of lubrication starved bearing using spectral centroid indicator combined with minimum entropy deconvolution // Measurement. 2024, vol. 226, p. 114156. doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114156.
16. Ehlert D. Eliminating risks in bearing lubrication // World Pumps. 2012, iss. 7, pp. 24, 26, 28, 30-31. doi.org/10.1016/S0262-1762(12)70153-0.
17. Crump W.J.J. Centralized lubrication for high temperature applications // Tribology. 1972, vol. 5, iss. 2, pp. 78-80. doi.org/10.1016/0041-2678(72)90122-4.

18. Qian X., Zhang S., Sun T., Wang J., Bao L., Yang K., Xu W., Chen S., Huang H., Liu C. Splash lubrication optimization for spiral bevel gear systems considering three objectives // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025, vol. 165, p. 109028. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109028.
19. Tian Y., Zhang C., Yang L. Analysis of the longitudinal coupled dynamic characteristics of shaft-shell system considering the lubrication of thrust bearing // *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2025, vol. 113, p. 105726. doi.org/10.1016/j.euromechsol.2025.105726.
20. Андреев А.А., Карапетян М.А. Автоматическая система смазки // *Техника и технологии: теория и практика*. – 2023. – №2 (8). – С. 38-43. – doi.org/10.34286/2712-7419-2023-8-2-38-43.
21. Шерстобитов Ю.А. Разработка автоматической централизованной системы смазки скребкового забойного конвейера // *Флагман науки*. – 2025. – №7(30). – С. 143-146. – doi.org/10.37539/2949-1991.2025.30.7.008.
22. Шишлянников Д.И., Лавренко С.А., Зверев В.Ю., Муравский А.К., Микрюков А.Ю. Исследование гидроабразивного износа рабочих ступеней скважинных электроцентробежных насосов, перекачивающих жидкости с высоким содержанием механических примесей // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – №7. – С. 5-20. – doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_5.
23. Абдуазизов Н.А., Жураев А.Ш., Халилов Ш.Ш. Исследование влияния величины загрязнения рабочей жидкости на надежность горных машин // *Scientific Journal Impact Factor*. – 2022. – Т. 1, №8. – С. 95-103. – doi.org/10.5281/zenodo.7358660.
24. Zhang T., Li C., Sun S. Effect of Temperature on Oil-Water Separations Using Membranes in Horizontal Separators // *Membranes*. 2022, vol. 12(2), p. 232. doi.org/10.3390/membranes12020232.
25. Gaifullin A.M., Shcheglov A.S. Self-Similarity of a Wall Jet with Swirl // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2022, vol. 43, pp. 1098-1103. doi.org/10.1134/S199508022208008X.

References

1. Popov M.V. Main gear lubrication system// *Technique and technology: theory and practice*. 2023, no. 3(9), pp. 17-22. doi.org/10.34286/2712-7419-2023-9-3-17-22.
2. Zhu S., Zhang X., Wang D., Wang J. Mixed turbulent lubrication analysis of worn journal bearing with end oil supply // *Tribology International*. 2024, vol. 193, p. 109380. doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109380.
3. Levanov I.G., Zadorozhnaya E.A., Mukhortov I.V., Nikitin D.N. Modeling of hydrodynamic plain bearings considering individual anti-wear properties of lubricants // *Bulletin of the South Ural State University*. 2021, vol. 21, no. 1, pp. 14-28. doi.org/10.14529/engin210102.
4. Ardah S., Profito F.J., Dini D. A comprehensive review and trends in lubrication modelling // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2025, vol. 342, p. 103492. – doi.org/10.1016/j.cis.2025.103492.
5. Vilanova E., Mangas I., Estevez J., Estevan C., Sogorb M.A. Lubricating oils // *Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition)*. 2025, vol. 5, pp. 977-986. doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.01084-8.
6. Zheng K., Zhang X., Du K., Li S., Zhang J., Wu W., Xu B., Yang H., Zhang C. Oil film mixed lubrication of heavy-load friction pairs: Theoretical modeling, solution methods, and applications // *Tribology International*. 2025, vol. 216, pp. 111589. doi.org/10.1016/j.triboint.2025.111589.
7. Zhang R., Yu Y., Ou S., Hu L., Cao B., Xie L., Ma B. Research on the stress response characteristics of the crank-connecting rod mechanism under lubrication failure and auxiliary equipment malfunction // *Engineering Failure Analysis*. 2025, vol. 179, p. 109751. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109751.
8. Ouyang L., Huang H., Yang X. An intelligent lubricating oil quality detector integrating computer technology // *Procedia Computer Science*. 2024, vol. 243, pp. 819-825. doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.098.
9. Stefan-Henningsen E., Roberts N., Kiani A. Enhancing tribological performance: A comprehensive review of graphene-based additives in lubricating greases // *Results in Engineering*. – 2025. – №25. – P. 1-16. – doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104551.
10. Ivanov S.L., Dudko P.P., Dmitriev G.Yu., Podkhalyuzin S.P. Automatic centralized lubrication systems. Experience, problems and prospects of use // *Journal of Mining Institute*. 2008, vol. 178, pp. 22-26.
11. Sivakov V.P., Vurasko A.V., Vikharev S.N., Isakov S.N., Isaeva K.S. Influence of rotary meter blocks location of circulating bearing lubrication in the drying section on drive power // *Proceedings of the Saint Petersburg Forest Technical Academy*. 2024, vol. 249, pp. 271-284. doi.org/10.21266/2079-4304.2024.249.271-284.
12. Yu G., Zhao Y., Fu Z., Chen Z. Application of back propagation neural network in the analysis of isothermal elastohydrodynamic lubrication // *Tribology International*. 2024, vol. 198, p. 109883. doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109883.
13. Sivakov V.P., Vurasko A.V., Isakov S.N., Isaeva K.S. Justification of energy saving in the drying section during modernization of circulating bearing lubrication // *Proceedings of the Saint Petersburg Forest Technical Academy*. 2023, vol. 243, pp. 269-283. doi.org/10.21266/2079-4304.2023.243.269-283.
14. Kurmanova D., Jaichibekov N., Karpenko A., Volkov K. Modelling and Simulation of Heat Exchanger with Strong Dependence of Oil Viscosity on Temperature // *Fluids*. 2023, vol. 8, p. 95. doi.org/10.3390/fluids8030095.
15. Xu X., Liao X., Zhou T., He Z., Hu H. Vibration-based identification of lubrication starved bearing using spectral centroid indicator combined with minimum entropy deconvolution // *Measurement*. 2024, vol. 226, p. 114156. doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114156.

16. Ehlert D. Eliminating risks in bearing lubrication // World Pumps. 2012, iss. 7, pp. 24, 26, 28, 30-31. doi.org/10.1016/S0262-1762(12)70153-0.
17. Crump W.J.J. Centralized lubrication for high temperature applications // Tribology. 1972, vol. 5, iss. 2, pp. 78-80. doi.org/10.1016/0041-2678(72)90122-4.
18. Qian X., Zhang S., Sun T., Wang J., Bao L., Yang K., Xu W., Chen S., Huang H., Liu C. Splash lubrication optimization for spiral bevel gear systems considering three objectives // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2025, vol. 165, p. 109028. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109028.
19. Tian Y., Zhang C., Yang L. Analysis of the longitudinal coupled dynamic characteristics of shaft-shell system considering the lubrication of thrust bearing // European Journal of Mechanics - A/Solids. 2025, vol. 113, p. 105726. doi.org/10.1016/j.euromechsol.2025.105726.
20. Andreev A.A., Karapetyan M.A. Automatic lubrication system // Technique and technology: theory and practice. 2023, no. 2(8), pp. 38-43. doi.org/10.34286/2712-7419-2023-8-2-38-43.
21. Sherstobytov Yu.A. Development of an automatic centralized lubrication system for a scraper face conveyor // Flagman of Science. 2025, no. 7(30), pp. 143-146. doi.org/10.37539/2949-1991.2025.30.7.008.
22. Shishlyannikov D.I., Lavrenko S.A., Zverev V.Yu., Muravsky A.K., Mikryukov A.Yu. Study of hydroabrasive wear of working stages of submersible electric centrifugal pumps pumping liquids with high content of mechanical impurities // Mining Information and Analytical Bulletin. 2023, no. 7, pp. 5-20. doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_5.
23. Abduazizov N.A., Zhuraev A.Sh., Khalilov Sh.Sh. Study of the influence of contamination level of working fluid on the reliability of mining machines // Scientific Journal Impact Factor. 2022, vol. 1, no. 8, pp. 95-103. doi.org/10.5281/zenodo.7358660.
24. Zhang T., Li C., Sun S. Effect of Temperature on Oil-Water Separations Using Membranes in Horizontal Separators // Membranes. 2022, vol. 12(2), p. 232. doi.org/10.3390/membranes12020232.
25. Gaifullin A.M., Shcheglov A.S. Self-Similarity of a Wall Jet with Swirl // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2022, vol. 43, pp. 1098-1103. doi.org/10.1134/S199508022208008X.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Иванова Евгения Сергеевна – аспирант	Ivanova Evgenia Sergeevna – postgraduate student
Иванов Сергей Леонидович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроения	Ivanov Sergey Leonidovich – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of mechanical engineering
Фролова Диана Дмитриевна – студент	Frolova Diana Dmitrievna – student
s255079@stud.spmi.ru	

Получена 09.02.2026