

Пневматическое пуско-вспомогательное устройство для оптимизации пуска горных машин с тяжелым ротором

А.Е. Избаева¹, К.К. Елемесов¹, Д.Д., Басканбаева¹✉, Н.Б. Бегасилова²

¹ *Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Республика Казахстан, г. Алматы, info@satbayev.university*

² *Назарбаев Университет, Казахстан, г. Астана, nu@nu.edu.kz*

✉ d.baskanbayeva@satbayev.university

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема оптимизации пусковых режимов технологических машин с тяжелым ротором, актуальная для различных отраслей промышленности, включая горно-металлургический комплекс. Предложено использование пневматического пуско-вспомогательного устройства на базе сильфонных пневмобаллонов с храповым механизмом для облегчения пуска таких машин и снижения пусковых токов. Описана конструкция экспериментального стенда, имитирующего работу шаровой мельницы и приведена методика проведения исследований. Показано, что предварительная работа предложенного пневматического пуско-вспомогательного устройства в пошаговом режиме, без включения основного двигателя, существенно снижает пиковые значения пускового тока. Определено влияние давления в пневмосистеме на эффективность пуска, установлено, что увеличение давления приводит к дальнейшему снижению пускового тока. Определены оптимальные параметры работы предложенного устройства (положение конечного выключателя, давление сжатого воздуха), обеспечивающие минимальные пусковые нагрузки на штатный привод. Сделан вывод о перспективности использования предложенного устройства для повышения надежности, энергоэффективности и снижения эксплуатационных расходов на предприятиях, использующих технологические машины с тяжелым ротором.

Ключевые слова: пневматический привод, пуско-вспомогательное устройство, тяжелый ротор, шаровая мельница, пусковые токи, сильфонный пневмобаллон, храповый механизм, оптимизация пуска

Благодарность/Финансирование: Исследование проведено в рамках выполнения грантовой темы, финансируемой Комитетом науки Министерства науки и Высшего образования Республики Казахстан АР19177970 «Совершенствование технологии изготовления корпуса детали насоса из фиброволокна».

Для цитирования: Избаева А.Е., Елемесов К.К., Басканбаева Д.Д., Бегасилова Н.Б. Пневматическое пуско-вспомогательное устройство для оптимизации пуска горных машин с тяжелым ротором // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. – № 1. – С. 214–225. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-214-225.

Pneumatic starting auxiliary device for optimising the start-up of mining machines with heavy rotors

A.E. Igbaeva¹, K.K. Yelemessov¹, D.D. Baskanbayeva¹✉, N.B. Begassilova²

¹ Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan, info@satbayev.university

² Nazarbayev University, Astana, Republic of Kazakhstan, nu@nu.edu.kz

✉ d.baskanbayeva@satbayev.university

Abstract. Introduction. This article addresses the optimization of start-up modes for technological machines with heavy rotors, relevant across industries, including mining and metallurgy. It proposes a pneumatic starting and auxiliary device (PSAD) using bellows pneumatic cylinders and a ratchet mechanism to facilitate start-up and reduce inrush currents in such machines. **Materials and methods.** An experimental setup simulating a ball mill's operation was designed. The methodology involved investigating the impact of the limit switch position, which controls the main engine, on the inrush current value. The experiment then fixed this position and altered the pneumatic system pressure in 0.1 MPa increments, from 0.1 MPa to 0.4 MPa, recording the resulting inrush current changes. **Results.** The study shows the impact from pulse and follow-up current to motor terminals, and the pre-work of PSAD in step-by-step mode. The result showed significant reduction in the initial current peaks due to the starting process of the main engine. The optimal limit switch position was at the beginning of the stroke of one cylinder, providing maximum force at minimal deformation. Increasing pressure led to inrush current decreases. **Discussion.** These results affirm pneumatic power systems and implementation in starting equipment, but there are complexities with precise adjustment and the requirement for good manufacturing and assembling qualities. These additional findings provide a more detailed evaluation of factors influencing PSAD performance. In particular, selecting the ideal diameter for supply piping is crucial. **Conclusion.** PSAD using bellows pneumatic cylinders and a ratchet mechanism is a promising approach for heavy rotor machines. Tests displayed efficiency in reducing inrush currents. Pre-work in step-by-step mode, combined with pressure increase, lowers starter loads on the drive. Precise adjustment is critical, otherwise, system performance and reverse drum rotation will result. **Resume.** This research establishes optimal PSAD parameters (limit switch placement, pneumatic pressure) for minimal inrush current. Results aid PSAD implementation in mining/metallurgy, enhancing reliability, energy efficiency, and decreasing costs. Still, deployment should consider adjusting difficulties and needs of producing and meeting components.

Keywords: pneumatic drive, starting and auxiliary device, heavy rotor, ball mill, starting currents, bellows pneumatic cylinder, ratchet mechanism, start-up optimization

Acknowledgments/Funding: The study was conducted under a grant funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan No. AP19177970 «Improvement of the technology for manufacturing a pump part body from fiberglass».

For citation: Igbaeva A.E., Yelemessov K.K., Baskanbayeva D.D., Begassilova N.B. Pneumatic starting auxiliary device for optimising the start-up of mining machines with heavy rotors. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 214–225. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-214-225.

Введение

В современном мире технологические машины с тяжелым ротором играют ключевую роль в различных отраслях промышленности, от горно-металлургического комплекса до энергетики. Эти агрегаты, такие как шаровые мельницы, печи, на-

сосы и компрессоры, обеспечивают выполнение сложных и трудоемких процессов, необходимых для производства широкого спектра продукции [1–3]. Однако эксплуатация этих машин сопряжена с рядом серьезных проблем, связанных с их значительной инерцией и тяжелыми условиями работы.

Одной из наиболее острых проблем является обеспечение надежного и эффективного пуска, поскольку именно в этот момент на приводные устройства и опорные узлы приходится максимальная нагрузка. Пуск таких машин сопровождается резкими скачками крутящего момента и пусковых токов, что приводит к повышенному износу оборудования, частым отказам и значительным эксплуатационным расходам [4–6]. Кроме того, пусковые режимы могут вызывать просадку напряжения в электросети, что создает дополнительные трудности при эксплуатации и требует принятия специальных мер предосторожности. В связи с этим, оптимизация пусковых режимов технологических машин с тяжелым ротором является актуальной и важной задачей, направленной на повышение их надежности, энергоэффективности и экономической целесообразности [7–9].

Существуют различные подходы к решению проблемы облегченного пуска технологических машин с тяжелым ротором. Одним из распространенных методов является использование устройств плавного пуска (УПП) с применением частотных регуляторов. УПП позволяют плавно увеличивать напряжение, подаваемое на обмотки двигателя, обеспечивая постепенный разгон до номинальной скорости вращения без резких скачков момента и тока [10–13].

Однако, УПП эффективны только в определенном диапазоне эксплуатационных режимов, когда ротор машины уже набрал некоторую частоту вращения. На пусковых режимах их применение ограничено из-за высоких пусковых токов. Другим подходом является применение гидроаккумулирующих вспомогательных пусковых устройств. Эти устройства накапливают энергию в гидравлической жидкости и высвобождают ее в момент пуска, обеспечивая дополнительный крутящий момент. Однако гидроаккумулирующие системы отличаются сложностью конструкции и повышенными требованиями к эксплуатации, что снижает их надежность и увеличивает эксплуатационные расходы. Кроме того, гидроприводы требуют использования рабочей жидкости, что может быть нежелательно с экологической точки зрения [14–16].

В последние годы все больше внимания уделяется использованию пневматических приводов в различных отраслях промышленности. Пневматические приводы обладают рядом преимуществ, таких как простота конструкции, надежность, безопасность и относительно низкая стоимость.

Одним из перспективных направлений является использование пневматических камерных систем в качестве пуско-вспомогательных устройств (ПВПУ) для технологических машин с тяжелым ротором. ПВПУ создают силовой импульс для преодоления сил трения покоя и выборки зазоров в зубчатых зацеплениях на этапе пуска, после чего на обмотку возбуждения ротора подается постоянное напряжение. В некоторых случаях ПВПУ могут выполнять функцию главного привода, особенно в тихоходных технологических машинах. Использование ПВПУ позволяет снизить нагрузку на штатный привод в момент пуска, что приводит к уменьшению пусковых токов, повышению надежности оборудования и снижению эксплуатационных расходов [17–19].

Однако, применение пневматических приводов имеет и свои ограничения. Одним из основных недостатков является относительно низкий КПД пневмоприводов, который обычно не превышает 5–15 %. Это обусловлено большими потерями энергии в компрессорах и пневмодвигателях, а также высокой стоимостью пневмоэнергии. По этой причине пневмоприводы не применяются в машинах с длительным режимом работы и большой мощностью, за исключением условий, исключающих применение электроэнергии, например в горнодобывающих машинах в шахтах.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка инвариантных пневматических приводов и исследование влияния воздействия пневматического привода независимо от типа камерной системы на формирование пусковых токов (импульсов). Разработка эффективных ПВПУ требует глубокого понимания физических процессов, происходящих в пневматических системах, а также учета особенностей работы технологических машин с тяжелым ротором. Необходимо учитывать множество факторов, таких как давление воздуха, объем камер, скорость перемещения рабочих органов, характеристики механических передач и т. д. Расчет работы ПВПУ в производственных условиях достаточно сложен и требует разработки специальных методик, учитывающих все эти факторы. Существующие методики рассматривают частные случаи их применения и содержат большое количество эмпирических коэффициентов, ограничивающих их широкое применение [20, 21].

Цель исследования: определение оптимальных параметров пуско-вспомогательного пневма-

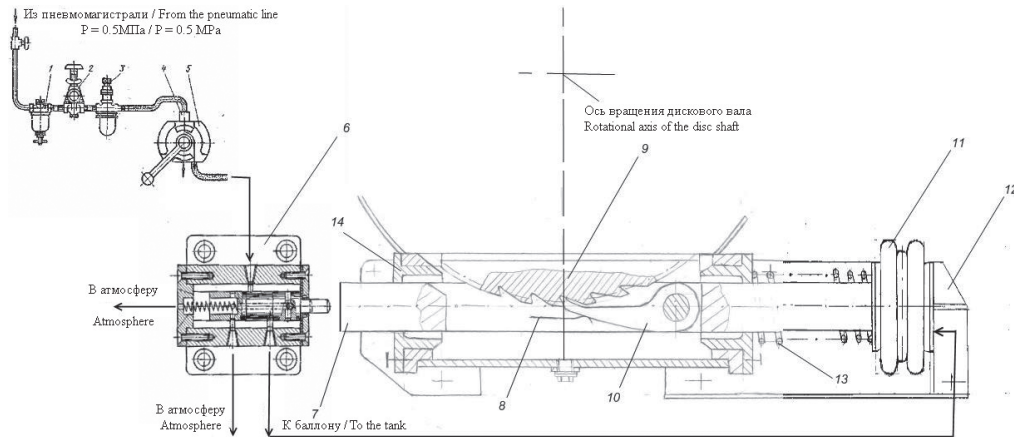


Рис. 1. Схема пневмобаллонного привода вакуумфилтра: 1 – фильтр грубой очистки воздуха; 2 – редуктор давления (регулятор давления); 3 – фильтр тонкой очистки воздуха (влажнотделитель); 4 – маслораспылитель (лубрикатор); 5 – пневмораспределитель (педальный клапан управления); 6 – пневмоцилиндр (воздушная камера управления); 7 – шток пневмоцилиндра; 8 – рычаг механического привода; 9 – шибер; 10 – корпус шиберного механизма; 11 – пневмобаллон; 12 – крышка корпуса пневмобаллона; 13 – пружина возвратная

Fig. 1. Scheme of pneumatic cylinder drive of vacuum filter: 1 – coarse air filter; 2 – pressure reducer (pressure regulator); 3 – fine air filter (moisture separator); 4 – oil sprayer (lubricator); 5 – pneumatic distributor (foot control valve); 6 – pneumatic cylinder (air control chamber); 7 – pneumatic cylinder rod; 8 – lever of mechanical drive; 9 – schieber; 10 – housing of the gate mechanism; 11 – pneumatic cylinder; 12 – cover of the pneumatic cylinder housing; 13 – return spring

тического привода для обеспечения надежного и энергоэффективного пуска технологических машин с тяжелым ротором, а также снижения пусковых токов, что крайне важно для горнодобывающего и перерабатывающего оборудования.

Объекты исследований

В данном исследовании в качестве объекта пристального внимания выбран пуско-вспомогательный пневматический привод (ПВПУ) на базе сильфонных пневмобаллонов с храповым механизмом. Эта конструкция представляет собой один из вариантов вспомогательных приводов, призванных облегчить пуск технологических машин с тяжелым ротором.

ПВПУ (рис. 1 и 2) состоит из сильфонных пневмобаллонов, являющихся источником энергии для создания пускового импульса (используется два пневмобаллона, работающих попеременно, серии И02 ТУ 38 10496-80 с диаметром опорной части $\varnothing = 200$ мм и ходом $\delta = 0 \dots 200$ мм, рассчитанные на давление до 0,5 МПа), храпового механизма, преобразующего возвратно-поступательного движения штока пневмобаллона во вращательное движение приводного вала (состоящего из храпового колеса, собачек и водила), толкателей, передающих усилие от пневмобаллонов к храповому механизму, собачек, обеспечивающих одностороннее

вращение храпового колеса, рамы, служащей для размещения и фиксации всех элементов привода, и блока управления, обеспечивающего автоматическое управление работой привода (пневматический золотник, конечные выключатели и другие элементы пневмоавтоматики).

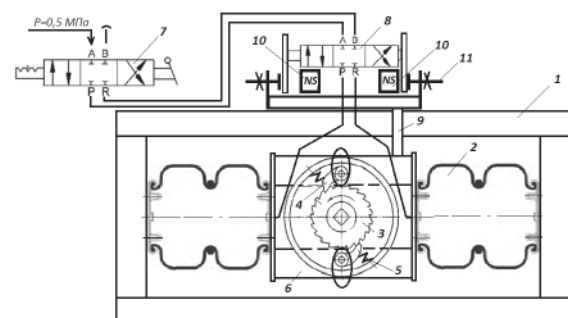


Рис. 2. Схема пневматического модуля: 1 – рама из швеллера № 12; 2 – пневматический баллон фирмы «FABIO» 2DC-225-3C; 3 – храповое колесо; 4 – собачка; 5 – пружина; 6 – водило; 7 – поворотный запорный клапан; 8 – пневматический золотник (пневмораспределитель); 9 – кронштейн толкателей; 10 – постоянные магниты; 11 – регулируемые упоры

Fig. 2. Pneumatic module diagram: 1 – frame made of #12 channel; 2 – FABIO 2DC-225-3C pneumatic cylinder; 3 – ratchet wheel; 4 – pawl; 5 – spring; 6 – carrier; 7 – rotary shut-off valve; 8 – pneumatic spool (pneumatic distributor); 9 – pusher bracket; 10 – permanent magnets; 11 – adjustable stops

Принцип работы основан на попеременном нагнетании воздуха в пневмобаллоны 2, при котором раздвигающийся баллон толкает шток храпового механизма 3. Собачка 4 проворачивает храповое колесо 3, конечное положение баллона переключает золотник 8, выпуская воздух и запуская второй баллон, возвращающий систему в исходное положение и зацепляющий собачку за следующий зуб. Таким образом, происходит пошаговое вращение приводного вала.

В данном исследовании ПВПУ на базе сильфонных пневмобаллонов с храповым механизмом будет рассматриваться как универсальное решение для облегчения пуска тяжелых роторных машин в горной промышленности. В рамках исследования ПВПУ будет использован для оценки эффективности снижения пусковых токов и механических нагрузок на штатный привод технологических машин, разработки методики выбора оптимальных параметров ПВПУ для различных типов технологических машин, оценки надежности и долговечности ПВПУ в условиях эксплуатации, близких к реальным, верификации математической модели пускового процесса, и изучения влияния внешних факторов.

Данное исследование направлено на создание эффективного и универсального решения для облегчения пуска технологических машин с тяжелым ротором. ПВПУ на базе сильфонных пневмобаллонов с храповым механизмом может быть использовано для шаровых мельниц

(МШР, МШЦ), таких как МШР-2,7х3,6 и МШЦ 2700х3600, где тяжелый барабан с загруженным измельчаемым материалом требует значительного пускового момента.

Методы исследования

Экспериментальные работы, представленные в данной статье, были направлены на изучение эффективности использования пневматического пуско-вспомогательного устройства (ПВПУ) для облегчения пуска шаровой мельницы и снижения пусковых токов.

Эксперименты проводились в два основных этапа. На первом этапе исследовалось влияние положения конечного выключателя, управляющего подачей напряжения на основной двигатель, на величину пускового тока. Варьируя положением конечного выключателя, определялся оптимальный момент для включения основного двигателя, стремясь к минимизации пускового тока. На втором этапе, зафиксировав положение конечного выключателя в оптимальной точке, изменяли давление в пневмосистеме ПВПУ с шагом 0,1 МПа в диапазоне от 0,1 до 0,4 МПа, регистрируя соответствующие изменения пускового тока. Перед каждым запуском барабан шаровой мельницы устанавливался в определенное положение, чтобы обеспечить воспроизводимость результатов.

Для проведения экспериментов была разработана специальная экспериментальная установка (рис. 3), основу которой составляла лабораторная



а/а



б/б

Рис. 3. Стенд на базе лабораторной барабанной мельницы:

а – внешний вид стенда; б – узел подключения пуско-вспомогательного привода

Fig. 3. Bench on the basis of a laboratory drum mill:

а – external view of the bench; б – connection of the start-up and auxiliary drive unit

двухкамерная мельница МШЦ 700 × 1000. Мельница была установлена на подшипниковые опоры, что позволяло имитировать свободное вращение тяжелого ротора. В качестве основного привода использовался электромеханический редукторный привод, включающий в себя трехфазный асинхронный электродвигатель переменного тока мощностью 3 кВт и частотой вращения 1500 об/мин. ПВПУ, являющееся объектом исследования, было размещено с противоположной стороны от основного привода и соединено с удлиненной цапфой барабана мельницы через упругую муфту. Само ПВПУ состояло из двух сильфонных пневмобаллонов серии ИО2 ТУ 38 10496-80, работающих попеременно, каждый с диаметром опорной части $\varnothing = 200$ мм и ходом $\delta = 0 \dots 200$ мм, рассчитанных на давление до 0,5 МПа. ПВПУ также включало храповый механизм, преобразующий возвратно-поступательное движение пневмобаллонов во вращательное движение приводного вала.

Для управления работой ПВПУ была разработана принципиальная схема, обеспечивающая возможность работы в автоматическом режиме. Данная схема включала блок управления подачей воздуха (кран управления подачей воздуха, редуктор, манометры, влагоотделитель), воздухораспределитель золотниковый, пневмовыключатели конечные, выключатель конечный из электрической схемы управления двигателем и систему трубопроводов. Давление в пневмосистеме контролировалось и регулировалось

с помощью блока управления подачей воздуха. Замеры пускового тока проводились с использованием прибора «Баланс-СК2!», который позволял регистрировать ваттметрграммы, отображающие изменение токовой составляющей во времени.

Результаты исследования и обсуждение

Экспериментальная работа проводилась на специально разработанном стенде, имитирующем условия эксплуатации шаровой мельницы, что позволило получить данные, максимально приближенные к реальным (рис. 3).

Экспериментальная установка представляла собой лабораторную двухкамерную мельницу МШЦ 700 × 1000, дооборудованную ПВПУ.

Мельница опиралась на подшипниковые опоры, что позволяло имитировать свободное вращение тяжелого ротора. В качестве основного, или центрального, привода был использован электромеханический редукторный привод с трёхфазным асинхронным электродвигателем переменного тока мощностью 3 кВт и частотой вращения 1500 об/мин. ПВПУ было размещено с противоположной стороны от основного привода и подключено к удлиненной цапфе барабана через упругую муфту.

Схема подключения ПВПУ к мельнице приведена на рис. 3, б.

Общий вид стенда представлен на рис. 4, демонстрируя расположение основных элементов.



Рис. 4. Общий вид испытательного стенда шаровой мельницы, подключенной к ПВПУ

Fig. 4. General view of the ball mill test bench connected to the PVPU

Для управления работой ПВПУ была разработана принципиальная схема управления, обеспечивающая возможность работы в автоматическом режиме. Эта схема, представленная на рис. 5, включала блок управления подачей воздуха (кран управления подачей воздуха, редуктор, манометры, влагоотделитель), воздухораспределитель золотниковый, пневмовыключатели конечные, выключатель конечный из электрической схемы управления двигателем и систему трубопроводов. Данная схема позволяла контролировать давление воздуха, поступающего в пневмобаллоны, а также управлять моментом включения и выключения подачи воздуха.

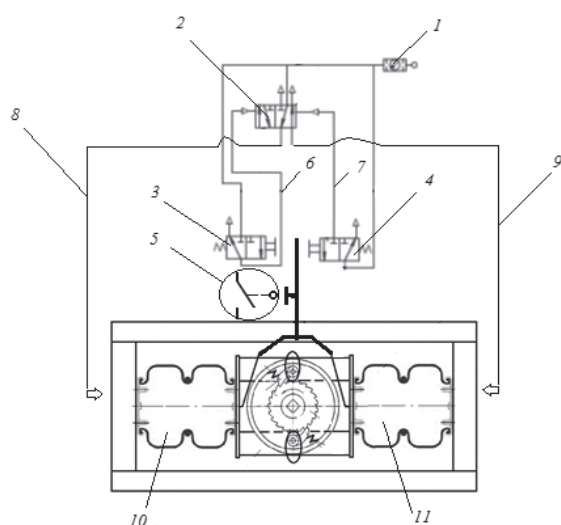


Рис. 5. Принципиальная схема управления стендом.

1 – блок управления подачей воздуха (кран управления подачей воздуха, редуктор, манометры, влагоотделитель); 2 – воздухораспределитель золотниковый; 3, 4 – пневмовыключатели конечные; 5 – выключатель конечный из электрической схемы управления двигателем (SB1); 6, 7, 8, 9 – трубопроводы напорные; 10, 11 – пневматические баллоны

Fig. 5. Principle scheme of bench control. 1 – air supply control unit (air supply control valve, reducer, pressure gauges, moisture eliminator); 2 – spool air distributor; 3, 4 – pneumatic limit switches; 5 – limit switch from the electric motor control circuit (SB1); 6, 7, 8, 9 – pressure pipelines; 10, 11 – pneumatic cylinders.

Испытания проводились в два этапа. На первом этапе исследовали влияние точки размещения конечного выключателя на величину пускового тока. Варьируя положение конечного выключателя, определяли оптимальный момент для подачи напряжения на основной двигатель мельницы, стремясь к минимальному значению

пускового тока. На втором этапе, после фиксации положения конечного выключателя в оптимальной точке, варьировали давление в пневмосистеме с шагом от 0,1 до 0,4 МПа, фиксируя изменение величины пускового тока. Перед каждым пуском барабан устанавливался в положение, при котором самая тяжелая его часть находилась в нижней точке, обеспечивая воспроизводимость результатов. Важным моментом является то, что для управления применялась схема приведенная на рис. 5, то есть воздух подается в оба балона поочередно, что формирует пошаговое движение.

Результаты первого этапа исследования показали, что существенное влияние оказывает не только сам факт импульса с последующей подачей пускового тока на клеммы электродвигателя, но и предварительная работа ПВПУ в пошаговом режиме, обеспечивающая несколько циклов прокрутки барабана без подключения электрической схемы. Наибольшее снижение пускового тока наблюдалось при размещении конечного выключателя в самом начале хода раздвижки одного из баллонов. Это объясняется тем, что в самом начале хода, когда стенки сифона еще не деформированы, создается максимальное усилие. Кроме того, исключались ударные нагрузки в механических передачах штатного привода, а также преодолевалось трение покоя в опорных узлах ротора.

На втором этапе при варьировании давления в пневмосистеме было установлено, что с увеличением давления происходит снижение пускового тока. Так, при давлении 0,1 МПа был зафиксирован пусковой ток 8 А, при 0,2 МПа – 6 А, а при 0,4 МПа – 5,5 А. Это свидетельствует о том, что увеличение энергии, запасаемой в сжатом воздухе, приводит к более эффективному пусковому импульсу, облегчающему разгон ротора мельницы. Замеры пускового тока проводились с помощью прибора «Баланс-СК2», который позволял регистрировать ваттметрграммы, визуальное отображающие изменение токовой составляющей во времени. Визуальный анализ ваттметрграмм показал, что использование ПВПУ не только снижает пиковое значение пускового тока, но и изменяет характер его нарастания, делая его более плавным. Это, в свою очередь, снижает вероятность повреждения обмоток двигателя и механических элементов привода [18–21].

Полученные результаты можно сопоставить с данными других исследований в области приме-

нения пневматических приводов для облегчения пуска технологического оборудования [22–25]. Результаты исследования, проведенного в рамках настоящей работы, также согласуются с общими принципами работы пневматических систем, где рассматриваются вопросы газодинамики и управления пневмоприводами.

Однако, следует отметить, что прямое сравнение полученных результатов с данными других исследований затруднено из-за различий в конструкциях ПВПУ, типах технологического оборудования и условиях проведения экспериментов. Тем не менее, общие тенденции, наблюдаемые в различных работах, подтверждают перспективность использования пневматических приводов в качестве вспомогательных пусковых устройств для технологических машин с тяжелым ротором.

Дополнительные результаты, полученные в рамках данного исследования, позволили более детально оценить влияние различных факторов на эффективность ПВПУ. В частности, было установлено, что важную роль играет выбор оптимального диаметра подводящих трубопроводов: малый диаметр (<10 мм) ограничивает скорость подачи воздуха в пневмобаллоны, снижая энергию пускового импульса, большой диаметр (>30 мм) приводит к увеличению расхода воздуха и снижению КПД. Оптимальное значение диаметра подводящих трубопроводов определяется характеристиками пневмосистемы и объемом пневмобаллонов.

Нами были исследованы трубопроводы с внутренним диаметром от 10 до 30 мм и оптимальное значение составило 18 мм для данной системы. Также, немаловажным фактором оказалась точная регулировка конечных пневмовыключателей. Неверно настроенные пневмовыключатели приводят либо к неполному наполнению пневмоцилиндров, либо к обратному действию системы (вместо пошагового движения вращение барабана начинало движение в обратном направлении).

Таким образом можно констатировать факт, что ПВПУ сложная к точной настройке и требовательная к качеству изготовления и сборки.

Заключение

1. Проблема оптимизации пусковых режимов технологических машин с тяжелым ротором, таких как шаровые мельницы, является актуальной и имеет важное значение для повышения надежности и энергоэффективности промышленного обо-

рудования. Высокие пусковые токи и скачки крутящего момента приводят к повышенному износу, частым отказам и просадкам напряжения в сети.

2. Предлагаемое решение – использование пневматического пуско-вспомогательного устройства (ПВПУ) на базе сильфонных пневмобаллонов с храповым механизмом – представляет собой перспективный подход к облегчению пуска тяжелых роторных машин. Этот метод позволяет создать силовой импульс для преодоления трения покоя и выборки зазоров, снижая нагрузку на штатный привод.

3. Экспериментальное исследование, проведенное на специально разработанном стенде, имитирующем условия эксплуатации шаровой мельницы, продемонстрировало эффективность ПВПУ в снижении пусковых токов. Было показано, что предварительная работа ПВПУ в пошаговом режиме, без подачи напряжения на основной двигатель, оказывает существенное влияние на уменьшение пиковых значений пускового тока.

4. Варьирование давления в пневмосистеме ПВПУ показало, что его увеличение приводит к более эффективному пусковому импульсу и, как следствие, к дальнейшему снижению пускового тока. Оптимальное давление позволяет запасти достаточно энергии в сжатом воздухе для облегчения разгона ротора мельницы.

5. Точная настройка и качество изготовления элементов ПВПУ, а именно правильный выбор диаметра подводящих трубопроводов и точная регулировка конечных пневмовыключателей, критически важны для достижения оптимальной производительности системы. Неправильные настройки могут привести к неэффективной работе системы и даже к обратному вращению барабана. ПВПУ требует внимания к деталям при сборке и настройке.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследования эффективности применения пневматического пуско-вспомогательного привода (ПВПУ) на базе сильфонных пневмобаллонов с храповым механизмом в качестве способа снижения пусковых токов и облегчения пуска технологических машин с тяжелым ротором, в частности шаровых мельниц, широко используемых в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности. Описаны конструкция стенда и методика проведения экспериментальных исследований.

2. Были установлены оптимальные параметры работы ПВПУ, такие как положение конечного выключателя и давление в пневмосистеме, необходимые для достижения минимальных значений пускового тока. Установлено, что предварительная работа ПВПУ в пошаговом режиме, обеспечивающая несколько циклов прокрутки барабана до включения основного двигателя, и увеличение давления сжатого воздуха в пневмобаллонах способствуют значительному снижению пусковых нагрузок на штатный привод, а также устранению ударных нагрузок в механических передачах и преодолению трения покоя в опорных узлах ротора.

3. Результаты исследования могут быть полезными при разработке и внедрении ПВПУ на предприятиях горно-металлургического комплекса и в других отраслях промышленности, где эксплуатируются технологические машины с тяжелым ротором.

4. Применение ПВПУ позволит повысить надежность и долговечность оборудования, снизить потребление электроэнергии на пусковых режимах, уменьшить эксплуатационные расходы, а также снизить риск просадок напряжения в электрической сети предприятия. Однако, при внедрении необходимо учитывать сложность настройки ПВПУ и требования к качеству изготовления и сборки его компонентов.

Список литературы

1. Pashkov E.N. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66(1). – P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/66/1/012014>.
2. Tananykhin D. Scientific and Methodological Support of Sand Management During Operation of Horizontal Wells // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2024. – V. 37(07). – P. 1395–1407. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.07a.17>.
3. Zaurbekov S.A., Chugunova N.I., Tatichanova G.S., Nursultanov M.E. Characterisation of solid sulfur in the Tengizchevroil // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2018. – V. 53(1). – P. 37–42.
4. Podoprigora D.G., Byazrov R.R., Lagutina M.A., Arabov D.V., Galimov V.V., Ermolin D.S. A novel integrated methodology for screening, assessment and ranking of promising oilfields for polymer floods // Advances in Geo-Energy Research. – 2024. – V. 12(1). – P. 8–21. <https://doi.org/10.46690/ager.2024.04.02>.
5. Kondrakhin V.P., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Valuev D.V., Mengxu Q. Mathematical Modeling and Multi-Criteria Optimization of Design Parameters for the Gyrotory Crusher // Mathematics. – 2023. – V. 11(10). – P. 2345. <https://doi.org/10.3390/math11102345>.
6. Korchmit A.V., Drozdov Y.Yu. Casting quality enhancement of bushings made of foundry aluminium bronzes // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 685. – P. 459–462. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.685.459>.
7. Kaliev B.Z., Muzaparov Z.M., Kadyrov Z.N., Kochetkov A.V. Proper selection of drill string bottom-hole assembly for directional well drilling // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – V. 50(9-10). – P. 583–587. <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9945-3>.
8. Tananykhin D., Korolev M., Stecyuk I., Grigorev M. An Investigation into Current Sand Control Methodologies Taking into Account Geomechanical, Field and Laboratory Data Analysis // Resources. – 2021. – V. 10. – P. 125. <https://doi.org/10.3390/resources10120125>.
9. Handam A. Multivariate analysis of efficiency of energy complexes based on renewable energy sources in the system power supply of autonomous consumer // International Journal of Advanced and Applied Sciences. – 2022. – V. 9(5). – P. 109–118. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2022.05.014>.
10. Ahmadi M.H., Alizadeh S.M., Hadi S.K., Iliushin P., Lekomtsev A. Laboratory evaluation of hybrid chemical enhanced oil recovery methods coupled with carbon dioxide // Energy Reports. – 2021. – V. 7. – P. 960–967. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.02.005>.
11. Smadi T.A.A. Computer application using low cost smart sensor // International Journal of Computer Aided Engineering and Technology. – 2012. – V. 4(6). – P. 567–579. <https://doi.org/10.1504/IJCAET.2012.049572>.
12. Zaurbekov K.S., Zaurbekov S.A., Sladkovsky A.V., Balgayev D.Y. Hydrodynamic Simulation of the Steam-Assisted Gravity Drainage Method for Different Reservoir Thicknesses Using Eclipse // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2023. – V. 3(459). – P. 60–69. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.299>.
13. Abramovich B.N., Sychev Y.A., Pelenev D.N. Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 327(5). – P. 052027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052027>.
14. Akanova G.K., Balgayev D.Y. Extension of operational life of ball valves in piston and plunger pumps // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2021. – V. 2021(7). – P. 165–175. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_7_0_165.
15. Zapar W.M., Gaeid K.S., Mokhlis H.B. Review of the Most Recent Work in Fault Tolerant Control of Power

- Plants 2018–2022 // Tikrit Journal of Engineering Sciences. – 2023. – V. 30(2). – P. 103–113. <https://doi.org/10.25130/tjes.30.2.11>.
16. Pryalukhin A.F., Martyshev N.V., Malozyomov B.V., Klyuev R.V., Filina O.A., Konyukhov V.Y., Makarov A.A. Improvement of Operational Reliability of Units and Elements of Dump Trucks Taking into Account the Least Reliable Elements of the System // World Electric Vehicle Journal. – 2024. – V. 15(8). – P. 365. <https://doi.org/10.3390/wevj15080365>
 17. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Demin A.Y. Geospatial Clustering in Smart City Resource Management: An Initial Step in the Optimisation of Complex Technical Supply Systems // Smart Cities. – 2025. – No. 8. – P. 14. <https://doi.org/10.3390/smartcities8010014>.
 18. Al Smadi T., Al-Maitah M. Artificial intelligent technology for safe driver assistance system // International Journal of Computer Aided Engineering and Technology. – 2020. – V. 13(1-2). – P. 183–191. <https://doi.org/10.1504/IJCAET.2020.108112>.
 19. Zaurbekov K., Syzdykov A., Zaurbekov S., Ismailova J. Investigation of the effect of a high-speed steam jet on viscous oil using the SAGD method // Chemical Papers. – 2024. – No. 78(8). – P. 4867–4873. <https://doi.org/10.1007/s11696-024-03436-z>.
 20. Tananykhin D., Palyanitsina A., Rahman A. Analysis of Production Logging and Well Testing Data to Improve the Development System for Reservoirs with Complex Geological Structure // Procedia Environmental Science, Engineering and Management. – 2020. – V. 7. – P. 629–648.
 21. Korchmit A.V., Drozdov Y.Yu. The influence of the pouring temperature on the structure and properties of copper metal alloys // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 685. – P. 450–454. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.685.450>.
 22. Podoprigora D.G., Sabukevich V.S., Korobov G.Y., Nguen V.T. Justification of Developed System Measures to Increase Productivity of Wells in Eastern Part of Pechora Sea Oil Field // International Journal of Engineering. – 2024. – V. 37(11). – P. 2303–2313. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.11b.15>.
 23. Podoprigora D., Korobov G., Bondarenko A. Acid stimulation technology for wells drilled the low-permeable high-temperature terrigenous reservoirs with high carbonate content // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – P. 2680–2696.
 24. Fomin S.I., Ljeljen A. Experience of operation of surface miners in opencast mining of cement raw materials. // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. – 2025. – No. 1. – P. 128–140. https://doi.org/10.25018/0236_14_93_2025_1_0_128.
 25. Fomin S.I., Ljeljen A. Improvement of the methods for determining ore losses when designing cement raw material deposit mining by surface miner combines // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2024. – V. 335(2). – P. 202–208. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/2/4203>.
-
- ## References
1. Pashkov E.N. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66(1), p. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/66/1/012014>.
 2. Tananykhin D. Scientific and Methodological Support of Sand Management During Operation of Horizontal Wells. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 2024, vol. 37(07), pp. 1395–1407. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.07a.17>.
 3. Zaurbekov S.A., Chugunova N.I., Tatichanova G.S., Nursultanov M.E. Characterisation of solid sulfur in the Tengizchevroil. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2018, vol. 53(1), pp. 37–42.
 4. Podoprigora D.G., Byazrov R.R., Lagutina M.A., Arabov D.V., Galimov V.V., Ermolin D.S. A novel integrated methodology for screening, assessment and ranking of promising oilfields for polymer floods. *Advances in Geo-Energy Research*, 2024, vol. 12(1), pp. 8–21. <https://doi.org/10.46690/ager.2024.04.02>.
 5. Kondrakhin V.P., Martyshev N.V., Klyuev R.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Valuev D.V., Mengxu Q. Mathematical Modeling and Multi-Criteria Optimization of Design Parameters for the Gyratory Crusher. *Mathematics*, 2023, vol. 11(10), pp. 2345. <https://doi.org/10.3390/math11102345>.
 6. Korchmit A.V., Drozdov Y.Yu. Casting quality enhancement of bushings made of foundry aluminium bronzes. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 459–462. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.685.459>.
 7. Kaliev B.Z., Muzaparov Z.M., Kadyrov Z.N., Kochetkov A.V. Proper selection of drill string bottom-hole assembly for directional well drilling. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2015, vol. 50(9-10), pp. 583–587. <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9945-3>.
 8. Tananykhin D., Korolev M., Stecyuk I., Grigorev M. An Investigation into Current Sand Control Methodologies Taking into Account Geomechanical, Field and Laboratory Data Analysis. *Resources*, 2021, vol. 10, pp. 125. <https://doi.org/10.3390/resources10120125>.
 9. Handam A. Multivariate analysis of efficiency of energy complexes based on renewable energy sources in the system power supply of autonomous consumer. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2022, vol. 9(5), pp. 109–118. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2022.05.014>.
 10. Ahmadi M.H., Alizadeh S.M., Hadi S.K., Iliushin P., Lekomtsev A. Laboratory evaluation of hybrid chemical

- enhanced oil recovery methods coupled with carbon dioxide. *Energy Reports*, 2021, no. 7, pp. 960–967. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.02.005>.
11. Smadi T.A.A. Computer application using low cost smart sensor. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 2012, vol. 4(6), pp. 567–579. <https://doi.org/10.1504/IJCAET.2012.049572>.
 12. Zaurbekov K.S., Zaurbekov S.A., Sladkovsky A.V., Balgayev D.Y. Hydrodynamic Simulation of the Steam-Assisted Gravity Drainage Method for Different Reservoir Thicknesses Using Eclipse. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2023, vol. 3(459), pp. 60–69. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.299>.
 13. Abramovich B.N., Sychev Y.A., Pelenev D.N. Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327(5), p. 052027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052027>.
 14. Akanova G.K., Balgayev D.Y. Extension of operational life of ball valves in piston and plunger pumps. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2021, vol. 2021(7), pp. 165–175. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_7_0_165.
 15. Zapar W.M., Gaed K.S., Mokhlis H.B. Review of the Most Recent Work in Fault Tolerant Control of Power Plants 2018–2022. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 2023, vol. 30(2), pp. 103–113. <https://doi.org/10.25130/tjes.30.2.11>.
 16. Pryalukhin A.F., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Klyuev R.V., Filina O.A., Konyukhov V.Y., Makarov A.A. Improvement of Operational Reliability of Units and Elements of Dump Trucks Taking into Account the Least Reliable Elements of the System. *World Electric Vehicle Journal*, 2024, vol. 15(8), p. 365. <https://doi.org/10.3390/wevj15080365>.
 17. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushovich A.E., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Demin A.Y. Geospatial Clustering in Smart City Resource Management: An Initial Step in the Optimisation of Complex Technical Supply Systems. *Smart Cities*, 2025, no. 8, p. 14. <https://doi.org/10.3390/smartcities8010014>.
 18. Al Smadi T., Al-Maitah M. Artificial intelligent technology for safe driver assistance system. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 2020, vol. 13(1-2), pp. 183–191. <https://doi.org/10.1504/IJCAET.2020.108112>.
 19. Zaurbekov K., Syzdykov A., Zaurbekov S., Ismailova J. Investigation of the effect of a high-speed steam jet on viscous oil using the SAGD method. *Chemical Papers*, 2024, no. 78(8), pp. 4867–4873. <https://doi.org/10.1007/s11696-024-03436-z>.
 20. Tananykhin D., Palyanitsina A., Rahman A. Analysis of Production Logging and Well Testing Data to Improve the Development System for Reservoirs with Complex Geological Structure. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 2020, vol. 7, pp. 629–648.
 21. Korchmit A.V., Drozdov Y.Yu. The influence of the pouring temperature on the structure and properties of copper metal alloys. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 450–454. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.685.450>.
 22. Podoprighora D.G., Sabukevich V.S., Korobov G.Y., Nguen V.T. Justification of Developed System Measures to Increase Productivity of Wells in Eastern Part of Pechora Sea Oil Field. *International Journal of Engineering*, 2024, vol. 37(11), pp. 2303–2313. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.11b.15>.
 23. Podoprighora D., Korobov G., Bondarenko A. Acid stimulation technology for wells drilled the low-permeable high-temperature terrigenous reservoirs with high carbonate content. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, pp. 2680–2696.
 24. Fomin S.I., Ljeljen A. Experience of operation of surface miners in opencast mining of cement raw materials. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2025, no. 1, pp. 128–140. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_1_0_128.
 25. Fomin S.I., Ljeljen A. Improvement of the methods for determining ore losses when designing cement raw material deposit mining by surface miner combines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335(2), pp. 202–208. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/2/4203>.

Сведения об авторах

Избаева Акжаркын Есентаевна — доктор технических наук, старший преподаватель кафедры технологических машин и оборудования, Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, ул. Сатпаева, 22, a.igbayeva@satbayev.university



Information about the authors

Akzharkyn E. Igbayeva — Dr. Sc., Senior Lecturer, Department of Technological Machines and Equipment, Institute of Power Engineering and Mechanical Engineering named after A. Burkitbaev, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayeva str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, Kazakhstan, a.igbayeva@satbayev.university

Елемесов Касым Коптлеуевич – кандидат технических наук, профессор, директор, Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, ул. Сатпаева, 22, k.yelemessov@satbayev.university



Kassym K. Yelemessov – Cand. Sc., Professor, Director of the Institute of Power Engineering and Mechanical Engineering named after A. Burkitbaev, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayeva str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, k.yelemessov@satbayev.university

Басканбаева Динара Джумабаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, ул. Сатпаева, 22, d.baskanbayeva@satbayev.university



Dinara D. Baskanbayeva – Cand. Sc., Associate Professor Department of Department of Technological Machines and Equipment, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayeva str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, d.baskanbayeva@satbayev.university

Бегасилова Нурай Бакытжановна – научный ассистент кафедры механической и аэрокосмической инженерии, Назарбаев Университет, Казахстан, 010000, г. Астана, пр. Кабанбай Батыра, 53, nuray.begassilova@nu.edu.kz



Nuray B. Begassilova – research assistant at the Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Nazarbayev University, 53, Kabanbay Batyr Ave., Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, nuray.begassilova@nu.edu.kz

Автор-корреспондент: Басканбаева Д.Д., d.baskanbayeva@satbayev.university

Corresponding author: Baskanbayeva D.D., d.baskanbayeva@satbayev.university

Критерии авторства

Игбаева А.Е. – проведение экспериментов, получение данных и их обработка, проведение граф-аналитического и математического метода обработки, подготовка и написание статьи; Елемесов К.К. – организация экспериментов, техническая проработка вопроса, анализ результатов; Басканбаева Д.Д. – проведение экспериментальных работ и подготовка статьи; Бегасилова Н.Б. – проведение экспериментальных работ и подготовка статьи.

Contribution of the authors

Igbaeva A.E. – conducting experiments, obtaining data and their processing, conducting a graph-analytical and mathematical method of processing, preparing and writing an article; Elemesov K.K. – organization of experiments, technical study of the issue, analysis of the results; D. D. Baskanbayeva – conducting experimental work and preparing an article; N.B. Begassilova – experimental work and preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Получена редакцией 23.01.2025
Получена после рецензии 11.02.2025
Принята к печати 28.02.2025

Received: 23.01.2025
Revised: 11.02.2025
Accepted: 28.02.2025