

О. Д. АЛИМОВ, Н. П. РЯШЕНЦЕВ, А. В. ФРОЛОВ

### О СОЗДАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

В горнорудной промышленности имеют практическое применение три способа бурения шпуров: ударно-поворотный, вращательный и вращательно-ударный.

Экспериментальные исследования [1, 2, 3] показали, что при бурении пород средней и высокой крепости целесообразно применять машины вращательно-ударного действия, которые имеют преимущества по сравнению с другими как по скорости бурения, так и по износостойкости инструмента. В настоящее время известны машины ударно-вращательного действия [2], выпускаемые фирмами Зальцгиттер, Хаускерр, Ньюссе и Грефер, и машины БУ-1, БУ-2 и СБУ-2 Кузнецкого машиностроительного завода. Эти машины отличаются друг от друга параметрами и конструкцией отдельных узлов, но общим для них является наличие пневматического привода вращателя и ударного узла. Отсутствие компрессорного хозяйства на многих шахтах и рудниках тормозит широкое внедрение прогрессивного вращательно-ударного способа бурения шпуров в породах выше средней крепости. Создание компрессорных станций на шахтах только для обслуживания бурильных машин во многих случаях нецелесообразно и создает ряд серьезных неудобств, связанных с эксплуатацией энергохозяйства.

Все сказанное выше побуждает к созданию электрических бурильных машин вращательно-ударного действия. Основная трудность при создании таких машин заключалась в отсутствии достаточно простой и надежной конструкции электрического ударного узла.

Решение этой проблемы различными организациями проводится в двух направлениях:

1. Создание электромеханических ударных узлов, в которых вращательное движение ротора электродвигателя преобразовывается с помощью механических передач в возвратно-поступательное движение бойка (ударника).

2. Создание электромагнитных ударных узлов, в которых вращательно-поступательное движение бойку сообщается непосредственно приводным двигателем.

Основными преимуществами электромеханических ударных узлов являются наличие надежных и совершенных вращающихся электрических двигателей и удобство осуществления вентиляции всего ударного узла. Недостатками являются сложность конструкции в целом, большое количество движущихся деталей, повышенная стоимость ударного узла.

Основными преимуществами электромагнитных молотков являются простота конструкций, малое количество движущихся деталей, что позволит, видимо, достичь большей надежности и долговечности ударного узла и значительно меньшей стоимости изготовления по сравнению с электромеханическими ударными узлами.

Главными причинами, тормозящими промышленное применение молотков, созданных на электромагнитном принципе, являются перегрев и малая энергия единичного удара. Ряд исследователей считает, что эти недостатки могут быть устранены и можно создать достаточно мощные и совершенные машины возвратно-поступательного действия электромагнитного (соленоидного) типа.

По этому вопросу приведем мнения некоторых специалистов.

Проф. А. И. Москвитин — «Правильно сконструированный соленоидный молоток может быть не тяжелее моторного, и его к. п. д. так же будет не ниже. В то же время этот молоток значительно проще и дешевле» [4].

Н. А. Шмаров: «Электроотбойный молоток должен быть простой конструкции, число изнашивающихся деталей должно быть минимальным, молоток должен быть прост в изготовлении, ремонте и эксплуатации. Этим условиям больше всего удовлетворяют молотки, построенные, выражаясь условно, на принципе соленоида. Очевидно, разрешение проблемы должно идти, главным образом, по этому пути» [5].

Акад. А. М. Терпигорев: «Сравнивая электромеханические и соленоидные молотки, мы можем сделать следующее заключение. В электромеханических молотках употребляются освоенные промышленностью быстроходные асинхронные моторы трехфазного тока, обладающие хорошим к. п. д. и  $\cos \phi$ . Однако наличие трансмиссии сильно понижает общий к. п. д. молотка и его конструкция получается слишком сложной, что ведет к увеличению числа неполадок в работе. Наоборот, в соленоидных молотках трансмиссия совершенно отсутствует, что упрощает и облегчает их конструкцию и делает ее надежной в работе. В то же время электрический двигатель возвратно-поступательного действия, еще не освоенный промышленностью, обладает низким к. п. д., сильно нагревается в работе и развивает недостаточную мощность. Однако это не исключает возможности появления в недалеком будущем достаточно мощных и надежных соленоидных молотков» [6].

Работы, проведенные на кафедре горных машин Томского политехнического института (ТПИ), также указывают на возможность создания работоспособной конструкции мощного электрического ударного узла электромагнитного типа. В ТПИ был разработан и изготовлен опытный образец многокатушечного электромагнитного молотка типа МС-3 с синхронным безыскровым переключателем [7, 8], который значительно проще электромеханических, а по своим техническим характеристикам близок к ним.

Основными недостатками электрического ударного узла типа МС-3 являются наличие вращающегося переключателя, который требует систематического ухода, и нерациональное использование магнитной системы, что проявляется в раздельном использовании катушек для прямого и обратного хода.

Исследования МС-3 показали, что к. п. д. электромагнитного привода может быть значительно повышен благодаря выбору рациональной конструкции магнитопровода и режимов работы молотка.

В результате исследования МС-3, а также электромагнитных молотков типа МС-15 и МС-16 [7, 8, 9, 13], на кафедре горных машин ТПИ была разработана и изготовлена опытная модель мощного ударного

узла электромагнитного типа, предназначенного для бурильных машин (рис. 1).

Ударный узел (рис. 2, а) состоит из инструмента 1, по которому наносит удары боек 2, намагничивающей катушки 4, ярма 5 и полюсов 6.

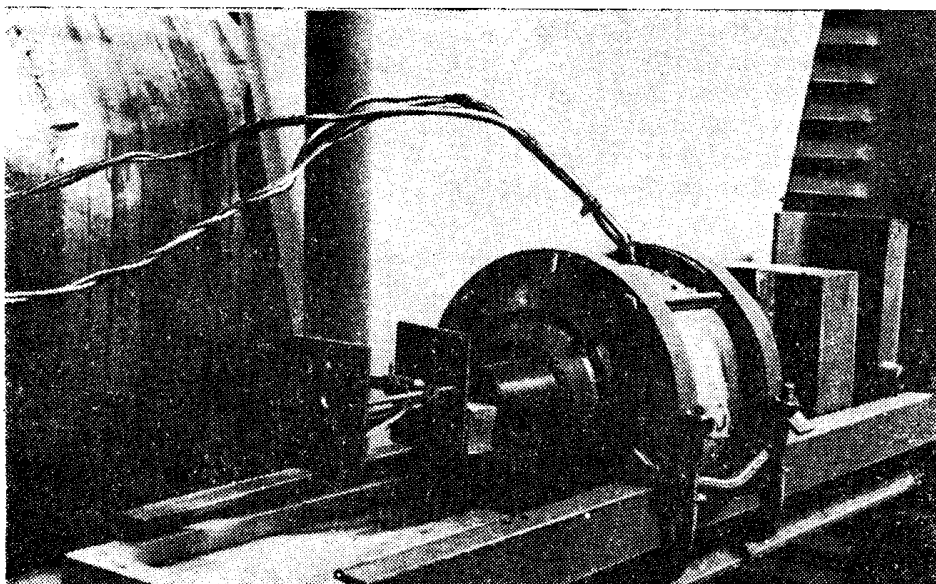


Рис. 1. Общий вид модели ударного узла.

Принцип работы узла следующий. Под действием упругих сил пружины боек находится в левом крайнем положении. При включении рубильника Р (рис. 2, б) по цепи намагничивающая катушка, полупро-

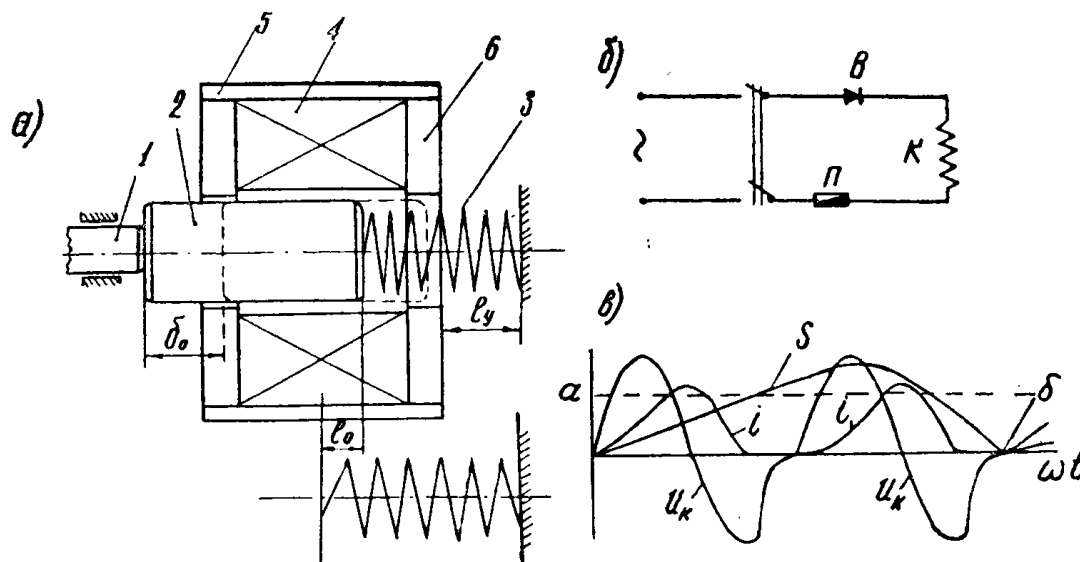


Рис. 2. Эскиз ударного узла (а), схема питания (б) и осциллограмма рабочего процесса (в).

водниковый выпрямитель В и предохранитель П начинает проходить пульсирующий ток  $i$ . Боек под действием электромагнитных сил катушки перемещается вправо. Динамика молотка рассчитывается так, что при подходе бойка к положению магнитного равновесия (обозначенного на рис. 2, а пунктиром, а на рис. 2, б — прямой  $ab$ ) протекание тока в ка-

тушке прекращается, но боек под действием накопленной кинетической энергии продолжает движение в том же направлении, сжимая пружину 3 (рис. 2, а). В промежуток времени, когда ток выпрямителя равен нулю, боек проходит положение магнитного равновесия, дополнительно сжимая пружину 3. К началу протекания следующей полуволны тока в катушке боек занимает крайнее правое положение. Под действием упругих сил пружины и второй полуволны тока боек перемещается в направлении инструмента. При подходе бойка к положению среднего магнитного равновесия протекание тока в катушке прекращается, но боек под действием накопленной кинетической энергии продолжает движение и наносит удар по инструменту. Затем цикл повторяется.

Из анализа рассмотренного принципа работы ударного узла видно, что частота ударов бойка синхронна с частотой питающего напряжения и определяется как

$$n = \frac{60 \cdot f}{2p} \text{ уд/мин}, \quad (1)$$

где  $n$  — частота ударов бойка;  $f$  — частота питающего напряжения;  $2p$  — число периодов напряжения, используемых для совершения одного полного цикла движения бойка.

Следовательно, изменение частоты ударов возможно (при данной схеме включения катушки) только путем изменения  $f$  или  $2p$ .

Модель электромагнитного ударного узла имеет следующую техническую характеристику:

энергия единичного удара, *кдж* — 4,0—4,5;  
 частота ударов в *мин* — 1500;  
 род тока, однофазный 50 *гц*;  
 напряжение, *в* — 380;  
 к. п. д., % — 46—50;  
 вес, *кг* — 47.

Наибольший интерес представляет выявление зависимости режима работы от конструктивных факторов, как-то: перемещения хвостовика инструмента или перемещения буферной пружины относительно магнитной системы ударного узла. Установлено, что на энергию удара к. п. д. и устойчивость работы ударного узла электромагнитного типа при прочих равных условиях существенное влияние оказывает величина начального поджатия  $l_0$  пружины бойком (рис. 2, а). Причем под величиной начального поджатия пружины мы понимаем расстояние между задним торцом бойка при нахождении его в положении удара и передним витком буферной пружины, если бы последняя находилась в свободном состоянии.

Зависимость энергии удара от величины начального поджатия пружины свойственна всем электромагнитным ударным узлам независимо от принципа их работы и схемы включения и объясняется тем, что буферная пружина является не только амортизатором, но и упругим звеном, накапливающим кинетическую энергию движения бойка при холостом ходе и возвращающей бойку при движении в сторону удара. При изменении параметров пружины изменяется рабочий процесс ударного узла и величина мощности, потребляемая из сети и передаваемая бойком хвостовику инструмента. Первым этапом экспериментального исследования созданной модели мощного электромагнитного ударного узла (рис. 1) был выбор и установление зависимости энергии удара  $A_y$  от величины начального поджатия пружины  $l_0$ .

При небольших значениях  $l_0$  усилие предварительного поджатия бойка также небольшое, поэтому при сравнительно малых значениях тока в катушке боек приходит в движение и раньше, чем прекращается протекание полуволны тока, доходит до положения магнитного равновесия (рис. 3). При этом электромагнитные силы тормозят движение

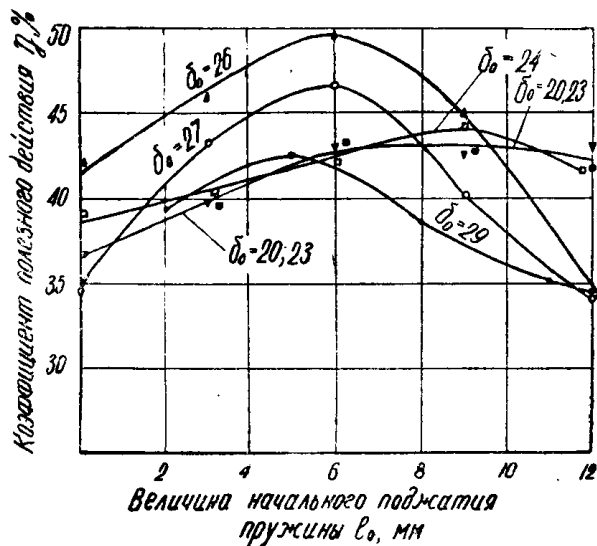


Рис. 3. Зависимость энергии удара от величины начального поджатия пружины.

бойка, уменьшая его скорость, и следовательно, величину свободного выбега бойка. В результате уменьшается ход бойка и энергия единичного удара. При увеличении начального поджатия пружины уменьшается тормозное действие электромагнитной силы и увеличивается энергия удара. Максимум энергии удара соответствует определенной величине поджатия пружины, которая зависит для данной конструкции от жесткости пружины и от величины начального рабочего воздушного зазора  $\delta_0$ . Дальнейшее увеличение поджатия пружины снова приводит к уменьшению энергии единичного удара, так как в этом случае боек подходит к положению магнитного равновесия позже, чем прекратится протекание тока в катушке ударного узла, т. е. опять наблюдается уменьшение величины свободного выбега бойка. Если под областью устойчивой работы ударного узла понимать такой режим работы, при котором энергия единичного удара изменяется не более чем на 10% по отношению к максимальной, то можно сказать, что при изменении величины начального поджатия пружины на  $\pm 25\%$  от оптимального значения не приводит к заметному изменению режима работы ударного узла.

Результаты экспериментального исследования, приведенные на рис. 3, соответствуют такому режиму работы ударного узла, когда отсутствует перемещение хвостовика инструмента относительно магнитной системы.

Во время работы бурильной машины с данным ударным узлом величина начального поджатия пружины и выбег бойка в сторону инструмента будут оставаться постоянными только при усилении подачи, превышающем максимальное значение электромагнитных сил катушки. При меньших значениях усилия подачи строго зафиксировать величину начального поджатия пружины и выбега бойка в сторону инструмента (т. е. перемещение хвостовика инструмента) практически не представляется возможным. Поэтому не меньший интерес представляют исследования работы ударного узла в режиме, когда изменяется величина начального зазора. Последняя оказывает значительное влияние на режим работы, так как от величины зазора зависит распределение магнитного потока во всей системе электромагнитного узла.

Кроме того, если считать, что электромагнитная сила тяги пропорциональна произведению квадрата ампервитков на производную проводимости воздушного зазора по самому зазору [11, 12], то с учетом результатов выполненной работы [13] можно сделать следующие выводы.

1. При больших значениях начального воздушного зазора электромагнитная сила тяги определяется в основном величиной тока, протекающего в катушке. Это объясняется тем, что скорость изменения проводимости воздушного зазора при больших значениях  $\delta_0$  почти не зависит от перемещения бойка.

2. При небольших значениях начального воздушного зазора  $\delta_0$  скорость изменения проводимости значительно возрастает. Следовательно, электромагнитная сила тяги будет определяться не только величиной тока, но и скоростью изменения и величиной проводимости.

Рассмотрим три характерных режима работы электромагнитного ударного узла в зависимости от величины начального воздушного зазора.

А. При  $\delta_0 > \delta_0'$  (где  $\delta_0'$  — величина начального воздушного зазора, соответствующая оптимальному режиму работы), начальная скорость движения бойка, определяемая величиной электромагнитной силы, мала, и боек подойдет к положению магнитного равновесия позже, чем прекратится ток в катушке. Часть пути, соответствующая максимальному значению скорости изменения проводимости, боек будет проходить только под действием тормозных сил трения и пружины, так как в это время ток равен нулю. Следовательно, запас кинетической энергии бойка будет недостаточным для того, чтобы обеспечить себе достаточный начальный зазор для движения в сторону удара. В конечном итоге энергия удара уменьшается. При  $\delta_0 \gg \delta_0'$  боек может возвращаться в положение магнитного равновесия следующей полуволны тока (рис. 2, в). При этом работа ударного узла будет неустойчивой, и возможен выход бойка из синхронизма.

Б. При  $\delta_0 < \delta_0'$  электромагнитная сила, определяемая произведением квадрата ампервитков на скорость изменения проводимости воздушного зазора, достигает значительной величины, и боек, получая большую скорость, подходит к положению магнитного равновесия раньше, чем закончится протекание тока в катушке. При выходе из этого положения боек начинает тормозиться током, и электромагнитный ударный узел переходит из двигательного в генераторный режим работы [15], в результате чего кинетическая энергия бойка к концу полупериода протекания тока резко падает. Как и при  $\delta_0 > \delta_0'$  энергия удара бойка снижается, и при  $\delta_0 \ll \delta_0'$  наблюдается неустойчивый режим работы.

Таким образом, для электромагнитного ударного узла существует вполне определенное значение начального воздушного зазора, соответствующее максимальному значению энергии единичного удара.

С целью определения наивыгоднейшего значения начального воздушного зазора и изучения влияния его на энергию удара и устойчивость работы ударного узла были сняты зависимости  $A_y = f(\delta_0)$  при различных значениях установочной длины пружины  $l_y$  (рис. 4). При всех значениях начального воздушного зазора  $\delta_0$ , лежащего в пределах 21—28 мм режим работы ударного узла устойчивый. При  $21 > \delta_0 > 28$  наблюдаются неудовлетворительный пуск и случаи остановки бойка в положении магнитного равновесия. С увеличением начального воздушного зазора возрастает энергия единичного удара для всех приведенных значений установочной длины буферной пружины (рис. 4). Максимального значения энергия удара достигает при  $\delta_0 = 26$  мм. При дальнейшем увеличении воздушного зазора энергия удара  $A_y$  уменьшается.

Исследование модели ударного узла производилось и на других возможных режимах работы. Максимальное значение энергии удара

при устойчивой работе составляло 4,5 кгм, а минимальные — 2,3 кгм, что в переводе на ударную мощность составляет соответственно 1,1 квт и 0,57 квт.

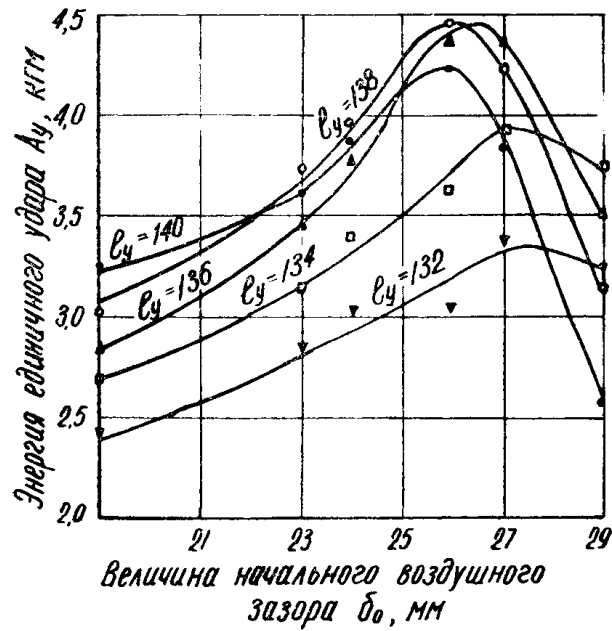


Рис. 4. Зависимость энергии удара от величины начального воздушного зазора.

Полученные результаты дают основание рекомендовать ударный узел электромагнитного типа прежде всего для использования в качестве ударного узла для бурильных машин вращательно-ударного действия. Кроме того, ударные узлы могут быть применены для вибриро-

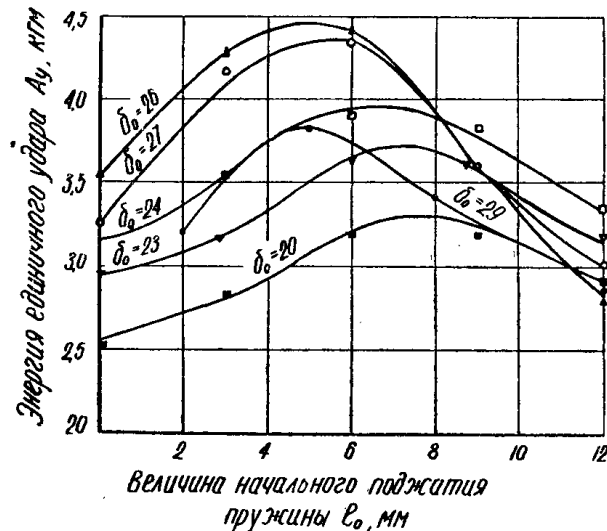


Рис. 5. Зависимость к. п. д. ударного узла от величины начального воздушного зазора.

вания ковшей породопогрузочных машин периодического и непрерывного действия, что позволит устранить налипание породы на ковш, повысить коэффициент заполнения ковша, а в целом увеличить производительность машины.

Следует отметить, что наименьший к. п. д. электромагнита при самых неблагоприятных режимах работы составил 34%. В зоне устойчивой работы к. п. д. колеблется в пределах 45—49% (рис. 5).

Сравнение результатов экспериментального исследования, приведенных на рис. 3 и 5, показывает, что параметры, характеризующие режим работы ударного узла с наибольшей энергией единичного удара, несколько отличаются от параметров, соответствующих максимальному значению к. п. д. при одном и том же значении величины начального воздушного зазора. Например, при  $\delta_0 = 26$  мм максимальному значению  $A_y$  соответствует величина начального поджатия пружины, равная 6 мм, а максимальному значению к. п. д. — 5 мм; при  $\delta_0 = 23$  мм величина начального поджатия пружины равна соответственно 7 и 9 мм.

Характерно, что изменение параметров, характеризующих наибольшее значение к. п. д., происходит в направлении устойчивой работы ударного узла. Следует отметить, что полученные значения к. п. д. модели ударного узла не являются предельными, хотя превышают к. п. д. некоторых лучших образцов ударных узлов электромеханического типа [14].

### Выводы

1. Экспериментальные исследования модели ударного узла электромагнитного типа со свободным выбегом бойка показали, что на основе однополупериодной схемы выпрямления и данном принципе работы можно создать мощную и работоспособную машину ударного действия.

2. Частота ударов электромагнитного ударного узла, включенного по однополупериодной схеме выпрямления тока со свободным выбегом бойка, может изменяться пропорционально частоте подведенного напряжения. Изменение частоты ударов при постоянной частоте напряжения возможно также путем настройки узла на специальный режим работы. Однако это, по-видимому, потребует изменения конструкции ударного узла и проведения дополнительных исследований.

3. Большое влияние на режим работы оказывают начальное поджатие пружины и величина начального воздушного зазора. Изменение этих параметров влечет за собой изменение энергии удара и к. п. д. ударного узла. Максимальные значения энергии единичного удара 4,5 кгм и к. п. д. 47—48% получены при  $\delta_0 = 26$  мм,  $l_0 = 6$  мм и коэффициенте жесткости пружины 1,18 кг/мм.

4. Результаты, полученные при исследовании модели ударного узла электромагнитного типа, могут быть положены в основу конструирования электрической бурильной машины вращательно-ударного действия и вибрационных узлов для вибрирования ковша породо-погрузочной машины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Алимов. Исследование процессов разрушения горных пород при бурении шпуров. Томск, 1960.
2. О. Д. Алимов, И. Г. Басов, В. Ф. Горбунов, Д. Н. Маликов. Бурильные машины, Госгортехиздат, 1960.
3. Совершенствование буровой техники и взрывных работ. ЦИИТЭИ угля, Москва, 1962.
4. А. И. Москвитин. Электрические молотки. Ж. «Электричество», № 2, 1933.
5. Н. А. Шмаров. Электрический ручной ударный инструмент. ПОНТИ, 1935.
6. А. М. Терпигорев. Горные машины для выемки пластовых полезных ископаемых. Углетехиздат, 1949.



7. П. М. Алабужев, Н. П. Ряшенцев. Некоторые результаты испытания соленоидного молотка МС-3. Известия высших учебных заведений, Горный журнал, № 7, 1958.
8. Н. П. Ряшенцев. Синхронный безыскровый переключатель кулачкового типа. Известия высших учебных заведений, Горный журнал, № 7, 1959.
9. В. В. Иванов, Н. П. Ряшенцев. Новые электрические молотки. Механизация строительства, № 7, 1961.
10. А. И. Москвитин. Электрические машины возвратно-поступательного движения. Изд. АН СССР, 1950.
11. М. И. Виттенберг. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. ГЭИ, 1961.
12. Ф. А. Ступель. Расчет и конструкция электромагнитных реле. ГЭИ, 1950.
13. Н. П. Ряшенцев, А. В. Фролов, Е. М. Тимошенко. Исследование магнитной проводимости рабочего зазора соленоидных молотков со свободным выбегом бойка. Ж. «Вестник электропромышленности», № 12, 1962.
14. Механизмы и машины ударного, вращательного и вращательно-ударного действия. Межвузовский сборник трудов, вып. 1, Новосибирск, 1963.
15. Е. М. Тимошенко. Исследование электромагнитных молотков со свободным выбегом бойка. Кандидатская диссертация, Томск, 1963