

УДК 622.619

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРУЗОЧНЫХ ОРГАНОВ
С НАГРЕБАЮЩИМИ ЗВЕЗДАМИ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

А. В. Отроков, Г. Ш. Хазанович, Н. Б. Афолина

*Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного
технического университета им. М. И. Платова,
пл. Ленина, 1, 346500, г. Шахты, Россия*

Приведены основные результаты экспериментальных исследований рабочих процессов погрузочных органов с нагребающими звездами на физической модели. Определены влияющие факторы и пределы их изменения, дана интерпретация полученных результатов. Установлены основные зависимости, характеризующие производительность и нагрузки погрузочного органа с нагребающими звездами.

Проходческий комбайн, погрузочный орган с нагребающими звездами, экспериментальные исследования, производительность, нагрузки

Современные горные проходческие комбайны избирательного действия оснащаются различными погрузочными органами непрерывного действия, среди которых широко представлены нагребающие лапы и звезды различных конструктивных исполнений. Однако, если исследованиям нагребающих лап посвящено значительное число публикаций (см. обзор работ в [1]), то рабочие процессы погрузочных органов с нагребающими звездами недостаточно изучены, идет поиск рациональных технических решений [2, 3].

Для разработки инженерной методики выбора параметров погрузочных органов с нагребающими звездами в Шахтинском институте (филиале) ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова создана экспериментальная модельная установка (рис. 1), проведены исследования процессов формирования грузопотока погрузочного органа и определена его производительность путем последовательного измерения масс погруженного материала отдельными лучами и нагребающей звездой в целом, а также возникающих при этом моментов сопротивлений зачерпыванию. Приводятся результаты экспериментальных исследований модели погрузочного органа во взаимосвязи с физическими процессами, происходящими при взаимодействии лучей нагребающей звезды со штабелем погружаемого материала.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При разработке методики исследований учитывались прежде всего основные особенности последовательного (по номерам оборотов звезды) образования масс единичных черпаний, которые вместе с частотой вращения нагребающих звезд определяют производительность как погрузочного органа, так и проходческого комбайна.

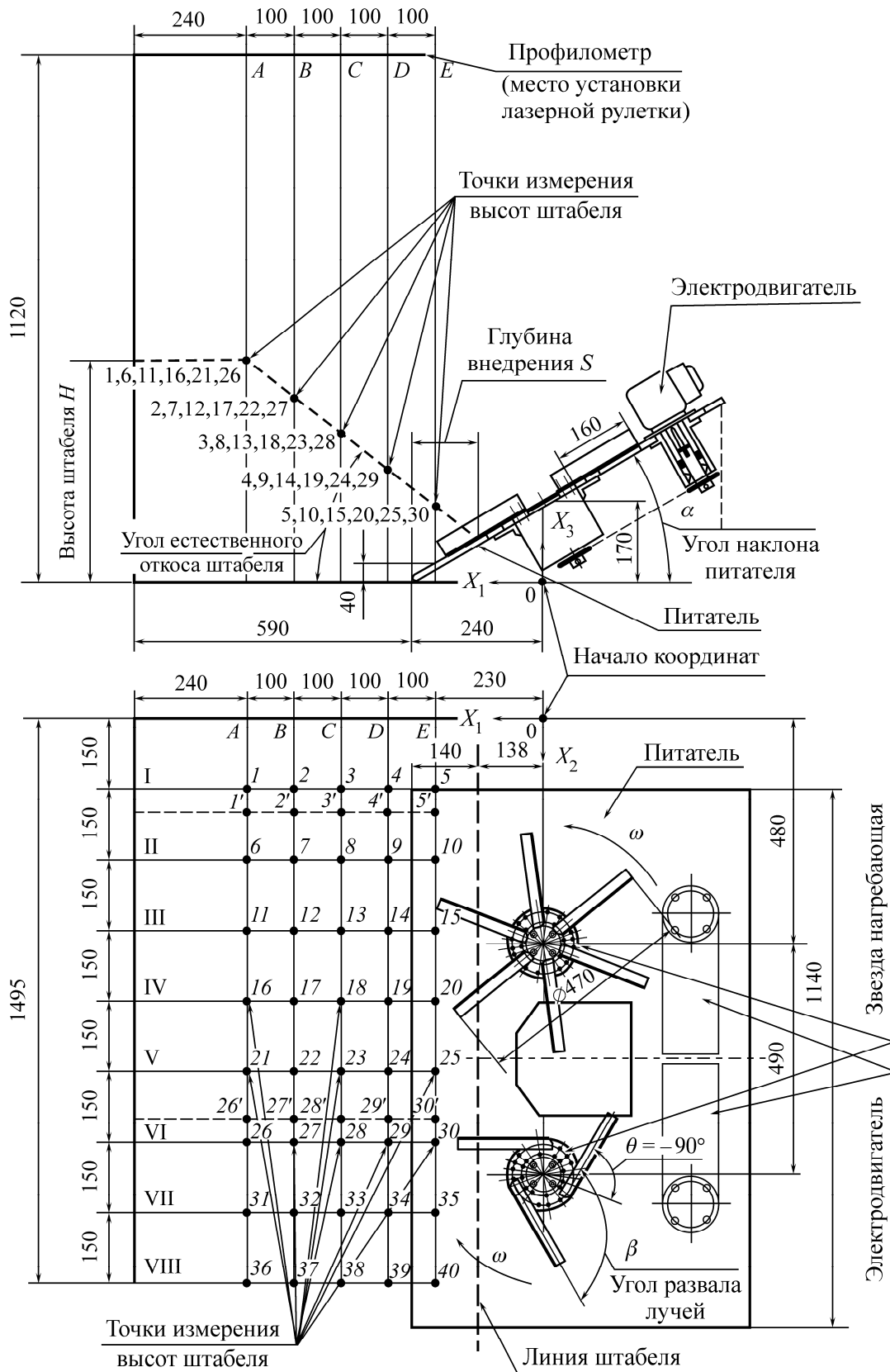


Рис. 1. Схема модельной экспериментальной установки и схема измерений профиля штабеля при воздействии на него нагревающей звезды (показаны две разные нагревающие звезды: верхняя с числом лучей $z = 6$, углами развала лучей $\beta = 60^\circ$ и углом установки лучей $\theta = 0^\circ$; нижняя — $z = 3$, $\beta = 120^\circ$, $\theta = -90^\circ$)

Следует отметить, что производительность погрузочного органа с нагребающими звездами определяется количеством (массой) материала, передаваемого на транспортер в единицу времени. Изменение массы погружаемого материала за один оборот связано с уменьшением объема активной зоны штабеля [4]. Таким образом, масса погруженного материала в зависимости от порядкового номера оборота нагребающей звезды ($m = f(N)$) является определяющей при расчете средней производительности погрузочного органа для принятого режима подачи погрузочного органа на штабель.

Экспериментальные исследования рабочего процесса разделены на два этапа:

- 1) изучение механических процессов, происходящих на контакте погрузочного органа со средой, а также деформаций исходного штабеля погружаемого материала;
- 2) получение количественных зависимостей массы зачерпнутого материала и возникающих при этом нагрузок на валу нагребающей звезды от основных влияющих факторов.

В результате выполнения экспериментов первого этапа проверена гипотеза формирования грузопотока материала нагребающими звездами [5], установлен общий характер зависимостей производительности и момента сопротивлений зачерпыванию от влияющих факторов.

Для проведения второго этапа экспериментальная установка оснащена устройствами для измерения массы погруженной горной породы в единичном черпании, фото- и видеофиксации процесса погрузки горной массы, в том числе с использованием профилометра для измерения деформаций штабеля (рис. 1), угла поворота нагребающей звезды, усилий, возникающих в луче нагребающей звезды. Для измерений и обработки данных используется крейтовая система LTR-U-8-1 производства российской фирмы ООО «Л Кард», представляющая собой универсальный цифровой измерительный комплекс с отдельными модулями для сбора данных от специализированных датчиков.

Перечень отобранных к исследованию влияющих факторов и пределы их изменения приведены ниже:

Количество лучей на звездах z , шт.	1, 4, 6 (модель: 1, 4, 6)
Угол установки лучей θ , град	0, -90 (модель: 0, -90)
Высота лучей звезд h , м	0.07, 0.14 (модель: 0.02, 0.04)
Частота вращения звезд n , об/мин	15, 24 (модель: 15, 24)

Каждому количеству лучей на звездах z соответствует определенный угол развала лучей β . Угол установки лучей θ имеет отрицательное значение при отклонении луча в сторону, противоположную повороту нагребающей звезды (на рис. 1 луч с $\theta = -90^\circ$ показан штриховой линией).

На данном этапе исследований постоянными условиями проведения экспериментов приняты: средняя крупность погружаемого материала d_1 (в натуральных условиях — 0.083 м, для физической модели при геометрическом масштабе моделирования 1 : 3.3 — 0.025 м), высота штабеля H (соответственно 1.0 и 0.3 м), угол наклона плиты питателя модели и натурной установки $\alpha = 20^\circ$. Высота штабеля, крупность материала и угол наклона плиты питателя приняты соответствующими средним производственным данным, в частности серийному проходческому комбайну КП-21 при проведении выработки по породам крепостью 4–5 единиц по шкале М. М. Протодыяконова, и другим моделям комбайнов.

Экспериментальные исследования позволили установить зависимость производительности и нагрузок от следующих факторов: количества лучей нагребающей звезды z (угла развала лучей β), угла установки θ , высоты h , длины лучей l (зависят от диаметра звезды d), частоты вращения нагребающей звезды n и порядкового номера оборота звезды N .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате обработки экспериментальных данных получены соотношения, которые позволяют уточнить характер взаимодействия нагребающих звезд с погружаемым материалом и найти эмпирические зависимости производительности и нагрузок от основных влияющих факторов. Последние являются основой инженерной методики выбора рациональных параметров погрузочных органов с нагребающими звездами проходческих комбайнов.

На рис. 2 приведены примеры обработки данных об изменении состояний штабеля с помощью профилометра. Для отображения положения поверхности откоса штабеля выбраны наиболее информативные линии профилометра — линия III, проходящая рядом с осью вращения нагребающей звезды, и линия D, расположенная на середине горизонтальной проекции откоса штабеля (рис. 1). Наименования осей на рис. 2 соответствуют осям координат модельной установки на рис. 1.

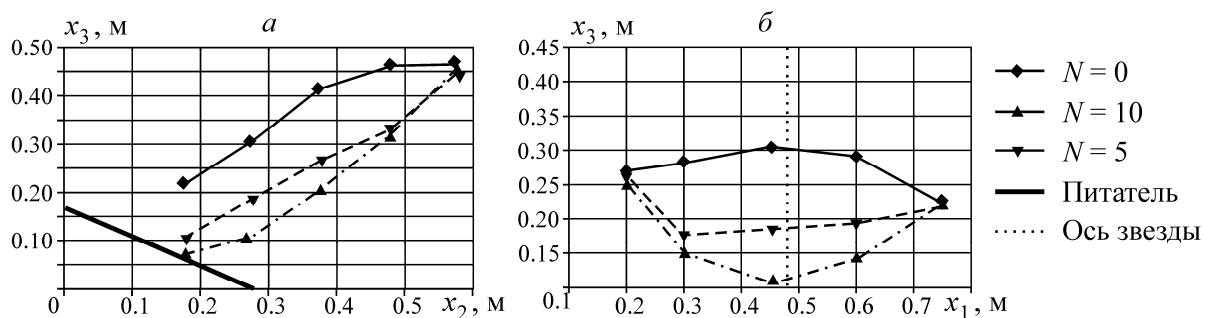


Рис. 2. Профили штабеля для звезды с $z = 6$, $\theta = 0^\circ$ в начальном положении ($N = 0$) и после 5 и 10 оборотов нагребающей звезды: *a* — линия III; *б* — линия D

В результате анализа профилограмм подтверждено, что при работе нагребающей звезды происходит так называемое “отодвигание” штабеля вследствие уменьшения объема материала над нагребающими элементами погрузочного органа, впервые обнаруженное при исследовании нагребающих лап [4]. Этот процесс аналогичен поведению штабеля при взаимодействии с парными нагребающими лапами.

Анализируя фронтальные профилограммы (рис. 2б), отмечено, что куски материала быстрее движутся по оси нагребающей звезды и тем интенсивнее, чем ближе к питателю, а на периферии звезды куски материала практически неподвижны.

С увеличением количества лучей на звезде z масса погруженного материала за один оборот m увеличивается (рис. 3а) с одновременным уменьшением погрузочной способности отдельного луча (количество материала, погружаемого одним лучом за один оборот звезды). Это происходит вследствие уменьшения объема возможного захвата материала из-за уменьшения угла развала лучей. Кроме того, снижение погрузочной способности нагребающего луча начиная с $z = 4$ происходит из-за повышенной подвижности погружаемого материала, который вследствие воздействия на него впереди идущим лучом звезды не успевает перейти в устойчивое статическое состояние (рис. 3б). С увеличением количества лучей уменьшается объем единичного захвата — материал не успевает опуститься в зону действия очередного луча звезды.

Угол установки лучей θ (характеризует форму нагребающей звезды) оказывает незначительное влияние на формирование объема единичного захвата. На рис. 4а видна группировка погрузочной способности нагребающих звезд с разными углами установки лучей. С увеличением высоты луча возрастает объем единичного захвата материала (рис. 4б).

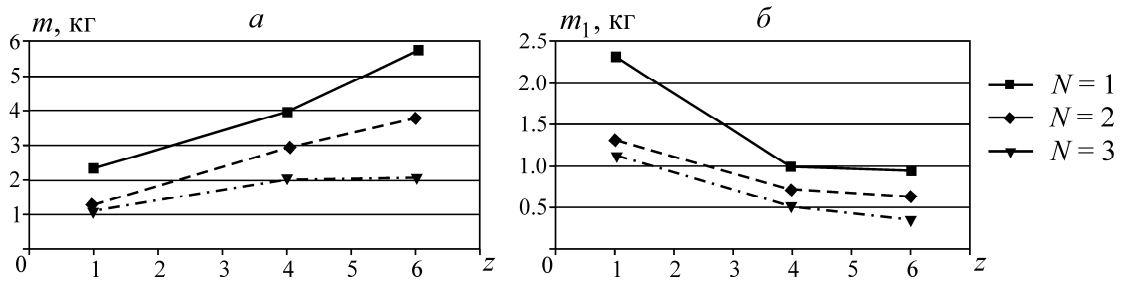


Рис. 3. Зависимость массы погруженного материала за один оборот звезды (а) и погрузочной способности отдельного луча звезды (б) от количества лучей z при разных номерах оборота звезды N для условий: $n = 24$ об/мин; $h = 0.02$ м; $\theta = 0^\circ$

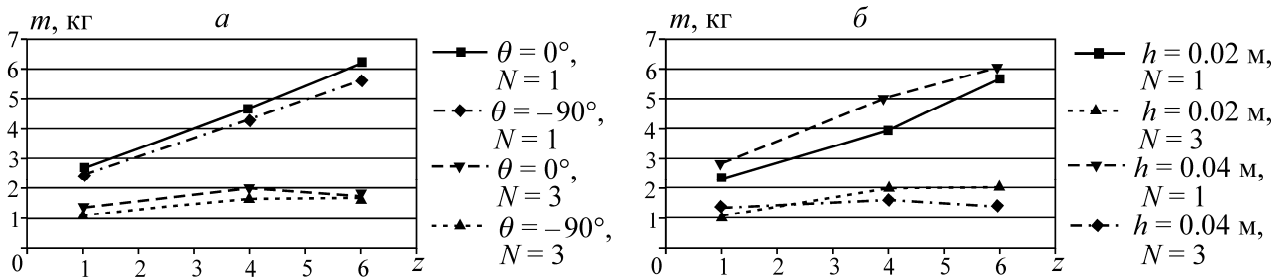


Рис. 4. Зависимость массы погруженного материала за один оборот звезды от количества лучей z : а — при разных углах установки лучей θ и номерах оборота звезды N ; б — при разных высотах лучей h и номерах оборота звезды N для условий: $n = 24$ об/мин; $h = 0.02$ м

Изменение момента сопротивления повороту звезды для лучей разной высоты характеризуется сходными зависимостями (рис. 5а). С увеличением количества лучей от одного до четырех нагрузки растут, а с четырех до шести — падают вследствие уменьшения объема захвата материала отдельным лучом, а также из-за перевода материала активной зоны в неравновесное состояние и снижения сопротивлений движению луча.

При непополняемом штабеле с ростом количества оборотов нагребающей звезды момент сопротивления зачерпыванию материала падает (рис. 5б) пропорционально уменьшению объема захваченного груза от номера оборота звезды.

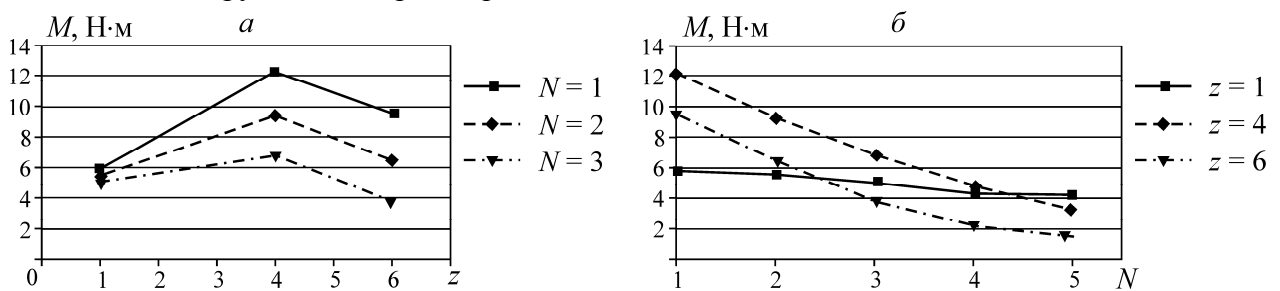


Рис. 5. Зависимость среднего момента сопротивления M : а — от количества лучей z при разных номерах оборота звезды N ; б — от номера оборота звезды N при разном количестве лучей z для условий: $h = 0.02$ м; $\theta = 0^\circ$

Однако следует отметить, что в отличие от характера зависимости объема (массы) погруженного материала от номера оборота звезды, зависимость момента сопротивления от номера оборота близка к линейной. Аналогичное поведение наблюдается и у погрузочных органов с нагребающими лапами [4, 6], так как с уменьшением объема захвата материала, снижающим момент сопротивления, плечо приложения силы сопротивления внедрению и проталкиванию увеличивается, тем самым увеличивая момент сопротивления.

Изменение угла установки лучей с 0 на -90° позволяет снизить момент сопротивления (рис. 6). Это объясняется тем, что нагребающая звезда с лучами, установленными под углом -90° , захватывает меньше материала вследствие особенностей перемещения лучей в штабеле и характера заполнения материалом межлучевого пространства.

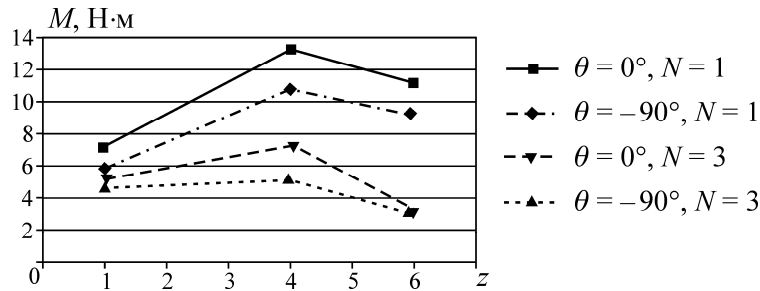


Рис. 6. Зависимость момента сопротивления M от количества лучей z при разных углах установки лучей θ и номерах оборота звезды N для условий $h = 0.02$ м

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И НАГРУЗОК ПОГРУЗОЧНОГО ОРГАНА

Как показали исследования, производительность погрузочного органа Q зависит от конструктивных параметров нагребающей звезды, гранулометрического состава материала, представленного средним размером куска d_1 , глубины внедрения погрузочного органа S , изменяемой в зависимости от номера оборота N нагребающей звезды, а также объема материала в активной зоне штабеля V . Последний показатель заимствован из теории работы парных нагребающих лап [4]. В общем виде многофакторная зависимость будет следующей:

$$Q = f(l, h, z, N, V, d_1, \theta).$$

Процесс образования объема захвата материала лучами нагребающих звезд подчиняется тем же основным закономерностям, что и для нагребающих лап шахтных погрузочных машин. Однако погрузочные органы с нагребающими звездами имеют существенные конструктивные особенности, влияющие на процесс погрузки. Признано целесообразным применять мультипликативную форму зависимости, что позволяет сохранить преимущество в известном подходе к расчету производительности и сопротивлений зачерпыванию. Теоретическую производительность нагребающей звезды можно выразить следующим соотношением:

$$Q \approx F_{\max} h n K_{Q_h} K_{Q_\theta} K_{Q_z} K_{Q_N}, \text{ м}^3/\text{мин},$$

где $F_{\max} = f(z)$ — максимальная площадь захвата материала одним лучом нагребающей звезды в функции числа лучей, м^2 ; K_{Q_h} , K_{Q_θ} , K_{Q_z} , K_{Q_N} — соответственно коэффициенты влияния относительной высоты луча, его угла установки, числа лучей и режима работы погрузочного органа (влияние глубины внедрения или номера черпания).

Среднее значение момента сопротивления на валу нагребающих звезд за один оборот звезды по аналогии с нагребающими лапами зависит от массы захваченного материала, диаметра нагребающей звезды d и ряда факторов, учитываемых коэффициентами K_{M_h} , K_{M_θ} , K_{M_z} , K_{M_N} :

$$Q \approx F_{\max} h \gamma g d K_{M_h} K_{M_\theta} K_{M_z} K_{M_N}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где γ — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; $g = 9.81$ — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Следует отметить, что несмотря на аналогичные обозначения коэффициентов влияния различных факторов в формулах производительности и момента сопротивления, конкретные зависимости каждого из коэффициентов имеют различные математические выражения. Формулы для расчетов коэффициентов установлены в результате обработки экспериментальных данных и приведены в [7].

ВЫВОДЫ

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований на оригинальной модельной установке подтвердил выдвинутую гипотезу об особенностях физического процесса формирования объема черпания нагребавшей звездой, ее производительности и нагрузок, возникающих при внедрении лучей звезды в штабель и захвате порции материала. Экспериментально установлены количественные характеристики рабочего процесса погрузки материала нагребавшей звездой:

— с увеличением количества лучей объем захвата отдельным лучом уменьшается, а объем захвата нагребавшей звездой стремится к максимуму, при этом средний момент сопротивления черпанию звездой остается постоянным или снижается;

— при уменьшении угла установки лучей объема захвата средние нагрузки снижаются незначительно;

— энергоемкость процесса погрузки снижается при увеличении количества лучей и уменьшении угла их установки с 0 до -90° .

Установлены регрессионные зависимости производительности и нагрузок исследуемого погрузочного органа:

— массы груза за очередной оборот нагребавшей звезды, которая с учетом частоты вращения и числа звезд определяет производительность погрузочного органа;

— производительности погрузочного органа с парными нагребавшими звездами, которая наряду с влиянием факторов, характерных для погрузочного органа с нагребавшими лапами — площади захвата, высоты гребка, объема горной массы в активной зоне, учитывает количество лучей и угол их установки в плоскости нагребавшей звезды;

— среднего значения момента сопротивления вращению за полный оборот нагребавшей звезды в штабеле погружаемого материала и удельной энергоемкости погрузки от той же группы влияющих факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Отроков А. В., Хазанович Г. Ш.** Выбор параметров проходческих погрузочных модулей непрерывного действия // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. — 2013. — № 4 (173).
2. **Афонина Н. Б., Отроков А. В.** К разработке методики исследования погрузочных органов проходческих комбайнов с нагребавшими звездами // Горн. оборудование и электромеханика. — 2013. — № 1.
3. **Афонина Н. Б., Отроков А. В., Воронов П. Р.** Экспериментальные исследования погрузочных органов с нагребавшими звездами // Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия: материалы I Междунар. науч. конф. 29-30 сентября 2013 г. — СПб; North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2013.
4. **Хазанович Г. Ш., Лоховинин С. Е.** Экспериментальные исследования производительности погрузочного органа с нагребавшими лапами // Шахт. и карьерный транспорт. — М.: Недра, 1984. — Вып. 9.
5. **Хазанович Г. Ш., Афонина Н. Б., Отроков А. В.** Физические закономерности процесса погрузки горной массы погрузочными органами с нагребавшими звездами // Горн. оборудование и электромеханика. — 2013. — № 4.
6. **Хазанович Г. Ш.** Взаимодействие груза с погрузочным органом // Проектирование и конструирование транспортных машин и комплексов: учеб. для вузов / под ред. И. Г. Штокмана. — М.: Недра, 1986.
7. **Афонина Н. Б.** Математическое моделирование рабочих процессов погрузочных органов с нагребавшими звездами // Совр. проблемы науки и образования. — 2013. — № 5; URL: <http://www.science-education.ru/111-10528> (дата обращения: 28.10.2013).