

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.



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 $\theta$ , 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  $\beta$ . Угол установки лучей  $\theta$  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  $\beta$ ), угла установки  $\theta$ , 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.

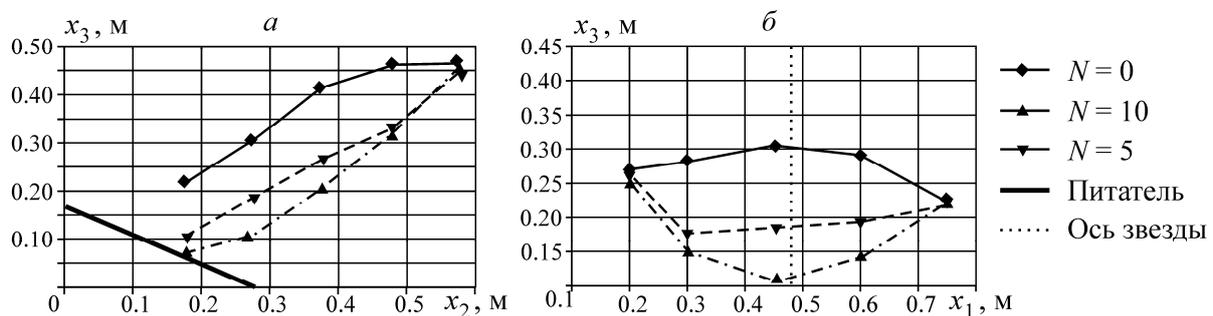


Рис. 2. Профили штабеля для звезды с  $z = 6$ ,  $\theta = 0^\circ$  в начальном положении ( $N = 0$ ) и после 5 и 10 оборотов нагребающей звезды: *a* — линия III; *б* — линия D

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  $\theta$  (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).

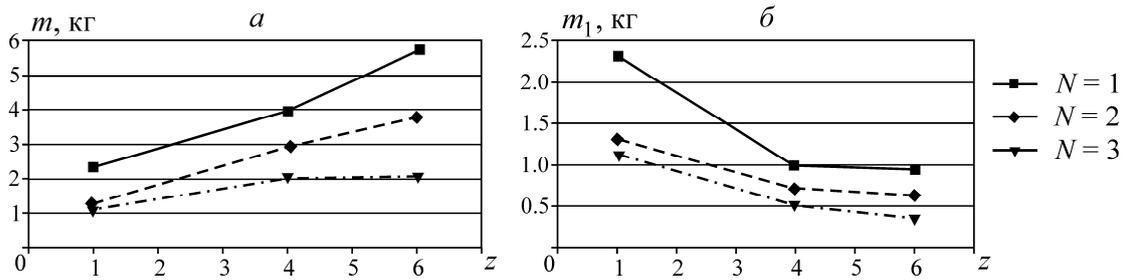


Рис. 3. Зависимость массы погруженного материала за один оборот звезды (а) и погрузочной способности отдельного луча звезды (б) от количества лучей  $z$  при разных номерах оборота звезды  $N$  для условий:  $n = 24$  об/мин;  $h = 0.02$  м;  $\theta = 0^\circ$

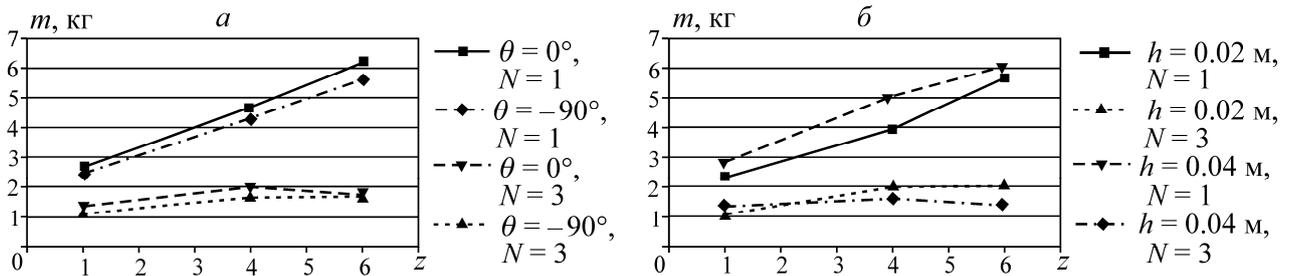


Рис. 4. Зависимость массы погруженного материала за один оборот звезды от количества лучей  $z$ : а — при разных углах установки лучей  $\theta$  и номерах оборота звезды  $N$ ; б — при разных высотах лучей  $h$  и номерах оборота звезды  $N$  для условий:  $n = 24$  об/мин;  $h = 0.02$  м

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.

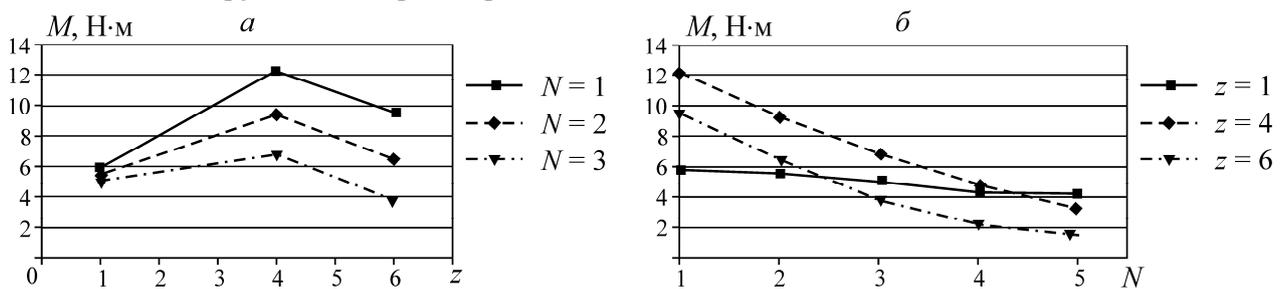


Рис. 5. Зависимость среднего момента сопротивления  $M$ : а — от количества лучей  $z$  при разных номерах оборота звезды  $N$ ; б — от номера оборота звезды  $N$  при разном количестве лучей  $z$  для условий:  $h = 0.02$  м;  $\theta = 0^\circ$

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  $-90^\circ$  позволяет снизить момент сопротивления (рис. 6). Это объясняется тем, что нагребающая звезда с лучами, установленными под углом  $-90^\circ$ , захватывает меньше материала вследствие особенностей перемещения лучей в штабеле и характера заполнения материалом межлучевого пространства.

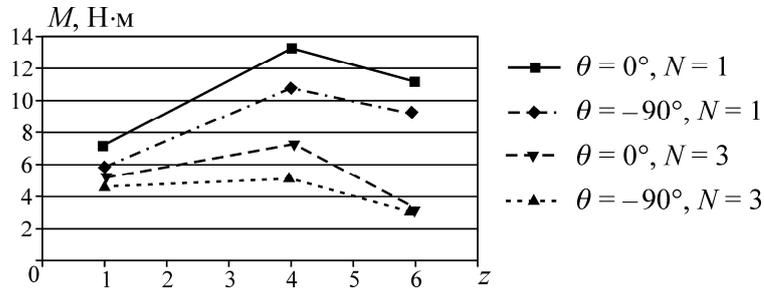


Рис. 6. Зависимость момента сопротивления  $M$  от количества лучей  $z$  при разных углах установки лучей  $\theta$  и номерах оборота звезды  $N$  для условий  $h = 0.02$  м

### 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,  $\text{м}^2$ ;  $K_{Q_h}$ ,  $K_{Q_\theta}$ ,  $K_{Q_z}$ ,  $K_{Q_N}$  — 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  $K_{M_h}$ ,  $K_{M_\theta}$ ,  $K_{M_z}$ ,  $K_{M_N}$ :

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

где  $\gamma$  — 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 нагрбающей звездой, ее производительности и нагрузок, возникающих при внедрении лучей звезды в штабель и захвате порции материала. Экспериментально установлены количественные характеристики рабочего процесса погрузки материала нагрбающей звездой:

— с увеличением количества лучей объем захвата отдельным лучом уменьшается, а объем захвата нагрбающей 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  $-90^\circ$ .

Установлены регрессионные зависимости производительности и нагрузок исследуемого погрузочного органа:

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

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

— среднего значения момента сопротивления вращению за полный оборот нагрбающей 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 нагрбающими звездами // Горн. оборудование и электромеханика. — 2013. — № 1.
3. **Афонина Н. Б., Отроков А. В., Воронов П. Р.** Экспериментальные исследования погрузочных органов с нагрбающими 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 нагрбающими 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 нагрбающими 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 нагрбающими звездами // Совр. проблемы науки и образования. — 2013. — № 5; URL: <http://www.science-education.ru/111-10528> (дата обращения: 28.10.2013).