

УДК622.619

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПОГРУЗОЧНЫХ ОРГАНОВ С НАГРЕБАЮЩИМИ ЗВЕЗДАМИ

**Афони́на Н.Б.**

*Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института) им. М. И. Платова, Шахты, Россия (346500, Ростовская обл., г.Шахты, пл.Ленина, 1), e-mail: myshxa@yandex.ru*

**В статье для разработки инженерной методики выбора рациональных параметров погрузочных органов с нагребными звездами с целью повышения эффективности эксплуатации проходческих комбайнов избирательного действия выполнены экспериментальные исследования процессов взаимодействия с разрушенной горной массой. Приведена структура математических моделей формирования производительности и нагрузок в нагребных звездах погрузочных органов проходческих комбайнов избирательного действия. Разработанные математические модели производительности и нагрузок дают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, полученными на модельной экспериментальной установке. Показано, что для проходческих комбайнов избирательного действия минимизация энергоёмкости погрузки материала позволяет достичь наилучших показателей работы всего комбайна.**

**Ключевые слова:** проходческий комбайн, погрузочный орган с нагребными звёздами, математическая модель, формирование производительности и нагрузок.

## MATHEMATICAL MODELING WORKFLOW OF LOADING MINING MASS WITH LOADING ORGANS WITH RAKING SPROCKETS

**Afonina N.B.**

*Shakhty institute (branch) of South-Russian state technical university (Novocherkassk polytechnic institute)*

**The article deals with the experimental investigation of processes of interaction of cutting combines of choosing action with broken mining mass which were fulfilled for working out an engineering method of choice of loading organs with grasping stars for the purpose of increasing the efficiency of exploitation of cutting combines of choosing action. The structure of mathematical models of forming production and loads in grasping stars of loading organs of cutting combines of choosing action is given. The worked out mathematical models of productivity and loadings give satisfactory correspondence with experimental data received on the model installation. It is shown that for cutting combines of choosing action minimization of power capacity of loading material permits to reach the best indices of work of the whole combine.**

**Keywords:** driving combine, loading organ with raking sprockets, mathematical model, forming performance and load.

### **Введение**

Для проведения горных выработок широко применяются проходческие комбайны избирательного действия, имеющие различные типы погрузочных органов. В последнее время широкое распространение находят погрузочные органы с нагребными звездами, отличающиеся простотой конструкции, повышенной надёжностью. Однако такие погрузочные органы недостаточно изучены [5]. Физические процессы погрузки горной массы отличаются от подобных для погрузочных органов с нагребными лапами вследствие существенно различной конструкции и характера движения исполнительных элементов в штабеле горной массы (траектории, скорости, формы элементов).

### **Цель исследований**

Целью работы является повышение эффективности эксплуатации проходческих комбайнов избирательного действия с нагребными звездами путем выбора рациональных параметров погрузочных органов для заданных условий эксплуатации на основе изучения процессов взаимодействия с разрушенной горной массой.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- 1) проведены экспериментальные исследования на модели погрузочного органа с нагребными звездами различной конфигурации для изучения влияния геометрических параметров на производительность погрузки и сопротивления зачерпыванию;
- 2) проанализирован процесс взаимодействия погрузочных органов со штабелем горной массы, на основе чего построены математические модели и алгоритмы расчета рабочего процесса;
- 3) разработана инженерная методика выбора параметров погрузочного органа.

### **Экспериментальные исследования**

При разработке методики экспериментальных исследований [2] были учтены основные особенности формирования объема единичного черпания, который определяет производительность погрузочного органа и комбайна в целом, а также сопротивления зачерпыванию горной массы.

Экспериментальные исследования позволили установить [1, 2, 6] влияние следующих факторов на формирование производительности и нагрузок в приводе нагребных звезд: количество лучей нагребной звезды  $Z$  (угол развала лучей  $\beta$ ), угол установки  $\theta$ , высота  $h$ , длина  $l$  лучей (зависит от диаметров звезды  $r$  и центральной втулки  $r_l$  соответственно) и частота вращения нагребной звезды  $n$ . Высота штабеля и крупность материала принята постоянной, соответствующей средним производственным данным; угол наклона питателя —  $20^\circ$ , что соответствует, например, проходческому комбайну КП-21 и другим.

### **Структура математической модели производительности**

Как показали исследования, производительность погрузочного органа зависит от конструктивных параметров нагребной звезды, гранулометрического состава материала, представленного средним размером куска  $d_{sr}$ , глубины внедрения погрузочного органа  $S$ , а также объема активной зоны материала штабеля  $V_a$  [3, 4, 6]:

$$Q = f(l, h, \beta(z), n, V_a, d_{sr}, \theta).$$

Процесс формирования объема захвата материала лучами нагребных звезд подчиняется тем же основным закономерностям, что и нагребные лапы шахтных погрузочных машин [7]. Однако, погрузочные органы с нагребными звездами имеют существенные конструктивные особенности, влияющие на процесс погрузки. Признано целесообразным применить мультипликативную форму зависимости, что позволяет

сохранить преюбреженность в известном подходе к расчету производительности и сопротивлений зачерпыванию. Теоретическую производительность нагрбающей звезды можно выразить следующим соотношением [3]:

$$Q \approx F_{max} \cdot h \cdot n \cdot K_{m,h} \cdot K_{m,\theta} \cdot K_{m,Z} \cdot K_{m,N}, \text{ м}^3/\text{мин},$$

где  $F_{max} = f(Z)$ - максимальная площадь захвата материала одним лучом нагрбающей звезды в функции числа лучей,  $\text{м}^2$ ;

$K_{m,h}$ ,  $K_{m,\theta}$ ,  $K_{m,Z}$ ,  $K_{m,N}$  — соответственно коэффициенты влияния относительной высоты луча, его угла установки и режима работы погрузочного органа (влияние глубины внедрения или номера черпания).

### **Структура математической модели нагрузок**

Зависимость среднего значения момента сопротивления на валу нагрбающих звезд за один оборот звезды по аналогии с нагрбающими лапами зависит от массы захваченного материала, диаметра нагрбающей звезды  $d_{zv}$  и ряда факторов, учитываемых коэффициентами  $K_{M,h}$ ,  $K_{M,\theta}$ ,  $K_{M,Z}$ ,  $K_{M,N}$ :

$$M_{cp} \approx F_{max} \cdot h \cdot \gamma \cdot g \cdot d_{zv} \cdot K_{M,h} \cdot K_{M,\theta} \cdot K_{M,Z} \cdot K_{M,N}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где  $\gamma$  - плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$$g = 9,81 \text{ — ускорение свободного падения, } \text{м}/\text{с}^2.$$

Следует отметить, что, несмотря на аналогичные обозначения коэффициентов влияния различных факторов в моделях производительности и момента сопротивления, конкретные математические зависимости каждого из коэффициентов, как показано ниже, имеют различные математические выражения.

### **Геометрическое моделирование площади черпания**

Для определения зависимости площади захвата материала лучом нагрбающей звезды от конструктивных параметров ( $Z$ ,  $\theta$ ,  $d_{zv}$ ,  $r_l$ ) составлена расчетная схема (рис. 1) и проведено геометрическое моделирование нагрбающей звезды.

Нагрбающая звезда состоит из центральной втулки с прикрепленными на ней нагрбающими лучами. Точки крепления лучей к втулке обозначены  $a_i$  (где  $i=1..Z$ ), края лучей  $b_i$  описывают круговую траекторию при вращении нагрбающей звезды.

Нагрбающие лучи могут устанавливаться под углом  $\theta$ , имеющим знак минус при повороте луча против движения (на рис. 1 по часовой стрелке). Лучи на звезде устанавливаются равномерно и для определенности нумеруются по направлению вращения звезды. Угол поворота звезды  $\varphi$  соответствует углу поворота первого луча.

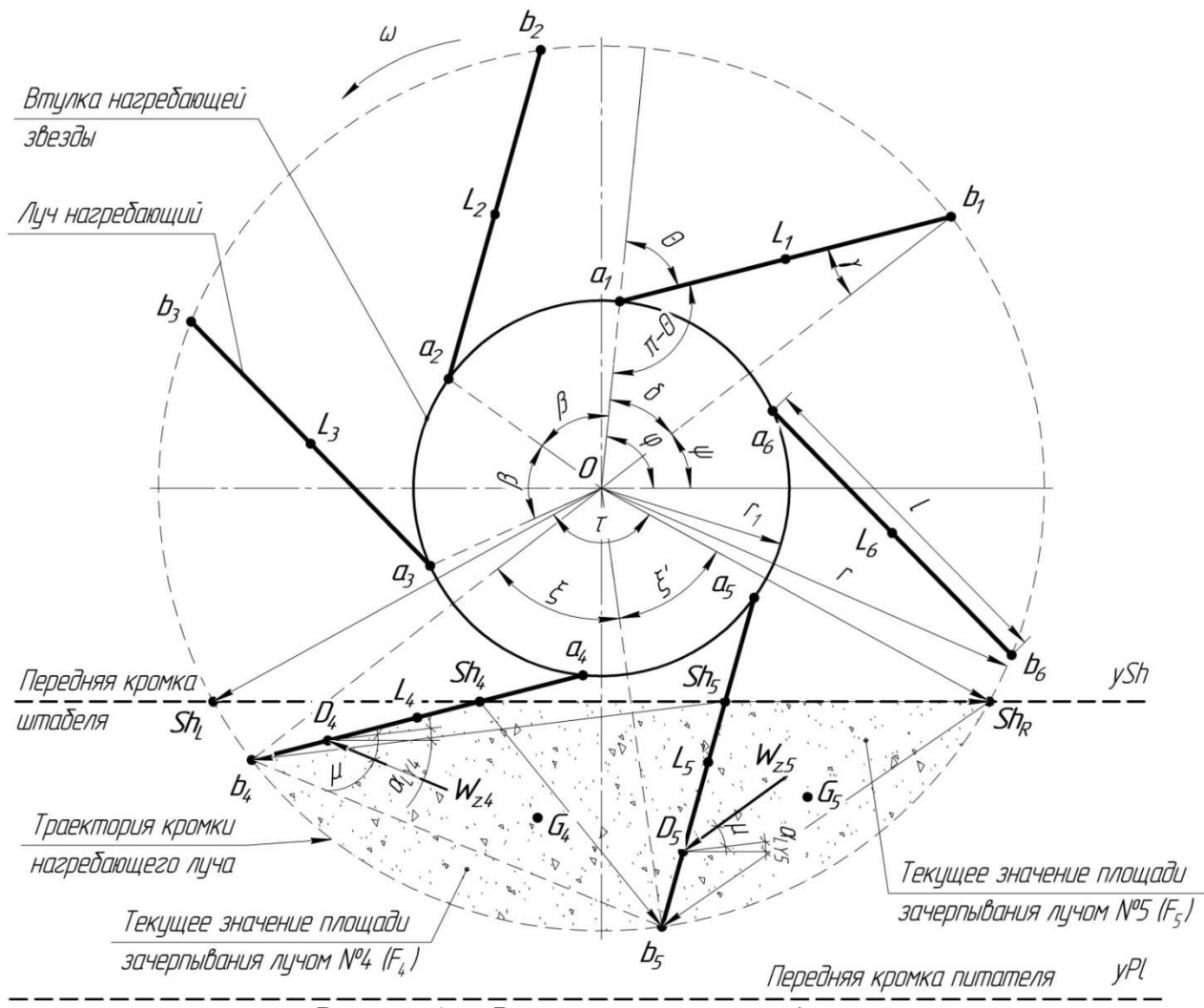


Рисунок 1 — Расчетная схема нагребавшей звезды

В общем случае, решить задачу определения координат точек  $b_i$  при любом угле поворота звезды  $\varphi$  можно рассматривая треугольник  $Oa_1b_1$ :

$$\begin{cases} b_i^{(x)} = r \cdot \cos\left(\varphi - \arcsin\left(\frac{l}{r} \cdot \sin(-\theta) + \beta \cdot (i - 1)\right)\right) \\ b_i^{(y)} = r \cdot \sin\left(\varphi - \arcsin\left(\frac{l}{r} \cdot \sin(-\theta) + \beta \cdot (i - 1)\right)\right) \end{cases}$$

где  $l = \sqrt{r_1^2 + r^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r \cdot \cos\left(\theta - \arcsin\left(\frac{r_1}{r} \cdot \sin(\theta)\right)\right)}$  - длина луча.

Для погрузки горной массы нагребавшая звезда погружается в штабель горной массы на величину  $S$ , образуя, таким образом, геометрическую площадь захвата материала:

$$F_{geom} = \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot (\tau - \sin(\tau)).$$

В отличие от погрузочного органа с нагребавшей лапой [5, 7], нагребавшая звезда имеет несколько нагребавших элементов. При сочетании определенной глубины внедрения рабочего органа в штабель горной массы и количества лучей возможны два принципиально различных варианта работы нагребавших лучей [2]:

1. В каждый момент времени в процессе черпания в штабеле находится только один луч. Данный вариант возможен при количестве лучей один, два, а также, при определенной глубине внедрения, три луча.

2. В каждый момент времени в процессе черпания в штабеле может находиться два и более лучей. Условие существования второго варианта работы лучей:

$$S > r \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) = r \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{z}\right)\right) \text{ или } (yS) > r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{z}\right).$$

Текущая площадь  $F_i$  захвата материала нагребующим лучом определяется как сумма площадей четырехугольника  $Sh_i b_i b_{i+1} Sh_{i+1}$  и сегмента траектории, ограниченной хордой  $b_i b_{i+1}$ :

$$F_i = \frac{1}{2} \left[ (\overrightarrow{b_i Sh_{i+1}} \times \overrightarrow{b_{i+1} Sh_i}) + r^2 \cdot (\xi - \sin(\xi)) \right].$$

Когда  $i+1$  луч покидает штабель, площадь захвата определяется по формуле:

$$F_i = \frac{1}{2} \left[ (\overrightarrow{b_i Sh_R} \times \overrightarrow{Sh_i Sh_R}) + r^2 \cdot (\xi' - \sin(\xi')) \right].$$

Для геометрического моделирования формирования площадей захвата лучей нагребующей звезды была написана программа на языке Python.

В результате моделирования установлено, что максимальная площадь захвата материала нагребующим лучом от угла установки лучей при постоянстве остальных параметров ( $Z$ ,  $d_{zv}$ ,  $r_l$ ,  $S$ ) не зависит. Незначительная разница в массах погруженного материала, установленная экспериментально, объясняется различной траекторией движения материала между лучами: при внедрении радиально установленного луча ( $\theta=0^\circ$ ) в штабель луч сдвигает первые куски по ходу движения, уплотняя материал перед собой и частично выдавливая его к центру звезды, что не наблюдается на лучах с  $\theta=-90^\circ$ . Эта разница учитывается коэффициентами  $K_{m,\theta}$  и  $K_{M,\theta}$ .

### Математические модели рабочего процесса

Обработка результатов экспериментальных исследований нагребующих звезд позволила установить зависимости массы погруженного материала и среднего момента сопротивления от высоты, угла установки, количества нагребующих лучей и порядкового номера черпания (режима работы погрузочного органа) (рис. 2).

Обработка результатов исследований нагребующих звезд позволила вывести зависимость массы погруженного материала за один определенный оборот звезды:

$$m = 0,91 \cdot N_{zv} \cdot F_{max} \cdot h \cdot \gamma \cdot K_{m,h} \cdot K_{m,\theta} \cdot K_{m,Z} \cdot K_{m,N}, \text{ кг}$$

где  $N_{zv}$  — количество нагребующих звезд на погрузочном органе;

$K_{m,h}$  — коэффициент влияния относительной высоты луча:

$$K_{m,h} = 0,5 \cdot (1 + h_d^{-1} + 0,1 \cdot h_d);$$

$h_d = \frac{h}{d_{sr}}$  — относительная высота луча;

$K_{m,\theta} = e^{0,05 \cdot \theta}$  — коэффициент влияния угла установки лучей;

$K_{m,Z} = e^{0,48 \cdot Z}$ - коэффициент влияния количества лучей на нагребающей звезде;

$K_{m,N} = 1,14 \cdot e^{-0,14 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9} \cdot N}$ - коэффициент режима работы погрузочного органа.

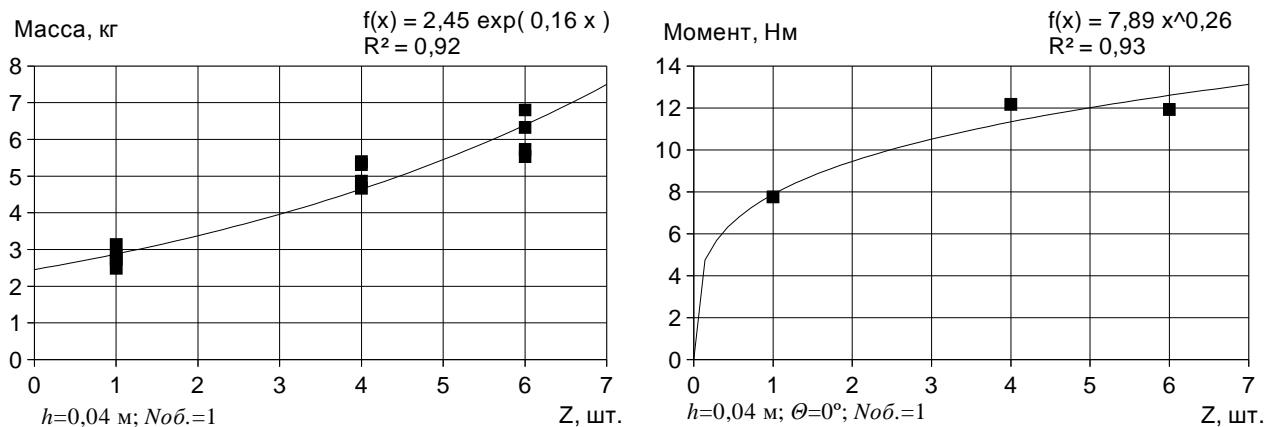


Рисунок 2 — Зависимости массы погруженного материала и среднего момента сопротивления от конструктивного исполнения нагребающей звезды и режима работы

Среднюю производительность погрузочного органа с двумя нагребающими звездами за первые  $N$  оборотов нагребающих звезд удобно представить в виде:

$$Q^{(N)} = 2,1 \cdot F_{max} \cdot h \cdot \gamma \cdot n \cdot K_{m,h} \cdot K_{m,\theta} \cdot K_{m,Z} \cdot e^{-0,14 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9}} \cdot \frac{1 - (e^{-0,14 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9}})^N}{(1 - e^{-0,14 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9}})^N}, \text{ кг/мин.}$$

Аналогично, анализируя зависимости среднего момента сопротивлений от конструктивных параметров и режима работы погрузочного органа (рис. 2), определены коэффициенты влияния математической модели момента сопротивлений.

Зависимость среднего значения момента сопротивления на нагребающих звездах погрузочного органа от захваченного материала за один определенный оборот звезды:

$$M_{c.zv} = 1,48 \cdot N_{zv} \cdot F_{max} \cdot h \cdot \gamma \cdot g \cdot d_z \cdot K_{M,h} \cdot K_{M,\theta} \cdot K_{M,Z} \cdot K_{M,N}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где  $g = 9,81$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$d_z$  — диаметр нагребающей звезды, м;

$K_{M,h} = 0,5 \cdot h_d^{-0,2} \cdot (1 + h_d^{-1} + 0,1 \cdot h_d)$  — влияние относительной высоты луча;

$K_{M,\theta} = e^{0,15 \cdot \theta}$ - коэффициент влияния угла установки лучей;

$K_{M,Z} = Z^{0,7}$ - коэффициент влияния количества лучей на нагребающей звезде;

$K_{M,N} = e^{-0,1 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9} \cdot N}$ - коэффициент влияния режима работы погрузочного органа.

Средний момент сопротивления за первые  $N$  оборотов нагребающих звезд, учитывая количество звезд равное двум:

$$M_{c.zv}^{(N)} = 28,96 \cdot F_{max} \cdot h \cdot \gamma \cdot d_z \cdot K_{M,h} \cdot K_{M,\theta} \cdot K_{M,Z} \cdot e^{-0,1 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9}} \cdot \frac{1 - (e^{-0,1 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9}})^N}{(1 - e^{-0,1 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9}})^N}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

### Оценка адекватности математических моделей

Относительная ошибка в определении массы погруженного материала и среднего момента сопротивления за один определенный оборот нагрбающей звезды в сравнении с экспериментальными значениями в среднем не превышает 12 %, например, на рис. 3 и 4 приведены зависимости для модельных условий (коэффициент моделирования  $\lambda=3,5$ ). Линии минимума и максимума соответствуют относительной ошибке в 15 %.

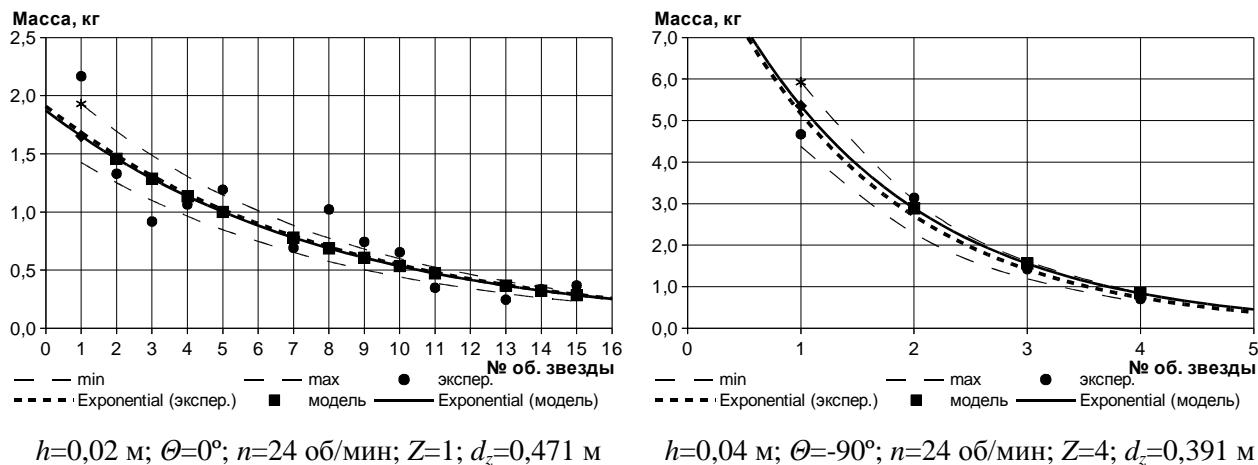


Рисунок 3 — Оценка адекватности математической модели массы погруженного материала для разных конструктивных исполнений нагрбающих звезд

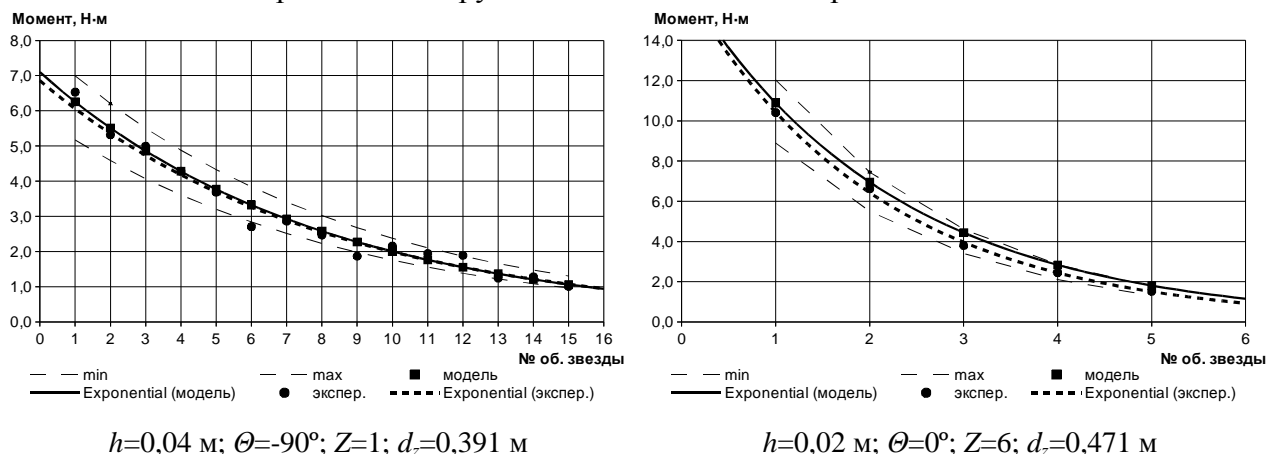


Рисунок 4 — Оценка адекватности математической модели среднего момента сопротивления для разных конструктивных исполнений нагрбающих звезд

### Энергоемкость процесса погрузки

При проектировании погрузочных органов проходческих комбайнов с нагрбающими звездами для сравнения между собой различных вариантов удобно и значительно более информативно пользоваться не значениями производительности и нагрузок, а показателем энергоемкости:

$$E = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_{с.зв}}{3,6 \cdot t}, \text{ мВт} \cdot \text{ч/кг.}$$

Средняя энергоемкость за первые  $N$  оборотов нагрбающих звезд:

$$E^{(N)} = 24,1 \cdot d_z \cdot h_d^{-0,2} \cdot e^{0,1 \cdot \theta} \cdot Z^{0,7} \cdot e^{-0,48 \cdot Z} \cdot e^{0,04 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9}} \cdot \frac{1 - (e^{0,04 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9}})^N}{(1 - e^{0,04 \cdot h_d^{0,5} \cdot Z^{0,9}})^N}, \text{ мВт} \cdot \text{ч/кг.}$$

В результате моделирования установлено, что наименьшей энергоемкостью процесса погрузки обладают нагребавшие звезды с шестью лучами, установленными под углом  $-90^\circ$ , несмотря на то, что наибольшую производительность показывают звезды с радиальными лучами ( $Z=6$  и  $\Theta=0^\circ$ ), а наименьшие нагрузки испытывают звезды с одним лучом.

### **Выводы**

1. Разработанные математические модели производительности и нагрузок дают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, полученными на модельной экспериментальной установке. Относительная ошибка не превышает 12 %.
2. Для проходческих комбайнов избирательного действия минимизация энергоемкости погрузки материала погрузочным органом при заданной производительности, определяемой производительностью разрушающего органа, позволяет достичь наилучших показателей работы всего проходческого комбайна.
3. Используя полученные математические модели можно выполнить оптимизацию параметров погрузочного органа, задавшись целевой функцией и системой ограничений.

### **Список литературы**

1. Афолина Н.Б., Отроков А.В. К разработке методики исследования погрузочных органов проходческих комбайнов с нагребавшими звездами //Горное оборудование и электромеханика. - 2013. - №1 – С.25-30.
2. Афолина Н.Б., Хазанович Г.Ш., Отроков А.В. Формирование гипотезы для расчета производительности за чистое время работы погрузочных органов с нагребавшими звездами //Перспективы развития Восточного Донбасса: материалы IV-й Междунар. и 62 Всерос. науч.-практ. конф., апрель 2013, г.Шахты /Шахтинский ин-т (филиал) ЮРГТУ(НПИ). - Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2013. - С.58-62.
3. Афолина Н.Б., Отроков А.В. К разработке математической модели погрузочных органов с нагребавшими звездами ///Современные научные исследования и инновации. – Сентябрь 2013. - № 9 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2013/09/26732> (дата обращения: 05.10.2013).
4. 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. - С.34-38.
5. Хазанович Г.Ш., Афолина Н.Б. К вопросу об исследовании современных комбайнов для строительства горных выработок //Материалы I Международной научно-практической



конференции «Современная наука: теория и практика». Том первый. Естественные и технические науки. г.Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. - С.561-564.

6. Хазанович Г.Ш., Афонина Н.Б., Отроков А.В. Физические закономерности процесса погрузки горной массы погрузочными органами с нагребными звездами /Горное оборудование и электромеханика. - 2013. - №4 – С.25-31.

7. Хазанович Г.Ш., Отроков А.В. Математическое моделирование процессов формирования производительности и нагрузок погрузочного органа с нагребными лапами /Горное оборудование и электромеханика. - 2010. - №8 – С.46-51.

Рецензенты:

Луганцев Б.Б., д.т.н., генеральный директор ОАО «Шахтинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт», г.Шахты.

Евстратов В.А., д.т.н., профессор, декан Технологического факультета Шахтинского института (филиала) ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова, г.Шахты.