

## ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ

М. Ю. Колобов, О. В. Чагин, В. Н. Блиничев

МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ КОЛОБОВ – д.х.н., доцент, заведующий кафедрой технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет». E-mail: mikhailkolobov@rambler.ru.

ОЛЕГ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ ЧАГИН – к.х.н., доцент кафедры технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет». E-mail: mechanics@isuct.ru.

ВАЛЕРЬЯН НИКОЛАЕВИЧ БЛИНИЧЕВ – д.х.н., профессор кафедры технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет». E-mail: mechanics@isuct.ru.

15300, Россия, Иваново, пр. Шереметевский, д. 7, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ). E-mail: mikhailkolobov@rambler.ru.

*В статье рассматриваются экспериментальные исследования по износу плоских разгонных элементов и ударных элементов (отбойников) в разработанном измельчителе.*

*Получены математические модели износа плоских радиальных разгонных элементов измельчителя центробежного действия, изготовленные из широко распространенных марок сталей разной твердости: Ст.3, сталь 40Х, сталь 45, сталь 65Г. Наибольшее влияние на износ элементов оказывает частота вращения ротора, меньшее – диаметр исходных частиц и производительность измельчителя.*

*В результате экспериментальных исследований получены математические модели процесса износа поверхностей разгонных и ударных элементов измельчителя центробежного действия в зависимости от исследуемых факторов, которые позволяют рассчитать срок их работы. Анализ полученной математической модели и поверхностей откликов позволяет сделать вывод о значительном влиянии всех исследуемых факторов на износ ударных элементов, особенно частоты вращения ротора и угла атаки частиц исходных материалов на ударный элемент.*

*Установка необходимого количества сменных разгонных и ударных элементов позволяет увеличить срок их работы и межремонтный период измельчителя в 1,5–2 раза.*

**Ключевые слова:** разгонные и ударные элементы, износ, центробежно-ударные измельчители.

## INCREASE OF LONGEVITY OF WORKING ORGANS OF CENTRIFUGAL-SHOCK GRINDING DOWN

M. Yu. Kolobov, O. V. Chagin, V. N. Blinichev

7, Sheremetievskiy Avenue, Ivanovo, 153000, Russia. Ivanovo State University of Chemistry and Technology.

*The article deals with experimental studies on the wear of flat acceleration elements and shock elements (bumpers) in the developed shredder.*

*Mathematical models of wear of the plane radial dispersal elements of the shredder of centrifugal action made of widespread grades of steels of different hardness are received: St. 3, steel 40X, steel 45, steel 65G. The greatest impact is the rotor speed, smaller-the diameter of the initial particles and the performance of the shredder.*

*The mathematical model of the percussion elements was developed. Analysis of the obtained mathematical model and surface response allows making a conclusion about significant influence of all investigated factors on the wear of the impact elements, in particular the rotor speed and angle of attack of the particles of source material on the impactor.*

*Thus, as a result of experimental studies, mathematical models of the process of wear of the surfaces of the acceleration and impact elements of the centrifugal chopper are obtained depending on the studied factors, which allow calculating the life of their work.*

*Installation of the required number of replaceable acceleration and impact elements allows to increase their working life and the overhaul period of the shredder by 1,5-2 times.*

**Key words:** acceleration and shock elements, wear, centrifugal impact grinders.

Широкое распространение в различных отраслях промышленности получили измельчители центробежно-ударного действия [1–4]. Положительными факторами применения таких измельчителей по сравнению с измельчителями других типов (щекowymi и валковыми дробилками, шаровыми и вибрационными мельницами) являются малые габариты и соответственно низкая стоимость машины, высокие производительность и степень измельчения, низкий удельный расход энергии, использование создаваемого роторами вентиляционного потока.

Одним из недостатков измельчителей ударного типа является относительно низкий ресурс рабочих органов, что требует их частой замены или полного восстановления и повышает эксплуатационные расходы.

Одним из важнейших факторов, обуславливающих эффективность измельчения в мельницах центробежно-ударного действия, является скорость и угол соударения частиц материала с ударными элементами мельницы. Для достижения скоростей нагружения, необходимых для получения заданного гранулометрического состава продукта помола, важно оптимально выбрать траектории движения измельчаемого материала, длину свободного полета частиц и производительность измельчителя. Для эффективного проведения процесса тонкого измельчения необходимо так организовать движение частиц измельчаемого материала, чтобы ограничить их столкновение с ударными элементами под неблагоприятными углами и в то же время достичь скоростей, достаточных для разрушения.

Известно, что разрушение частицы материала происходит лучше при прямом или близком к нему углу столкновения ее с поверхностью ударного элемента. Поэтому разгонные элементы должны

устанавливаться под таким углом к диаметру ротора, чтобы обеспечить прямой угол атаки летящей частицы к поверхности ударного элемента.

Изнашивание рабочей поверхности ударных элементов и разгонных лопаток центробежных измельчителей происходит в результате удара измельчаемого материала об отбойники и его скольжении по лопаткам. В результате износа увеличивается радиальная щель между разгонными и ударными элементами, износ разгонных лопаток ведет к изменению направления движения и скорости частиц, вылетающих с поверхности лопаток.

Повышение ресурса рабочих элементов ударных измельчителей не должно приводить к снижению эффективности измельчения. Например, нельзя уменьшить угол атаки или снизить скорость удара, чтобы уменьшить интенсивность изнашивания.

Важным этапом для оптимизации проведения процесса измельчения в мельницах центробежно-ударного действия является расчет необходимого количества разгонных и ударных элементов [5].

На основании теоретических расчетов и проведенных нами исследований разработан измельчитель центробежно-ударного действия [6, 7].

В разработанном измельчителе экспериментальные исследования по износу плоских разгонных и ударных элементов (отбойников) проводили при измельчении кварцевого песка (модельный материал).

По результатам однофакторных исследований разгонных элементов были определены интервалы и уровни варьирования факторов и реализована матрица плана эксперимента  $3^3$  [8]. В качестве независимых переменных использовались:  $X_1$  – диаметр исходных частиц, мм;  $X_2$  – частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $X_3$  – производительность измельчителя,  $\text{кг/час}$ . В качестве критерия оптимизации выбран  $Y_1$  – интенсивность

изнашивания по массе, г/кг. Диапазоны варьирования факторов:  $0,45 \leq X_1 \leq 1,15$  мм, интервал 0,35 мм;  $3775 \leq X_2 \leq 5405$  мин<sup>-1</sup>, интервал 815 мин<sup>-1</sup>;  $200 \leq X_3 \leq 500$  кг/ч, интервал 150 кг/ч.

Были получены математические модели износа плоских радиальных разгонных элементов измельчителя центробежного действия, изготовленных из широко распространенных марок сталей разной твердости:

– для стали Ст. 3:

$$Y_1 = 0,589781 + 0,10778X_1 + 0,541635X_2 + 0,311009X_2^2 - 0,101688X_3 + 0,048474X_3^2 + 0,0375X_1X_2 - 0,045X_2X_3 \quad (1)$$

– для стали 40Х:

$$Y_1 = 0,395706 + 0,083899X_1 + 0,345469X_2 + 0,173531X_2^2 - 0,099543X_3 + 0,043784X_3^2 - 0,02875X_2X_3 \quad (2)$$

– для стали 45:

$$Y_1 = 0,247602 + 0,067094X_1 - 0,023146X_1^2 + 0,286737X_2 + 0,179125X_2^2 - 0,06405X_3 + 0,031257X_3^2 + 0,035X_1X_2 - 0,0275X_2X_3 \quad (3)$$

– для стали 65Г:

$$Y_1 = 0,156841 + 0,044097X_1 + 0,165344X_2 + 0,081794X_2^2 - 0,044087X_3 + 0,015408X_3^2 - 0,02125X_1X_2 \quad (4)$$

После преобразования математических моделей (1–4) были получены функции отклика в натуральных значениях факторов:

– для стали Ст. 3:

$$Y_1' = 7,550244 - 0,295475d - 0,003609n + 0,00000047n^2 - 0,000496Q + 0,00000215Q^2 + 0,000131dn - 0,00000037nQ \quad (5)$$

– для стали 40Х:

$$Y_1' = 3,855242 + 0,239711d - 0,001892n + 0,00000026n^2 - 0,000947Q + 0,00000195Q^2 - 0,00000024nQ \quad (6)$$

– для стали 45:

$$Y_1' = 4,448786 - 0,069178d - 0,188947d^2 - 0,002143n + 0,00000027n^2 - 0,000366Q + 0,00000139Q^2 + 0,000123dn - 0,00000022nQ \quad (7)$$

– для стали 65Г:

$$Y_1' = 1,632423 + 0,467928d - 0,000867n + 0,000000123n^2 - 0,000773Q + 0,00000068Q^2 - 0,000074dn \quad (8)$$

В уравнениях (5)–(8) принято: d – диаметр исходных частиц, мм; n – частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>; Q – производительность измельчителя, кг/час.

На рисунках 1 и 2 показаны примеры зависимостей интенсивности изнашивания разгонных элементов (лопаток) ( $Y_1$ ) от диаметра исходных частиц ( $X_1$ ), частоты вращения ротора ( $X_2$ ), производительности измельчителя ( $X_3$ ). Наибольшее влияние оказывает частота вращения ротора, меньшее – диаметр исходных частиц и производительность измельчителя.

Интенсивность изнашивания лопаток увеличивается с 0,27 г/кг до 1,79 г/кг (Ст. 3), с 0,12 г/кг до 1,2 г/кг (сталь 40Х), с 0,08 г/кг до 0,91 г/кг (сталь 45), с 0,02 г/кг до 0,53 г/кг (сталь 65Г) с повышением частоты вращения ротора с 3775 мин<sup>-1</sup> до 5405 мин<sup>-1</sup>. Интенсивность изнашивания лопаток при частоте вращения ротора 5405 мин<sup>-1</sup> повышается с 1,2 г/кг до 1,79 г/кг (Ст. 3), с 0,72 г/кг до 1,2 г/кг (сталь 40Х), с 0,53 г/кг до 0,91 г/кг (сталь 45), с 0,33 г/кг до 0,53 г/кг (сталь 65Г) с увеличением диаметра исходных частиц от 0,45 мм до 1,15 мм. При повышении производительности от 200 кг/ч до 500 кг/ч при частоте вращения

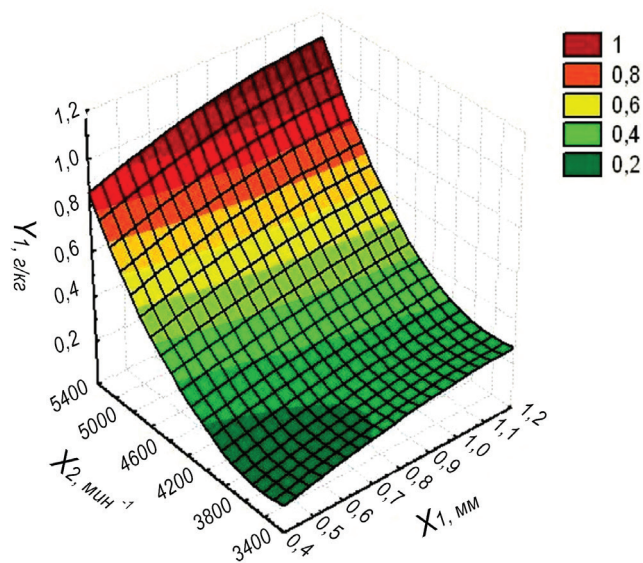
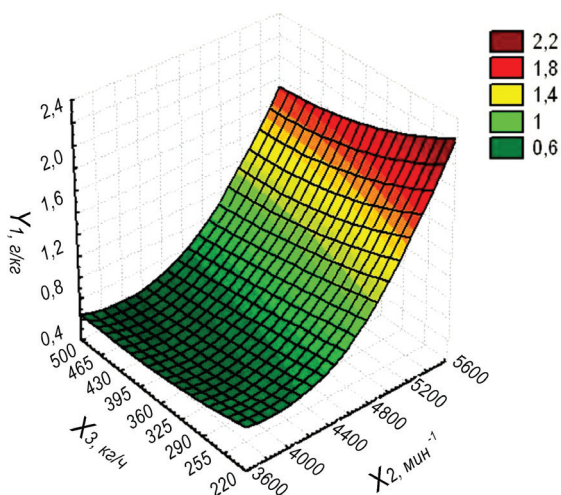


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания разгонных лопаток ( $Y_1$ ) от диаметра исходных частиц ( $X_1$ ) и частоты вращения ротора ( $X_2$ ) (при производительности измельчителя  $X_3 = 500$  кг/ч, сталь 40Х)





**Рис. 2.** Зависимость интенсивности изнашивания разгонных лопаток ( $Y_1$ ) от частоты вращения ротора ( $X_2$ ) и производительности измельчителя ( $X_3$ ) (при диаметре исходных частиц  $X_1 = 1,15$  мм, Ст. 3)

ротора 5405 мин<sup>-1</sup> наблюдается снижение интенсивности изнашивания разгонных лопаток с 1,79 г/кг до 1,44 г/кг (Ст. 3), с 1,2 г/кг до 0,91 г/кг (сталь 40X), с 0,91 г/кг до 0,72 г/кг (сталь 45), с 0,53 г/кг до 0,4 г/кг (сталь 65Г).

По результатам однофакторных исследований были определены интервалы и уровни варьирования факторов и реализована матрица плана эксперимента 3<sup>4</sup> [8]. В качестве независимых переменных использовались:

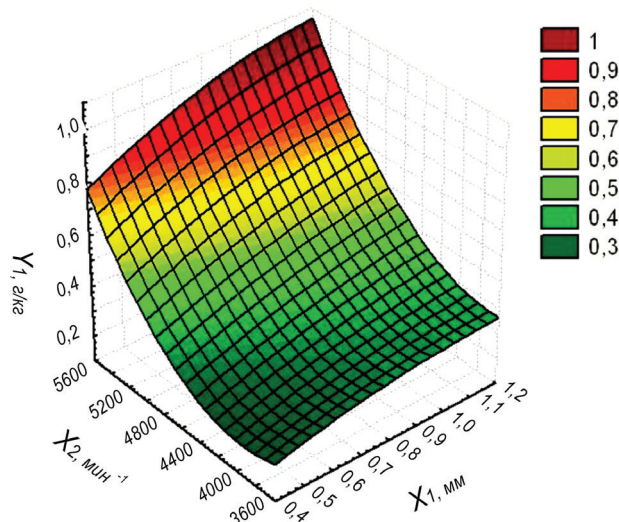
$X_1$  – диаметр исходных частиц, мм;  $X_2$  – частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>;  $X_3$  – производительность измельчителя, кг/час,  $X_4$  – угол атаки, град. В качестве критерия оптимизации выбран:  $Y_1$  – интенсивность изнашивания по массе, г/кг. Диапазоны варьирования факторов:  $0,45 \leq X_1 \leq 1,15$  мм, интервал 0,35 мм;  $3775 \leq X_2 \leq 5405$  мин<sup>-1</sup>, интервал 815 мин<sup>-1</sup>;  $200 \leq X_3 \leq 500$  кг/ч, интервал 150 кг/ч;  $60 \leq X_4 \leq 120^\circ$ , интервал 30°.

Была получена математическая модель износа ударных элементов измельчителя центробежного действия, изготовленных из стали Ст. 3:

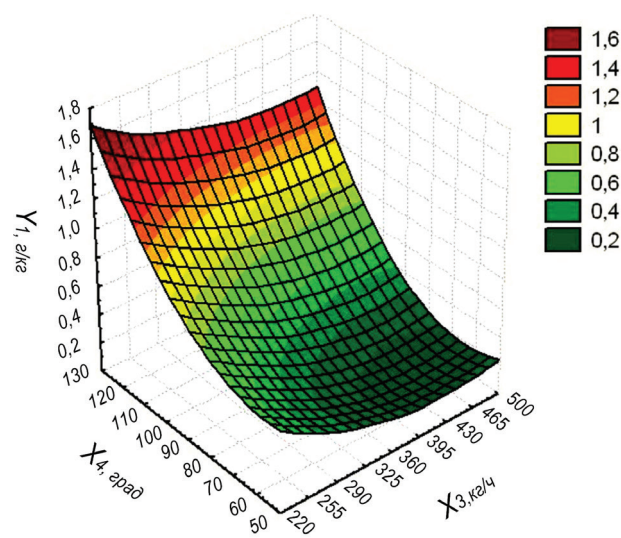
$$Y_1 = 0,294042 + 0,099087X_1 + 0,238495X_2 + 0,105054X_2^2 - 0,13669X_3 + 0,342637X_4 + 0,182395X_4^2 + 0,05125X_1X_2 + 0,05X_1X_4 - 0,05X_2X_3 + 0,1375X_2X_4 \quad (9)$$

После преобразования получена функция отклика в натуральных значениях факторов:

$$Y_1' = 5,657799 - 0,970137d - 0,00167n + 0,00000016n^2 + 0,000966Q - 0,0546802\beta +$$



**Рис. 3.** Зависимость интенсивности изнашивания ударных элементов ( $Y_1$ ) от диаметра исходных частиц ( $X_1$ ) и частоты вращения ротора ( $X_2$ ) (при производительности измельчителя  $X_3 = 200$  кг/ч, угле атаки  $X_4 = 90^\circ$ )



**Рис. 4.** Зависимость интенсивности изнашивания ударных элементов ( $Y_1$ ) от производительности измельчителя ( $X_3$ ) и угла атаки ( $X_4$ )

(при диаметре исходных частиц  $X_1 = 0,45$  мм, частоте вращения ротора  $X_2 = 5405$  мин<sup>-1</sup>)

$$+ 0,0002027\beta^2 + 0,0001797dn + 0,0047619d\beta - 0,00000041nQ + 0,0000056n\beta \quad (10)$$

где  $d$  – диаметр исходных частиц, мм;  $n$  – частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>;  $Q$  – производительность измельчителя, кг/час;  $\beta$  – угол атаки, град.

Графическое изображение поверхностей откликов показано на рис. 3 и 4.

Анализ полученной математической модели и поверхностей откликов позволяет сделать вывод о значительном влиянии всех исследуемых факторов на износ ударных элементов, особенно частоты вращения ротора и угла атаки частиц исходных материалов на ударный элемент.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований получены математические модели процесса износа поверхностей разгонных и ударных элементов измельчителя центробежного действия в зависимости от исследуемых факторов, которые позволяют рассчитать срок их работы.

Установка необходимого количества сменных разгонных и ударных элементов позволяет увеличить срок их работы и межремонтный период измельчителя в 1,5-2 раза.

#### *Литература*

1. *Лапшин В.Б., Колобов М.Ю., Колобова В.В., Рязанцева А.В.* Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. Иваново. 2004. Т. 47. Вып. 8. С. 71–75.
2. *Колобов М.Ю., Лапшин В.Б., Сахаров С.Е., Абахиин А.М.* Международная научная конференция «Теоретические основы создания, оптимизации и управления энерго- и ресурсосберегающими процессами и оборудованием». Сборник трудов. Том II. Иваново. 2007. С. 13–15.
3. *Колобов М.Ю., Сахаров С.Е., Сахарова С.Г.* Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. Иваново. 2013. № 1. С. 71–75.
4. *Колобов М.Ю., Сахаров С.Е.* Аграрный вестник Верхневолжья. Иваново. 2016. № 3 (15). С. 105–110.
5. *Колобов М.Ю., Колобова В.В., Сахарова С.Е.* Научное обозрение. Саратов. 2012. № 5. С. 305–308.
6. Патент № 130880, МПК В 02 С 13/00. Измельчитель / Колобов М.Ю., Сахаров С.Е., Сахарова С.Г., Баранов Н.М.; заявитель и патентообладатель ИГХТУ. № 2013107049/13; заявл. 18.02.2013; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22. 2 с.
7. Патент № 130881, МПК В 02 С 13/02. Измельчитель сыпучих материалов / Колобов М.Ю., Сахарова С.Г., Сахаров С.Е.; заявитель и патентообладатель ИГХТУ. № 2013109277/13; заявл. 01.03.2013; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22. 2 с.
8. *Мельников С.В., Алешкин В.Р., Роцин П.М.* Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос. 1980. 168 с.