

УДК 621.926.5

**Д.Г. Минасян, Е.С. Каменецкий, В.Н. Хетагуров,
С.Е. Соболев, В.А. Плиев**

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ РАДИАЛЬНЫХ РЕБЕР РОТОРА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Приведены результаты испытаний центробежной мельницы вертикального типа. С помощью трехмерного компьютерного моделирования выявлено, что производительность мельницы вертикального типа при установке в полости ротора радиальных ребер с вырезами у ступицы ротора больше чем при использовании цельных ребер. Полученные результаты экспериментально подтверждены, причем рост производительности происходит при низких значениях удельного расхода электроэнергии.

Ключевые слова: центробежная мельница вертикального типа, движение измельчаемого материала, конструкция ребер ротора, вычислительный эксперимент, экспериментальные исследования.

Для повышения эффективности работы центробежной мельницы вертикального типа [1, 2] необходимо усовершенствовать математическую модель движения измельчаемого материала в её рабочей зоне, которая позволит определить ряд технологических показателей и конструктивных параметров, полезных при проектировании этих машин.

Проведенные ранее аналитические и численные расчеты движения измельчаемого материала в центробежной мельнице проводились при установке в полости ее ротора цельных радиальных ребер [3—5]. В результате испытаний было сделано предположение, что выполнение прямоугольных или трапецеидальных вырезов в ребрах в зоне у ступицы ротора мельницы позволит увеличить её производительность.

С целью определения различий в характере движения измельчаемого

материала в корпусе центробежной мельницы при установке в полости ротора цельных ребер и ребер с вырезами было проведено трехмерное компьютерное моделирование с использованием пакета OpenFOAM. Сыпучая среда рассматривалась как неньютоновская жидкость с эквивалентным коэффициентом вязкости, зависящим от давления $\mu = \nu + k \cdot P$, где ν и k — константы: ν предполагалось равным 0,001, а значение $k = 0,0006$ [6]. Принималось, что во внутренней полости ротора мельницы установлено три радиальных ребра — цельных или с вырезами в зоне у ступицы ротора. Предполагалось, что движение измельчаемого материала в рабочем пространстве мельницы описывается уравнениями Навье-Стокса:

$$\rho \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \cdot (\vec{v} \cdot \nabla) \cdot \vec{v} =$$
$$= -\nabla \cdot P + \nabla \cdot (\mu \cdot \nabla \cdot \vec{v}), \quad (1)$$

где ρ — плотность материала; \bar{v} — скорость движения материала; ∇ — оператор Гамильтона; P — давление избыточное над гидростатическим.

При этом $\nabla \cdot \bar{v} = 0$.

Цилиндрический корпус центробежной мельницы неподвижен и на внутренней её поверхности задавались условия отсутствия относительной скорости движения измельчаемого материала

$$u = 0, v = 0, w = 0, \quad (2)$$

где u, v, w — соответственно тангенциальная, радиальная и вертикальная составляющие скорости.

Условия отсутствия относительной скорости движения измельчаемого материала задавались также на всей внутренней полости ротора и поверхностях радиальных ребер

$$u = 0, v = \omega \cdot r, w = 0, \quad (3)$$

где ω — угловая скорость ротора; r — текущее значение радиуса.

Принималось, что верхняя (свободная) поверхность столба измельчаемого материала в корпусе центробежной мельницы является горизонтальной, что является справедливым при больших высотах засыпки. При этом вертикальная составляющая скорости на этой поверхности считалась равной нулю ($w = 0$), а для горизонтальных составляющих скорости использовались условия отсутствия трения:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0; \frac{\partial v}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Построение расчётной сетки для случая установки в полости ротора трех ребер с вырезами трапецеидальной формы показано на рис. 1. В области ротора мельницы использовалась сетка с более мелким шагом, а в верхней части корпуса шаги были больше.

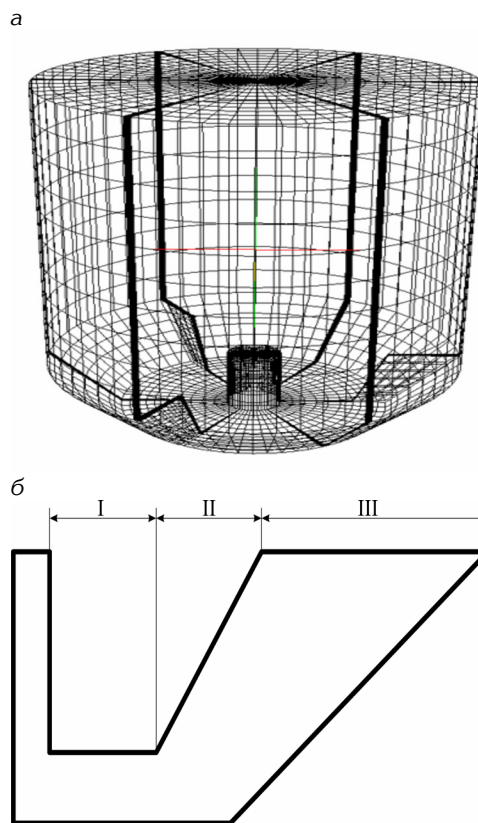


Рис. 1. Расчетная сетка для случая с вырезом в ребрах (а) и форма ребра с вырезом у ступицы ротора мельницы (б)

Решение проводилось методом конечных объемов SIMPLE. Для привязки результатов счета к конкретному, легко проверяемому в лабораторных условиях, случаю был просчитан вариант работы центробежной мельницы с диаметром ротора $R = 0,3$ м при частоте вращения ротора 310 мин^{-1} , высоте столба материала в корпусе — $0,27$ м и установке в полости ротора трёх радиальных ребер: цельных или ребер, в теле которых были выполнены трапецеидальные вырезы.

Были выявлены новые закономерности распределения тангенциальной скорости непосредственно над верх-

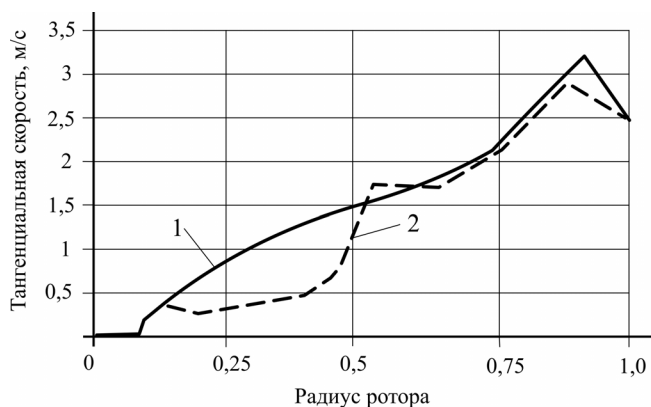


Рис. 2. Зависимость тангенциальной скорости движения частиц материала при установке в роторе цельных ребер (1) и ребер с вырезами (2)

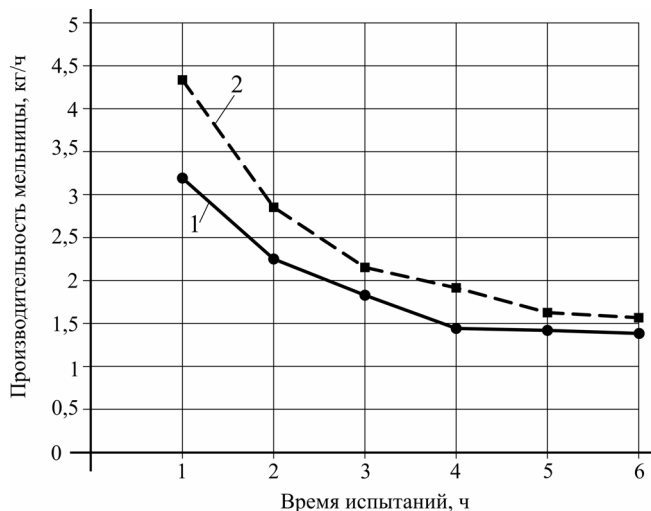


Рис. 3. Зависимость производительности мельницы от времени испытаний при установке в роторе цельных ребер (1) и ребер с вырезами (2)

ними кромками радиальных ребер ротора (рис. 2). Так, при установке в полости ротора цельных ребер тангенциальная скорость движения измельчаемого материала возрастает монотонно от нулевых значений у ступицы до максимальных значений на расстоянии 0,9 от радиуса ротора и спадом у стенок корпуса мельницы. При использовании ребер с трапециевидными вырезами наблюдаются

три зоны (рис. 1, 2): зона I – тангенциальная скорость имеет минимальные значения, что связано с областью вырезов; зона II – тангенциальная скорость возрастает по параболе, что связано с влиянием наклонной части вырезов на движение измельчаемого материала; зона III – тангенциальная скорость возрастает монотонно и имеет характер, идентичный варианту с цельными ребрами, но значения скорости в этом случае примерно на 10 % меньше.

Как видно, тангенциальная скорость движения частиц материала над верхними кромками ребер с вырезами на всех участках меньше чем при установке в полости ротора цельных ребер. Поэтому на основании расчетов был сделан вывод о том, что производительность мельницы с вырезами в ребрах будет больше при одинаковых энергетических затратах, т.к. измельчение материала происходит более эффективно

при большей разности скоростей ребра и частиц материала вблизи верхних кромок ребер [2].

Для проверки теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования центробежной мельницы вертикального типа с теми же характеристиками, которые были использованы при проведении расчетов. В качестве измельчаемого материала использовался кусковый

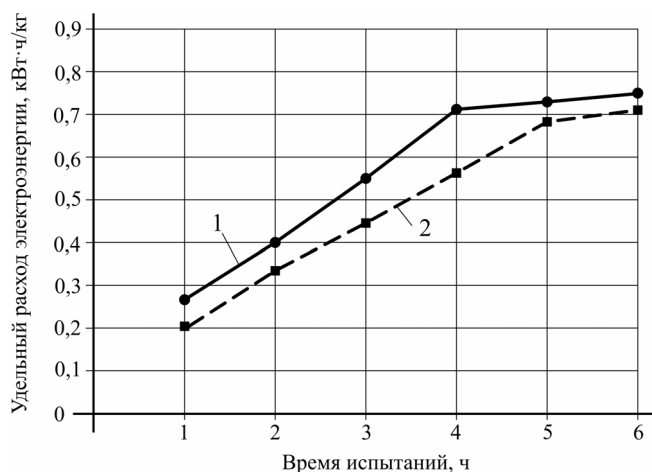


Рис. 4. Зависимость удельного расхода электроэнергии от времени испытаний при установке в роторе цельных ребер (1) и ребер с вырезами (2)

доломит Боснинского месторождения (РСО-Алания) крепостью по Протодьяконову 8 с фракциями узких классов крупности — 12 + 9 мм. Испытания продолжались 6 часов с контролем технологических показателей через каждый час работы центробежной мельницы.

На рис. 3 изображены графики зависимости производительности мельницы от времени испытаний при разных конфигурациях ребер.

Видно, что в случае вырезов в ребрах производительность мельницы по исходному продукту больше на 10-12 %, что подтверждает выводы, полученные при проведении численных экспериментов. Отмечено, что с течением времени показатели выхода измельченного продукта у двух вариантов конфигурации радиальных ребер, установленных в полости ротора мельницы, сближаются. Это можно объяснить тем, что с течением вре-

мени механизм ударного разрушения материала в мельнице сменяется процессом взаимного истирания материала.

На рис. 4 приведен график зависимости удельного расхода электроэнергии с двумя вариантами конфигурации радиальных ребер.

Видно, что удельный расход электроэнергии при установке в полости ротора центробежной мельницы радиальных ребер с вырезами у ступицы ротора в среднем на 11 % меньше, чем при использовании цельных ребер.

Выводы

С помощью трехмерного компьютерного моделирования выявлено, что производительность мельницы вертикального типа выше при использовании вырезов в радиальных ребрах ротора. Полученные результаты экспериментально подтверждены, причем рост производительности происходит при низких значениях удельного расхода электроэнергии. Это можно объяснить большей разницей скоростей частиц измельчаемого материала и верхних кромок радиальных ребер ротора центробежной мельницы вертикального типа, находящихся на одинаковом расстоянии от оси мельницы, при установке в полости ротора радиальных ребер с вырезами прямоугольной или трапецеидальной формы, выполненными в зоне у ступицы ротора и цельных ребер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2084787 Мельница // Хетагуров В.Н., Ильяшик В.П., Чужинев А.И. Опубл. в Б.И. № 20, 1997.

2. Хетагуров В.Н. Разработка и проектирование центробежных мельниц вертикального типа — Владикавказ: Издательство «Терек», 1999. – 225 с.

3. Каменецкий Е.С., Минасян Д.Г., Хетагуров В.Н. Математическое моделирование движения измельчаемого материала в корпусе центробежной мельницы вертикального типа // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. докл. Межд. науч. — техн. конф. Чтения памяти В.Р. Кубачека. — Екатеринбург; Уральская гос. Горно-геологическая академия, 2011. – С.271-275.

4. Каменецкий Е.С., Минасян Д.Г., Хетагуров В.Н. Сравнение компьютерного моделирования характера движения материала в корпусе центробежной мельницы с результатами экспериментальных исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ, №9, 2011. – С.391-396.

5. Каменецкий Е.С., Минасян Д.Г., Хетагуров В.Н. Современные модели центробежной мельницы вертикального типа с тремя и шестью ребрами // Материалы научно-практической конференции, посвященной дню эколога «Природа. Общество. Человек», Владикавказ, 3 июня 2011 г. – С. 37-40.

6. Каменецкий Е.С., Тедеева С.Р., Хетагуров В.Н. Совершенствование модели быстрого движения сыпучего материала // Труды международной конференции: Современные методы физико-математических наук, 9-14 октября 2006 г., Орел, Т.2, 2006. – С.36-39. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Минасян Давид Григорьевич — младший научный сотрудник, davidmd@yandex.ru,

Каменецкий Евгений Самойлович — доктор физико-математических наук, доцент, заведующий отделом, esk@smath.ru,

Южный математический институт ВНЦ РАН и РСО-А,

Хетагуров Валерий Николаевич — доктор технических наук, профессор, hetag@mail.ru,

Соболев Сергей Евгеньевич — кандидат технических наук, ассистент, excluzive86@mail.ru,

Плиев Владимир Айварович — аспирант, bob4apa@gmail.com,

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет).



**РУКОПИСИ,
ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»**

ОЦЕНКА РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИВОДА ТОРФЯНЫХ ФРЕЗЕРУЮЩИХ АГРЕГАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

(№ 936/01-13 от 01.11.12, 19 с.)

Фомин Константин Владимирович — доктор технических наук, профессор, доцент,
Fomin-tver@mail.ru,

Крылов Константин Станиславович — кандидат технических наук, доцент,

Жигульский Николай Александрович — аспирант,

Фомин Павел Константинович — аспирант,

Тверской государственный технический университет.

ESTIMATION OF REGIMES OF THE LOADING ELEMENTS OF ELEMENTS OF THE DRIVE OF PEAT MILLING ASSEMBLIES WITH USE OF LINEAR MODELS AT THE DESIGN STAGE

Fomin Konstantin Vladimirovich, Krylov Konstantin Stanislavovich,

Zhigulskiy Nikolai Alexandrovich, Fomin Pavel Konstantinovich