

Д-р техн. наук В.П. Надутый,  
асп. В.П. Левченко,  
канд. техн. наук И.П. Хмеленко  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА ОТ СВОЙСТВ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА**

У статті представлені результати ідентифікації експериментальних досліджень залежності продуктивності вертикального вібраційного грохоту від властивостей мінеральної сировини, що переробляється. Отримана узагальнена математична модель продуктивності у виді багатофакторної регресійної залежності другого порядку.

## **CONSTRUCTION REGRESSION DEPENDENCES OF VERTICAL VIBRATING SCREEN PRODUCTIVITY ON PROPERTIES OF A PROCESSED MATERIAL**

In article results of experimental researches of dependence of vertical vibrating screen productivity from characteristics of processed mineral materials are presented. The generalised mathematical model of productivity in the form of multifactorial regression dependence of the second order is received.

Особое место при добыче и переработке полезных ископаемых занимает вибрационное грохочение, которое обеспечивает отбор товарного продукта на стадии дробления или измельчения. Таким образом, снижается нагрузка на дробильное и измельчительное оборудования, и соответственно – их энергопотребление. Так реализуется главный принцип обогатителей «Не дробить ничего лишнего!».

Несмотря на широкое разнообразие конструкций вибрационных грохотов и режимов их работы, дальнейшее совершенствование данных машин непосредственно связано с повышением технологических показателей, снижением энерго- и металлоёмкости, а также с возможностью адаптации оборудования к разнообразным условиям эксплуатации, обеспечивая тем самым универсальность конструкции.

С учетом вышеперечисленных требований, опираясь на многолетний опыт проектирования, создания и эксплуатации машин для переработки горной массы в Институте геотехнической механики НАН Украины была разработана конструкция вертикального вибрационного грохота (ВВГ) [1]. При массе машины 1,3 т и габаритных размерах – 1400x1400x1900, площадь просеивающей поверхности составила 3,2м<sup>2</sup>, а мощность вибропривода всего-навсего 0,74 кВт, что в несколько раз меньше, чем у аналогичных по массе грохотов. При этом, во время работы вибровозбудителей, реализуется пространственное колебание рабочей поверхности, представляющей собой резонирующее ленточно-струнное сито (РЛСС), что в свою очередь повышает скорость протекания процессов перемешивания, сегрегации и просеивания, обеспечивая тем самым высокие технологические показатели работы грохота.

В работе [2] были определены основные факторы оказывающие доминирующее влияние на технологические показатели грохота – эффективность грохочения ( $E$ , %) и производительность ( $Q$ ,  $m^3/h$ ), и составлен план эксперимента, направленный на установление качественных и количественных характеристик машины. Эти результаты представлены в работах [3-6].

Наряду с конструктивными и режимными параметрами грохота на процесс классификации и транспортирования материала существенное влияние оказывают характеристики перерабатываемой массы, которые в свою очередь являются не регулируемым звеном в процессе грохочения [6-7].

**Целью работы** является построение регрессионной зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от характеристик перерабатываемого сырья.

Основными характеристиками перерабатываемого материала, а также пределы их варьирования, в экспериментальной работе были приняты следующие:

- $\gamma$  – процентное содержание подрешетного материала в исходном продукте, % (20...60);
- $\rho$  – плотность горной массы,  $г/см^3$  (1,4; 2; 2,6; 4,9);
- $W$  – влажность материала, % (0...15).

В качестве экспериментальных материалов были представлены следующие горные породы (класс -10мм): уголь ( $\rho = 1,4 г/см^3$ ), шлаковый ( $\rho = 2 г/см^3$ ) и гранитный ( $\rho = 2,6 г/см^3$ ) отсева и железная руда ( $\rho = 4,9 г/см^3$ ).

Фиксированными значениями в ходе экспериментов были режимные и конструктивные параметры грохота: 1) амплитуда колебаний грохота  $A=1$  мм; 2) частота вращения вала вибровозбудителя  $\omega=1500$  об/мин; 3) угол направления возмущающей силы относительно горизонта  $\beta=45$  град; 4) суммарная длина просеивающей поверхности  $L = 3,2$  м; 5) пропускная способность бункера-питателя  $q = 1$   $m^3/h$ ; 6) угол наклона просеивающей поверхности относительно горизонта  $\alpha = 8$  град; 7) размер ячейки РЛСС  $d = 3$  мм.

В ходе работы для установления индивидуального влияния каждого из варьируемых факторов на производительность (функция отклика) был выполнен парный регрессионный анализ, а для общего влияния всех параметров – множественный.

**Зависимость производительности грохота ( $Q$ ) от влажности материала ( $W$ )** идентифицировалась на основании 48-ми экспериментальных наблюдений [6], при которых помимо  $W$  варьировалась плотность горной массы ( $\rho$ ) и процентное содержание подрешетного класса в исходном продукте ( $\gamma$ ). Расчётная зависимость имеет вид:

$$Q = 0,55 - 0,0026 \cdot \gamma + 0,051 \cdot \rho - 0,0205 \cdot W + 0,0005 \cdot W^2.$$

Статистические характеристики этой регрессионной зависимости: коэффициент детерминации  $R^2 = 0,84$  и статистика Фишера  $F = 55,8$  подтверждают адекватность полученной модели экспериментальным данным. Коэффициенты

надёжности коэффициентов регрессии  $t_\gamma = 4,89$ ,  $t_\rho = 8,51$ ,  $t_W = 4,92$  и  $t_{W^2} = 1,92$  являются значимыми ( $t_{tabl} = 2,02$ ).

Парная регрессионная зависимость производительности грохота от влажности материала рассчитывалась при фиксированных параметрах  $\gamma = 38\%$  и  $\rho = 2 \text{ г/см}^3$ :

$$Q = 0,5532 - 0,0205 \cdot W + 0,0005 \cdot W^2.$$

Зависимость производительности грохота от влажности материала при различных вариациях остальных характеристик горной массы представлена на рис.1. Из рисунка видно, что функция квадратично убывает при увеличении влажности материала.

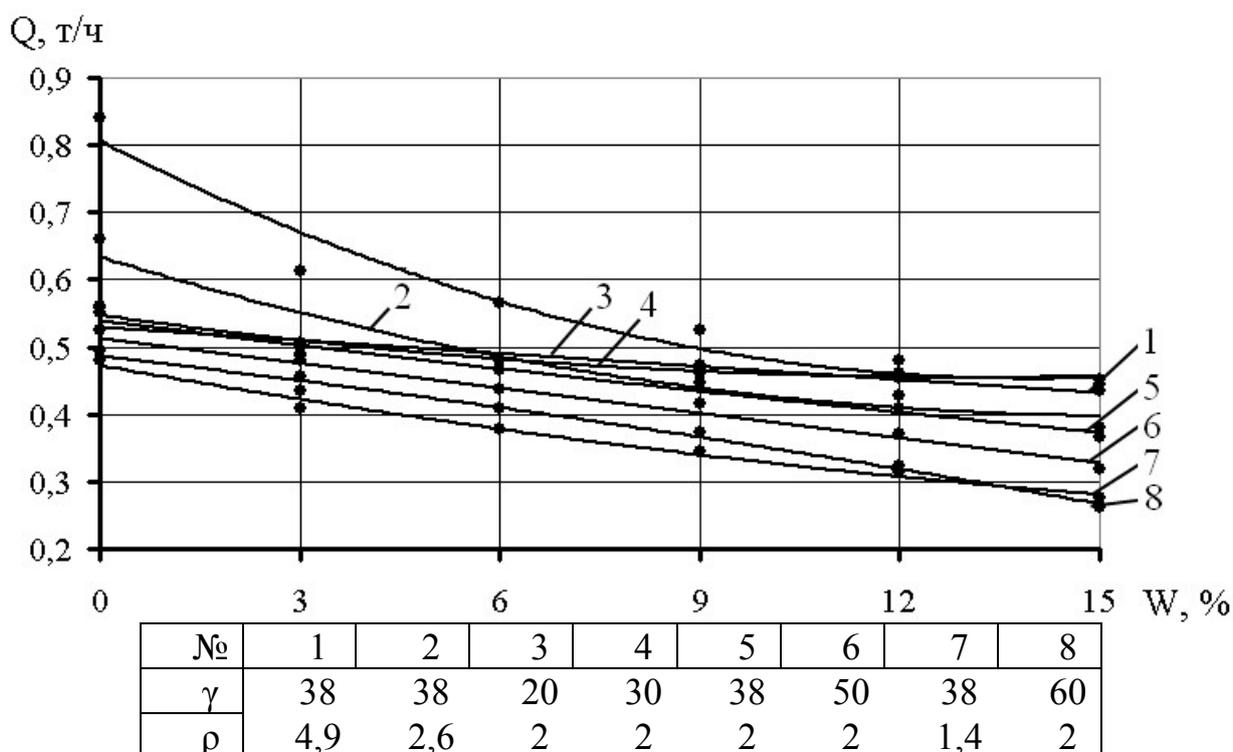


Рис.1 – Зависимость производительности грохота от влажности материала.

**Зависимость производительности грохота (Q) от процентного содержания подрешетного продукта в исходном материале ( $\gamma$ ).** Объем выборки составил 45 измерений. В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение:

$$Q = 0,374 + 0,106 \cdot \rho - 0,0114 \cdot W - 0,00003 \cdot \gamma^2.$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,969$  модели свидетельствует о высокой тесноте связи между расчетными и экспериментальными значениями. Статистика Фишера  $F = 429,3$ , намного больше своего табличного значения, следо-

вательно модель – адекватна. Коэффициенты регрессии значимы, т.к. значительно превышают критическое значение статистики Стьюдента  $t_{tabl} = 2,02$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  ( $t_{\rho} = 24,98$ ,  $t_W = 15,37$  и  $t_{\gamma^2} = 8,7$ ). При расчете зависимости линейный член, относительно фактора  $\gamma$ , был исключен из уравнения, т.к. был низким уровень его значимости  $t_{\gamma} = 0,71$ .

Парная регрессия рассчитывалась при фиксированных параметрах  $\rho = 2 \text{ г/см}^3$  и  $W = 6\%$ :

$$Q = 0,5176 - 0,00003 \cdot \gamma^2.$$

Графически данная зависимость при различных вариациях характеристик горной массы представлена на рис.2, из которого видно, что производительность практически не изменяется для сухих материалов по мере увеличения варьируемого параметра ( $\gamma$ ) и параболически снижается – для влажных материалов.

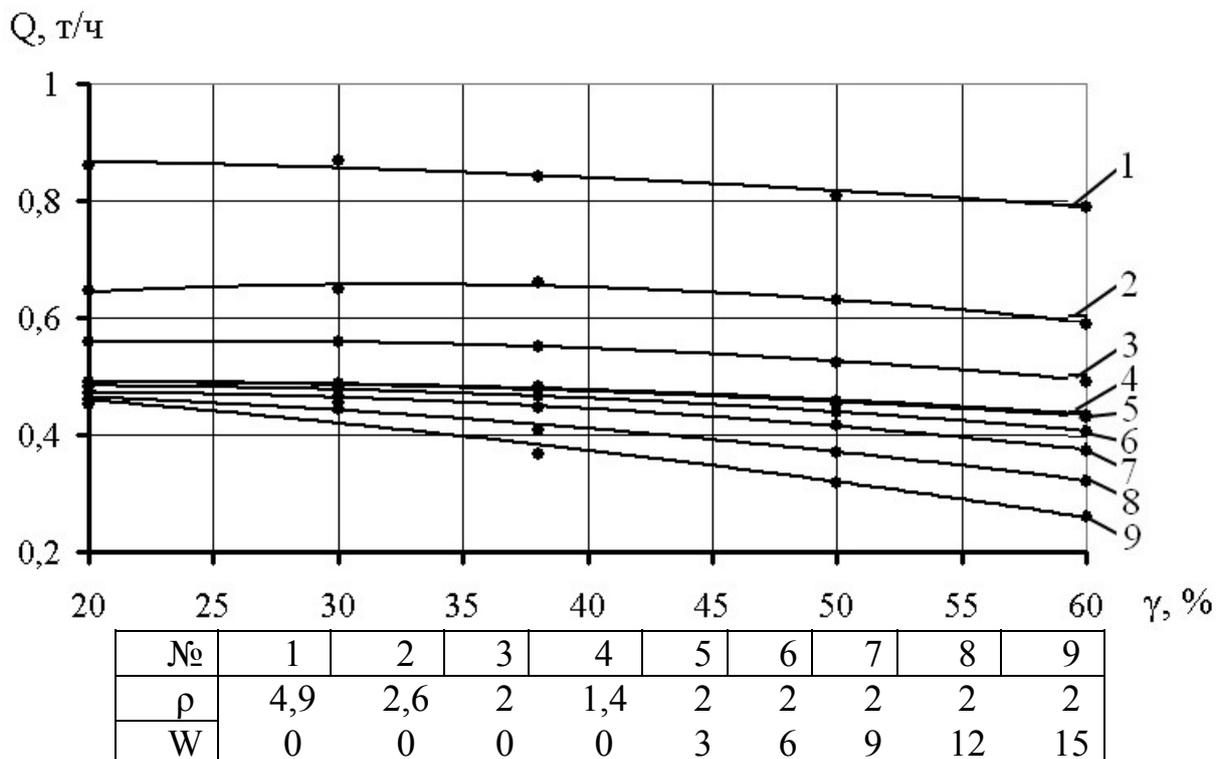


Рис.2 – Зависимость производительности грохота от процентного содержания подрешетного продукта в исходном материале.

**Зависимость производительности грохота (Q) от плотности горной массы (ρ).** В ходе исследований было получено 40 измерений функции отклика при различных вариациях W и γ. При статистической обработке экспериментальных данных получена следующая регрессионная зависимость:

$$Q = 0,325 - 0,0015 \cdot \gamma - 0,0176 \cdot W + 0,18 \cdot \rho - 0,0163 \cdot \rho^2,$$

коэффициент детерминации  $R^2 = 0,89$  и статистика Фишера  $F = 74,14$  которой подтверждают вид принятой зависимости. Коэффициенты регрессии  $t_\gamma = 1,89$ ,  $t_W = 11,86$ ,  $t_\rho = 3,9$  и  $t_{\rho^2} = 2,32$  превышают табличное значение статистики Стьюдента  $t_{tabl} = 2,03$  и являются значимыми.

Для установления индивидуального влияния плотности материала на производительность остальные факторы были приняты на следующих уровнях  $\gamma=38\%$  и  $W=6\%$ , и получена такая зависимость:

$$Q = 0,1624 + 0,18 \cdot \rho - 0,0163 \cdot \rho^2.$$

На рис. 3 наглядно представлена данная зависимость при различных комбинациях характеристик материала. Производительность возрастает по параболическому закону, причем для сухих материалов с плотностью более  $2,6 \text{ г/см}^3$  она выше на 50-100% по сравнению с грохочением влажного сырья.

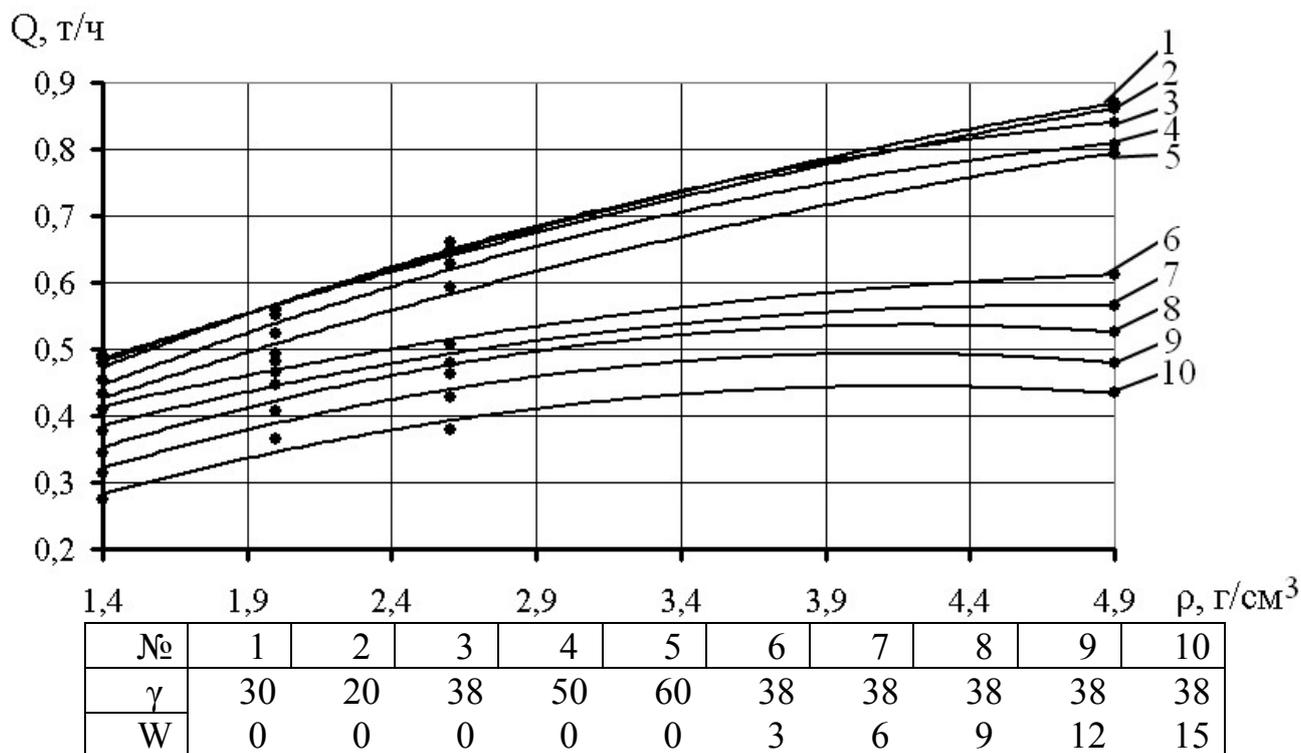


Рис.3 – Зависимость производительности грохота от плотности материала.

Полученный объем экспериментальных данных из 61 измерения, позволяет разработать обобщенную регрессионную зависимость производительности вертикального вибрационного грохота от характеристик горной массы. Поскольку именно данная зависимость позволяет подобрать рациональные параметры работы грохота в конкретных горно-геологических условиях эксплуатации.

Обобщенную зависимость получали в следующем виде [2]:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots + a_n \cdot x_n + b_1 \cdot x_1^2 + \dots + b_n \cdot x_n^2 + c_1 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ + c_2 \cdot x_1 \cdot x_3 + \dots + c_k \cdot x_{n-1} \cdot x_n,$$

где  $y$  – функция отклика (производительность);  $a_0$  – свободный член;  $a_n \cdot x_n$ ,  $b_n \cdot x_n^2$  – линейные и квадратичные слагаемые;  $c_k \cdot x_{n-1} \cdot x_n$  – слагаемое, содержащие парные произведения переменных.

При расчете воспользуемся средствами прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics с применением встроенной функции “Шаговый отбор”. При этом на первом шаге расчета в уравнение включают не все, а только один фактор с наибольшим по модулю значением коэффициента корреляции между независимой (факторы) и зависимой переменной (производительность). На каждом следующем шаге, из оставшихся не включенными в уравнение независимых переменных, в предыдущую модель добавляют только одну независимую переменную, наиболее тесно связанную с зависимой, и заново пересчитывают все параметры регрессии. После пересчета сравнивают полученные оценки нового уравнения с оценками предшествующего шага. Так продолжают до тех пор, пока не получают наилучшее уравнение с наибольшими расчетными значениями  $F$  и  $R^2$  [8]. После расчета обобщенная регрессионная зависимость имеет следующий вид:

$$Q = 0,24 - 0,0011 \cdot \gamma + 0,21 \cdot \rho - 0,00022 \cdot \gamma \cdot W - 0,0056 \cdot \rho \cdot W - \\ - 0,0172 \cdot \rho^2 + 0,0006 \cdot W^2$$

Полученное регрессионное уравнение с высоким уровнем адекватности и достоверности описывает экспериментальные данные – это подтверждают высокая расчётная статистика Фишера  $F = 217,1$  и коэффициент детерминации  $R^2 = 0,961$ . Коэффициенты регрессии и их статистика, представленные в табл. 1, превышают критическое значение Стьюдента  $t_{tabl} = 2,00$ .

Таблица 1 – Расчётные значения коэффициентов регрессии и их надёжности

Переменная	$\gamma$	$\rho$	$\gamma \cdot W$	$\rho \cdot W$	$\rho^2$	$W^2$
Коэффициент регрессии	-0,0011	0,21	-0,00022	-0,0056	-0,0172	0,0006
$t_{rasch}$	3,13	8,27	5,19	10,71	4,49	4,6

**Выводы.** В результате выполненной работы были получены регрессионные зависимости производительности вертикального вибрационного грохота, как от каждого, в отдельности, варьируемого свойства обрабатываемого материала, так и от их общего влияния. Все расчетные уравнения с высоким уровнем достоверности и адекватности описывают полученные ранее экспериментальные данные. Кроме этого, разработанная обобщенная регрессионная зависимость производительности грохота от характеристик горной массы позволяет адапти-

ровать машину к условиям эксплуатации путём подбора её рациональных или оптимальных параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. № 53632 UA, МПК<sup>8</sup> В 07 В 1/40 (2006.01). Вертикальний вібраційний грохот / Надутый В.П., Левченко П.В., Кіжло Л.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ; Заявл. 26.04.2010; Опубл. 11.10.2010, Бюл. №19. – 3 с.
2. Надутый В.П. Определение целевых функций и варьируемых параметров процесса грохочения на вертикальном вибрационном грохоте/ В.П. Надутый, В.В. Сухарев, П.В. Левченко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 92. – С. 120–125.
3. Надутый В.П. Определение зависимости эффективности грохочения от конструктивных параметров вертикального вибрационного грохота/ В.П. Надутый, П.В. Левченко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб.- 2011. – Вип. 45 (86). – С. 43–48.
4. Франчук В.П. Определение зависимости эффективности грохочения от режимных параметров вертикального вибрационного грохота/ В.П. Франчук, В.П. Надутый, П.В. Левченко// Вібрації в техніці та технології: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2011. – Вып. 2(62). – С. 73–76.
5. Надутый В.П. Результаты экспериментальных исследований зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от его конструктивных параметров/ В.П. Надутый, П.В. Левченко// Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Укр. міжвід. наук.-техн. зб. держ. ун-ту "Львівська політехніка". – Львів. – 2011. – Вип. 45. – С.24–29.
6. Надутый В.П. Влияние свойств горной массы на производительность вертикального вибрационного грохота/ В.П. Надутый, П.В. Левченко, И.П. Хмеленко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 93. – С. 23-29.
7. Надутый В.П. Влияние характеристик горной массы на эффективность классификации вертикального вибрационного грохота/ В.П. Надутый, П.В. Левченко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 93. – С. 81–86.
8. Бююль А., Цефель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. – СПб.: ООО «Диа-СофтЮП», 2005. – 608 с.

**УДК [662.74:537]:62 – 9.001.24**

Кандидаты техн. наук Е.Ю. Пигида,  
Л.Т. Холявченко,  
инженеры С.Л. Давыдов, С.В. Демченко  
(ИГТМ НАН Украины)

#### **РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИОННОЙ КАМЕРЫ ПЛАЗМО-ДУГОВОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕД**

Приводиться методика визначення основних конструктивних параметрів реакційної камери плазмо-дугового реактору для газифікації частинок вугілля у парах води. Для ілюстрації використання описаної методики наводиться приклад розрахунку при газифікації вугілля марки «А» із розміром частинок  $d_p \leq 0,1 \cdot 10^{-3}$  м.

#### **THE CALCULATION OF THE FORM FACTOR OF ARC PLASMA REACTION CHAMBER FOR CONVERCION OF CARBON-BEARING MEDIUM**

There is the method for determining the main design parameters of the reaction chamber of an arc plasma reactor for the gasification of coal particles in water vapor. For illustration the application of the described method is given the example of calculation for the gasification of brand "A" coal with a particle size  $d_p \leq 0.1 \cdot 10^{-3}$  m.

Основным элементом плазмо-дугового реактора для переработки углеродсодержащих сред является камера сгорания. В ней протекает сложный ком-