

УДК 622.234.5

Б.В. Радько

ЭМПИРИО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОМОНИТОРНОЙ ВЫЕМКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ*

Иллюстрируется методический подход к определению параметров гидромониторной выемки угля, сочетающий аналитические и корреляционные исследования на обширном статистическом материале.

Ключевые слова: производительность гидроотбойки, коэффициент гидравлической разрушаемости угля, вопросы сходимости расчетных и фактических значений.

В последнее время вновь наблюдается интерес к использованию гидравлической добычи угля, особенно там, где нет условий для высокоеффективного применения механизированных комплексов (крутые и крутонаклонные пласты, нарушенные участки с ценными марками углей, пласти, склонные к самовозгоранию и др.). В связи с этим актуально проанализировать накопленный опыт исследований параметров гидромониторной выемки угольных пластов

Исследования гидравлического разрушения углей и пород проводились в ИГД им. А.А. Скочинского, ЛГИ, КузНИИУИ, ВНИИГидроугле, ДонУГИ, УкрНИИГидроугле и др.

В УкрНИИГидроугле разработана методика исследования параметров и показателей гидромониторной выемки (отбойки и вымыва отбитого угля из заходки) с использованием статистических материалов. С помощью этой методики по данным работы гидрошахт и гидрокомплексов Донбасса построена эмпирио-аналитическая модель гидромониторной выемки, пригодная для прогнозирования ее производительности с достаточной

для практических целей точностью на пластах с различными горно-геологическими условиями, в том числе и в других угольных бассейнах.

Многолетний опыт работы автора с использованием различных статистических материалов (затрат на поддержание горных выработок, производительности труда и др.) позволяет лучше понять их природу, которая как представляется, имеет несколько отличный от вероятностного механизм формирования. Величина выходного показателя многофакторного статистического явления устанавливается под влиянием трех причин: детерминирующего воздействия некоторого числа (в большинстве случаев значительного) активных факторов, вероятностных колебаний в пределах объективной неопределенности явления (например, по причине анатропных свойств угольного массива) и ошибок измерений, также имеющих вероятностную природу. А хаотический характер распределения точек при построении зависимостей объясняется не столько их стохастической природой, сколько случайными сочетаниями большого числа действующих

* Работа выполнялась в рамках госконтракта Минобрнауки РФ №15.515.11.5073 от «06» октября 2011 г.

факторов. Если правильно учесть влияние таких факторов, то амплитуда случайных отклонений окажется относительно небольшой. Например, для участковой себестоимости угля (годовые точки) по оценке она не превышает 20 %. Остальные 80 % себестоимости формируются функционально под влиянием действующих факторов.

Такое понимание природы статистических данных позволило рассматривать производительность гидравлической выемки как величину, сформированную, в основном, детерминирующим влиянием действующих факторов (напора струи, расхода воды, технологических параметров, физико-механических характеристик угольного массива и др.). Амплитуда вероятностных отклонений этой величины, обусловленная объективной неопределенностью, не может быть непрходимым препятствием для достоверного количественного прогноза. Поэтому, если выдвинутая гипотеза адекватна природе изучаемого явления, то оно должно описываться аналитическим выражением.

Логично предположить, что величина производительности гидравлического разрушения твердых тел пропорциональна кинетической энергии гидромониторной струи.

Тогда после несложных логических построений получаем следующее уравнение:

$$\Pi_{r/o} = 3,6 \cdot K' \cdot \frac{m \cdot V^2}{2} = \\ = 3,6 \cdot K' \cdot P_0 \cdot q_0, \quad (1)$$

где $\Pi_{r/o}$ — производительность гидроотбойки, 10^3 кг/с; K' — коэффициент пропорциональности, $\text{с}^2/\text{м}^2$; $m = q_0 \cdot \rho$ — секундная масса гидромониторной струи, кг/с; q_0 —

расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; $V = \sqrt{\frac{2 \cdot P_0}{\rho}}$ — скорость истечения воды из насадки, м/с; P_0 — давление воды у насадки, Па.

Для удобства пользования выражение (1) целесообразно преобразовать с учетом зависимостей $K' = R_o \cdot m \cdot \gamma$ и

$$q_0 = \mu \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_0}{\rho}}, \quad \text{после чего}$$

оно приобретает вид:

$$\Pi_{r/o} = 4R_o m \gamma \mu \rho^{-0.5} P_0^{1.5} d_0^2, \quad (2)$$

где $\Pi_{r/o}$ — производительность гидроотбойки, 10^3 кг/ч; R_o — коэффициент гидравлической разрушенности угля или других твердых тел, м/Мн; m — мощность пласта, м; γ — плотность угля (объемный вес), $10^3 \text{кг}/\text{м}^3$; μ — коэффициент расхода воды; P_0 — давление воды у насадки, МПа; d_0 — диаметр насадки, м.

Из уравнения (2) следует, что производительность выемки угольных пластов гидромониторными струями зависит функционально от коэффициента их гидравлической разрушенности R_o , мощности m и плотности γ угля, коэффициента расхода μ и плотности ρ воды, ее давления у насадки P_0 , а также диаметра насадки d_0 . Особое место среди этих факторов занимает коэффициент гидравлической разрушенности угля R_o .

Коэффициент R_o формируется под влиянием большого числа горнотехнологических и природных факторов, трудно поддается количественной оценке и поэтому является главной причиной недостаточной точно-

сти расчетов. В соответствии с традиционным подходом повысить точность прогнозов можно за счет увеличения числа учитываемых факторов. При этом очень важно корректно учитывать характер влияния каждого фактора в отдельности. Формальный подход к определению характера влияния факторов по расположению точек вносит дополнительных ошибки в расчеты. А влияние ошибок на точность определения статистических величин лишь по форме аналогично влиянию объективной неопределенности, по существу же оно имеет принципиальное отличие. Если величина объективной неопределенности не препятствует достоверному количественному прогнозу, то ошибки измерений или допущенные при обработке статистических данных, могут превратить эти данные в кучу хлама.

Показателем допустимости величины ошибок в пассивном эксперименте (когда используются готовые статистические данные, как в нашем случае) может служить уменьшение коэффициента вариации статистической выборки по мере учета новых факторов. На рис. 1 приведен график зависимости точности T вычислений статистической величины от числа учтенных факторов K . График характеризует идеальную статистическую выборку, в которой отсутствуют ошибки измерений и вариация точек W_h обусловлена только объективной неопределенностью, а также то обстоятельство, что влияние факторов учтено в соответствии с характером, сформированным физикой процесса. Из графика следует, что на начальном участке кривой каждый дополнительный учитываемый фактор дает ощущимый прирост точности T . Но по мере увеличения их числа значимость (степень влияния) каждого последующего

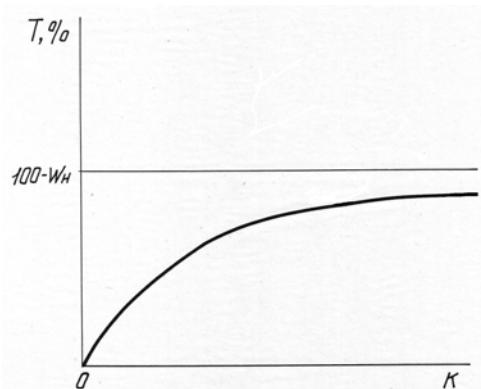


Рис. 1. Зависимость точности определения статистической величины от числа учитываемых факторов

фактора становится все меньше и меньше. Между тем трудности, связанные с их выявлением и использованием, возрастают.

В реальных условиях коэффициент вариации W кроме величины объективной неопределенности отражает также возмущающее влияние неучтенных факторов и ошибок измерений (наблюдений). Поэтому, если с увеличением числа учитываемых факторов точность T расчетов возрастает, то это свидетельствует о допустимой величине ошибок и приемлемости результатов обработки статистических данных.

Из графика также следует, что для практических целей достаточно учитывать некоторое конечное число факторов, выявляемое в процессе конкретных исследований. При этом их количество ограничивается приемлемой точностью прогноза.

Для выявления характера влияния различных факторов на величину коэффициента гидравлической разрушающей способности R_o угольных пластов использовался эмпирио-аналитический метод исследования. Его сущность заключается в следующем. Характер парных зависимостей устанавливает-

ся аналитически, а их параметры — по статистическим данным шахтных наблюдений. Затем парные зависимости объединяются в многофакторную модель, точность расчетов по которой оценивается коэффициентом вариации.

Для выявления характера влияния действующих факторов использовался метод теоретического анализа особенностей физических взаимодействий гидромониторной струи с угольным массивом в пределах возможного диапазона изменения численных значений изучаемых факторов. С целью получения общей картины влияния конкретного фактора исследованию подвергались как граничные зоны, так и серединные области в зоне существования независимой переменной.

Рассмотрим в качестве примера влияние угла падения пластов. Он, как известно, оказывает определенное воздействие на эффективность гидроотбойки. На крутом падении она эффективнее, чем на пологом. Анализ возможных причин приводит к выводу о влиянии гравитационных сил. На рис. 2 приведена схема расположения гравитационных сил от покрывающей толщи пород на нетронутый массив угля, а также от собственного веса отбитого угля. Из схемы видно, что нормальная составляющая веса покрывающей толщи пород ($H \cdot \gamma \cdot g \cdot \cos\alpha$) увеличивается при уменьшении угла падения пластов и достигает максимальной величины ($H \cdot \gamma \cdot g$) при горизонтальном залегании. В этой связи представляется логичным предположить, что повышение давления покрывающей толщи пород с уменьшением угла падения пластов и при прочих равных условиях обуславливает уменьшение количества пор, трещин, полостей, дефектов строения и др., что приводит через

повышение плотности углей к его упрочнению. Связь между плотностью ископаемых углей и их механической прочностью (разрушаемостью) отчетливо видна, если расположить в ряд бурые угли, каменные и антрациты. Налицо зависимость: чем выше плотность, тем хуже разрушаемость ископаемых углей, и, наоборот, при уменьшении плотности их разрушаемость увеличивается. Если эти рассуждения верны, то с повышением давления со стороны покрывающей толщи разрушаемость угольного массива будет ухудшаться.

Так как менее плотные угли легче поддаются разрушению гидромониторной струей, становится понятным, почему на крутом падении гидроотбойка эффективнее, чем на пологом. Из схемы также следует, что гравитационная составляющая веса отбитого угля, направленная по падению $t \cdot g \cdot Sina$ с увеличением угла наклона пластов растет, повышая тем самым эффективность транспортирования угля из заходки, чем увеличивает продуктивное время работы струи по разрушению. Таким образом, при увеличении угла падения угольных пластов влияние гравитационных сил способствует повышению эффективности гидравлической выемки как за счет производительности гидроотбойки, так и пропускной способности самотечного гидротранспорта. При отсутствии ограничений по гидротранспорту (что имеет место при $\alpha \geq 15^\circ$) характер зависимости коэффициента гидравлической разрушаемости угольных пластов является линейной функцией $\cos\alpha$ и имеет следующий вид:

$$R_o = a - b \cdot \cos\alpha \quad (3)$$

где α — угол падения пласта, град., a, b — параметры.

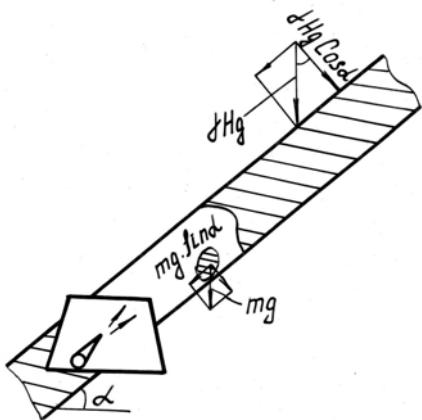


Рис. 2. Схема разложения гравитационных сил

С помощью теоретического анализа физики процессов формирования искомых зависимостей устанавливался характер влияния и по другим факторам.

Для определения численных значений параметров a и b использовалась выборка из данных статистической совокупности, накопленных за период 1959—1984 гг. Общий объем наблюдений составил 495 заходки. Геометрические и технологические параметры изменялись в значительных пределах: площадь заходок 2-65 м², продолжительность выемки 9-420 мин, давление воды 2,5-10 МПа, диаметр насадок 17-29 мм. Влияние опорного давления учитывалось типом заходки — нарезная, очистная на массив, очистная на выработанное пространство, комбинированная. Характеристика пластов, разрабатываемых гидромониторным способом, представлена в табл. 1.

Статистическая выборка формировалась в соответствии с принципом «при прочих разных условиях» и представлена 84 узловыми точками.

Принцип формирования статистической выборки «при прочих разных условиях» обладает существенными

преимуществами по сравнению с принципом при «прочих равных условиях». Он не требует большого объема выборки; позволяет использовать данные, отражающие совместное влияние нескольких факторов одновременно при случайных сочетаниях их численных значений; дает возможность использовать в исследованиях огромные массивы статистических данных, образующихся естественным путем при функционировании тех или иных процессов и несущих всеобъемлющую информацию о них.

Узловые точки выборки это не конкретные эмпирические точки анализируемой статистической совокупности. Это понятие используются для того, чтобы указать позиции с определенными значениями действующих факторов. Количество эмпирических точек, характеризующих положение той или иной узловой точки, может быть разным определяется по минимальному относительному ущербу от возникновения случайных ошибок измерений (наблюдений). Относительный ущерб от накопления случайных ошибок расчет, а от уменьшения их величины — падает. Эти противоположные тенденции имеют суммарный минимум, соответствующий оптимальному числу измерений (наблюдений).

Парные эмпирио-аналитические зависимости объединены в многофакторную модель, имеющую следующий вид:

$$R_o = \frac{10^7 \cdot (12 \cdot K_3 + I)}{(110 + t) \cdot (700 + H)} \times \\ \times \frac{(104 - A^c) \cdot (6 - Cosa)}{[0,04 \cdot (V^F - 25)^2 + 43]}, \quad (4)$$

где K_3 — коэффициент типа заходки, учитывающий влияние выработанного пространства на разрушаемость угольного массива; I — природная

Таблица 1

Характеристика пластов, разрабатывавшихся гидромониторным способом

Гидрошахты и гидрокомплексы	Символ пласта	Марка угля	Угол падения (α), град.	Мощность (m), м	Выход летучих (V), %	Природная метаноносность (I), м ³ /т	Пластовая зольность (A), %	Глубина работ (H), м	Годы
1. Г/шахта «Красноармейская»	m_5^1	Г	10,5	1,0	41,3	3,0	29,0	140	1979-1980
2. Г/шахта «Новодонецкая»	I_3	Г	10,5	1,77-2,58	38,5	3,5	23,3	115	1969
3. Г/шахта «Пионер»	I_7	Г	13	0,7-0,8	37,4	4,9	9,3	160	1981-1982
4. Г/шахта «Пионер»	m_4^0	Г	13	0,8-1,2	36,7	7,8	12,3	300	1983-1984
5. Г/шахта «Пионер»	m_4^2	Г	13	0,8-1,1	36,1	7,7	7,9	280	1982-1983
6. Г/комплекс ш. № 7 «Белянка»	h_7	К	20	1,1-1,2	21,5	17,7	7,2	270	1960
7. Г/комплекс ш. № 63 «Зимогорье»	m_3	Г	33	0,9-1,0	42,5	2,5	21,8	95	1960
8. Г/комплекс ш. № 4 «Привольнянская-Северная»	m_3	Д	38	1,8-2,1	41,3	2,5	18,0	90	1962
9. Г/шахта № 4	h_{10}	Т, ПА	73	1,1-2,1	9,2	13,4	11,5	160	1959
10. Г/комплекс ш. № 4 «Лутугинская»	I_2	Г	86	1,0	40,8	2,5	15,6	100	1962

Таблица 2

Шкала коэффициентов типа заходки

	Типы заходок						
	Нарезные стороны		Междунarezными и очистными на массиве, $K_3^{H/O(m)}$	Очистные со стороны массива угля, $K_3^{O(m)}$	Междуючистными на массиве выработанное пространство, $K_3^{O(m/v)}$	Очистные состороны выработанного пространства	
	массива угля, $K_3^{H(m)}$	выраб. пространства, $K_3^{H(v)}$				$K_3^{O(v)}$	в деформированной зоне, $K_3^{O(v/v)}$
Значения коэффициента K_3	0, 74	1,0	1,35	1,83	2,47	3,33	4,5

метаноносность, $\text{м}^3/\text{10}^3\text{кг}$; A^c — средняя по угольным пачкам зольность пласта, %, t — продолжительность выемки заходки, мин.; H — глубина разработки, м; V^r — выход летучих веществ, %.

В выражении (4) неявно учтены и другие факторы: площадь вынимаемой заходки, коэффициент извлечения угля и рабочая длина гидромониторной струи. Отметим также, что размерности левой и правой частей этого выражения не совпадают потому, что в явном виде не учтены все действующие факторы. А это, как уже отмечалось выше, по-видимому, невозможно, да и нецелесообразно.

В табл. 2 приведена расширенная шкала коэффициентов, учитывающих тип заходки, включая некоторые промежуточные варианты.

Из таблицы видно, что с помощью коэффициентов можно учесть достаточно широкий спектр состояний угольного массива в краевой зоне, испытывающей воздействие опорного давления от развитых очистных работ (развитыми очистными работами можно считать такие, при которых имеют место периодические осадки основной кровли). Вместе с тем эта шкала, конечно, не может отразить все многообразие возможных состояний, так как построена на дискретных принципах, тогда как способность угольного массива разрушаться реализуется непрерывно, особенно в условиях действующей шахты. К тому же косвенно и ориентировочно учитывающие состояния угольного массива могут отразить лишь приближенную картину его состояний. Тем не менее, эта шкала позволяет уменьшить вариацию точек статистической выборки и величину максимально возможной ошибки при прогнозировании. Разумеется, это возможно при правильном определении типа заход-

док, что не всегда просто, особенно для промежуточных состояний.

О корректности построенной многофакторной эмпирио-аналитической модели можно судить по графику сходимости расчетных и фактических данных (см. рис. 3).

Прямолинейный характер зависимости, угол наклона, равный 45° , и симметричное расположение точек свидетельствуют о том, что построенная многофакторная модель корректно отражает изучаемое явление и может использоваться для прогнозирования величины коэффициента гидравлической разрушенности в различных условиях.

Величины коэффициентов вариации подготовленной выборки и статистической совокупности, вычисленные без учета промежуточных состояний угольного массива (см. табл. 2), равны соответственно $W_b = 16,27\%$ и $W_c = 15,7\%$. Для подтверждения корректности полученных результатов была осуществлена дополнительная проверка по данным контрольной статистической выборки. Для этого использовались данные наблюдений по пл. I3 г/ш «Пионер», полученные в 1988г., спустя год после построения многофакторной модели коэффициента гидравлической разрушенности R_o . Определение типа заходок производилось с учетом промежуточных состояний угольного массива (табл. 2). Коэффициент вариации контрольной выборки оказался еще меньше $W_k = 13,0\%$.

Это послужило толчком для пересчета коэффициента вариации статистической выборки с использованием расширенной шкалы коэффициентов, учитывающих тип заходки. Коэффициент вариации снизился до $W_e^1 = 10,5\%$. Уменьшилась также и величина максимальной ошибки прогнозиро-

вания с 35 % до 17 %. Здесь необходимо отметить, что отнесение заходок к тому или иному типу производилось по косвенным данным. Поэтому величина коэффициентов определена приближенно. И, тем не менее, полученные результаты обнадеживают.

Существует еще один резерв повышения точности прогнозов путем учета закона распределения случайных отклонений за счет объективной неопределенности. Теоретически исключение влияния действующих факторов позволяет выделить случайную компоненту статистической выборки, построить закон распределения ее вероятностей и с его использованием еще больше повысить точность прогнозирования.

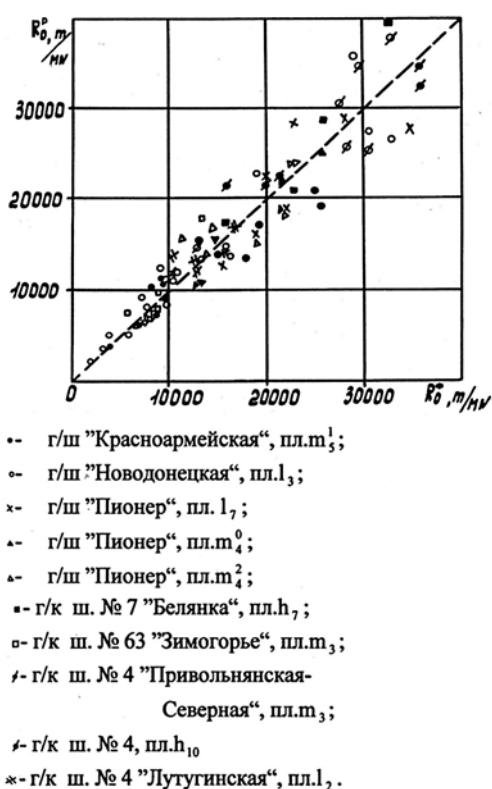


Рис. 3. График сходимости расчетных и фактических значений коэффициента гидравлической разрушенности угольных пластов

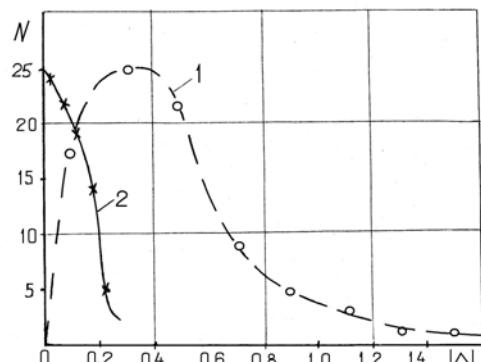


Рис. 4. Графики распределения числа заходок репрезентативной выборки: 1 — коэффициент гидравлической разрушенности угольных массивов; 2 — случайная компонента коэффициента гидравлической разрушенности угольных массивов

На рис. 4 приведены графики распределения числа заходок статистической выборки в зависимости от абсолютной величины относительного отклонения коэффициента гидравлической разрушенности углей (кривая 1) и его случайной компоненты (кривая 2) от средних значений. Из графиков видно, что коэффициент гидравлической разрушенности углей и ее случайная компонента имеют разные законы распределения. Из чего следует, что на формирование закона распределения статистической величины R_0 оказывают влияние обе компоненты: детерминированная и случайная. Причем первая воздействует опосредованно через неучтенные и случайные сочетания значений действующих факторов, искажая закон распределения случайной компоненты. Но так как сочетания действующих факторов в разных выборках из одной и той же статистической совокупности не будут одинаковыми, то и их искажающее влияние на закон распределения случайной компоненты также будет изменяться, что должно привести к нестабильности харак-

тера кривой 1. Иначе говоря, кривая 1 не отражает никакой закон распределения статистической величины R_0 , а является лишь эмпирической зависимостью конкретной выборки. В связи со сказанным возникает сомнение в принципиальной возможности построить эмпирическим путем закон распределения статистической величины R_0 , да и, вообще, в существовании такого закона.

В тоже время при достаточно полном исключении влияния формирующих R_0 факторов эмпирические кривые распределения случайной компоненты статистической величины при разных выборках и даже разных статистических величинах неизменно будут соответствовать нормальному закону распределения. Что и наблюдается при исследовании коэффициента разрушаемости угольных массивов R_0 (кривая 2). Это дает основание воспользоваться интегралом вероятностей для уточнения величины случайной ошибки. Вероятность того, что ошибка прогнозирования коэффициента гидравлической разрушаемости угольных массивов не будет превышать величину коэффициента вариа-

ции 16,27 %, а при использовании расширенной шкалы коэффициентов типа заходки — 10,5 % равна соответственно 0,943 и 0,984.

В заключение отметим, что формула (4) не является единственным выражением многофакторной эмпирико-аналитической модели коэффициента гидравлической разрушаемости угольных массивов. Эмпирическая часть модели, представленная численными параметрами парных зависимостей, многовариантна в отличие от аналитической части и зависит от очередности ввода действующих факторов при построении многофакторного выражения. С изменением очередности учета действующих факторов изменятся параметры парных зависимостей, да и сама многофакторная модель будет иметь другой вид.

Выражения (2) и (4) использовались в типовых технологических схемах и инструкциях по эксплуатации различных вариантов короткозабойных систем разработки для проектирования производительности гидроотбойки и эксплуатационной производительности гидромонитора на гидрошахтах Донбасса в период 1983—1998 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. М. — Л., Наука, 1965.
2. Зельдович Я.Б., Мышикис А.Д. Элементы прикладной математики. — М.: Наука, 1972.
3. Radjko B.V. Empirico-Analytical Investigations of Coal Seams Breaking Process with Plain Water Jets, *Proceedings of the 8th American Water Jets Conference*, Vol. II, pp. 867-878, Water Jet Technology Association, Houston, Texas, 1995.
4. Radjko B.V. «General Equation of Hydraulic Breaking Process of Solids with Plain Water Jets», *Proceedings of the 5th Pacific International Conference on Water Jet Technology*, New Delhi, India, 1998.
5. Растрగин Л.А. Этот случайный, случайный, случайный мир. М., «Молодая гвардия», 1969. ГИАС

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Радько Борис Васильевич — профессор, колледж Восточноукраинского Национального университета им. В. Даля, e-mail: potock@mail.ru.

