

УДК 622.8:621.31



А. Г. МНУХИН,
доктор техн. наук
(МакНИИ)



А. М. БРЮХАНОВ,
доктор техн. наук
(МакНИИ)



И. Г. СОДУХ,
инж.
(МакНИИ)



С. Я. МАХНО,
доктор физ.-мат. наук
(Институт прикладной математики
и механики НАН Украины)

Необходимость проведения испытаний на взрывобезопасность рудничного электрооборудования с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка»

Проанализированы данные, полученные при испытаниях на взрывобезопасность оболочек рудничного взрывозащищенного электрооборудования напряжением от 12 до 1140 В постоянного и переменного тока. Приведены результаты расчетов давлений в режиме дугового короткого замыкания для различных групп электрооборудования. Доказано, что безопасность аппаратуры, предназначенной для работы во взрывоопасных средах, может быть обеспечена при условии проведения испытаний оболочек рудничного взрывобезопасного электрооборудования в режиме мощного дугового короткого замыкания.

Практически с первых дней использования на шахтах электрической энергии возникла проблема, связанная с защитой окружающей среды (взрывоопасной метановоздушной) от поджигания ее электрической искрой. Особенно актуальна эта проблема для шахт, опасных по газу и пыли. Одним из источников возникновения электрической искры является электрооборудование. На шахтах, опасных по газу и пыли, должно использоваться электрооборудование с уровнем взрывозащиты не ниже рудничного взрывобезопасного исполнения [1]. Один из таких видов

взрывозащиты шахтного электрооборудования – взрывонепроницаемая оболочка. Функционирование этого специфического вида защиты, традиционного во всем мире, проверяют согласно указанному нормативному документу с помощью взрывных камер (фактически испытательных комплексов) различных конструкций и размеров, создаваемых индивидуально в каждой стране.

Такие испытания проводили последовательно в двух режимах: маломощного искрения (обычно от автомобильной свечи) и дугового короткого замыкания (к. з.). Полагали, что причиной первого режима могут быть в условиях производства, например, наличие утечек тока по изоляции, поверхностных разрядов, работа схем управления и т. п., а причиной второго режима могло послужить лишь дуговое короткое замыкание в испытываемом объекте от достаточно мощного силового источника. В целях упрощения процесса конструирования силового электрооборудования, а фактически снижения его стоимости, за рубежом стали отказываться от испытаний рудничного электро-

оборудования в режиме мощного дугового короткого замыкания из-за маловероятности возникновения короткого замыкания в оболочке в момент заполнения ее взрывоопасной смесью, в частности метановоздушной. Увеличение давления взрыва внутри оболочки при заполнении ее не только метановоздушной смесью, но и продуктами разложения пластмасс (пиролиза изоляции) в данном случае вообще не учитывали.

В особосложных и специфически тяжелых условиях угледобычи в Украине такие испытания обязательны [2]. Но до последнего времени для доказательства необходимости подобных испытаний и возможности отказа от них серьезной основы не было, а все применяемые решения по созданию безопасного электрооборудования (точнее его оболочек) опирались фактически на общие соображения.

МакНИИ в течение многих лет проводит испытания на взрывобезопасность оболочек рудничного взрывозащищенного электрооборудования различного назначения и конфигурации. Эти оболочки обеспечивают работу всех видов изделий для угольной промышленности при разном рабочем напряжении в сетях различной мощности. Возникла идея обобщить все данные испытаний для выбора обоснованных технических решений в части проектирования взрывобезопасных оболочек достаточно высокой надежности. Результаты предварительного анализа этих данных показывают, что наиболее эффективную и взвешенную оценку можно получить, используя для обработки имеющихся данных методы математической статистики высокого уровня [3–5] (корреляционный и регрессионный анализ). В качестве исходных данных для расчетов использованы следующие факторы (всего до 7 отделений на каждый образец): напряжение питания образца, В; объем отделения, л; давление взрыва без избыточного давления и $CH_4 = 9...9,5\%$, МПа; давление взрыва при избыточном давлении 0,06 МПа и $CH_4 = 9...9,5\%$ (взрывоустойчивость), МПа; давление взрыва при избыточном давлении 0,06 МПа и $CH_4 = 8...8,5\%$ (взрывонепроницаемость), МПа; давление при дуговом к. з., МПа.

Анализировали группы данных, полученных при испытаниях электрооборудования напряжением от 12 до 1140 В постоянного и переменного тока, общим количеством 1089 точек. Для оценки возможного корректного построения зависимостей между давлением взрыва при избыточном давлении, равном нулю и $CH_4 = 9...9,5\%$ ($X_3^1, X_3^2, X_3^3, X_3^4$) и давлением взрыва при дуговом к. з. (в данном случае X_6^1 ,

X_6^2, X_6^3 и X_6^4), были взяты во внимание матрицы коэффициентов парной корреляции, приведенные ниже (X – давление взрыва, нижний индекс – номер фактора, верхний индекс – номер отделения испытываемой оболочки).

$X_1=36\text{ В}$	X_5^1	X_5^2	X_5^3	X_6^1
X_2^1	0,003	0,45		
X_2^2	0,49	0,11		
X_2^3	0,81	0,69		
X_3^1	0,89	0,61	0,44	0,11
X_3^2	0,77	0,80	0,69	0,47
X_3^3	0,79	0,89	0,93	
X_4^1	0,23	0,99	0,92	0,11
X_4^2	0,47	0,89		0,47
X_5^1	1	0,77	0,51	0,23
X_5^2		1	0,75	0,47
X_5^3			1	
X_6^1				1

$X_1=127\text{ В}$	X_5^1	X_5^2	X_5^3	X_6^1	X_6^2	X_6^3
X_2^1	0,43	0,22	0,06	0,22	0,10	
X_2^2	0,17	0,57		0,11	0,22	
X_2^3				0,82	0,95	
X_3^1	0,96	0,53	0,69	0,02	–0,10	0,65
X_3^2	0,62	0,89	0,88	0,08	0,07	0,51
X_3^3	0,77	0,88	0,82	–0,09	–0,22	0,37
X_4^1	0,98	0,55	0,67	0,04	–0,19	0,67
X_4^2	0,63	0,91	0,88	0,07	0,08	0,53
X_4^3	0,49	0,73	0,71	–0,18	–0,17	0,22
X_5^1	1	0,59	0,68	0,12	–0,11	0,68
X_5^2		1	0,88	0,28	0,26	0,56
X_5^3			1	0,22	0,22	0,64
X_6^1				1	0,71	0,68
X_6^2					1	0,74
X_6^3						1

Исследование зависимостей между указанными ранее факторами показало, что функциональные связи весьма слабы (условны) и не могут быть непосредственно использованы для выбора режима испытаний (при дуговом к. з. или без дугового к. з.) оболочек рудничного взрывозащищенного электрооборудования различных классов по рабочему напряжению и функциональному назначению.

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

$X_1=220 \text{ В}$	X_2^1	X_2^2	X_3^1	X_3^2	X_4^1	X_4^2	X_5^1	X_5^2	X_6^1
X_2^1	1	0,96	0,56	0,35	0,51	0,34	0,61	0,89	0,06
X_2^2		1	0,38	0,10	0,38	0,10	0,55	0,80	0,04
X_3^1			1	0,80	0,99	0,86	0,99	0,92	0,27
X_3^2				1	0,77	0,99	0,90	0,90	0,11
X_4^1					1	0,83	0,99	0,88	0,28
X_4^2						1	0,95	0,94	0,12
X_5^1							1	0,88	0,09
X_5^2								1	0,38
X_5^3									1

$X_1 = 300 \text{ В}$	X_2^1	X_2^2	X_3^1	X_3^2	X_4^1	X_4^2	X_5^1	X_5^2	X_6^1	X_6^2
X_2^1	1	0,52	0,50	0,70	0,52	0,67	0,56	-0,66	-0,14	-0,91
X_2^2		1	0,73	0,65	0,74	0,65	-0,76	0,67	-0,42	0,71
X_3^1			1	0,31	0,99	0,40	0,99	-0,44	0,75	-0,07
X_3^2				1	-0,34	0,97	-0,37	0,88	0,25	0,32
X_4^1					1	0,47	0,99	-0,44	0,73	-0,07
X_4^2						1	-0,45	0,96	0,16	0,40
X_5^1							1	0,50	0,73	-0,15
X_5^2								1	0,01	0,54
X_6^1									1	-0,01
X_6^2										1

Результаты расчетов давлений в режиме дугового к. з.

Напряже- ние пита- ния, В	Отделе- ния обо- лочек	Уравнение	Давление при $p_0 = 0$ X_3 , МПа		Прогнозируемое давление при дуговом к. з. X_4 , МПа					
			min	max	Нижняя граница прогноза		Верхняя граница прогноза		Среднее значение прогноза	
					min	max	min	max	min	max
12 – 1140	1–5	$X_4 = 0,790 X_3 + 0,390$	0,10	0,64	0,37	0,73	0,57	1,06	0,47	0,90
	1	$X_4 = 1,147 X_3 + 0,297$	0,10	0,63	0,31	0,93	0,51	1,11	0,41	1,02
	2	$X_4 = 1,114 X_3 + 0,282$	0,11	0,65	0,24	0,85	0,57	1,16	0,40	1,00
	3	$X_4 = 1,095 X_3 + 0,278$	0,12	0,67	0,29	0,84	0,53	1,11	0,41	1,01
	4	$X_4 = 2,227 X_3 + 0,090$	0,16	0,37	0,45	0,91	0,65	1,11	0,45	0,91
127	1	$X_4 = 0,020 X_3 + 0,627$	0,18	0,73	0,50	0,56	0,68	0,74	0,63	0,64
	2	$X_4 = 0,122 X_3 + 0,588$	0,18	0,60	0,44	0,56	0,72	0,84	0,61	0,66
300	1	$X_4 = 0,807 X_3 + 0,345$	0,18	0,55	0,35	0,69	0,64	0,89	0,50	0,79
660	1	$X_4 = 0,790 X_3 + 0,450$	0,10	0,73	0,40	0,90	0,64	1,17	0,53	1,03
	2	$X_4 = 1,050 X_3 + 0,360$	0,10	0,63	0,31	0,88	0,62	1,16	0,47	1,02
	3	$X_4 = 1,030 X_3 + 0,340$	0,18	0,65	0,39	0,86	0,66	1,15	0,66	1,01
	4	$X_4 = 1,05 X_3 + 0,285$	0,20	0,55	0,39	0,75	0,60	0,98	0,79	0,86
1140	1	$X_4 = 1,030 X_3 + 0,340$	0,18	0,65	0,39	0,75	0,66	1,15	0,53	1,01
	2	$X_4 = 1,400 X_3 + 0,220$	0,10	0,70	0,05	0,86	0,67	1,44	0,40	1,10
	3	$X_4 = 0,518 X_3 + 0,150$	0,18	0,65	0,21	0,76	0,72	1,48	0,42	1,14

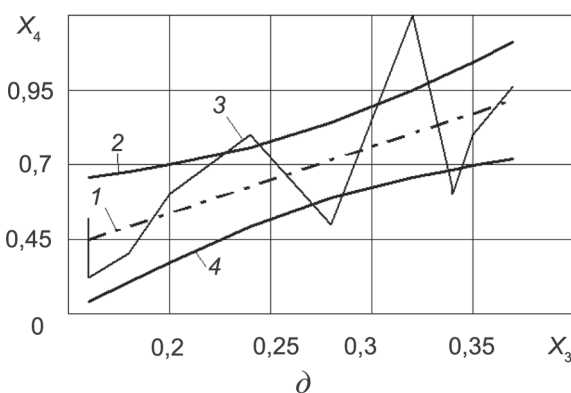
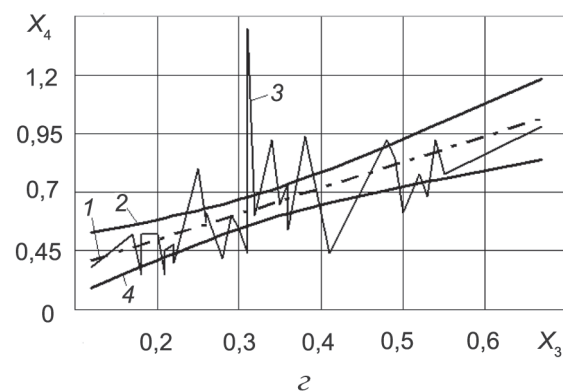
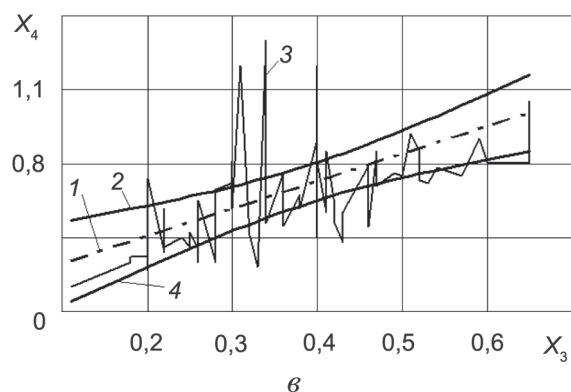
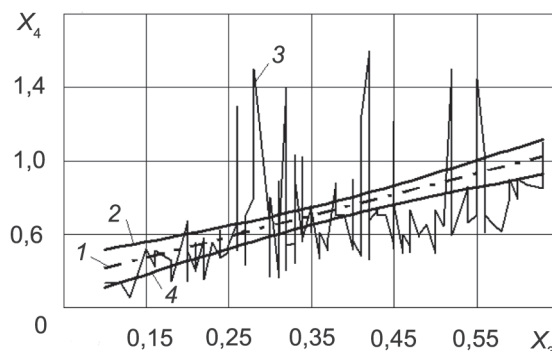
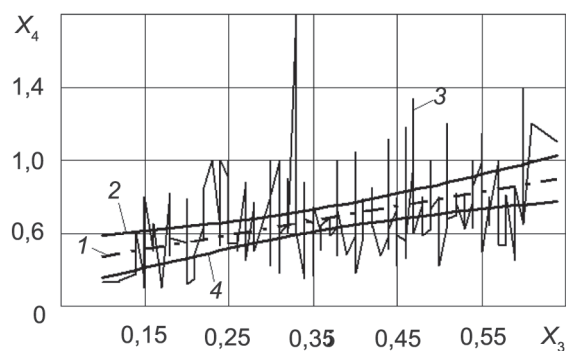


Рис. 1. Зависимость давлений в режиме дугового к. з. от давления взрыва без первоначального давления по всему массиву исходных данных (рабочее напряжение 12 – 1140 В). Полости оболочек: первые (а); вторые (б); третьи (в); четвертые (г); пятые (д): 1 – регрессия; 2 и 4 – верхняя и нижняя границы доверительного интервала; 3 – экспериментальные данные.

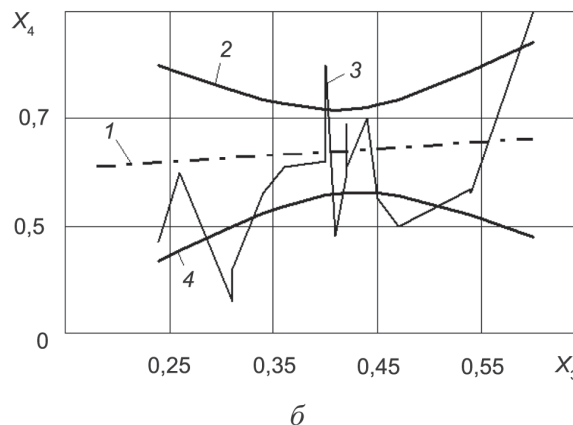
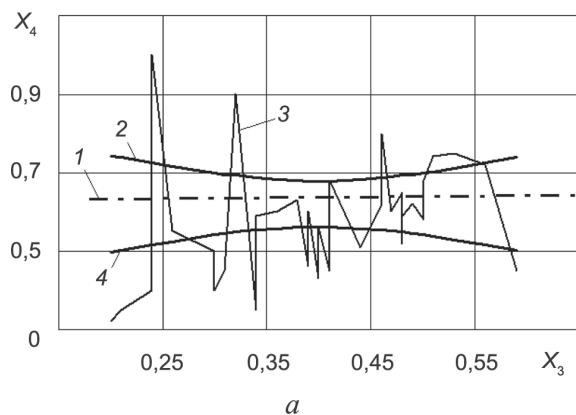


Рис. 2. Зависимости давлений в режиме дугового к.з. от давления взрыва без первоначального давления по всему массиву исходных данных при рабочем напряжении 127 В. Полости оболочек: первые (а); вторые (б): 1 – регрессия; 2 и 4 – верхняя и нижняя границы доверительного интервала; 3 – экспериментальные данные.

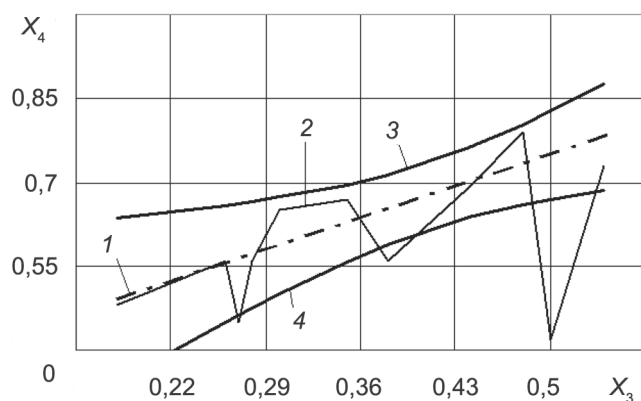


Рис. 3. Зависимости давления в режиме дугового к.з. от давления взрыва без первоначального давления по всему массиву исходных данных при рабочем напряжении 300 В: 1 – регрессия; 2 и 4 – верхняя и нижняя границы доверительного интервала; 3 – экспериментальные данные.

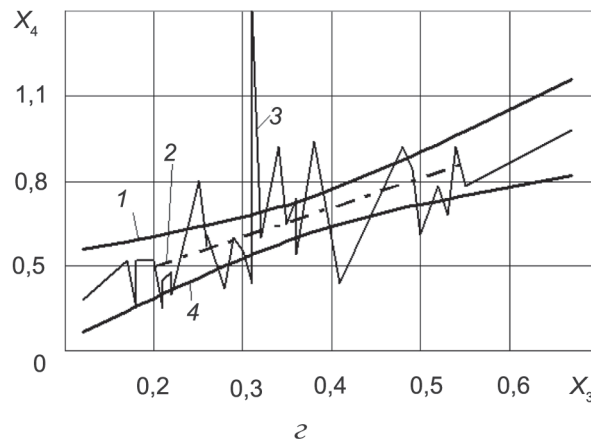
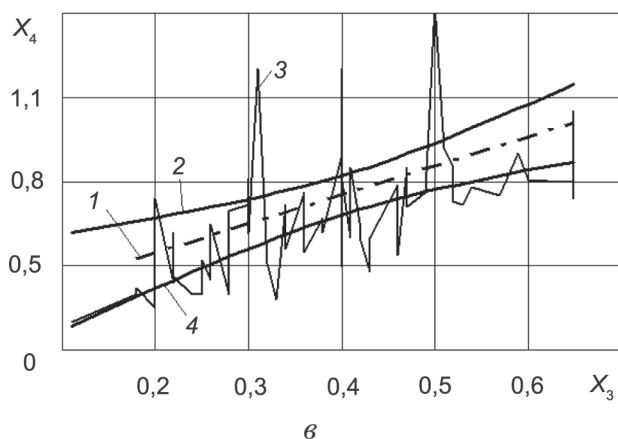
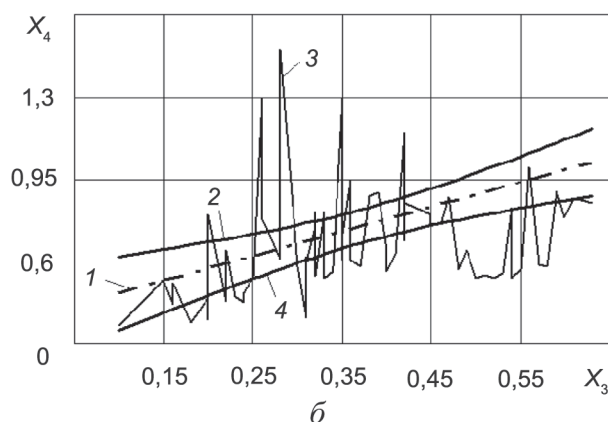
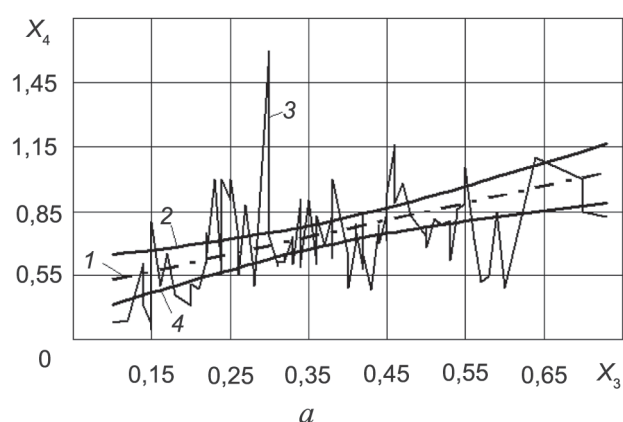


Рис. 4. Зависимости давлений в режиме дугового к.з. от давления взрыва без первоначального давления по всему массиву исходных данных при рабочем напряжении 660 В. Полости оболочек: первые (а); вторые (б); третьи (в); четвертые (г): 1 – регрессия; 2 и 4 – верхняя и нижняя границы доверительного интервала; 3 – экспериментальные данные.

Обработанные методами регрессионного и дисперсионного анализа исходные данные в виде линейных регрессионных зависимостей для различных групп электрооборудования совместно со значениями прогноза, в том числе в нелинейной его части, а также предельные значения давлений, полученные опытным и расчетным путем (при исходном давлении без поджата $p_0 = 0$ и при дуговом к. з.), для этих зависимостей представлены в таблице.

Графическая интерпретация аналитических уравнений (см. таблицу) с учетом доверительных интервалов, определенных при 95 %-ном уровне значимости, показаны на рис. 1 – 5.

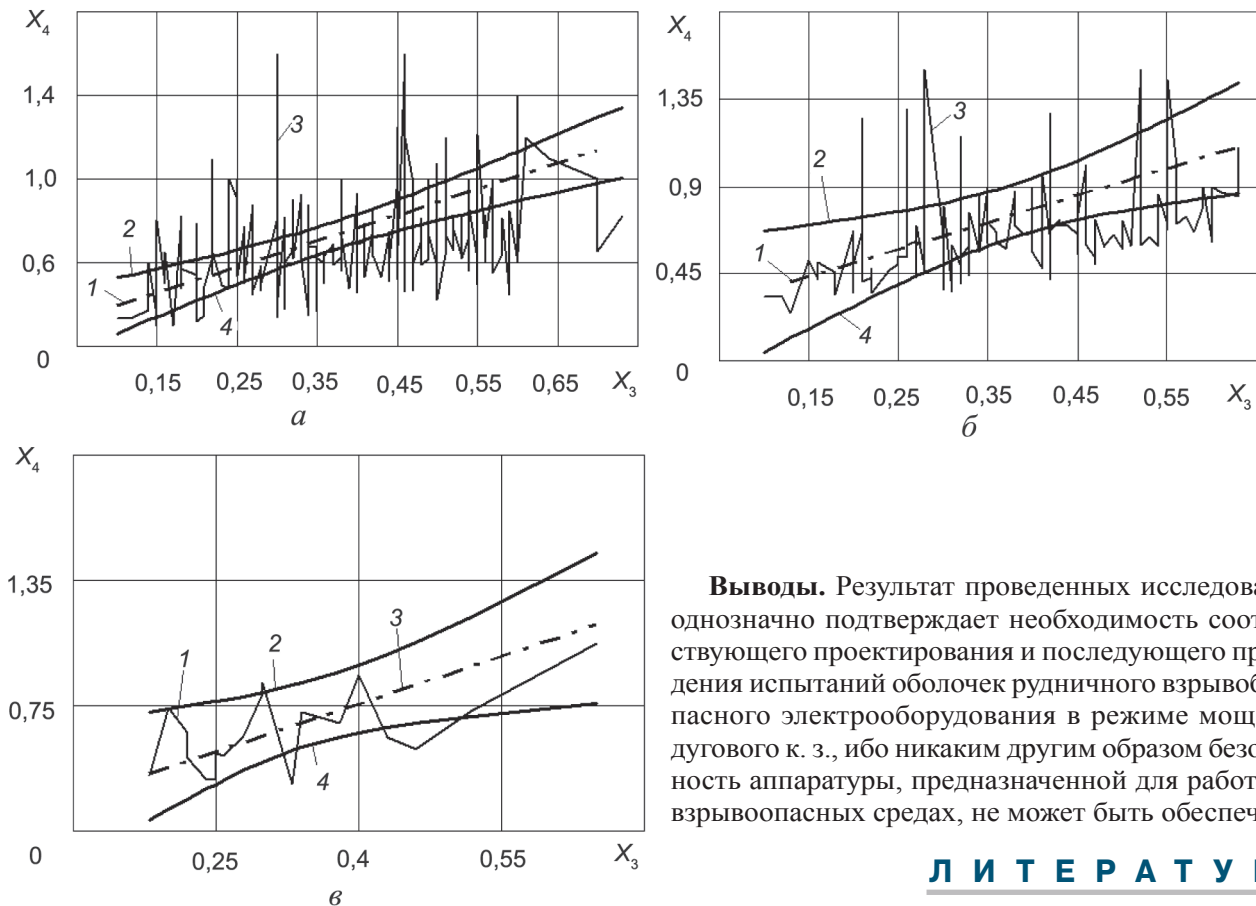


Рис. 5. Зависимости давлений в режиме дугового к.з. от давления взрыва без первоначального давления по всему массиву исходных данных при рабочем напряжении 1140 В. Полости оболочек: первые (а); вторые (б); третьи (в): 1 – регрессия; 2 и 4 – верхняя и нижняя границы доверительного интервала; 3 – экспериментальные данные.

Сопоставляя данные таблицы, можно сделать вывод, что среднее значение увеличения давления при переходе к режиму к. з. составляет X_4/X_3 и равняется $\bar{X} = 1,7 \dots 1,79$ МПа в зависимости от уровня сглаживания трендов экспериментальных данных [6]. В целом же это соотношение, по всему массиву рассматриваемых данных, может быть описано нормальным законом распределения при среднем значении увеличения давления при переходе к режиму к. з. $\bar{X} = 1,70$ и среднем значении отклонения $\sigma = 1,04$.

Выводы. Результат проведенных исследований однозначно подтверждает необходимость соответствующего проектирования и последующего проведения испытаний оболочек рудничного взрывобезопасного электрооборудования в режиме мощного дугового к. з., ибо никаким другим образом безопасность аппаратуры, предназначенной для работы во взрывоопасных средах, не может быть обеспечена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10: затв. Держкомітетом України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010. – К., 2010. – 432 с.
2. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка»: ГОСТ 22782.6–81. – [Действующий от 1982-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 69 с. – (Государственный комитет СССР по стандартам).
3. Кендалл М. Статистические выводы и связи / М. Кендалл, А. Стюарт; пер. с англ. – М.: Наука, 1973. – 900 с.
4. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. – [2-е изд.] – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
5. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау; пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 957 с.
6. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений / Дж. Тьюки пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 693 с.