

*к. т. н., доц. Денисенко В.П.,
к. т. н., доц. Лепило Н.Н.,
ст. преподаватель Складова Г.А.
(ДонГТУ, Алчевск, Украина)*

О СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПРОЦЕССОВ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА ИЗ ВЫРАБОТОК ДОБЫЧНОГО УЧАСТКА

Досліджено статистичні характеристики процесу виділення метану у виробки видобувної ділянки для різних геологічних і технологічних умов розробки, виявлені загальні закономірності. Для опису процесу метановиділення запропоновано використовувати розподіл Вейбула.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Развитие угольной промышленности Украины идет в направлении интенсификации производства, повышения производительности труда и концентрации угледобычи на предприятиях отрасли. Однако, основные промышленные и балансовые запасы угля в пределах горных отводов действующих шахт Донбасса характеризуются высокой природной метаноносностью угольных пластов. Значительные объемы выделения метана при этом являются одним из факторов, который сдерживает эффективное использование новой техники и технологии выемки угля и ухудшает безопасность ведения горных работ. В связи с этим возрастает актуальность прогноза метанообильности горных выработок, что требует исследования статистических характеристик процессов выделения метана.

Анализ исследований и публикаций. Тот факт, что процесс метановыделения из углепородного массива следует рассматривать как случайный, известен, и в литературе неоднократно упоминается о необходимости использования теории случайных процессов в исследованиях, связанных с проблемой газовой выделения в выработки добычных участков угольных шахт [1-7]. Однако рассмотренные проблемы не полностью исчерпывают комплекс задач, связанных с описанием закона распределения колебаний метановыделения в выработки добычного участка. Исследователями, как правило, применяется нормальный закон распределения для характеристики метановыделения, хотя рассчитанные по экспериментальным данным

статистические характеристики процессов метановыделения зачастую свидетельствуют об отклонении от этого закона.

Процесс изменения метановыделения носит случайный характер и в основном зависит от изменения напряженно-деформированного состояния углепородной толщи, многих природных и технологических факторов. Процессы, имеющие вероятностный характер и смещенную плотность распределения, удовлетворительно описываются с помощью распределения Вейбулла: например, разрушение материалов под влиянием микродефектов, коэффициент устойчивости подземных сооружений [8].

В принципе любое нормальное распределение становится смещенным, если вероятность события умножить или разделить на параметр. Так как в формулу нормального распределения входит экспоненциальная зависимость, то, умножив эту вероятность на параметр, получим распределение, смещенное вправо, а если вероятность разделить на параметр, то максимум распределения сместится влево.

Постановка задачи. Задача работы состоит в определении параметров случайного процесса газовыделения в выработки добычного участка для различных условий отработки и выявления закона распределения дебита метана. Для этого необходимо по фактическим данным дебита метана рассчитать и проанализировать статистические характеристики процесса выделения метана по источникам, определить закон распределения дебита метана, адекватно описывающий эти процессы, и разработать методику выбора коэффициентов для определенного закона распределения.

Изложение материала и его результаты. Основными вероятностными характеристиками случайного процесса метановыделения $I(t)$ являются функция распределения $F(I)$ и плотность вероятности $f(I)$. Функция распределения характеризует статические свойства процесса и определяет вероятность того, что значение случайной величины I не превысит заданного конкретного значения i :

$$F(i) = P(I \leq i),$$

где P — вероятность.

Числовые параметры функции распределения определяются путем математической обработки информации о дебите метана из источников газовыделения. В настоящей работе исследовали дебит метана добычного участка, лавы и, дополнительно, выработанного пространства, полученного путем вычитания от общего дебита метана на участке дебита лавы.

Исходными данными для анализа служила телеинформация о концентрации метана в исходящей струе лавы и добычного участка по

данным аппаратуры аэрогазового контроля (АГК) и количестве проходящего воздуха в соответствующих пунктах замера. Замеры выполнялись за период отработки лавы, рассматривались среднесуточные значения. По этим данным рассчитывался фактический дебит метана из участка, лавы и выработанного пространства, который использовался в качестве изучаемой характеристики.

Для получения объективных характеристик была выполнена статистическая обработка дебита метана 10 добычных участков шести шахт за период полной отработки лав (от 6 до 26 месяцев). В табл. 1 приведен перечень шахт и участков, которые использовались в качестве объектов исследования, и объем выборки исходных данных (сутки).

Таблица 1 – Объекты исследования

Номер объекта	Наименование шахты	Наименование лавы	Индекс пласта	Объем выборки
1	«Суходольская – Восточная»	23 Западная уклонная	i_3^1	375
2		22 Восточная уклонная	i_3^1	537
3		35 Западная	i_3^1	308
4	«Самсоновская – Западная»	3-я восточная	k_2^H	783
5		3-я западная	k_2^H	539
6	«Молодогвардейская»	25 Орловская	k_2	175
7		17 Орловская	k_2	363
8	«Белореченская»	6-я западная	l_6	254
9	«Лутугинская»	3-я восточная	k_3^B	283
10	им. Н.П. Баракова	5 Северная	k_5^H	634

Результаты вычисления численных параметров распределения метановыделения по всем объектам приведены в табл. 2-4. Для каждого объекта вычислялись статистические параметры дебита метана из добычного участка, лавы и выработанного пространства.

Полученные нами результаты подтвердили выводы авторов [1,2], исследовавших закономерности метановыделения, что закон распределения метановыделения в выработки добычного участка не подчиняется нормальному закону распределения случайных величин. В выполненных нами расчетах об этом свидетельствуют значения асимметрии и эксцесса. В отличие от распределения концентрации метана в исходящих струях, показанных в работах [1,2], где практически всегда положительные отклонения преобладают над

отрицательными, то есть распределение имеет правостороннюю асимметрию, а эксцесс положительный, в нашем случае, в распределении дебита из участка, наблюдается как правосторонняя, так и левосторонняя асимметрия, эксцесс имеет как положительный, так и отрицательный знак.

Положительный знак коэффициента асимметрии характеризует правостороннюю асимметрию и свидетельствует о том, что вероятность отклонения случайной величины метановыделения от среднего значения в сторону высоких значений больше, чем при нормальном распределении. Положительные значения эксцесса свидетельствуют о том, что случайная величина метановыделения принимает значения, близкие к среднему с более высокой вероятностью, чем при нормальном законе распределения. Отрицательный знак эксцесса свидетельствует об обратном, максимум многоугольника распределения располагается в таких случаях ниже, чем у нормального закона распределения.

Исходя из данных табл. 2–4, можно выделить ряд общих особенностей распределения метановыделения, характерных для разных геологических и горнотехнических условий отработки добычных участков.

Распределение дебита метана в исходящих струях лав характеризуется, в основном, положительной асимметрией и за исключением объектов 6 и 7 положительным эксцессом. В распределении дебита метана в исходящих струях добычных участков, как правило, преобладают положительная асимметрия и отрицательный эксцесс. Аналогичное распределение наблюдается для выделения метана из выработанного пространства.

Это свидетельствует о том, что характер распределения выделения метана связан с особенностями процесса выделения метана из конкретного источника. Так, метановыделение из пласта, которое в основном определяет метанообильность лавы, в газовом балансе добычного участка составляет 20-30 %, при этом коэффициент вариации для этого источника составляет 0,31-0,49. Выработанное пространство характеризуется большим уровнем метановыделения и колебаний, коэффициент вариации для этого источника изменяется в более широких пределах, чем для лавы. Основной вклад в газовый баланс вносит метановыделение из выработанного пространства, в связи с этим, формирование метановыделения в исходящей струе добычного участка зависит от характера метановыделения из выработанного пространства.

Таблица 2 – Статистические характеристики суммарного дебита метана из добычного участка

Статистические характеристики	Объекты исследования									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
среднее, м ³ /мин	24,59	13,94	5,60	8,89	11,12	12,72	14,46	5,90	4,95	9,94
медиана, м ³ /мин	24,90	13,68	5,25	8,72	11,34	13,05	14,35	6,01	4,63	9,40
мода, м ³ /мин	23,51	11,77	4,23	7,02	8,35	12,10	15,00	7,59	3,70	8,00
минимальное значение	14,85	6,88	1,98	2,85	4,86	5,09	6,26	2,56	2,78	4,14
максимальное значение	31,60	25,55	13,42	15,36	16,96	21,60	22,25	8,41	8,16	17,37
размах колебаний, м ³ /мин	16,75	18,67	11,44	12,51	12,10	16,51	15,99	5,86	5,39	13,23
дисперсия, м ³ /мин	8,69	8,79	3,15	6,09	7,30	11,05	9,38	1,93	1,87	6,27
станд. отклонение, м ³ /мин	2,95	2,97	1,77	2,47	2,70	3,32	3,06	1,39	1,37	2,50
коэффициент вариации	0,120	0,213	0,317	0,278	0,243	0,261	0,212	0,236	0,276	0,252
коэф. неравномерности	1,360	1,638	1,951	1,833	1,729	1,784	1,635	1,707	1,828	1,756
асимметрия	-0,325	0,478	0,970	0,206	-0,108	-0,031	0,072	-0,145	0,538	0,528
эксцесс	-0,060	0,477	1,179	-0,581	-0,981	-0,574	-0,513	-1,037	-0,652	-0,085

Таблица 3 – Статистические характеристики дебита метана из лавы

Статистические характеристики	Объекты исследования									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
среднее, м ³ /мин	5,65	6,29	1,64	3,21	2,89	6,41	3,70	1,25	2,91	4,51
медиана, м ³ /мин	5,28	6,07	1,57	3,08	2,82	6,10	3,67	1,14	2,67	4,25
мода, м ³ /мин	5,94	6,75	1,49	3,42	1,46	6,00	3,60	0,82	2,66	4,10
минимальное значение	0,98	1,12	0,35	0,46	0,75	2,09	0,07	0,53	0,89	1,04
максимальное значение	12,92	14,90	4,49	8,06	8,08	11,97	9,00	3,27	5,82	9,53

размах колебаний, м ³ /мин	11,94	13,79	4,15	7,60	7,33	9,88	8,93	2,73	4,94	8,49
дисперсия, м ³ /мин	5,20	5,25	0,31	1,46	1,17	4,33	3,25	0,38	1,12	1,99
станд. отклонение, м ³ /мин	2,28	2,29	0,56	1,21	1,08	2,08	1,80	0,62	1,06	1,41
коэффициент вариации	0,404	0,364	0,338	0,377	0,374	0,324	0,487	0,494	0,364	0,313
коэф. неравномерности	2,211	2,093	2,015	2,132	2,122	1,973	2,461	2,482	2,091	1,938
асимметрия	0,649	0,709	0,721	0,566	1,012	0,556	0,259	0,822	0,843	0,530
эксцесс	0,008	0,572	2,122	0,652	2,017	-0,109	-0,421	0,275	0,465	0,232

Таблица 4 – Статистические характеристики дебита метана из выработанного пространства

Статистические характеристики	Объекты исследования									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
среднее, м ³ /мин	18,94	7,65	3,95	5,68	8,24	6,30	10,76	4,65	2,05	5,42
медиана, м ³ /мин	19,52	7,84	3,60	5,56	8,48	6,18	10,57	4,64	2,08	5,28
мода, м ³ /мин	20,86	10,28	2,37	3,69	10,76	11,00	9,39	3,23	1,05	4,11
минимальное значение	8,61	0,21	0,29	0,02	0,14	0,40	4,00	2,01	0,08	0,00
максимальное значение	28,29	17,92	10,54	13,42	15,21	16,09	19,81	7,22	5,73	13,39
размах колебаний, м ³ /мин	19,68	17,71	10,25	13,40	15,08	15,69	15,81	5,21	5,66	13,38
дисперсия, м ³ /мин	12,21	10,05	2,95	6,75	7,62	11,59	7,83	1,46	1,87	8,12
станд. отклонение, м ³ /мин	3,49	3,17	1,72	2,60	2,76	3,40	2,80	1,21	1,37	2,85
коэффициент вариации	0,185	0,414	0,434	0,458	0,335	0,540	0,260	0,260	0,669	0,526
коэф. неравномерности	1,554	2,242	2,303	2,373	2,005	2,620	1,781	1,780	3,006	2,577
асимметрия	-0,454	-0,054	0,731	0,223	-0,146	0,187	0,365	-0,003	0,438	0,345
эксцесс	-0,064	-0,163	0,344	-0,537	-0,569	-0,896	-0,030	-0,909	-0,420	-0,340

Кроме этого установлено, что величина стандартного отклонения метановыделения из лавы зависит от величины среднего значения в данной выработке. Эта зависимость (рис. 1) показывает, что с увеличением среднего значения дебита метана увеличивается отклонение. Это необходимо учитывать при прогнозе метановыделения.

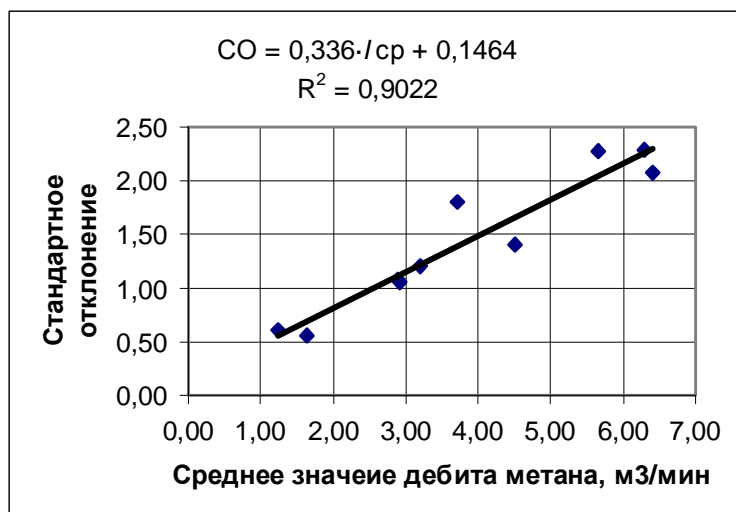


Рисунок 1 – Зависимость стандартного отклонения дебита метана от его среднего значения для метановыделения из лав

Распределение метановыделения имеет общий характер для всех шахт, отклонение от нормального закона распределения вероятно вызвано влиянием условий ведения горных работ и геомеханическими особенностями сдвижения вмещающего массива пород. Далее расчеты выполнены на примере добычного участка 35-ой Западной лавы пласта i_3^1 шахты «Суходольская-Восточная».

Обработка фактических данных метановыделения рассматриваемых объектов показала, что изменение дебита метана в горных выработках удовлетворительно характеризуется распределением Вейбулла.

Функция $F(I)$ и плотность $f(I)$ распределения Вейбулла описываются уравнениями [9]

$$F(I) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{I - I_0}{\eta}\right)^m\right] & \text{при } I > I_0; \\ 0 & \text{при } I \leq I_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$f(I) = \begin{cases} \frac{m}{\eta} \cdot \left(\frac{I - I_0}{\eta}\right)^{m-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{I - I_0}{\eta}\right)^m\right] & \text{при } I > I_0, \\ 0 & \text{при } I \leq I_0 \end{cases}, \quad (2)$$

где I_0, η, m – параметры распределения, причем $I > I_0$.

Математическое ожидание и дисперсия распределения Вейбулла рассчитываются по формулам [9]

$$M = I_0 + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right); \quad (3)$$

$$D = \eta^2 \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right], \quad (4)$$

где Γ – гамма-функция.

Коэффициент асимметрии рассчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{m}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right)\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{m}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right]^{3/2}}, \quad (5)$$

Чтобы воспользоваться распределением Вейбулла для математического описания процесса выделения метана, необходимо по имеющимся фактическим данным дебита метана I определить параметры распределения.

Для параметра I_0 задается наименьшее значение дебита метана за исследуемый временной период. Для определения параметра η используется соотношение (3). Для этого в него вместо математического ожидания подставляется среднее значение дебита метана I_{cp} за исследуемый период. Тогда из уравнения (3) получим

$$\eta = \frac{I_{cp} - I_0}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad (6)$$

Для определения параметра m используется соотношение (4). Для этого в левую часть выражения (4) необходимо подставить значение дисперсии, полученное при обработке фактических данных за период отработки соответствующей лавы. Поскольку полученное уравнение не может быть решено аналитически относительно m , оно решается численным путем.

Практически параметры η и m находятся методом итераций с использованием инструмента Excel Подбор параметра. Для этого задается начальное значение параметра m , затем по формулам вычисляется η (6) и D (4). Полученное расчетное значение D

сравнивается со значением дисперсии, полученным на основании обработки фактических данных за исследуемый период. Расчет повторяется до совпадения расчетной и фактической дисперсий с заданной точностью (обычно 0,001).

Рассчитанные значения плотности и функции распределения по фактическим данным, нормальному закону распределения и распределению Вейбулла для участка 35-ой Западной лавы пласта i_3^1 шахты «Суходольская-Восточная» приведены на графиках (рис. 2-3).

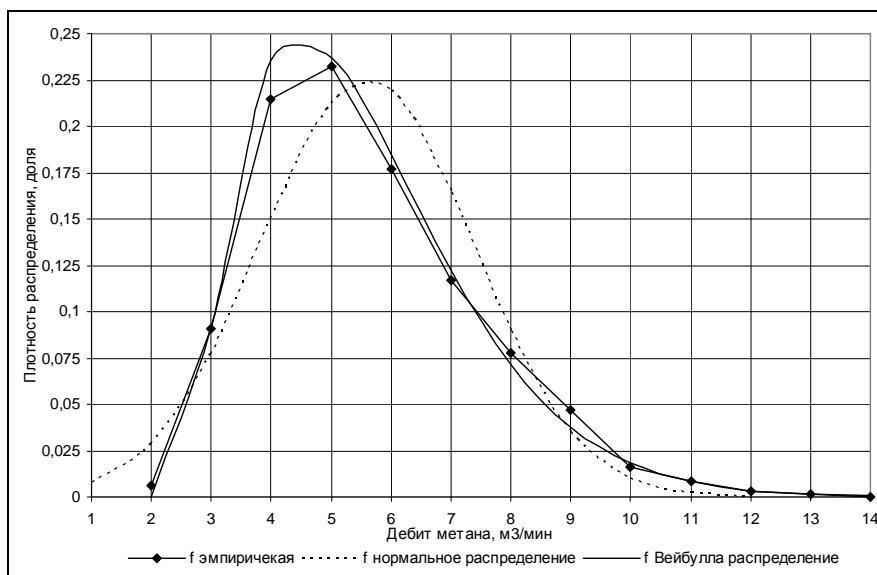


Рисунок 2 – Плотность распределения дебита метана для участка 35-ой Западной лавы шахты «Суходольская-Восточная»

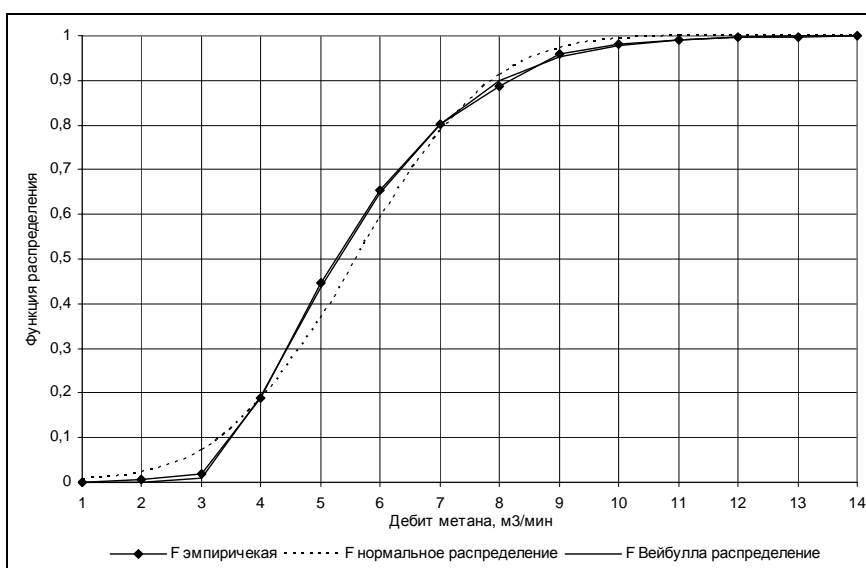


Рисунок 3 – Функция распределения дебита метана для участка 35-ой Западной лавы шахты «Суходольская-Восточная»

Функции распределения, рассчитанные по распределению Вейбулла, позволяют точнее устанавливать значения метановыделения в определенных интервалах. Из приведенного графика вытекает, что в 95% случаев метановыделение на участке конкретной лавы будет составлять менее 9 м³/мин, в 50% случаев – менее 5,3 м³/мин. (при среднем метановыделении 5,6 м³/мин.).

Выводы.

Установлено, что процесс метановыделения из выработок добычного участка для различных геологических и технологических условий отработки имеет общие закономерности, проявляющиеся в характере колебаний значений дебита метана во времени. Для описания этого процесса предложено использовать распределение Вейбулла, так как оно позволяет достоверно описать спектр метановыделения, что достигается подбором коэффициентов распределения.

Исследованы статистические характеристики процесса выделения метана в выработки добычного участка для различных геологических и технологических условий отработки, выявлены общие закономерности. Для описания процесса метановыделения предложено использовать распределение Вейбулла.

Statistical descriptions of process of selection of methane in making of extraction area for different geological and technological terms of working off are explored, general conformities to the law are exposed. For description of process of selection of methane it is suggested to use the Veybulla distributing.

Библиографический список.

1. Пигида Г.Л. Элементы теории автоматической газовой защиты очистных участков угольных шахт/ Г.Л. Пигида. – М.: Недра, 1975. – 80 с.
2. Бусыгин К.К. Статистические характеристики процесса газовыделения/ К.К. Бусыгин // Труды/ МакНИИ. – Макеевка, 1968. – т. ХУШ. – С.70-78.
3. Пигида Г. Л. Об оценке показателя относительной метанообильности лав при увеличении скорости подвигания/ Г. Л. Пигида [и др.] // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1972. – № 8. – С. 51-54.
4. Новиков Л.А. К вопросу о методах исследования нестационарных диффузионных процессов и средствах контроля концентрации метана в выработках угольных шахт/ Л.А. Новиков//

Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. тр. /НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск, 2002. – № 36. – С. 32-40.

5. Пигида Г.Л. Об оценке показателя относительной метанообильности участка для шахт Львовско-Волынского бассейна/ Г.Л. Пигида, В.М. Бережной, В.М. Смаль // Разработка пластовых месторождений полезных ископаемых. – Киев: Техника, 1971. – вып.25. – С. 32-36.

6. Пигида Г.Л. К вопросу о точности расчетного метода прогноза газообильности угольных шахт / Г.Л. Пигида, В.М. Бережной // Труды / МакНИИ. – М., 1969.– Т.ХХ: Вопросы безопасности в угольных шахтах. – С.44-53.

7. Лидин Г.Д. Вопросы газоносности угольных пластов и прогноза метанообильности шахт / Г.Д. Лидин // Методы определения газоносности пластов и прогноза газообильности шахт. – М.: Госгортехиздат, 1962. – С. 3-24.

8. Скобенко А.В. Обоснование применения распределения Вейбулла для вероятностной оценки устойчивости подземных выработок// Науковий вісник НГА України. –1998. – №3. – С. 18-19.

9. Мюллер П. Таблицы по математической статистике/ П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.

*Рекомендовано к печати
д. т. н., проф. Клишиным Н.К.*