

**УДК 622.252.5**

## **МЕТОД ЭКСПРЕССКОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УСТАНОВКИ СТАЛЕПОЛИМЕРНЫХ АНКЕРОВ**

**Халимендигов Е. Н.**

*(ОАО шахта Красноармейская-Западная № 1, г. Красноармейск,  
Украина)*

**Колчин Г. И.**

*(МакНИИ, г. Макеевка, Украина)*

**Назимко В. В.**

*(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)*

*Висловлена методика послідовного контролю якості установки сталі полімерних анкерів, оснований на використуванні залежності спектра власних коливань системи анкер-порода.*

*Method of successive control quality of setting polymeric anchors has shown, based on the dependence of spectrum oscillation of the system anchor-rock.*

В настоящее время анкерная сталеполимерная крепь получает все большее распространение на угольных шахтах Украины. Особенностью использования такой крепи является то, что анкеры устанавливаются в очень больших количествах. В среднем в одном ряду устанавливают от 5 до 15 анкеров в зависимости от величины сечения выработки. При месячных объемах проходки 1-2 тыс. м ежемесячно устанавливают до 10 тыс. анкеров и более. При таких объемах возникает проблема приемки установленных анкеров.

Указанная проблема решается методами теории надежности. До сих пор считается, что технология установки анкерной крепи выдерживается полностью и достаточно проверить несколько анкеров из партии, состоящей из нескольких тысяч, чтобы прокон-

тролировать качество установки анкеров. Контроль качества установки анкеров осуществляют путем его выдергивания с помощью коаксиального домкрата. При этом удается испытать таким способом не более 3 – 5 анкеров в смену. Вместе с тем при расширенном использовании анкерной крепи в промышленном производстве существует множество факторов, которые являются источниками снижения качества установки. Среди главных факторов, негативно влияющих на качество установки, следует назвать влажность стенок в шпурах, пробуренных под анкеры, недостаточное время перемешивания полимерного состава, обеспечивающего твердение смеси и закрепление анкерного стержня, неоптимальная величина зазора между анкерным стержнем и стенками шпура. Так при малом зазоре анкер сложно вставить в шпур, в результате чего задерживается время установки, и смесь избыточно перемешивается, что снижает ее прочность. В случае, когда зазор слишком велик, не обеспечивается надлежащее качество перемешивания ингредиентов твердеющего состава. Негативно на прочность закрепления воздействует эффект перчаток, когда остатки полимерной ампулы препятствуют надежному контакту смолы и породной стенки шпура и много других факторов.

В реальных условиях производства подземной добычи угля эти факторы действуют практически всегда и в той или иной мере уменьшают прочность закрепления анкеров. В отличие от существующих подходов, которые дают неопределенные результаты по испытанию нескольких анкеров на выдергивание из партии, состоящей из нескольких тысяч анкеров авторы публикации [1] предлагают использовать основы теории надежности, которая с заранее заданной достоверностью определяет необходимое количество испытаний. При этом применяется так называемый одноступенчатый контроль надежности (качества) установки сталеполлимерных анкеров типа вероятности.

План испытаний в методике [1] определяется по заданным надежностям  $R_1$  и  $R_0$  (или вероятностям нормальной работы  $P_1$  и  $P_0$ ) анкеров и рискам поставщика и потребителя  $\beta$  и  $\alpha$ . В роли поставщика в данном случае выступают звенья, устанавливающие анкеры, а потребителем является шахта, на которой работают рабочие в составе звеньев. Сведение риска поставщика  $\beta$  к мини-

муму возможно только за счет того, что потребитель примет у него как можно больше продукции. Снижение риска потребителя  $\alpha$  возможно за счет принятия только высококачественной и сверхнадежной продукции. Обычно находят компромисс и устанавливают приемлемые уровни риска, как для поставщика, так и для потребителя.

Конечная надежность анкеров определяется как отношение числа анкеров, которые не выдержали испытания к общему числу испытанных анкеров. Если фактическая надежность превышает заданный уровень  $R_0$ , партия установленных (например, в течение месяца) анкеров принимается. Если фактическая надежность меньше уровня  $R_1$  тогда партия бракуется.

Согласно [2, 3] ширина диапазона неопределенности решения определяется разницей между уровнями надежности (вероятности)  $\Delta = R_0 - R_1$ . Количество необходимых испытаний и допустимое количество бракованных анкеров определяется исходя из выше заданных условий путем решения системы уравнений.

$$\sum_{i=0}^{r-1} C_N^i P_0^{N-i} (1 - P_0)^i = 1 - \alpha$$
$$\sum_{i=0}^{r-1} C_N^i P_0^{N-i} (1 - P_1)^i = \beta$$

где  $C$  – доля надежных анкеров в  $i$ -том интервале испытаний.

Оценки, выполненные в [1] показали, что для сведения риска потребителя до уровня 10 % необходимо испытать около 200 анкеров.

Такая программа испытаний действительно обеспечивает надежный результат, однако авторы публикации [1] считают полученный объем испытаний достаточно большим, что снижает реальность применения указанной методики.

Аналогичная проблема возникает при оценке несущей способности анкерной крепи в процессе ее работы и активном проявлении горного давления. Исследования [4, 5] показали, что при оценке динамики изменения натяжения анкеров в процессе их работы разброс показаний даже на соседних анкерах превышает

100 %. Такой разброс возникает из-за перекосов породных блоков и периодического их заклинивания на контуре подготовительной выработки. Значительная величина разброса ужесточает требования к количеству анкеров, которые необходимо контролировать. При единичных измерениях результаты мониторинга будут фактически неопределенными и по ним нельзя сделать надежного заключения.

Исходя из имеющегося опыта, в данной работе предлагается выполнять контроль качества установки анкерной крепи и ее несущей способности в процессе работы анкеров методом последовательного контроля качества, разработанным профессором А. Вальдом [6].

В отличие от плана единичных испытаний профессором Вальдом разработан метод последовательного анализа статистических результатов испытаний, когда количество наблюдений, необходимое для определенного вывода заранее неопределенно. Решение об окончании испытаний зависит на каждой стадии испытаний от результатов предыдущих наблюдений. Вальдом А. разработаны такие планы последовательных испытаний, которые требуют существенно меньшего количества опытов по сравнению с методикой [1], обеспечивающей такую же надежность испытаний, но основанную на заранее фиксированном количестве испытаний.

По существу методика последовательных испытаний основана на условной вероятности и теореме гипотез, используемой в теории вероятности и математической статистике [7].

Статистические испытания основаны на проверке гипотез. Пусть партия из  $N$  (например, равным 10 тыс.) анкеров, установленная в течение месяца, содержит  $m$  штук, установленных некачественно. Тогда доля некачественных анкеров составит  $P = m/N$ . Обозначим через  $P_0$  допустимую долю некачественных анкеров, при которой всю партию целесообразно принять как удовлетворяющую в целом требованиям ПБ и технической эксплуатации. Ясно, что в жестких горно-геологических и горнотехнических условиях угольной шахты требовать полное отсутствие некачественно установленных анкеров абсурдно. Даже при изготовлении изделий в заводских условиях допускается определен-

ный процент некачественных изделий, поскольку требование абсолютного качества неизбежно влечет за собой высокие экономические издержки, которые снижают конкурентоспособность товара. Тем более разумен допуск определенного количества некачественно установленных анкеров в жестких условиях угольной шахты.

Контроль партии установленных анкеров осуществляется методом проверки гипотез [8]. Последовательность операций при проверке гипотезы состоит в следующем. Обозначим через  $\Theta$  значение параметра, который характеризует партию изделий. В нашем случае этим параметром является доля дефектных анкеров  $P$ . Символом  $H$  обозначим гипотезу относительно  $\Theta$ , а значит и относительно всей партии установленных анкеров. Символом  $\alpha$  обозначим вероятность того, что партия изделий будет забракована, символом  $\beta$  – вероятность того, что партия установленных анкеров будет принята.

В нашем случае имеется две гипотезы. Пусть гипотеза  $H_1$  определяет, что  $\Theta = \Theta_1$ , где  $\Theta_1$  характеризует хорошую партию анкеров, которые можно в целом принять как удовлетворяющие правилам технической эксплуатации и ПБ. Тогда гипотеза  $H_2$  предполагает, что  $\Theta = \Theta_2$ , где  $\Theta_2$  характеризует плохую партию анкеров, которая не соответствует правилам технической эксплуатации и ПБ. Такая партия не может быть принята к эксплуатации: дефектные анкера должны быть заменены качественно установленными, а также должны быть приняты организационные мероприятия по устранению дальнейшего повторения некачественной установки анкеров.

Пусть  $\alpha_1$  соответствует вероятности отклонения гипотезы  $H_1$ , когда эта гипотеза является правильной. Риск неправомерного отклонения хорошей партии изделий всегда существует и именуется риском изготовителя. Соответственно символом  $\alpha_2$  обозначим вероятность отклонения плохой партии анкеров. Аналогично  $\beta_1$  – вероятность того, что партия хорошо установленных анкеров будет принята, а  $\beta_2$  – вероятность принятия плохой партии анкеров.

Для фиксированного значения  $\Theta$  существуют тождества  $\alpha_1 + \beta_1 = \alpha_2 + \beta_2 = 1$ , поскольку сумма вероятности противоположных событий всегда равна единице.

Процесс контроля партии установленных анкеров состоит из четырех этапов и заключается в следующем.

1. Формулируется так называемая нулевая гипотеза и альтернативная ей. В том случае, когда нас интересует доля дефектных изделий, гипотезы принимают следующий вид.

$$H_1: P=P_1; \quad H_2: P=P_2 \quad (1)$$

2. Определяется уровень значимости, для чего устанавливаем значение вероятности  $\alpha_1$ , когда нулевая гипотеза верна, но при этом отклоняется. Следует подчеркнуть, что величины  $P_1$ ,  $P_2$  и  $\alpha_1$  определяются из экономических соображений или методом экспертных оценок. При этом следует учесть условия, в которых устанавливаются анкеры. Так если анкерная крепь устанавливается непосредственно в подготовительном забое с применением механизации, допустимая доля дефектных анкеров должна быть минимальна. На практике часто складываются такие обстоятельства, при которых анкеры устанавливают после проходки выработки. Например изменяется горнотехническая обстановка и требуется дополнительное усиление стационарной рамной крепи. Условия для установки анкеров при этом ухудшаются, поэтому неразумно требовать такого же качества установки.

3. Выбирается область отклонения. Другими словами ее называют критической областью. С учетом случайных отклонений должен существовать зазор между границей области принятия партии изделий и границей области браковки. Ширина критической области принимается таким образом, чтобы вероятность отклонения нулевой гипотезы соответствовала уровню значимости. При проверке партии на количество дефектных изделий область отклонения определяется числом дефектных изделий, которое именуют браковочным числом.

4. Этап принятия решения. Нулевая гипотеза  $H_1$  принимается, если число дефектных анкеров равно или меньше приемочного числа анкеров. Гипотеза  $H_2$  принимается, если число дефектных анкеров равно или меньше браковочного числа анкеров.

При применении последовательного анализа гипотез пункт 4 повторяется многократно до тех пор, пока не будет принята одна из альтернативных гипотез  $H_1$  или  $H_2$ .

Вальдом А. предложен эффективный метод последовательного анализа гипотез, основанный на последовательном вычислении критерия, представляющего собой отношение вероятностей. При большом числе изделий, например нескольких тысячах, последовательный анализ позволяет уменьшить число проверок в несколько раз по сравнению с методами, основанными на фиксированных методах наблюдений.

Алгоритм проф. Вальда состоит в следующем. Изделия проверяются путем последовательного их испытания путем накопления выборки из общей партии установленных анкером. При каждой последующей проверке  $m$ -го изделия вычисляется логарифм отношения вероятностей получения проверочной выборки. Первая вероятность  $p_{1m}$  определяется из предположения что гипотеза  $H_1$  верна, а вторая вероятность  $p_{2m}$  вычисляется из предположения что верна гипотеза  $H_2$ .

$$\begin{aligned} P_{1m} &= p_1^{d_m} (1 - p_1)^{m - d_m} \\ P_{2m} &= p_2^{d_m} (1 - p_2)^{m - d_m} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $d_m$  – число бракованных анкером.

Затем на каждом этапе при проверке  $m$ -го анкера вычисляется отношение вероятностей по зависимости

$$\ln \frac{p_{2m}}{p_{1m}} = d_m \ln \frac{p_2}{p_1} + (m - d_m) \ln \frac{1 - p_1}{1 - p_0} \quad (3)$$

Проверка продолжается до тех пор, пока логарифм отношения вероятностей находится в критической зоне

$$\ln \frac{\beta}{1 - \alpha} < \ln \frac{p_{2m}}{p_{1m}} < \ln \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (4)$$

Окончательный выбор гипотезы происходит когда

$$\ln \frac{p_{2m}}{p_{1m}} \geq \ln \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (5)$$

Поверяемая партия при этом бракуется. Если же

$$\ln \frac{p_{2m}}{p_{1m}} \leq \ln \frac{\beta}{1-\alpha} \quad (6)$$

партия принимается.

Для реализации предложенной методики испытаний необходимо разработать метод экспрессконтроля качества установки анкеров, который дает возможность испытать, по крайней мере, десятки анкеров в смену. Было принято решение, что такой метод должен основываться на использовании виброакустических процессов, которые возбуждаются в окрестности установленного анкера.

Разработка виброакустического метода контроля качества установки сталеполимерных крепей выполнялось на основе Методических рекомендаций [9, 10] и в которых изложены физические основы метода. Метод реализуется путем ударного возбуждения исследуемого объекта, в данном случае анкера, установленного в породном массиве и регистрации параметров вибрации объекта в области звуковых частот.

Исследованиями ИГТМ НАНУ установлено, что спектр колебаний крепи зависит от нагрузки на эту крепь и качества контакта крепи с окружающими породами. Именно этот эффект используется в основе метода экспрессконтроля качества установки анкерной крепи. При хорошем контакте анкера с окружающим массивом увеличивается показатель затуханий системы анкер – окружающие породы, как на частотах основного резонанса, так и более высоких частотах.

На рис. 1 приведено сопоставление спектров собственных частот колебаний анкера в подвешенном состоянии и закрепленном в массиве спустя два часа после его установки. Очевидна разница спектров, которую в данной работе предложено использовать в качестве критерия качества установки. Как видно в свободном состоянии преобладает одна собственная частота на уровне 1 кГц. После закрепления анкера возникает ряд собственных частот в диапазоне 1 – 4 кГц, а структура самого спектра становится более сложной.



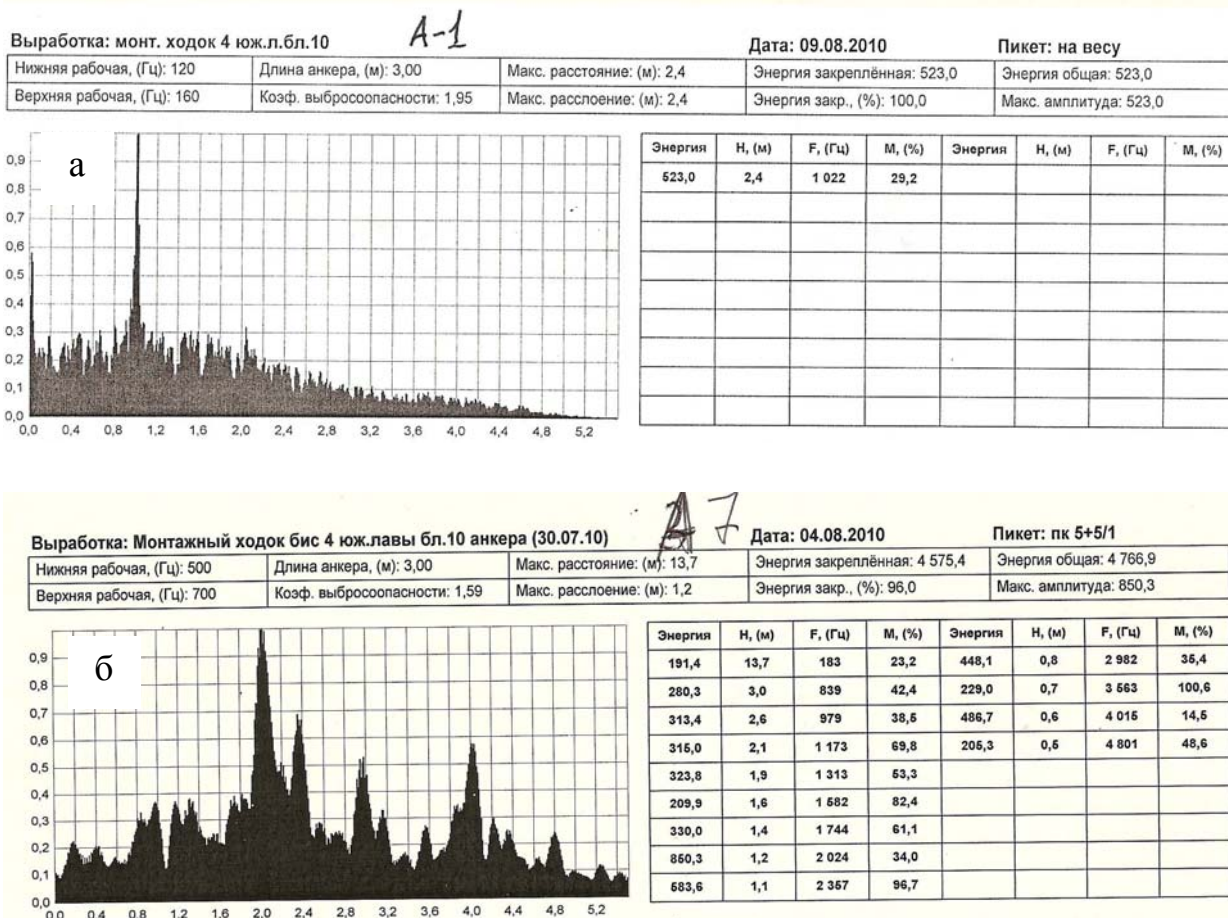


Рис. 1. Сопоставление спектров собственных частот системы анкера в свободном (подвешенном) состоянии (а) и закрепленном в массиве горных пород (б)

При исследовании зависимости параметров спектров колебаний от качества закрепления был изучен ряд спектров, которые снимались непосредственно после установки анкера, а также спустя определенное время после установки, например 5, 10, 15 минут, 60 минут, два часа, сутки и т.д. Примеры спектров приведены на рис. 2.

Для нахождения подходящего критерия для оценки качества закрепления сталеполимерного анкера был вычислен ряд показателей спектра, таких как средняя частота колебаний, энергия колебаний и вариация частоты колебаний. Статистическая обработка результатов виброметрии показала, что наиболее информативным является коэффициент вариации частот спектра.

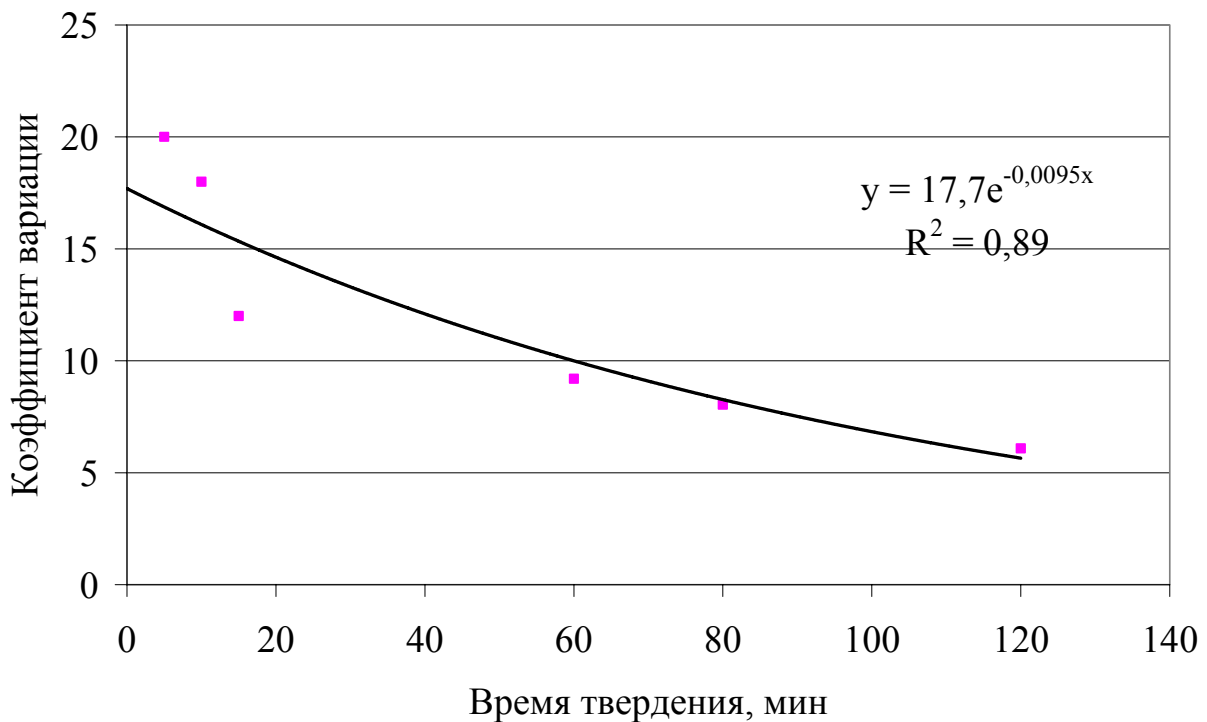


Рис. 2. Изменение коэффициента вариации частоты спектра собственных колебаний системы массив – анкер по мере твердения смолы

График на рис. 2 демонстрирует зависимость этого показателя от времени твердения полимерной смолы, которой анкер закреплялся в шпуре. С показателем тесноты связи равным 0,89 установлено, что вариация частот спектра уменьшается по мере улучшения контакта между анкером и окружающим массивом. При этом величина коэффициента вариации уменьшается по экспоненте с показателем -0,0095.

Методика проведения акустического зондирования заключается в том, что в каждом пункте исследования сейсмоприемник устанавливается в породах кровли, а по анкеру наносят серию ударов. Акустический сигнал от импульсного возбуждения массива регистрируется при помощи шахтного регистратора типа РАМШ [11].

После окончания акустического зондирования зарегистрированная информация обрабатывалась в лаборатории МакНИИ на персональном компьютере по специальным программам. В ре-

зультате обработки акустической информации для каждого пункта наблюдения был получен частотный спектр акустического сигнала, по которому определялся коэффициент вариации частот спектра.

Хронометраж виброметрических испытаний анкерных составляющих комбинированных охранных систем свидетельствует о том, что решение о приемки или браковке партии установленных анкеров при риске потребителя и поставщика на уровне 10 % и надежности 90 % принимается после испытания 24 – 40 анкеров, если использовать методику последовательных испытаний, предложенную в данной работе. Такой объем испытаний реально осуществить в течение смены двум работникам. Именно такие показатели свидетельствуют о преимуществе нового метода испытаний качества установки анкеров по сравнению с существующими методами.

### **СПИСОК ССЫЛОК**

1. Кожушок О.Д. Методика оценки надежности анкерной крепи / О.Д. Кожушок, В.В. Назимко // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – Донецьк, 2008. – № 2. – С. 60 – 67.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 420 с.
3. Барлоу Р. Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Наука, 1985.– 345 с.
4. Tingkan L., Hebblewhite B. Field monitoring of rock bolting performance in weak roof strata // Proceedings International Conference on Ground Control in Mining. – Morgantown: West Virginia University. – 1999. – Pp. 243-248.
5. Signer S., Lewis J. A case study of bolt performance in a two-entry gateroad // Proceedings International Conference on Ground Control in Mining. – Morgantown: West Virginia University. – 1999. – Pp. 8 – 17.
6. Вальд А. Последовательный анализ. – М.: Физматгиз, 1960.– 328 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей.– М.: Наука, 1964.– 576 с.

8. Коуден Д. Статистические методы контроля качества. – М.: Физматгиз, 1961.– 624 с.
9. Методические рекомендации по геофизическому контролю и диагностике геомеханического состояния подземных геотехнических систем угольных шахт/ Минуглепром Украины, ИГТМ НАНУ – Днепропетровск: «ВИК», 2009.– 80 с.
10. Халимендигов Е.Н. Виброакустическая диагностика работы рамной крепи выемочных штреков при интенсивной отработке угольного пласта //Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2007.– Вып. 73.– С. 11– 17.
11. Щипачев В.К. Регуляризация решения задачи определения акустическим способом расстояния от горной выработки до выбросоопасного пласта// Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сборник научных трудов МакНИИ.– Макеевка: МакНИИ, 1995.– С. 52 – 56.