

УДК 622.235.53

**Б.Н. АНДРЕЕВ** (д-р техн. наук, проф.)

**Д.В. БРОВКО** (канд. техн. наук, доц.)

**В.В. ХВОРОСТ** (канд. техн. наук, асс.)

ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог

## **К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ РИСКА НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Выполнен анализ оценки риска состояния строительных объектов поверхности горнопромышленного комплекса по критерию снижения их несущей способности функционально связанного с вероятностью риска обрушения зданий и сооружений. С помощью предложенной методики может быть исследована количественная взаимосвязь между снижением «несущей способности» элементов зданий и сооружений с «состояниями» строительных объектов.

**Ключевые слова:** риск, надежность, конструкции, обрушение.

Аварийные ситуации на объектах поверхности горнопромышленного комплекса, вызванные запроектными воздействиями, в общем случае непредсказуемы и сводятся к локальным аварийным воздействиям на отдельные конструкции одного здания: взрывы, пожары, карстовые провалы, дефекты конструкций и материалов, некомпетентная реконструкция (перепланировка) и т. п. случаи.

Как правило, воздействие рассматриваемого типа приводит к местным повреждениям несущих конструкций зданий. При этом в одних случаях чрезвычайные ситуации этими первоначальными повреждениями и исчерпываются, а в других - несущие конструкции, сохранившиеся в первый момент аварии, не выдерживают дополнительной нагрузки, ранее воспринимавшейся поврежденными элементами, и тоже разрушаются.

Существующая нормативная база по управлению безопасностью строительных объектов не в полной мере справляется с возложенными на нее задачами, а норм, которые регламентируют риск аварии зданий, нет вообще. Использование в строительстве методики нормирования, основанной на коэффициентах надежности, теоретически обеспечивает безопасность строительных конструкций. Однако опыт эксплуатации конструкций показывает, что надежность является необходимым, но не достаточным условием безопасности.

Установлено, что в 80% случаев причиной строительных аварий являются грубые человеческие ошибки, допускаемые при проектировании, изготовлении и монтаже несущих конструкций, которые при невыгодном сочетании с непредсказуемыми факторами природно-климатического и техногенного характера становятся причинами обрушений строящихся и уже построенных зданий и сооружений.

Таким образом, формирование процедур и методик, позволяющих устанавливать степени конструкционной безопасности зданий с учетом риска, является весьма актуальной потребностью строительного комплекса. Механизмом практической реализации политики обеспечения безопасности строительных объектов должна стать система управления рисками на всех стадиях жизненного цикла здания и сооружения.

Значительный износ существующих зданий и сооружений с большим сроком эксплуатации, а также низкое качество строительных объектов, возведенных в стране за последние четверть века, являются причинами роста числа обрушений зданий и сооружений, нередко сопровождающихся гибелью людей. В этой связи для повышения надежности и безопасности эксплуатации строительных объектов в

последние годы разработан целый ряд нормативных документов в области диагностирования, обследования и мониторинга технического состояния зданий и сооружений.

Исторически задачи повышения безопасности зданий и сооружений при длительном их использовании решались по разным методологическим концепциям, сыгравшим, несомненно, свою положительную роль. Следует отметить, что ещё на рубеже 60-х - 70-х годов прошлого века усилия известных специалистов [1] были направлены на научное обоснование принципов задания уровня надёжности зданий и сооружений ещё на стадии их проектирования, что позволило в 80-х годах при переработке всех СНиПов по проектированию несущих элементов (строительных конструкций и грунтовых оснований) зданий и сооружений ввести соответствующие коэффициенты «запаса» (по надёжности, условиям работы, по материалу и т. п.), которые заложены во всех СНиПах по проектированию и в настоящее время. Однако подобный методологический подход не позволяет оценивать фактическую надёжность несущих элементов и в целом зданий и сооружений на стадии их эксплуатации, поскольку в классической теории [1, 2] надёжность любого объекта должна оцениваться вероятностью того, что объект на заданный момент окажется в каком-то заданном состоянии. Невозможность решения подобных задач оценивания надёжности применительно к таким объектам, как эксплуатируемые здания и сооружения, в частности, обусловлена была тем, что в нормативной базе не была регламентирована классификация состояний строительных объектов и их несущих элементов, которая впервые в нашей стране была представлена в 1998 году [3]. Однако даже введение этой классификации не позволяет оценивать надёжность эксплуатируемых строительных объектов по показателю вероятности того, что объект в данное время (или через какое-то время) окажется в каком-то конкретном состоянии (например, в «работоспособном», «ограниченно работоспособном», или в каком-то другом состоянии), поскольку на практике для распознавания (идентификации) этого состояния нам никогда не хватает информации, которая должна вводиться в расчётные зависимости для вычисления вероятности очень сложного события, каковым является конкретное «техническое состояние» строительных объектов.

Понимание этого факта привело к необходимости развития другого методологического направления по обеспечению безопасности эксплуатации строительных объектов, а именно к разработке научных основ технического диагностирования состояния несущих элементов зданий и сооружений. Вместе с тем эта классификация состояний зданий и сооружений далека от совершенства, так как на практике при проведении обследований состояния строительных объектов она не позволяет с достаточной степенью объективности настолько точно оценивать расчётным путём «несущую способность» элементов строительных объектов, чтобы однозначно и обоснованно идентифицировать переход несущих элементов зданий и сооружений из одного состояния в другое.

Неразрешимой на современном этапе всё равно остаётся проблема объективного оценивания состояния эксплуатируемых зданий и сооружений по критериям несущей способности их элементов, которую всегда желательно определять не расчётно-теоретическими методами, как это предписывается нормативными документами [3], а аппаратными способами. Вместе с тем сложность данной проблемы носит, по крайней мере, двоякий характер.

Во-первых, при статических режимах загрузки зданий и сооружений выявить фактическую «несущую способность» элементов эксплуатируемых строительных объектов (грунтового основания и конструкций) в лучшем случае удаётся

лишь тогда, если на стадии строительства объекта установлены тензодатчики в грунтовое основание и в несущие строительные конструкции, регистрирующие в них фактические напряжения. Но нормативно это сегодня не предписывается. Для промышленных зданий и сооружений, диагностирование состояния которых выполняется периодическими их обследованиями в соответствии с [3], мы можем с помощью средств неразрушающих методов контроля (НМК) определять лишь фактическую прочность материала конструкций. Переход же от прочности материала конструкций  $R$  к их «несущей способности» ( $P_{нс}$ ) сегодня осуществляется лишь расчётно-теоретическими методами по правилам строительной механики и сопротивления материалов. В то же время специалистам известно, что такой переход,

$$R \Rightarrow (P_{нс}), \quad (1)$$

при сложных конструктивных схемах современных строительных объектов всегда сопряжён со значительными неточностями и неопределённостями даже при использовании современных численных методов расчёта, например, в виде метода конечных элементов (МКЭ). Связано это, прежде всего, с тем, что параметр  $R$  следовало бы определять в значительном числе точек (расчётных сечений) строительных конструкций, к которым в эксплуатируемых зданиях и сооружениях зачастую нет доступа приборами НМК из-за наличия облицовочных отделочных покрытий как внутри зданий, так и по их фасадам. Кроме того определение прочности материала (бетона) железобетонных конструкций (ЖБК) с помощью доступных средств НМК сегодня ограничивается толщинами до 60 см.

Что же касается грунтовых оснований, то доступа к ним под эксплуатируемыми зданиями и сооружениями вообще нет, и определить сопротивление (прочность) грунтов  $R$  под эксплуатируемым строительным объектом, как правило, практически не возможно.

Во-вторых, оценивание состояний зданий и сооружений по критерию «несущей способности» в соответствии с [3] методически может быть осуществимо, если было бы возможно измерить те фактические нагрузки (хотя бы статические)  $P_{\phi}$  которые испытывают грунтовые основания и конструкции эксплуатируемых зданий и сооружений. Как известно, на стадии проектирования строительных объектов расчётным путём определяют предельные (критические) нагрузки  $P_{кр}$  которые могут выдержать те или иные здания и сооружения. Тогда на стадии их эксплуатации оценивание состояния их несущих элементов (грунтового основания и конструкций) можно было бы выполнять по известному правилу строительной механики, что несущая способность обеспечена при условии:

$$P_{\phi} \leq P_{кр}, \quad (2)$$

Однако, как можно измерить (каким динамометром) фактический вес здания, передаваемый на грунтовое основание? Поскольку параметр  $P_{\phi}$  в этом случае (по аппаратурным данным) неизвестен, то алгоритм оценивания по критерию его «несущей способности» (2) оказывается нереализуемым. В следствие этого, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации строительных объектов, параметр  $P_{\phi}$  в (2) для всех несущих элементов (грунтового основания и конструкций) определяется расчётным путём (по известной процедуре сбора нагрузок). Вместе с тем процедура сбора нагрузок (ввиду её трудоёмкости и неточ-

ности) на практике всегда выполняется с «запасом», и поэтому расчётное значение нагрузок как правило, превосходит фактическое значение нагрузок.

$$\left(P_{\phi}\right)^p > P_{\phi}, \quad (3)$$

а фактическое значение нагрузок  $P_{\phi}$  остается неизвестным.

Таким образом, алгоритм диагностирования состояния зданий и сооружений по критерию их «несущей способности» (2) оказывается нереализуемым. Кроме того, практика показывает, что не исключены ошибки в расчётах параметра  $\left(P_{\phi}\right)^p$  когда он оказывается заниженным в сравнении с фактическими нагрузками что при использовании алгоритма (2) даёт вообще неадекватные оценки о состоянии объекта, приводящие к обрушениям зданий и сооружений, когда при их проектировании или обследовании на стадии эксплуатации вместо алгоритма (2) фактически оказывается ситуация:

$$\left(P_{\phi}\right)^p < P_{\phi} > P_{кр}, \quad (4)$$

Анализ причин большинства обрушений зданий и сооружений свидетельствует о том, что основной причиной этих обрушений является ситуация (4) ввиду незнания фактических нагрузок (или трудно прогнозируемых). В случае воздействия на здания и сооружения динамических (и в особенности случайных динамических) нагрузок ситуация лишь ещё больше усугубляется (при воздействии ветровых и сейсмических нагрузок, технологических нагрузок и т. п.).

В этой связи представляется актуальным для оценивания надёжности эксплуатируемых зданий и сооружений использовать теорию рисков возникновения опасных и аварийных ситуаций. Вместе с тем для несущих элементов строительных объектов применение этой теории находится в зачаточном состоянии. В этой связи в данной области имеется весьма ограниченное число публикаций, например, свидетельствующее о целесообразности исследования применимости теории рисков к технической диагностике строительных объектов.

На процесс зарождения и развития риска оказывает свое влияние многообразие факторов и условий (рис. 1). Приведенная схема позволяет выделить целый ряд первопричин риска: отказы в работе узлов и оборудования вследствие их конструктивных недостатков, плохого технического изготовления или нарушения правил технического обслуживания; отклонения от нормальных условий эксплуатации; ошибки персонала; внешние воздействия и пр. Вследствие возможности возникновения указанных причин опасные промышленные объекты постоянно находятся в неустойчивом состоянии, которое по отношению к безопасности производства становится особенно критичным при возникновении аварийных ситуаций на объектах.

Обычно аварии предшествует накопление дефектов или отклонения от нормального хода процессов. Эта фаза может длиться минуты, сутки или даже годы. Сами по себе дефекты или отклонения еще не приводят к аварии, но их накопление увеличивает риск ее возникновения. В процессе эксплуатации объекта, как правило, выпадает эта фаза из-за невнимания к регламенту или недостатка информации о работе объекта. На следующей фазе происходит неожиданное событие, которое существенно меняет ситуацию. Попытки восстановить нормальный ход технологического процесса, не обладая полной информацией, зачастую только усугубляют развитие аварии. Наконец наступает последняя фаза – авария.

Если оценивать риск возникновения опасной и (или) аварийной ситуации с эксплуатируемым строительным объектом по вероятности  $P$  разрушения (выхода из строя) одного из несущих элементов объекта, влекущего за собой разрушение данного объекта (здания, сооружения) или невозможность выполнения им возложенных на него функций. При этом предполагается, что возникновение опасной и аварийной ситуации является следствием снижения несущей способности ( $P_{нс}$ ) несущих элементов строительного объекта.

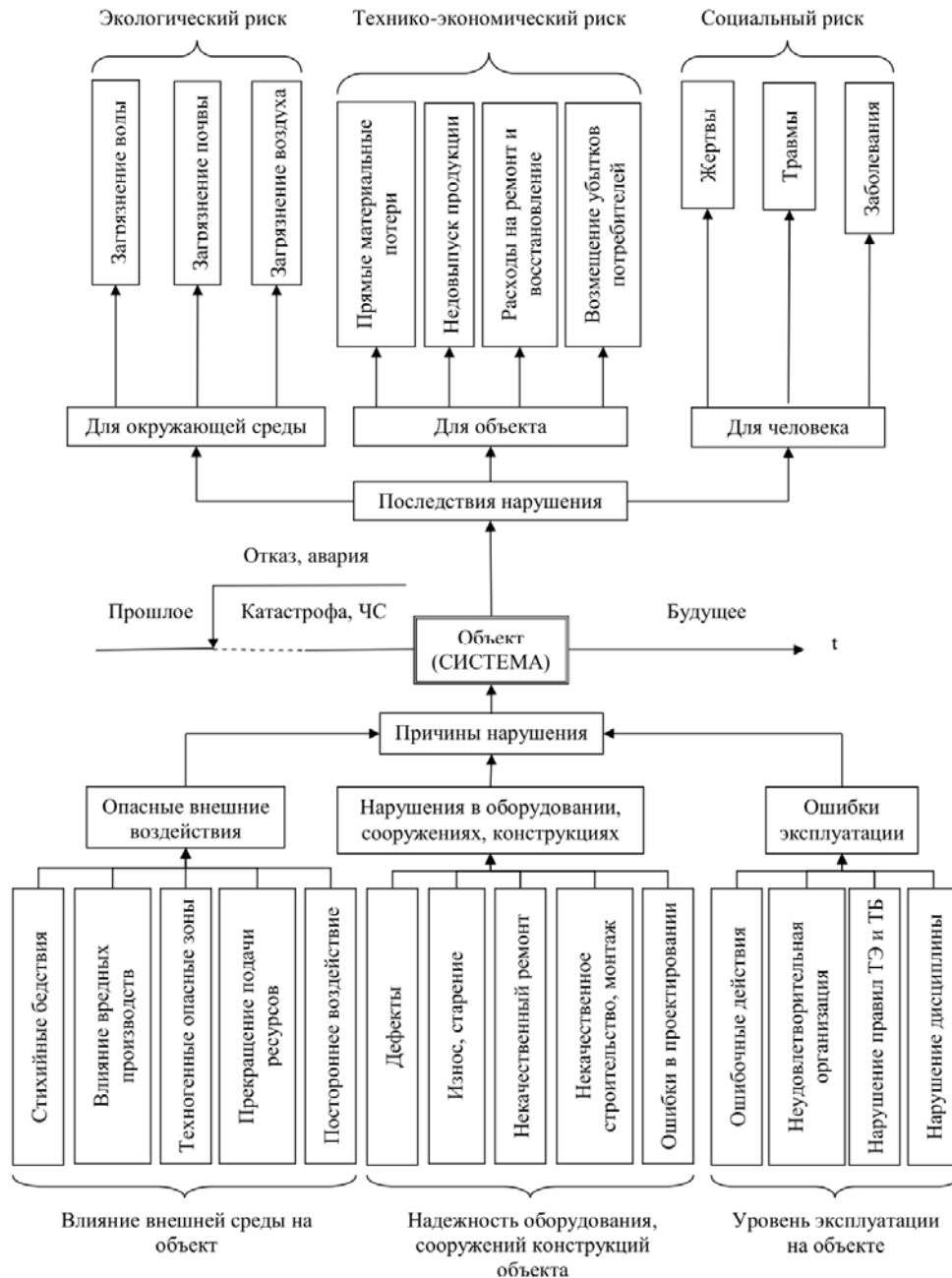


Рис.1. Функциональная модель развития риска промышленного объекта

Также предполагается, что на стадии проектирования объекта для всех его несущих элементов (грунтового основания и конструкций) была задана расчётная (требуемая) несущая способность  $[P_{нс}]$ . Длительная эксплуатация объекта со временем приводит к снижению несущей способности (по разным причинам) его эле-

ментов на некоторые величины ( $\Delta(P_{nc})$ ) так, что фактическая несущая способность ( $(P_{nc})_{\phi}$ ) элементов объекта становится равной:

$$(P_{nc})_{\phi} = [P_{nc}] - \Delta(P_{nc}), \quad (5)$$

Далее вводим коэффициент снижения несущей способности  $\eta$  который определяем:

$$\eta = \frac{[P_{nc}]}{(P_{nc})_{\phi}}. \quad (6)$$

Тогда

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \Delta(P_{nc}) = 0 \Rightarrow [P_{nc}] = (P_{nc})_{\phi} \\ \eta = 1 \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \Delta(P_{nc}) > 0 \Rightarrow (P_{nc})_{\phi} \Rightarrow 0 \\ \eta = \infty \end{array} \right\} \quad (8)$$

Т. е. коэффициент  $\eta$  может изменяться в пределах:

$$\eta = \{1, \infty\}. \quad (9)$$

Очевидно, что при возрастании показателя  $\eta$  (при снижении несущей способности элементов объекта  $(P_{nc})_{\phi}$ ) вероятность разрушения объекта, как показателя риска возникновения опасной и аварийной ситуации, возрастает. Следовательно, в принципе существует некоторая зависимость вероятности обрушения строительного объекта  $P$  от показателя снижения несущей способности его элементов  $\eta$  (5) - (9):

$$P = P(\eta). \quad (10)$$

При этом с возрастанием  $\eta = \{1, \infty\}$  вероятность разрушения объекта  $P$  возрастает от 0 до 1:

$$P(\eta) = \{0, 1\}. \quad (11)$$

Можно себе представить ситуацию, когда показатель  $\eta$  может быть и меньше 1. Такое бывает в том случае, если

$$(P_{nc})_{\phi} > [P_{nc}], \quad (12)$$

это на практике означает - строительный объект построен с запасом по несущей способности, что в практике проектирования строительных объектов (в [2] и в СНиПах) регламентируется соответствующими коэффициентами  $\gamma$  надёжности, условий работы и т. п.:

$$\gamma = \frac{(P_{nc})_{\phi}}{[P_{nc}]} > 1, \quad (13)$$

С этой точки зрения коэффициенты надёжности (запаса)  $\gamma$  являются обратными по отношению к показателю  $\eta$ .

В теории рисков принято, что зависимости типа (10) должны задаваться на основе большой статистики по опыту эксплуатации объектов-аналогов или на основе экспертных оценок.

Зададим графическую форму зависимости (10), представленную на рис. 2 кривой А-В-С-Д. Логика её построения заключается в следующем.

Для случая, когда имеются запасы по несущей способности строительного объекта и  $\eta \leq 1$ , вероятность обрушения объекта  $P$ , очевидно, следует принимать равной нулю (точка А на рис. 2).

При снижении несущей способности элементов объекта  $\Delta(P_{nc})$  на 10%, когда  $\eta = 1,1$  оценивают вероятность обрушения строительного объекта, равной  $P = 0.85$  (точка С на рис. 2).

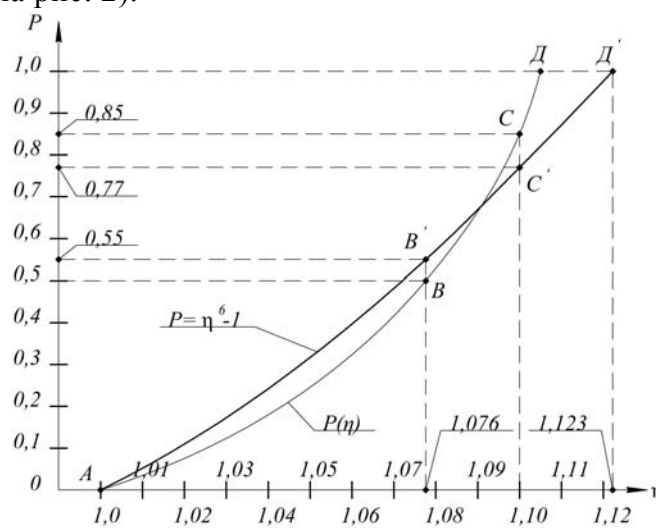


Рис. 2. График вероятности обрушения строительного объекта

Для придания зависимости (10) графической формы, близкой к параболе, между точками А и С появляется точка В с вероятностью обрушения объекта  $P = 0.50$ , что соответствует снижению несущей способности элементов  $\Delta(P_{nc})$  на 7.6% или  $\eta = 1,076$

При этом результаты вполне согласуются с погрешностью расчётов фактической несущей способности элементов эксплуатируемых зданий и сооружений при их обследовании в соответствии с обязательными требованиями по [1-3].

Точка Д (см. рис. 2) получается автоматически по результатам построения зависимости (10) по точкам А, В, С в виде гладкой параболы.

Если принять, что графическое построение зависимости (10) по выше рассмотренным точкам А, В, С, Д является достаточно логичным и обоснованным, то можно выполнить аппроксимацию этой зависимости как параболической функции вида:

$$P = A \cdot \eta^B + C, \quad (14)$$

в которой должны быть аппроксимированы параметры «А», «В», «С» с максимальным приближением зависимости (14) к графику функции (10), построенной по точкам А-В-С-Д (см. рис. 2). Результат аппроксимации в диапазоне изменения показателя  $1 \leq \eta \leq 2$ , дает следующее аналитическое выражение для функции (14)

$$P = \eta^6 - 1, \quad (15)$$

Как следует из рис. 2, функция (15), проходящая через точки А, В', С', Д', достаточно близка по своей графической форме к графику, построенному по точкам А-В-С-Д.

Таким образом, использование зависимости (10) в виде (15) позволяет оценивать состояние строительных объектов по критерию снижения их несущей способности функционально связанного с вероятностью риска обрушения зданий и сооружений.

Очевидно, что использование показателя рисков опасных и аварийных ситуаций вполне оправдан для очень ответственных объектов горнопромышленного комплекса, аварии на которых потенциально опасны по своим последствиям для людей и окружающей среды.

Целесообразность использования показателя (10), (11), (15) диктуется и тем, что с его помощью может быть в дальнейшем обоснованно задана количественная взаимосвязь между снижением «несущей способности» элементов зданий и сооружений с «состояниями» строительных объектов, регламентируемыми в [3] лишь на качественном уровне, что на практике снижает объективность оценки фактического состояния эксплуатируемых зданий и сооружений при ситуациях (1), (4). Поэтому дальнейшие исследования по применению теории рисков могут дать существенный эффект в повышении надёжности эксплуатируемых зданий и сооружений.

### Список использованной литературы

1. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений / В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1971. – 255 с.
2. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К. – 2009. – 45 с.
3. НПАОП 45.2-1.01-98. Правила обстежень, оцінки технічного стану та паспортизації виробничих будівель і споруд. – К. – 1998. – 26 с.

*Надійшла до редакції 2.03.2014*

Б.М. Андреев, Д.В. Бровко, В.В. Хворост

#### ДО ПИТАННЯ ОЦІНКИ РИЗИКУ НАДІЙНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ОБ'ЄКТІВ ГІРНИЧОПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА ЯКІ ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ

Виконано аналіз оцінки ризику стану будівельних об'єктів поверхні гірничопромислового комплексу за критерієм зниження їх несучої здатності функціонально пов'язаного з імовірністю ризику обвалення будівель і споруд. За допомогою запропонованої методики може бути досліджена кількісний взаємозв'язок між зниженням «несучої здатності» елементів будівель і споруд з «станами» будівельних об'єктів.

Ключові слова: ризик, надійність, конструкції, обвалення.

B.N. Andreev, D.V. Brovko, V.V. Khvorost

#### TO QUESTION RISK ASSESSMENT OF RELIABILITY OF STRUCTURES OPERATED FACILITIES MINING COMPANIES

The analysis of the risk assessment of the state of buildings surface mining industry by reducing their carrying capacity is functionally associated with the probability of the risk of collapse of buildings and structures. With the proposed method can be studied quantitatively inter-relationship between the decline "carrying capacity" of the elements of buildings and structures with the "state" of construction projects.

Keywords: risk, safety, construction, caving.