

blasting performance significantly: combined effect of static and dynamic stress fields both natural (caused by the geological structure of the undermined area or the rock pressure behavior) and man-made (created by means of various technical solutions). This can make breaking more efficient through improvement of the quality of ore crushing, reducing the consumption of explosives, increasing productivity of workers, etc.

Originality. We have found out that when breaking underground uranium ore in the narrow space the wells, commonly, are located in the points affected by the high compressive stress. This increases the resistance of the layer affected by blasting, and it causes incomplete breaking of ore or well shooting. In this case the actual specific consumption of explosives during breaking exceeds the optimum.

When breaking process is carried out in wide area and wells are located in the unstressed place the resistance of ore to explosion is reduced. This reduces the amount of energy spent on breaking.

Practical value. During determining the parameters of the drilling and blasting operations for underground mining of uranium ore deposits we recommend to use improved method of Professor Yu.P. Kaplenko, which takes into account the stress-strain state of the massif, and improves the quality of ore reduction during the breaking.

Keywords: *stress-strain state of massif, breaking, well, uranium deposit*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Б.М. Андрєєвим. Дата надходження рукопису 20.11.12.

УДК 622.28: 624.07: 624.012.45: 624.9: 69.07

**Г.Г. Литвинский, д-р техн. наук, проф.,
Э.В. Фесенко, канд. техн. наук, доц.**

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Украина, e-mail: fesenkoed@gmail.com

ТЕОРИЯ РАСЧЕТА ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПИ

**G.G. Litvinsky, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
E.V. Fesenko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor**

Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine,
e-mail: fesenkoed@gmail.com

THEORY OF CALCULATION OF CONCRETE-FILLED-STEEL-TUBE (CFST) OF MINING SUPPORT

Цель. Разработать теорию расчёта несущей способности трубобетонных элементов (ТБЭ) по первому предельному состоянию при их произвольном нагружении нормальной силой и изгибающим моментом, установить закономерности совместной работы стальной трубы и твердеющего состава.

Методика. Для адекватного представления совместной работы металла и бетонного заполнителя в трубобетоне использовано условие их совместного деформирования на участках контакта с помощью аналитической и численной математических моделей. Основным отличием методики является учёт различных типов напряженно-деформированного состояния (НДС) стали и бетона в трубобетоне при наступлении предельных состояний на крайних волокнах стальной обоймы.

Результаты. В результате установлены три различных типа НДС в трубобетоне, выявлены особенности наступления предельного состояния для каждого типа. Предложена расчётная схема распределения внутренних усилий в трубобетонном элементе при его произвольном внешнем нагружении и, на основе физически обоснованной модели взаимодействия бетона и стальной трубы, исследована несущая способность трубобетона. Установлены закономерности перехода одного типа предельного состояния в другое по мере изменения внешнего нагружения ТБЭ, заданного в виде отношения нормальной силы к изгибающему моменту. Разработан метод расчета несущей способности трубобетона. Получены аналитические зависимости для расчета предельных соотношений внешних нагрузок для трех типов НДС.

Научная новизна. Впервые разработана аналитическая теория прочности сжато-изогнутых трубобетонных элементов при любом соотношении внешних нагрузок в первом предельном состоянии. Теория охватывает произвольные сочетания механических свойств и геометрических параметров твердеющего заполнителя и стальной обоймы. Установлено наличие трех различных типов НДС в ТБЭ. Впервые предложена обобщенная диаграмма предельных усилий в ТБЭ в виде зависимости предельно допустимых моментов от продольной сжимающей силы.

Практическая значимость. Разработанная аналитическая теория позволяет достоверно рассчитывать прочность различных ТБЭ по первому предельному состоянию, что необходимо для их применения в строительных конструкциях промышленного и гражданского назначения, поверхностного комплекса горных предприятий и подземной крепи горных выработок.

Ключевые слова: *трубобетон, нагружение, прочность, модель, предельное состояние*

Постановка проблемы и анализ публикаций. Эффективность промышленного и гражданского строи-

тельства во многом зависит от снижения материалоемкости и стоимости применяемых строительных материалов, конструктивных элементов.

© Литвинский Г.Г., Фесенко Э.В., 2013

В последнее время всё более перспективными становятся композитные конструкции, рационально сочетающие разные по свойствам строительные материалы, в частности – трубобетонные элементы (ТБЭ), где в качестве несущих конструкций служат стальные трубы, заполненные бетоном [1–3 и др.].

Трубобетон обладает высокой несущей способностью при небольших поперечных сечениях элементов, являясь примером оптимального сочетания прочностных характеристик металла и бетона. При этом стальные трубы выполняют функции несъёмной опалубки при бетонировании, обеспечивая как продольное, так и поперечное армирование бетона.

Особенно эффективны трубобетонные конструкции при работе на сжатие с относительно малыми эксцентриситетами. Как показали многочисленные исследования [1–3 и др.], несущая способность ТБЭ, как правило, выше суммарной несущей способности металла и бетона, из которого он изготовлен. При продольном сжатии ТБЭ реактивное боковое давление, действующее со стороны стальной оболочки на бетонное ядро, создает для бетона благоприятные условия работы – объёмное сжатие, в результате чего резко снижается возможность возникновения продольных трещин в бетоне. При этом прочность бетона при сжатии существенно возрастает (примерно в 1,8–2,7 раза) [3]. Стальная обойма, в свою очередь, благодаря благоприятному влиянию внутреннего давления твердой среды, не теряет местную устойчивость. Кроме того, ТБЭ обладают значительно более высокой огнестойкостью, чем металлические элементы. Особенно важным для горностроительных конструкций и шахтной крепи является сопротивление коррозии металла в агрессивной среде, которое у ТБЭ больше в 2 раза из-за невозможности коррозии во внутренней полости.

Сравнение технико-экономических показателей металлических, железобетонных и трубобетонных колонн показывает, что экономия стали при трубобетонном исполнении конструкций, по сравнению с металлическим, составляет до 56%, их стоимость уменьшается до 74%, а приведенные затраты снижаются на 62%. Масса трубобетонных колонн по сравнению с железобетонными уменьшается до 83%.

Нерешенная часть проблемы. Широкое применение трубобетонных конструкций сдерживается отсутствием достоверной методики расчёта их прочности и несущей способности. Большинство исследований по разработке методов расчета ТБЭ выполнено для центрального (реже внецентренного) сжатия [1–10]. Однако, из-за эмпирического подхода, положенного в основу многих исследований, результаты имеют ограниченную область применения, не отражают физику процессов перераспределения напряжений и деформаций при работе трубобетона и, поэтому, не могут быть распространены на все многообразие свойств используемых строительных материалов, особенно на новые марки сталей, высокопрочные и легкие бетоны, полимерные и другие трубы и т.д. Получение новых эмпирических коэффициентов для таких материалов потребует обшир-

ных и трудоёмких экспериментов, поскольку существующие зависимости не способны учесть эти особенности при расчетах ТБЭ.

Кроме того, до настоящего времени не существует методики расчета ТБЭ, находящихся под действием произвольного сочетания изгибающих моментов и продольных сжимающих сил, т.е. в сложном напряженном состоянии. Поэтому достоверно рассчитать прочность и несущую способность сжато-изогнутых ТБЭ не представляется возможным. А именно такой вид нагрузки часто возникает в различных строительных конструкциях, особенно в конструкциях подземных горных крепей.

Открытым остается вопрос трактовки стадии разрушения ТБЭ. Одни исследователи, основываясь на данных экспериментов, считают предельным состояние полного разрушения ТБЭ в момент достижения максимальной нагрузки [4, 5]. Другие авторы [1, 2, 6, 7] предлагают рассматривать в качестве предельного состояния начало текучести трубы в продольном направлении. Оба подхода являются правильными, однако, поскольку здесь учитываются разные предельные состояния ТБЭ, они должны использоваться в зависимости от условий эксплуатации рассматриваемых ТБЭ. В ответственных сооружениях, когда предельные деформации несущих элементов ограничены технологическими требованиями, расчет должен вестись по первому предельному состоянию, т.е. нагрузке, вызывающей в обойме напряжения, равные пределу текучести стали. В последнее время много внимания расчету ТБЭ уделяется и зарубежными исследователями [8, 9], где особый акцент делается на ответственные сооружения высотного типа и в районах вероятных землетрясений.

В связи с вышеизложенным, особую актуальность приобретает проблема разработки достоверного и научно обоснованного метода расчёта ТБЭ при нагружении произвольным сочетанием продольных сжимающих сил и изгибающих моментов. Особенно это важно при их применении в шахтном и подземном строительстве, в частности, в конструкциях горных крепей и тоннельных обделок [10].

Цель исследований состоит в разработке теории расчёта несущей способности трубобетонных элементов по первому предельному состоянию при их произвольном нагружении нормальной силой и моментом, установлении закономерностей совместной работы стальной трубы и твердеющего состава. **Объектом исследований** является ТБЭ и его компоненты, а **предмет исследований** – несущая способность ТБЭ. **Задачи исследований** состоят в разработке теоретической модели и методики определения несущей способности ТБЭ. **Основная идея** исследований заключается в использовании физически обоснованной модели взаимодействия бетона и стали в ТБЭ для построения теории расчета.

Основная часть. Рассмотрим ТБЭ квадратного поперечного сечения как наиболее эффективный для использования в крепях горных выработок [10]. Он находится под действием центральной сжимающей силы N и изгибающего момента M (см. расчетную схему рис. 1).

Основная физическая гипотеза, положенная в основу теоретической модели взаимодействия бетона и стали в ТБЭ, состоит в том, что под действием внешней нагрузки оба материала деформируются совместно, т.е. как единая композитная конструкция, следовательно

$$\varepsilon_c = \varepsilon_\delta = const, \quad (1)$$

где ε_c , ε_δ – относительные деформации на контакте стальной обоймы и бетонного ядра соответственно.

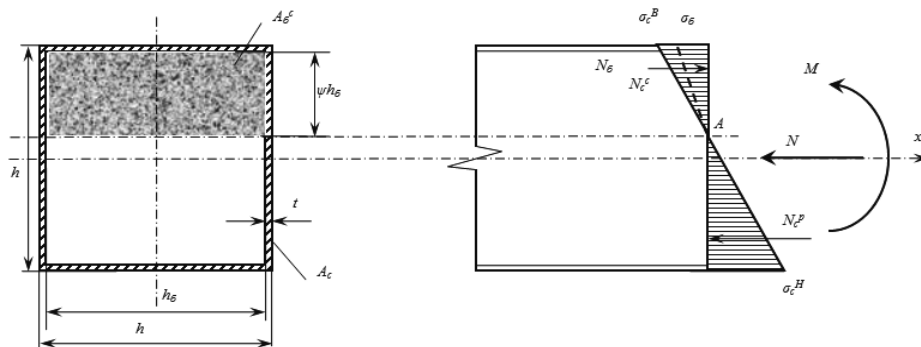


Рис. 1. Расчетная схема

Под действием изгибающего момента M (при $N = 0$) происходит смещение нейтральной оси ТБЭ, которая перестает совпадать с его геометрической осью, поскольку напряжения в растянутой зоне бетона равны нулю из-за возникновения в нём поперечных трещин.

Обозначим через ψ отношение сжатой зоны бетона A_δ^c к его общей площади A_δ

$$\psi = \frac{A_\delta^c}{A_\delta} \text{ или } \psi = \frac{h_c}{h_\delta},$$

где h_c и h_δ – высота, соответственно, сжатой зоны бетона и его полная высота.

Параметр ψ (относительная сжатая зона бетона) будет иметь минимальное значение ψ_{min} при чистом изгибе ТБЭ (когда $N = 0$). Рост продольной сжимающей силы N увеличивает ψ и при определенном соотношении $k = N/M$ параметр ψ достигнет 1. Из расчётной схемы ясно, что, несмотря на возможный дальнейший рост соотношения k , относительная сжатая зона бетона ψ не может превысить 1. Таким образом, всегда соблюдается условие $\psi_{min} \leq \psi \leq 1$. В зависимости от соотношения k будут разрушаться либо нижние волокна трубы $\sigma_c^H = R_c$, либо верхние – $\sigma_c^B = R_c$.

Следует учесть, что здесь имеются в виду предельно допустимые значения приложенных нагрузок N и M для данного ТБЭ, которые приводят к возникновению напряжений в стальной обойме, равных пределу текучести стали R_c , т.е. возникновению предельного состояния.

Поэтому для корректного описания процессов совместной работы и деформирования металла и бетона в ТБЭ необходимо различать несколько типов напряжённо-деформированного состояния (НДС), которые должны быть учтены при расчете прочности и несущей способности ТБЭ (рис. 2).

Учтём, что бетон почти не воспринимает растягивающих напряжений и работает только на сжатие, т.е. площадь его сжатой зоны равна A_δ^c , тогда как площадь его растянутой зоны следует принять $A_\delta^p = 0$. В сжатой зоне максимальные напряжения, вызванные внешней нагрузкой, составят σ_δ , а в металлической обойме действуют сжимающие и растягивающие напряжения σ_c . Равнодействующие этих напряжений обозначены на расчетной схеме N_δ , N_c^c , N_c^p .

Если последовательно увеличивать продольную силу N от 0 до максимума, то первый тип НДС (рис. 2, а) характеризуется соотношением $k = N/M$, при котором относительная сжатая зона бетона $\psi \leq 0,5$. Внешние нагрузки вызывают разрушение нижних волокон стальной обоймы и соблюдаются соотношения $\sigma_c^H = R_c = Const$ и $\sigma_c^B < R_c$.

По мере роста продольной силы N (т.е. при росте соотношения k) относительная сжатая зона бетона увеличивается и достигает $\psi = 0,5$. В этом случае напряжения в верхних и нижних волокнах обоймы одинаковы $\sigma_c^H = \sigma_c^B$ и дальнейший рост N вызывает перескок разрушения с нижних на верхние волокна обоймы, когда начинают соблюдаться соотношения $\sigma_c^H < R_c$ и $\sigma_c^B = R_c = Const$, что соответствует второму типу НДС (рис. 2, б). После этого $0,5 \leq \psi \leq 1$ и растягивающие напряжения в нижних волокнах σ_c^H уменьшаются до нуля (когда $\psi = 1$).

Последний третий тип НДС (рис. 2, в) наблюдается, когда сжатая зона бетона становится равной его общей площади ($\psi = 1$), растягивающие напряжения везде в сечении отсутствуют, разрушение стальной обоймы происходит в верхних волокнах от сжатия $\sigma_c^B = R_c$. Предельный случай этого типа НДС – центральное сжатие ТБЭ, т.е. отсутствие изгибающего момента ($M = 0$).

Для определения предельных внешних нагрузок N и M запишем уравнения равновесия, используя расчетную схему (рис. 1).

$$\text{Для уравнения равновесия моментов } \sum M(A) = 0$$

$$M = M(N_\delta) + M(N_c^c) + M(N_c^p) + M(N), \quad (2)$$

где $M(N_\delta)$, $M(N_c^c)$, $M(N_c^p)$, $M(N)$ – моменты относительно точки A , вызванные равнодействующими сжимающих напряжений в бетоне N_δ , стали N_c^c , растягивающих напряжений в металле N_c^p , внешней сжимающей силы N соответственно.

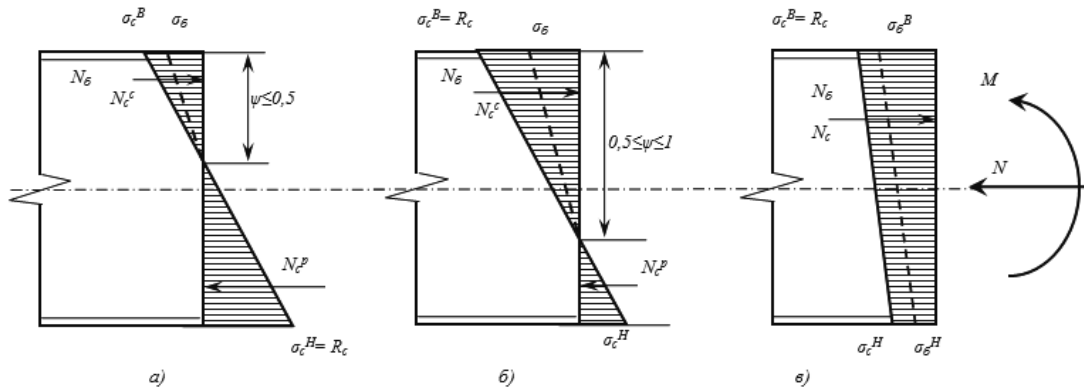


Рис. 2. Три типа напряжённо-деформированного состояния ТБЭ: а) $\psi \leq 0,5$; б) $\psi = 0,5$; в) $\psi = 1$

Для уравнения равновесия сил $\sum N(x) = 0$

$$M(N) = N \cdot h_0 \cdot (0,5 - \psi). \quad (12)$$

$$N = N_0 + N_c^c - N_c^p. \quad (3)$$

Определим члены уравнений (2, 3). Исходя из (1),

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_c}{E_c} \cdot E_0. \quad (4)$$

Введем обозначение

$$g_0 = \frac{A_0 \cdot E_0}{A_c \cdot E_c},$$

где g_0 – относительная жесткость бетона; A_0, A_c – площадь бетона и стальной обоймы соответственно; E_0, E_c – модуль упругости бетона и стали соответственно.

Выразим ψ через напряжения в верхних и нижних волокнах стальной обоймы (рис. 2)

$$\psi = \frac{\sigma_c^B}{\sigma_c^H + \sigma_c^B}. \quad (5)$$

Тогда для слагаемых сил и моментов в (2) и (3)

$$N_0 = 0,5 \cdot \psi^2 \sigma_c^B \cdot g_0 \cdot A_c; \quad (6)$$

$$N_c^c = \frac{A_c}{4} \cdot \sigma_c^B \cdot (1 + \psi); \quad (7)$$

$$N_c^p = \frac{A_c}{2} \cdot \sigma_c^H \cdot (1 - \frac{\psi}{2}); \quad (8)$$

$$M(N_0) = 0,5 \cdot \psi^2 \sigma_c^B \cdot g_0 \cdot A_c \cdot \frac{2}{3} h_0; \quad (9)$$

$$M(N_c^c) = \frac{A_c}{4} \cdot \sigma_c^B \cdot h_0 \cdot \psi \cdot (1 + \frac{2}{3} \psi); \quad (10)$$

$$M(N_c^p) = \frac{A_c}{4} \cdot \sigma_c^H \cdot h_0 \cdot (1 - \psi) \cdot (\frac{5}{3} - \frac{2}{3} \psi); \quad (11)$$

Определим предельные момент M и сжимающую силу N для каждого типа НДС ТБЭ.

1 тип НДС: при $\psi \leq 0,5$ разрушаются нижние волокна стальной обоймы, поэтому в выражения (2 – 12) подставим $\sigma_c^H = R_c$. После преобразований получим

$$[N] = \frac{2P_c \cdot \psi}{1 - \psi} \cdot \left(2 + \psi \cdot g_0 - \frac{1}{\psi} \right), \quad (13)$$

где $P_c = \frac{A_c \cdot R_c}{4}$ – прочность одной грани стальной обоймы.

$$[M] = \frac{4P_c \cdot h_0 \cdot \psi}{3(1 - \psi)} \left(\psi^2 \cdot g_0 + 3\psi + \frac{5}{4\psi} - 3 \right) + [N] \cdot h_0 \cdot (0,5 - \psi) \quad (14)$$

2 тип НДС: при $0,5 \leq \psi \leq 1$ разрушаются верхние волокна стальной обоймы, поэтому в выражения (2 – 12) подставим $\sigma_c^B = R_c$. После преобразований получим

$$[N] = 2P_c \cdot \left(2 + \psi \cdot g_0 - \frac{1}{\psi} \right); \quad (15)$$

$$[M] = \frac{4P_c \cdot h_0}{3} \left(\psi^2 \cdot g_0 + 3\psi + \frac{5}{4\psi} - 3 \right) + [N] \cdot h_0 \cdot (0,5 - \psi) \quad (16)$$

3 тип НДС: когда $\psi = 1$ нет растягивающих напряжений в металле, эпюра напряжений трапециевидная (рис. 2, в). Предельные нагрузки M и N вызывают разрушение верхних волокон обоймы $\sigma_c^B = R_c$. Выражения (2, 3) принимают вид

$$M = M(N_0) + M(N_c); \quad (17)$$

$$N = N_0 + N_c. \quad (18)$$

После преобразований получим выражения для определения предельных момента и продольной силы

$$[N] = \frac{A_c}{2} \cdot (R_c + \sigma_c^H) \cdot (1 + g_\delta); \quad (19)$$

$$[M] = \frac{A_c \cdot h_\delta}{12} \cdot (R_c - \sigma_c^H) \cdot (2 + g_\delta). \quad (20)$$

Полученные выражения (13–16, 19, 20) позволяют рассчитать значения предельных нагрузок на ТБЭ для всех возможных случаев его нагружения – от чистого изгиба ($N = 0$, $k = N/M = 0$) до центрального сжатия ($M = 0$, $k = N/M = \infty$) и любого промежуточного соотношения k . Однако для каждого из трёх рассмотренных выше типов НДС ТБЭ необходимо использовать соответствующие выражения: для 1 типа – (13, 14); 2 типа – (15, 16); 3 типа – (19, 20).

Определим граничные значения k при переходе одного типа НДС в другой. Поскольку первый тип НДС завершается при $\psi = 0,5$, подставим это значение в выражения (13, 14) и рассчитаем предельное соотношение $k_1 = N/M$ на границе между типами НДС 1 и 2. После преобразований получим

$$k_1 = \frac{3g_\delta}{h_\delta \cdot (g_\delta + 4)}. \quad (21)$$

Для определения соотношения k_2 , на границе перехода между типами НДС 2 и 3, необходимо либо подставить $\psi = 1$ в выражения (15, 16), либо принять $\sigma_c^H = 0$ в выражениях (19, 20). Выполнив преобразования, получим

$$k_2 = \frac{6 \cdot (g_\delta + 1)}{h_\delta \cdot (g_\delta + 2)}. \quad (22)$$

Чтобы определить предельно допустимые нагрузки следует, задаваясь величиной действующей на ТБЭ продольной сжимающей силы $[N]$, рассчитать относительную сжатую зону бетона ψ , из выражений (13 или 15) для 1 и 2 типов НДС либо напряжений в нижних волокнах обоймы σ_c^H из формулы (19) для 3 типа. После этого определить допустимый изгибающий момент $[M]$ из выражений (14, 16, 20) для соответствующего типа НДС.

Расчеты по предложенной методике дают возможность получить обобщенную диаграмму предельных усилий $[N]$ и $[M]$ для ТБЭ, т.е. зависимость допустимого изгибающего момента в ТБЭ от действующей в нем продольной сжимающей силы. На рис. 3 приведена такая диаграмма для ТБЭ со следующими параметрами: обойма – стальная труба квадратного поперечного сечения с размерами 160x160x4 мм, предел текучести стали $R_c = 240$ МПа, модуль упругости $E_c = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; бетон – мелкозернистый класса В7,5 с модулем упругости $E_\delta = 1,3 \cdot 10^4$ МПа.

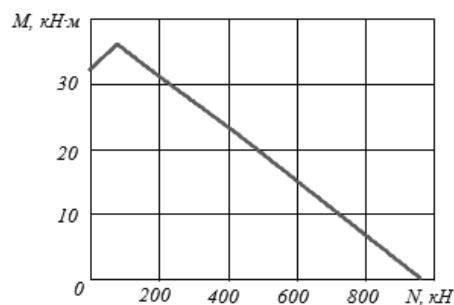


Рис. 3. Обобщенная диаграмма предельных усилий ТБЭ

Возрастающий участок диаграммы соответствует 1 типу НДС ТБЭ, когда разрушение стальной обоймы происходит в ее нижних волокнах от растягивающих напряжений, вызванных изгибающим моментом $[M]$. Поэтому действующая в сечении ТБЭ сжимающая сила $[N]$ приводит к уменьшению напряжений в растянутых нижних волокнах, чем и объясняется возрастание допустимого момента $[M]$ с увеличением $[N]$ на этом участке диаграммы. При $k = k_1$ наблюдается максимально возможный изгибающий момент для данного ТБЭ. При 2 и 3 типах НДС происходит разрушение стальной обоймы в верхних волокнах от сжимающих напряжений, поэтому на ниспадающем участке диаграммы рост продольной силы $[N]$ увеличивает напряжения, что приводит к уменьшению допустимого момента $[M]$.

Выводы.

1. Предложены физически обоснованная модель и расчётная схема взаимодействия бетона и стали в ТБЭ, основанная на учёте совместного деформирования металла и бетона по поверхности контакта в единой грузонесущей композитной конструкции – труботетоне.

2. Разработана теория расчёта прочности ТБЭ по первому предельному состоянию, учитывающая три возможных типа НДС в зависимости от произвольного соотношения внешних нагрузок, – момента и продольной силы, любого сочетания механических свойств и геометрических показателей бетона и стали. Применение теории продемонстрировано на примере трубы квадратного поперечного сечения.

3. Предложена обобщенная диаграмма предельных усилий для ТБЭ, где отражены все три типа НДС работы ТБЭ.

4. К задачам дальнейших исследований можно отнести получение диаграмм предельных усилий для ТБЭ круглой, прямоугольной и других форм поперечного сечения, изучение поведения ТБЭ при других предельных состояниях.

Список литературы / References

1. Стороженко Л.И. Расчёт труботетонных конструкций / Стороженко Л.И., Плахотный П.И., Черный А.Я. – К.: Будивельник, 1991. – 120 с.

Storozhenko, L.I., Plakhotny, P.I. and Cherny A.Ya. (1991), *Raschot trubobetonnnykh konstruksyy* [Calculation of Guncrete Structures], Budivelynyk, Kiev, Ukraine.

2. Кришан А.Л. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов / А.Л. Кришан, А.И. Заикин, М.С. Купфер // *Бетон и железобетон*. – 2008. – № 2. – С. 22–25.
- Krishan, A.L., Zaikin, A.I. and Kupfer, M.S. (2008), “Determination of the Breaking Load of Compressed Guncrete Elements”, *Beton i zhelezobeton*, no.2, pp. 22–25.
3. Кришан А.Л. Оценка напряженно-деформированного состояния сжатых трубобетонных элементов / А.Л. Кришан, А.И. Сагадатов // *Предотвращение аварий зданий и сооружений: Межвуз. сб. науч. тр.* – М., 2009. – Вып. 8. – С. 509–515.
- Krishan, A.L. and Sagadotov, A.I. (2009), “Evaluation of the stress-Strain State of Compressed Guncrete Elements”, *Predotvrashcheniye avariyy zdaniy i sooruzheniy*, Issue 8, pp. 509–515.
4. Дегтярев В.В. Колонны с высокой несущей способностью из трубобетона с нагружением на бетонное ядро / В.В. Дегтярев, Н.В. Смирнов, В.М. Васькин // *Транспортное строительство*. – 1995. – №4–5. – С. 40–45.
- Degtyarev, V.V., Smirnov, N.V. and Vaskin, V.M. (1995), “Heavy load-carrying capability guncrete column with loading on the concrete core”, *Transportnoye stroitelstvo*, no.4, pp. 40–45.
5. Митрофанов В.П. Вдосконалений розрахунок міцності трубобетонних елементів варіаційним методом / В.П. Митрофанов, Д.К. Онипенко // *Будівництво України*. – 1999. – №1. – С.44–46.
- Mytrofanov, V.P. and Onipenko, D.K. (1999), “Improved strength calculation of guncrete elements by the variation method”, *Budivnytstvo Ukrainy*, no.1, pp. 44–46.
6. Сінельник О.П. Інженерний метод розрахунку трубобетонних конструкцій при центральному завантаженні / О.П. Сінельник // *Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури*. – Макіївка, 2011. – Вып. 4. – С. 47–52.
- Sinelnik, O.P. (2011), “Axially-loaded guncrete structures engineering calculation method”, *Bulletin of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, Makeevka, Issue 4, pp. 47–52.
7. Резван И.В. Расчёт прочности центрально-сжатых трубобетонных элементов / И.В. Резван // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 1.
- Rezvan, I.V. (2012), “Strength calculation of the axially-loaded guncrete structures”, *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, no.1.
8. Hu, Y.M., Yu, T. and Teng, J.G. (2011), “FRP-Confined Circular Concrete-Filled Thin Steel Tubes under Axial Compression”, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15, No.5, pp. 850–860.
9. Isao Nishiyama and Shosuke Morino (2004), “US-Japan cooperative earthquake research program on CFT structures: achievements on the Japanese side”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 6, Issue 1, pp. 39–55.
10. Литвинский Г.Г. Исследование эффективности прокатных профилей для рамной крепи горных выработок / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // *Уголь Украины*. – 2012. – №11. – С. 11–14.
- Litvinskiy, G.G. and Fesenko, E.V. (2012), “Study of effectiveness rolled profiles for frame mine support”, *Ugol Ukrainy*, no.11, pp. 11–14.
- Мета.** Розробити теорію розрахунку несучої здатності трубобетонних елементів (ТБЕ) за першим граничним станом при їх довільному навантаженні нормальною силою та згинальним моментом, встановити закономірності сумісної роботи сталеві труби та складу, що твердіє.
- Методика.** Для адекватного представлення сумісної роботи металу та бетонного заповнювача у трубобетонному елементі використано умову їх сумісного деформування на ділянках контакту за допомогою аналітичної та чисельної моделей. Основною різницею методики є врахування різних типів напружено-деформованого стану (НДС) сталі та бетону у трубобетоні при настанні граничних станів на крайніх волокнах сталеві обойми.
- Результати.** У результаті встановлено три різних типи НДС у трубобетоні, виявлено особливості настання граничного стану для кожного типу. Запропонована розрахункова схема розподілу внутрішніх зусиль у трубобетонному елементі при його довільному зовнішньому навантаженні та, на основі фізично обґрунтованої моделі взаємодії бетону й сталеві труби, досліджена несуча здатність трубобетону. Встановлено закономірності переходу одного типу граничного стану в інше у міру зміни зовнішнього навантаження трубобетонних елементів (ТБЕ), заданого у вигляді відношення нормальної сили до згинального моменту. Розроблено метод розрахунку несучої здатності трубобетону. Отримано аналітичні залежності для розрахунку граничних співвідношень зовнішніх навантажень для трьох типів НДС.
- Наукова новизна.** Уперше розроблена аналітична теорія міцності стисло-зигнутих трубобетонних елементів при будь-якому співвідношенні зовнішніх навантажень у першому граничному стані. Теорія охоплює довільні поєднання механічних властивостей і геометричних параметрів тверднучого заповнювача та сталеві обойми. Встановлена наявність трьох різних типів НДС у ТБЕ. Уперше запропонована узагальнена діаграма граничних зусиль у ТБЕ у вигляді залежності гранично допустимих моментів від подовжньої стискувальної сили.
- Практична значимість.** Розроблена аналітична теорія дозволяє достовірно розраховувати міцність різних ТБЕ за першим граничним станом, що необхідне для їх використання в будівельних конструкціях промислового й цивільного призначення, поверхневого комплексу гірничих підприємств і підземного кріплення гірничих виробок.
- Ключові слова:** трубобетон, навантаження, міцність, модель, граничний стан
- Purpose.** To develop a theory of calculation of bearing capacity of concrete-filled-steel-tube (CFST) of the first limit state being loaded by normal force and bending moment. To establish the laws of the joint work of steel pipe and hardening concrete mix.

Methodology. For adequate representation of the joint work of metal and concrete mix in CFST we took into account their joint deformation in the contact zone in the analytical and numerical mathematical models. The main characteristic feature of the method is consideration of different types of stress-strain state of the steel and concrete in CFST depending on the limit states of the fibers of the steel container.

Findings. We have considered three different types of stress-strain state of CFST elements, and determined conditions of the limit state approach for each type. We have created formulas for calculation of the distribution of internal forces in concrete element being loaded by external force. The carrying capacity of concrete has been determined based on the physical model of the interaction of concrete and steel pipe. The laws of the transition of one type of limit state to another with changing external loading of CFST have been defined as the ratio of the normal force and the bending moment. We have developed the method for calculation of the concrete bearing capacity. Analytical dependences for

calculation of the limit relations of external loads for the three types of stress-strain state have been found out.

Originality. For the first time we have proposed an analytical theory of strength of beam concrete column for any ratio of external loads in the first limit state. The theory is applicable for any combination of mechanical and geometrical parameters of concrete and steel. We have determined the presence of three types of stress-strain state in CFST. For the first time we have proposed a generalized diagram of limit forces in CFST as a function of maximum allowable moment of the longitudinal compressive force.

Practical value. The theory allows us to calculate the strength of the first limit state of CFST elements. It is necessary for their use in construction of industrial and civil engineering structures, surface complex of mines and underground mine support.

Keywords: *guncrete, loading, strength, model, limiting state*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
Р.А. Фрумкіним. Дата надходження рукопису 11.12.12.*

УДК 004.942:553.044

В.П. Рачковский, канд. техн. наук, доц.

Частное высшее учебное заведение „Европейский университет“, г. Ровно, Украина, e-mail: it-eufimb@rambler.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТОЙЧИВОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

V.P. Rachkovsky, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor

Private Higher Educational Institution “European University”, Rivne, Ukraine, e-mail: it-eufimb@rambler.ru

MATHEMATICAL MODEL OF MINE VERTICAL OPENING STABILITY

Цель. Рассчитать устойчивость массива вокруг горной выработки при разработке алмазоносных месторождений.

Методика. Методом математического моделирования исследована устойчивость состояния равновесия нижней части очистной камеры вертикальной выработки в кимберлитовой породе с учетом состояния равновесия бесконечного пространства для этой полости под действием нагрузки на глубине более 1000 метров.

Результаты. Разработана модель устойчивости вертикальной очистной выработки цилиндрической формы. Выявлен локальный характер критического давления при деформации массива, окружающего горную выработку. Предложена система разработки алмазных месторождений с магазинированием руды в выработанном пространстве.

Научная новизна. Создана комбинация осесимметричных расчетных блоков моделей напряженного состояния цилиндрической выемной камеры с осевым сжатием и внешним давлением, которые сочетаются с плоскостной постановкой задачи и определяют устойчивость кимберлитового массива.

Практическая значимость. Заключается в разработке и использовании методики обоснования геотехнологических параметров разработки кимберлитовых месторождений Украины и методических рекомендаций для оценки технологических параметров выемочных камер в кимберлитовых трубках.

Ключевые слова: *массив кимберлитов, цилиндрическая оболочка, упругопластическая модель*

Постановка проблемы. Создание подземных сооружений различного назначения, в том числе глубоких подземных сооружений всевозможной конфигурации, а также выемочных камер большого диаметра непосредственно связано с необходимостью разработки обоснованных методов их расчета. Этого,

в первую очередь, требуют условия безопасности труда и сохранности, находящегося в подземных сооружениях алмазоносного сырья, оборудования и др. Исследование локальной неустойчивости в задачах геомеханики, в первую очередь, связано с определением основного (докритического) напряженно-деформированного состояния массива. В случае моделирования нестандартных поперечных сечений