

Н.Т. ВУ¹, Н.В. ФЕДОРОВА¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

ВАРИАНТ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ БЕТОНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Аннотация. Представлено обоснование режимов статико-динамического нагружения эксплуатируемых железобетонных каркасов многоэтажных зданий при запроектном воздействии в виде внезапного удаления отдельных несущих элементов. На основе теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева построены аналитические зависимости для определения параметров диаграммы статико-динамического деформирования бетона при различных режимах статического нагружения и последовательном динамическом догружении. Преимущество полученного уточненного варианта деформирования бетона состоит в том, что он содержит два важных параметра, учитывающих влияния скорости нагружения и уровня статического нагружения на сложное напряженно-деформированное состояние бетона. Численными исследованиями показано, что предельная статико-динамическая прочность бетона при динамическом догружении зависит от уровня начального напряженного состояния при статическом нагружении бетона, с которого производится динамическое догружение до предельного состояния. Проведенным с использованием рассматриваемой модели численным анализом подтверждены также результаты экспериментальных исследований о том, что микротрещинообразование в бетоне при статическом нагружении начинается не с некоторого уровня значения напряжений, а практически с момента начала нагружения бетона. Полученные результаты представляют интерес для решения прикладных задач, связанных с проблемой живучести, защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, в частности при определении критериев прочности бетона при особом напряженном состоянии.

Ключевые слова: железобетон, живучесть, внезапная структурная перестройка, прогрессирующее обрушение, теория пластичности бетона, статико-динамическое нагружение, динамическая прочность, диаграмма деформирования бетона.

N.T. VU¹, N.V. FEDOROVA¹¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

VARIANT OF THE PLASTICITY THEORY FOR CONCRETE IN RELATION TO THE STATIC-DYNAMIC DEFORMATION REGIME

Abstract. The substantiation of the modes of static-dynamic loading of the operated reinforced concrete frames of multi-storey buildings under the out-of-design impact in the form of sudden removal of individual load-bearing elements is presented. Based on the theory of plasticity of concrete and reinforced concrete by G.A. Geniev, analytical dependences are constructed to determine the parameters of the static-dynamic deformation diagram of concrete under various modes of static loading and sequential dynamic loading. The advantage of the obtained refined variant of concrete deformation is that it contains two important parameters that take into account the influence of the loading speed and the level of static loading on the complex stress-strain state of concrete. Numerical studies have shown that the limiting static-dynamic strength of concrete under dynamic loading depends on the level of the initial stress state under static loading of concrete, from which dynamic loading is carried out to the limit state. The numerical analysis carried out using the model under consideration also confirmed the results of experimental studies that microcracking in concrete under static loading does not begin with a certain stress level, but practically from the moment of the beginning of concrete loading. The results obtained are of interest for solving applied problems related to the problem of survivability, protection of buildings and structures from progressive collapse, in particular when determining the criteria for the strength of concrete under special stress.

Keywords: reinforced concrete, survivability, sudden column removal, progressive collapse, plasticity theory of concrete, static-dynamic loading, dynamic strength, concrete deformation diagram.

Введение

Анализ отечественных и зарубежных научных публикаций последних двух десятилетий показал, что проблема обеспечения надежности и безопасности конструкций зданий и сооружений в процессе возведения и эксплуатации в экстремальных запроектных условиях в последнее время приобретает все большую актуальность [1-4].

До настоящего времени на основе накопленных во всем мире опытных данных выявлен ряд специфических свойств бетона как одного из основных материалов для широкого класса строительных конструкций гражданского и промышленного назначения: физическая нелинейность [5, 6], трещинообразование [7], ползучесть [8], дилатация [9]. На основе выявленных свойств бетона в работах таких известных ученых как О. Мор, М.М. Филоненко-Бородич [10], П.П. Баландин [11], А.А. Гвоздев [12], Н.И. Карпенко [13], В.М. Бондаренко [13] и других разработаны различные деформационные модели, позволяющие в достаточной мере оценивать объемные напряженно-деформированные состояния конструкций в условиях сложного режима статического нагружения. Одной их наиболее удобных и часто используемых в практике расчета является деформационная теория пластичности бетона, сформулированная профессором Г.А. Гениевым еще в 1970-го гг. [5]. Соотношения этой теории устанавливают связь между инвариантами напряженного и деформированного состояния бетона при кратковременном простом (пропорциональном) нагружении.

$$T = G_0 \left(1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) \Gamma, \quad (1)$$

где константа $G_0 = E_b / [2(1+\nu)]$ представляет собой начальный модуль сдвига;

$T = (1/\sqrt{6}) \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ - интенсивность касательных напряжений для рассматриваемого вида напряженного состояния; $\Gamma = \sqrt{2/3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$

- интенсивность деформаций сдвига; $\Gamma_s = \frac{2T_s}{G_0} = \frac{2}{G_0} T_c \left[\frac{\lambda(1+\delta)}{2} + \sqrt{\frac{\lambda^2(1+\delta^2)}{4} + (1+\delta)} \right]$ -

предельное значение интенсивности деформации сдвига.

Аналитическое выражение (1) является результатом аппроксимации многочисленных экспериментальных зависимостей $\sigma_b - \varepsilon_b$ при сложном напряженном состоянии. При этом оно позволяет получить сравнительно простые зависимости между напряжениями и деформациями.

С каждым годом в связи с всевозрастающим количеством и различными видами воздействий техногенного, природного характера возникает необходимость изучения поведения бетона при других режимах нагружения. В работах [14, 15] проведены экспериментальные исследования динамического деформирования бетона. Влиянию скорости нагружения на характеристики прочности и деформативности бетона при различных видах напряженного состояния посвящено значительное количество исследований [16-18]. Этими исследованиями выявлено, что сопротивление бетона динамическому нагружению повышается с увеличением скорости деформирования (нагружения).

До настоящего времени, задачам, касающимся деформирования и разрушения тяжелого бетона при сопряженном режиме - статико-динамическом нагружении, не уделено нужного внимания в отечественных и зарубежных исследованиях. В то же время

актуальность таких исследований в последние годы возросла в связи с необходимостью решения проблемы, связанной с защитой зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. В качестве примера на рисунке 1 показано напряженное состояние конструкции при особом предельном состоянии, где статическое нагружение конструктивной системы вызвано эксплуатационной нагрузкой, а источником динамического догружения может стать внезапное удаление одного из несущих элементов, например, колонны первого этажа. При таком воздействии напряжения в неразрушенных бетонных элементах исходной n -раз статически неопределимой системы (σ_n^{st}) изменяются с σ_n^{st} на σ_{n-1}^d .

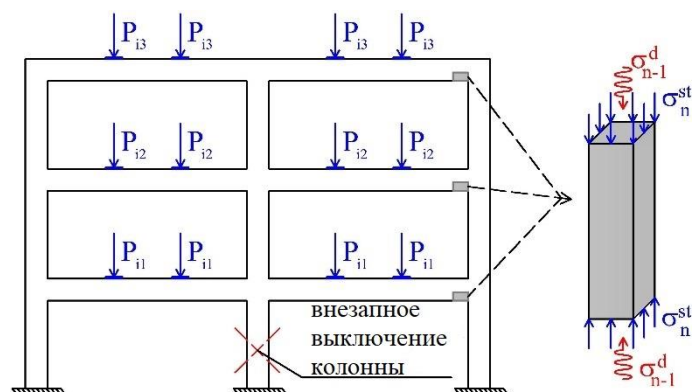


Рисунок 1 – Напряженное деформированное состояние характерного бетонного элемента железобетонной рамы при внезапном удалении колонны

Под таком режиме нагружения в работах [19-21] авторами были проведены экспериментальные исследования бетонных и железобетонных опытных образцов для определения параметров статико-динамического деформирования. Установлено, что при сопряженном статико-динамическом воздействии механическое поведение тяжелого бетона существенно отличается от поведения исключительно при статическом или динамическом нагружении. Это приводит к тому, что традиционная теория и параметры механики железобетона недостаточно корректны для расчета железобетонных конструкций при таком режиме нагружения. Критерии особого предельного состояния, используемые в научных публикациях и в нормативных документах не учитывающие эту специфику воздействий, недостаточно полно отражают параметры статико-динамического деформирования бетона и железобетона при таком режиме нагружения. В связи с этим приобретают актуальность новые теоретические исследования о характеристиках деформирования и разрушения бетона при таких условиях для оценки устойчивости и предотвращения прогрессирующего обрушения конструкции зданий и сооружений.

В развитие данного направления целью настоящего исследования явилось построение деформационной модели на основе деформационной теории пластичности бетона Г.А. Гениева, которое с одной стороны учитывало бы наиболее характерные особенности бетона как физически нелинейного материала при статико-динамическом режиме нагружения, а с другой стороны, была бы удобной для практического использования при решении задачи живучести зданий и сооружений при запроектных воздействиях.

Модели и методы

Динамическое нагружение. Полученные опытные данные в упомянутых работах [14, 15] свидетельствуют о росте динамического предела прочности бетона а также начального модуля упругости при увеличении средней скорости деформирования образцов $(d\Gamma / dt)_{cp}$. Скорость деформирования представляет собой технический параметр, который характеризует быстроту изменения относительной деформации бетона при динамическом

нагружении. В то же время в ряде научных публикаций [22-25] принят другой физический параметр, характеризующий процесс деформирования и разрушения материала при приложении ударной нагрузки – время динамического догружения t_d . Связь между t_d и $(d\Gamma / dt)_{cp}$ определяется формулой:

$$\left(\frac{d\Gamma}{dt} \right)_{cp} = \frac{\Gamma_s}{t_d}. \quad (2)$$

Поскольку в хрупких материалах основным механизмом деформирования и разрушения является накопление микрповреждений и формирование системы трещин, то характерное время протекания этих процессов вплоть до разрушения можно считать равным соответствующему значению времени динамического догружения. Поэтому время динамического догружения в качестве физического параметра ударного разрушения является предпочтительным для использования в качестве ключевого параметра модели динамического поведения.

Влияние времени динамического догружения (или средней скорости деформирования) на прочностно-деформативной характеристики бетона чаще всего учитывается введением в расчетные формулы коэффициентов динамического упрочнения φ_d - как отношение динамического и статического параметра при различной скорости деформации.

$$\varphi_E^d = E_0^d / E_0 ; \varphi_c^d = R_c^d / R_c, \quad (3)$$

где φ_E^d , φ_c^d - коэффициенты динамического упрочнения начального модуля упругости бетона и предела прочности при одноосном сжатии соответственно.

Для теоретического определения коэффициента динамического упрочнения предела прочности, наиболее простым и обоснованным экспериментально подходом является реологическая модель деформирования бетона Кельвина-Фойгта-Гениева, в которой предложено изменение предела прочности бетона в зависимости от времени динамического догружения. Модель представляет собой два соединенных параллельно элемента А и Б. Первый элемент А описывается деформационной теорией пластичности бетона, находящегося в условиях трехосного напряженного состояния. Второй элемент Б характеризуется параметром К - модулем вязкого сопротивления. Используя деформационный критерий предельного состояния, автором установлена связь между φ_c^d и временем динамического воздействия t_d (4):

$$t_d = \frac{2 \cdot \operatorname{arccctg} \sqrt{\varphi_c^d - 1}}{\omega \cdot \sqrt{\varphi_c^d - 1}}. \quad (4)$$

Из приведенной формулы видно, что чем меньше значения времени динамического догружения тем больше коэффициент динамического упрочнения предела прочности φ_c^d .

До настоящего времени не проводились теоретические исследования об увеличении начального модуля упругости бетона в зависимости от времени динамического догружения.

Вариант такого исследования проведем применительно к динамическому режиму деформирования используя общую теорию пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева с формированием двух дополнительных рабочих гипотез.

1. Диаграммы деформирования бетона при статическом и динамическом нагружении аффинноподобны, т.е. деформирование бетона при динамическом нагружении тоже можно описывать с помощью деформационной теории пластичности бетона Г.А. Гениева (5):

$$T = G_0^d \left(1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s^d} \right) \Gamma. \quad (5)$$

2. Скорость нагружения при динамическом воздействии постоянна (6):

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \left(\frac{d\Gamma}{dt} \right)_{cp} = const. \quad (6)$$

3. Коэффициенты динамического упрочнения при одноосном сжатии и растяжении бетонных образцов одинаковы (7).

$$\varphi_c^d = \varphi_p^d = \varphi_b^d. \quad (7)$$

Тогда предельное значение интенсивности касательных напряжений для любого вида напряженного состояния может быть представлено в компактной форме (8):

$$T_s^d = T_c^d \cdot k(\lambda, \delta) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{R_c^d R_p^d} \cdot k(\lambda, \delta) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\varphi_c^d R_c) \cdot (\varphi_p^d R_p)} \cdot k(\lambda, \delta) = \varphi_b^d T_s. \quad (8)$$

4. Динамический начальный модуль сдвига бетона определим исходя из модуля упругости с учетом коэффициента динамического упрочнения φ_E^d (9).

$$G_0^d = \frac{E_0^d}{2(1+\nu)} = \frac{\varphi_E^d E_0}{2(1+\nu)} = \varphi_E^d G_0. \quad (9)$$

Поставляя формулу (3) в (2) получим аналитическую зависимость теории пластичности бетона при динамическом нагружении:

$$T^d = \varphi_E^d G_0 \left(1 - \frac{\varphi_E^d G_0}{4\varphi_b^d T_s} \Gamma \right) \Gamma. \quad (10)$$

Статико-динамическое нагружение. В работах [19-21] представлены результаты экспериментальных исследований опытных образцов бетонных призм на одноосное сжатие при двухэтапном статико-динамическом режиме их нагружения по специально разработанной методике. На первом этапе образцы нагружают квазистатической нагрузкой до заданного уровня, на втором - высокоскоростной нагрузкой до разрушения. Анализ полученных опытных данных показал, что процесс образования и развития микротрещин, и соответственно повреждение в бетонных образцах наступало даже при небольшом уровне статического нагружения. При увеличении значения статического нагружения, плотность и длина микротрещин неуклонно увеличивались и раскрывались по всему телу опытного образца. Тем самым опытные образцы меняют свои прочностные и деформационные характеристики при каждом уровне статического нагружения. Таким образом, при построении статико-динамической диаграммы бетона особое значение приобретает учет истории предварительного нагружения. Пусть $T^{st} / T_s^{st} = \eta$, $\eta \in [0,1)$: уровень статического нагружения. При η близкое к единице происходит полное слияние микротрещин и наступает разрушение бетонного образца. После окончательного ударного нагружения опытных образцов наблюдалось снижение значения предельной прочности бетонных призм при увеличении уровня статического нагружения. Данный факт позволяет формулировать важную гипотезу о деформировании бетонных конструкций при статико-динамическом нагружении: статико-динамическая диаграмма деформирования бетона является результатом поступательного переноса динамической диаграммы до уровня статического нагружения.

Используя сформулированную гипотезу построим вариант теории пластичности бетона применительно к статико-динамическому режиму деформирования в виде диаграммы представленной на рисунке 2.

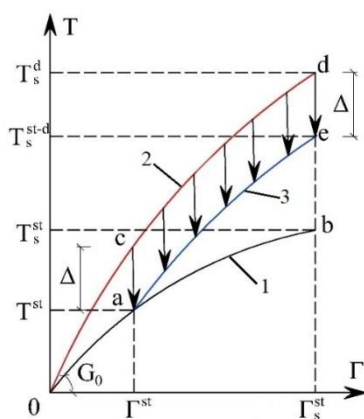


Рисунок 2 – Вариант теории пластичности бетона применительно к статико-динамическому режиму деформирования

На рисунке 2 изображено семейство нелинейных диаграмм, отражающих закономерности деформирования бетона при различных режимах нагружения. Кривая 1 представлена зависимостью (1) построенную для статического режима нагружения. Кривая 2 соответственно описана зависимостью (10) для динамического режима нагружения. Искомой в нашем решении является диаграмма деформирования бетона при статико-динамическом режиме нагружении (кривая 3).

Кривая 3 – это графическое представление рассматриваемого нами варианта теории пластичности бетона применительно к статико-динамическому режиму деформирования. Она имеет вид параболы, полученный параллельным переносом графика кривой (2) в отрицательном направлении вдоль оси T на расстояние Δ , равные статическому уровню интенсивности нагружения. Тогда значение интенсивности касательных напряжений для рассматриваемого вида напряженного состояния T^{st-d} может быть определено из выражения:

$$T^{st-d} = T^d - \Delta, \quad (11)$$

где Δ равна длине участка de или ca (см. рисунок 2):

$$\Delta = T^d(\Gamma^{st}) - T(\Gamma^{st}). \quad (12)$$

Интенсивность касательных напряжений на уровне статического нагружения определяется формулой:

$$T(\Gamma^{st}) = \eta \cdot T_s. \quad (13)$$

Подставляя выражение для $T(\Gamma^{st})$ из формулы (1) в (13) получим:

$$G_0 \left(1 - \frac{G_0}{4T_s} \Gamma^{st} \right) \Gamma^{st} = \eta \cdot T_s. \quad (14)$$

Решая установленное квадратное уравнение (14), находим значение интенсивности деформаций сдвига на уровне заданного статического нагружения η при рассматриваемом сложном напряжённом состоянии:

$$\Gamma^{st} = \left(1 - \sqrt{1 - \eta} \right) \frac{2T_s}{G_0}. \quad (15)$$

Подставим (10) и (15) в (12) получим значение Δ :

$$\Delta = T^d(\Gamma^{st}) - T(\Gamma^{st}) = \varphi_E^d G_0 \left[1 - \frac{\varphi_E^d G_0}{4\varphi_b^d T_s} (1 - \sqrt{1-\eta}) \frac{2T_s}{G_0} \right] (1 - \sqrt{1-\eta}) \frac{2T_s}{G_0} - \eta \cdot T_s$$

$$= -\frac{T_s}{\varphi_b^d} \left\{ \left[(1 - \sqrt{1-\eta}) \varphi_E^d - \varphi_b^d \right]^2 + \eta \varphi_b^d - (\varphi_b^d)^2 \right\}. \quad (16)$$

Тогда подставляя (16) и (10) в (11) получим искомый вариант теории пластичности бетона применительно к статико-динамическому режиму деформирования

$$T^{st-d} = \varphi_E^d G_0 \left(1 - \frac{\varphi_E^d G_0}{4\varphi_b^d T_s} \Gamma \right) \Gamma + \frac{T_s}{\varphi_b^d} \left\{ \left[(1 - \sqrt{1-\eta}) \varphi_E^d - \varphi_b^d \right]^2 + \eta \varphi_b^d - (\varphi_b^d)^2 \right\}. \quad (17)$$

Анализируя формулу (17), можно видеть, что интенсивность касательных напряжений зависит не только от вида напряженного состояния, от уровня статического нагружения η но и скорости нагружения (через коэффициенты φ_E^d и φ_b^d).

Результаты исследования и их анализ

Для демонстрации корректности предложенного варианта теории пластичности бетона применительно к статико-динамическому режиму деформирования в качестве примера рассмотрим частный случай одноосного напряженного состояния для тяжелого бетона В25.

При расчете приняты следующие исходные данные. Физико-механические характеристики бетона: $R_b = 25$ МПа, $E_b = 3 \cdot 10^4$ МПа. Имеем напряженное состояние: $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, $\sigma_1 = \sigma_b$. Интенсивность касательных напряжений определена по формуле:

$$T = (1/\sqrt{6}) \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{(\sigma_b - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - \sigma_b)^2} = \frac{\sigma_b}{\sqrt{3}};$$

начальный модуль сдвига $G_0 = \frac{E_b}{2(1+\nu)}$; интенсивность деформаций сдвига

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_b + \nu \cdot \varepsilon_b)^2 + (\nu \cdot \varepsilon_b - \nu \cdot \varepsilon_b)^2 + (-\nu \cdot \varepsilon_b - \varepsilon_b)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (1 + \nu) \varepsilon_b;$$

предельная интенсивность деформаций сдвига $\Gamma_s = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (1 + \nu) \varepsilon_{ult}$.

По формуле (1) находится аналитическое описание диаграммы деформирования бетона при одноосном статическом нагружении:

$$\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}} = \frac{E_b}{2(1+\nu)} \left(1 - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (1+\nu) \varepsilon_b}{2 \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (1+\nu) \varepsilon_{ult}} \right) \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (1+\nu) \varepsilon_b \text{ или } \sigma_b = E_b \left(1 - \frac{\varepsilon_b}{2\varepsilon_{ult}} \right) \varepsilon_b. \quad (18)$$

Аналогично при одноосном статическом нагружении зависимость (10) принимает вид:

$$\sigma_b^d = \varphi_E^d E_0 \left(1 - \frac{\varphi_E^d E_0}{4\varphi_b^d \varepsilon_{ult}} \varepsilon_b \right) \varepsilon_b. \quad (19)$$

На рисунке 3 приведены расчетные диаграммы деформирования бетона класса В25 при статическом и динамическом одноосном сжатии в координатной системе « σ_b - ε_b » рассчитанные по формулам (18) и (19), соответственно.

а)

б)

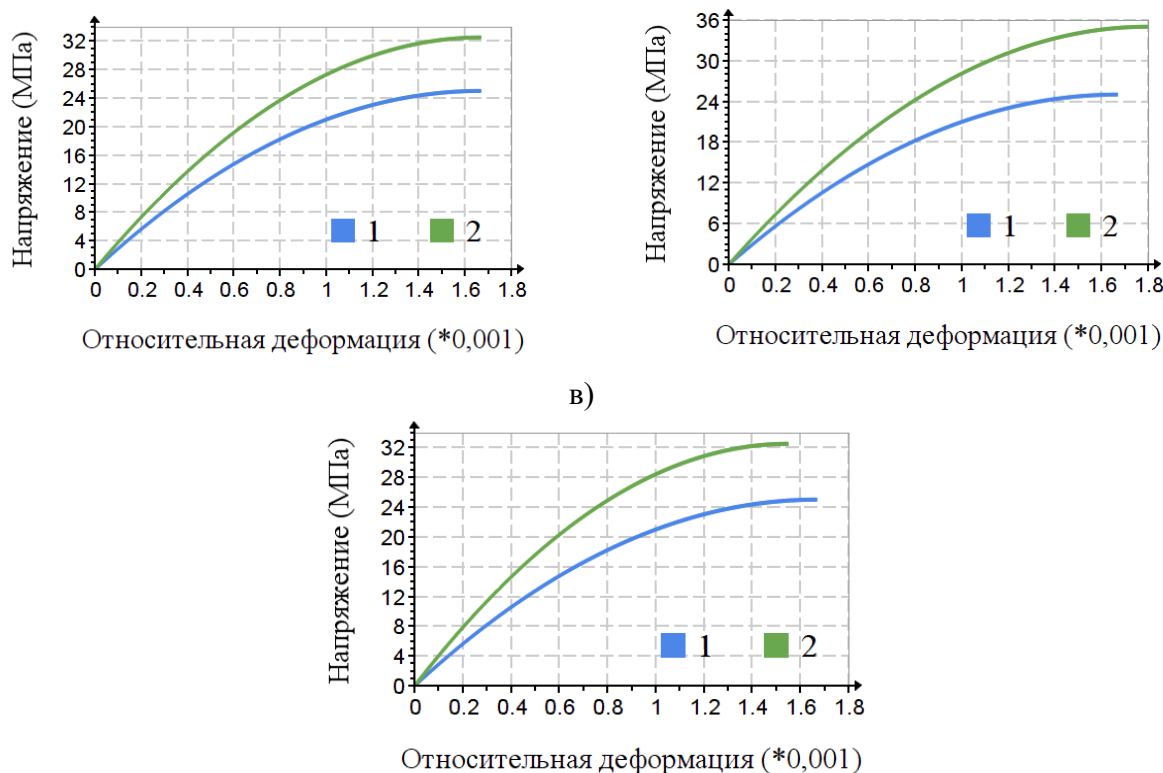


Рисунок 3 – Нелинейные диаграммы деформирования бетона класса В25 при статическом (кривая 1) и динамическом (кривая 2) режимах нагружений:

а) при $\varphi_E^d = \varphi_b^d = 1,4$; б) при $\varphi_E^d = 1,3$ и $\varphi_b^d = 1,4$; в) при $\varphi_E^d = 1,4$ и $\varphi_b^d = 1,3$

Анализируя диаграммы на рисунке 3 можно сделать следующие выводы: При динамическом нагружении, в зависимости от коэффициентов динамического упрочнения φ_E^d и φ_b^d прочностные и деформативные свойства бетона существенно изменяется по сравнению с его характеристиками при статическом нагружении. Когда $\varphi_E^d = \varphi_b^d$ (см. рисунок 3 а) наблюдается постоянство значений предельной относительной деформации при статическом а также динамическом нагружении. В случае $\varphi_E^d < \varphi_b^d$ на рисунке 3 б динамическое значение предельной деформации бетона больше чем статическое значение. Наоборот, при $\varphi_E^d > \varphi_b^d$ (см. рисунок 3 в) предельная относительная деформация уменьшается при увеличении скорости нагружении.

При статико-динамическом одноосном сжатии, основная физическая зависимость деформационной теории будет иметь вид (20):

$$\sigma_b^{st-d} = \varphi_E^d E_0 \left(1 - \frac{\varphi_E^d E_0}{4 \varphi_b^d \varepsilon_{ult}} \varepsilon_b \right) \varepsilon_b + \frac{\varepsilon_{ult}}{\varphi_b^d} \left\{ \left[(1 - \sqrt{1 - \eta}) \varphi_E^d - \varphi_b^d \right]^2 + \eta \varphi_b^d - (\varphi_b^d)^2 \right\}. \quad (20)$$

На рисунке 4 приведены расчетные диаграммы деформирования бетона класса В25 при статическом (кривая 1) и динамическом (кривая 2) и статико-динамическом (кривая 3) одноосном сжатии в координатной системе σ_b и ε_b для случая $\varphi_E^d = \varphi_b^d = 1,4$.

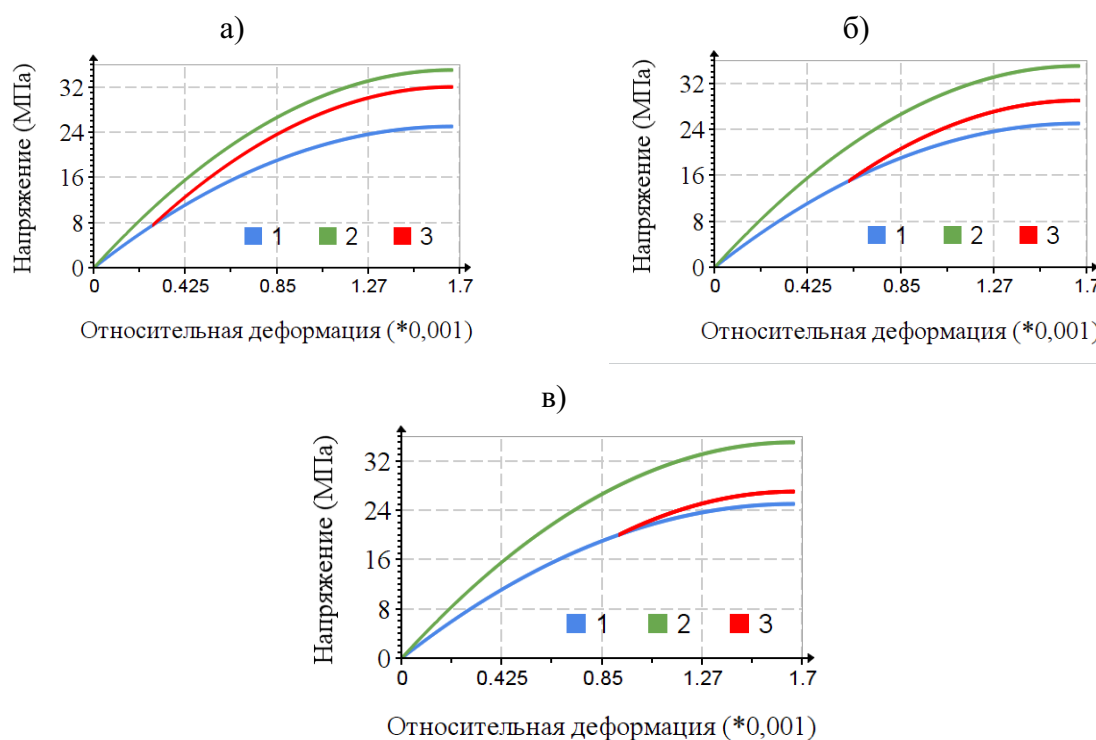


Рисунок 4 – Нелинейные диаграммы деформирования бетона класса B25 при статическом (кривая 1) и динамическом (кривая 2) и статико-динамическом режимах (кривая 3) нагружений:
 а) при $\eta = 0,3$; б) при $\eta = 0,6$; в) при $\eta = 0,8$

Анализируя диаграммы деформирования бетона с использованием разработанного варианта теории пластичности бетона применительно к статико-динамическому режиму деформирования можно видеть, что статико-динамическая кривая приближается к динамической 2 при малом уровне статического нагружения η и стремится к статической кривой 1 при увеличении η . При этом также установлено, что уровень начального статического нагружения практически не оказывает влияния на его предельную деформативность.

Выводы

На основе теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева сформулированы исходные гипотезы и получены деформационные зависимости для бетона при статико-динамическом режиме нагружения.

Предложенная модель представляет собой обобщение статических моделей неупругого деформирования и разрушения бетона, учитывающая скорость деформирования и уровень статического нагружения. Это обеспечивает возможность моделирования статико-динамических процессов на единой методологической основе.

Построенная зависимость могут быть использованы при формулировке критериев особого предельного состояния в процессе расчетного анализа по защите железобетонных конструктивных систем зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, когда при внезапном гипотетическом удалении одной из несущих конструкций и последующей за этим структурной перестройкой системы, оставшиеся неразрушенными конструктивные элементы получают динамические догружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белостоцкий А.М., Карпенко Н.И., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Карпенко С.Н., Петров А.Н., Кайтуков Т.Б., Харитонов В.А. О методах расчета напряженно-деформированного состояния и на устойчивость к прогрессирующему обрушению пространственных плитнооболочечных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности, трещинообразования и приобретаемой анизотропии // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. № 14(2). С. 30-47. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47>
2. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // *MATEC Web of Conferences*. 2018. No. 251. doi:10.1051/MATECCONF/201825102047.
3. Серпик И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Лагутина А.А. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 10. С. 49–51.
4. Tamrazyan A.G., Fedorov V.S., Kharun M. The effect of increased deformability of columns on the resistance to progressive collapse of buildings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 675. No. 1.
5. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
6. Scalerandi M., Bentahar M., Mechri C. Conditioning and elastic nonlinearity in concrete: Separation of damping and phase contributions // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 161. Pp. 208-220. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.11.035.
7. Kayondo M., Combrinck R., Boshoff W.P. State-of-the-art review on plastic cracking of concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. No. 225. Pp. 886 - 899. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.07.197.
8. Tošić N., Aidarov S., de la Fuente A. Systematic Review on the Creep of Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*. 2020. Vol. 13 (22). P. 5098. doi:10.3390/MA13225098. URL:<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/22/5098/htm> (date of application: 3.07.2022).
9. Hung C.C., Hu F.Y. Behavior of high-strength concrete slender columns strengthened with steel fibers under concentric axial loading // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 175. Pp. 422–433. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.201.
10. Филоненко-Бородич М.М. Об условиях прочности материалов, обладающих различным сопротивлением растяжению и сжатию // *Инж. сборник*. 1954. № 19. С. 36–48.
11. Баландин П.П. К вопросу о гипотезах прочности // *Вестник инженеров и техников*. 1937. № 1.
12. Гвоздев А.А., Карпенко Н.И. Работа железобетона с трещинами при плоском напряженном состоянии // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1965. № 2.
13. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Карпенко С.Н., Кадиев Д.З. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций в условиях действия низких отрицательных температур // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2018. Т. 714. № 6. С. 5–17.
14. Feng W., Liu F., Yang F., Li L., Jing L. Experimental study on dynamic split tensile properties of rubber concrete // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 165. Pp. 675–687. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.01.073.
15. Zhang H., Wang B., Xie A., Qi Y. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2017. No. 152. Pp.154–167. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.06.177.
16. Lu D., Wang G., Du X., Wang Y. A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete // *International Journal of Impact Engineering*. 2017. No. 103. Pp. 124–137. doi:10.1016/J.IJIMPENG.2017.01.011.
17. Ren J., Dang F., Wang H., Xue Y., Fang J. Enhancement Mechanism of the Dynamic Strength of Concrete Based on the Energy Principle // *Materials*. 2018. No. 11. doi:10.3390/MA11081274. URL:<https://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1274/htm> (date of application: 3.07.2022).
18. Fu Q., Xu W., He J., Su L., Song H., Niu D. Dynamic strength criteria for basalt fibre-reinforced coral aggregate concrete // *Composites Communications*. 2021. No. 28. doi:10.1016/J.COCO.2021.100983.
19. Федорова Н.В., Медянкин М.Д., Бушова О.Б. Экспериментальное определение параметров статико-динамического деформирования бетона при режимном нагружении // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 3. С. 72–81.
20. Федорова Н.В., Медянкин М.Д., Бушова О.Б. Определение параметров статико-динамического деформирования бетона // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 1. С. 4–11.
21. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Experimental determination of the parameters of the static-dynamic deformation of concrete under loading modal // *Building and reconstruction*. 2020. No. 89(3). Pp. 72–81. doi:10.33979/2073-7416-2020-89-3-72-81. URL:<https://construction.elpub.ru/jour/article/view/286> (date of application:3.04.2021).

22. Гениев Г.А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 18–19.
23. Федорова Н.В., Колчунов В.И., Чемодуров В.Т., Кореньков П.А. Определение параметров динамического догружения в арматуре растянутого железобетонного элемента // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4 (370). С. 235–241.
24. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2014. 208 с.
25. Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 896(1). doi:10.1088/1757-899X/896/1/012040. URL:https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/896/1/012040 (date of application: 8.12.2020).

REFERENCES

1. Belostotskii A.M., Karpenko N.I., Akimov P.A., Sidorov V.N., Karpenko S.N., Petrov A.N., Kaitukov T.B., Kharitonov V.A. O metodakh rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i na ustoichivost' k progressiruyushchemu obrusheniyu prostranstvennykh plitnoobolocheknykh zhelezobetonnykh konstrukttsii s uchetom fizicheskoi nelineinosti, treshchinoobrazovaniya i priobretaemoi anizotropii [On methods for calculating the stress-strain state and resistance to progressive collapse of spatial slab-shell reinforced concrete structures, taking into account physical nonlinearity, cracking and acquired anisotropy] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol. 14. No. 2. Pp. 30–47. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47 (rus).
2. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. doi:10.1051/MATECCONF/201825102047.
3. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseitsev A.V., Lagutina A.A. Analiz v geometricheski, fizicheski i konstruktivno nelineinoi postanovke dinamicheskogo povedeniya ploskikh ram pri zaproektnykh vozdeistviyakh // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2012. No. 10. Pp. 49–51. (rus)
4. Tamrazyan A.G., Fedorov V.S., Kharun M. The effect of increased deformability of columns on the resistance to progressive collapse of buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 675. No.1. Pp. 012004.
5. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Stroizdat Publ., 1974. (rus).
6. Scalerandi M., Bentahar M., Mechri C. Conditioning and elastic nonlinearity in concrete: Separation of damping and phase contributions // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 161. Pp. 208–220. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.11.035.
7. Kayondo M., Combrinck R., Boshoff W.P. State-of-the-art review on plastic cracking of concrete // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 225. Pp. 886–899. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.07.197.
8. Tošić N., Aidarov S., de la Fuente A. Systematic Review on the Creep of Fiber-Reinforced Concrete. Materials. 2020. Vol. 13. P. 5098. doi:10.3390/MA13225098. URL:https://www.mdpi.com/1996-1944/13/22/5098/htm (date of application: 3.07.2022).
9. Hung C.C., Hu F.Y. Behavior of high-strength concrete slender columns strengthened with steel fibers under concentric axial loading // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 175. Pp. 422–433. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.201.
10. Filonenko-Borodich M.M. Ob usloviyakh prochnosti materialov, obladayushchikh razlichnym soprotivleniem rastyazheniyu i szhatiyu [On the conditions of strength of materials with different resistance to tension and compression] // Inzh. sbornik. 1954. Vol. 19. Pp. 36–48.
11. Balandin P.P. K voprosu o gipotezakh prochnosti [On the issue of strength hypotheses]// Vestnik inzhenerov i tekhnikov. 1937. (rus)
12. Gvozdev A.A., Karpenko N.I. Rabota zhelezobetona s treshchinami pri ploskom napryazhennom sostoyanii [Work of reinforced concrete with cracks in a plane stress state]// Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii. 1965. Vol. 2. (rus)
13. Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N., Karpenko S.N., Kadiev D.Z. O postroenii diagrammnogo metoda rascheta sterzhnevnykh zhelezobetonnykh konstrukttsii v usloviyakh deistviya nizkikh otritsatel'nykh temperatur [On the construction of a diagram method for the calculation of reinforced concrete rod structures under conditions of action of low negative temperatures] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo. 2018.Vol. 714. No. 6. Pp. 5–17. (rus)
14. Feng W., Liu F., Yang F., Li L., Jing L. Experimental study on dynamic split tensile properties of rubber concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 165. Pp. 675–687. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.01.073.

15. Zhang H., Wang B., Xie A., Qi Y. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 152. Pp. 154–167. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.06.177.
16. Lu D., Wang G., Du X., Wang Y. A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete // *International Journal of Impact Engineering*. 2017. Vol. 103. Pp. 124–137. doi:10.1016/J.IJIMPEN.2017.01.011.
17. Ren J., Dang F., Wang H., Xue Y., Fang J. Enhancement Mechanism of the Dynamic Strength of Concrete Based on the Energy Principle // *Materials* 2018. Vol. 11. DOI:10.3390/MA11081274. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1274/htm> (date of application: 3.07.2022).
18. Fu Q., Xu W., He J., Su L., Song H., Niu D. Dynamic strength criteria for basalt fibre-reinforced coral aggregate concrete // *Composites Communications*. 2021. Vol. 28. doi:10.1016/J.COCO.2021.100983.
19. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Eksperimental'noe opredelenie parametrov statiko-dinamicheskogo deformirovaniya betona pri rezhimnom nagruzhении [Experimental determination of the parameters of static-dynamic deformation of concrete under regime loading] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. No. 3. Pp. 72–81. (rus)
20. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Opredelenie parametrov statiko-dinamicheskogo deformirovaniya betona [Determination of parameters of static-dynamic deformation of concrete] // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020. No. 1. Pp. 4–11. (rus)
21. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Experimental determination of the parameters of the static-dynamic deformation of concrete under loading modal // *Building and reconstruction*. 2020. Vol. 89. No. 3. Pp. 72–81. DOI:10.33979/2073-7416-2020-89-3-72-81. URL: <https://construction.elpub.ru/jour/article/view/286> (date of application: 3.04.2021).
22. Geniev G.A. Metod opredeleniya dinamicheskikh predelov prochnosti betona [Method for determining the dynamic strength of concrete] // *Beton i zhelezobeton*. 1998. No. 1. Pp. 18–19.
23. Fedorova N.V., Kolchuno, V.I., Chemodurov V.T., Koren'kov P.A. Opredelenie parametrov dinamicheskogo dogruzheniya v armature rastyanutogo zhelezobetonnoho ehlementa [Determination of the parameters of dynamic additional loading in the reinforcement of a tensile reinforced concrete element] // *Izvestiya VUZov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2017. Vol. 4. No. 370. Pp. 235–241. (rus)
24. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzhenii pri zaproektnykh vozdeistviyakh [Survivability of buildings and structures under beyond design basis impacts]. Moscow: ASV Publ., 2014. (rus)
25. Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 896. No. 1. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012040. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/896/1/012040> (date of application: 8.12.2020)

Информация об авторах:

Ву Нгок Туен

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры фундаментального образования.
E-mail: ngoctuyennd91@gmail.com

Федорова Наталия Витальевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой архитектурно-строительного проектирования.
E-mail: fenavit@mail.ru

Information about authors:

Vu Ngoc Tuyen

National Research Moscow State Construction University (NRU MGSU), Moscow, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Fundamental Education.
E-mail: ngoctuyennd91@gmail.com

Fedorova Natalia V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
Advisor to RAACS, doctor of technical sciences, professor, head. department of architectural and construction design.
E-mail: fenavit@mail.ru