



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОННЫХ, ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ И СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ ПЛИТ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УДАР МОДЕЛЬНЫМ СНАРЯДОМ

Н. Н. Белов<sup>а,1</sup>, В. Е. Буньков<sup>а,2</sup>, А. С. Пляскин<sup>а,3</sup>, Н. Т. Югов<sup>б,4</sup>, А. А. Югов<sup>а,5</sup>

<sup>а</sup> ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»,  
2, Соляная площадь, г. Томск, Россия, 634003.

<sup>б</sup> ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»  
40, пр. Ленина, г. Томск, Россия, 634050.

E-mail: <sup>1</sup> n.n.Belov@mail.ru, <sup>2</sup> viktorbunkov@inbox.ru, <sup>3</sup> plyaskinandrei@mail.ru, <sup>4</sup> n.t.Yugov@mail.ru,

<sup>5</sup> Yugalex@mail.ru

Получена 10 апреля 2020; принята 22 мая 2020.

**Аннотация.** В работе посредством методики компьютерного моделирования исследованы особенности ударного взаимодействия стальных цилиндрических ударников с бетонными, железобетонными и сталефибробетонными плитами в диапазоне скоростей 100–800 м/с. Приведено сравнение экспериментальных результатов с данными математического моделирования ударного взаимодействия стальных цилиндров с бетонными плитами. Для реализации модели использован программный комплекс «РА-НЕТ-3», предназначенный для решения задач удара и взрыва в полной трёхмерной постановке, модифицированный для динамических задач методом конечных элементов. Динамическое разрушение в бетоне рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов (трещин, пор) под действием образующихся в процессе нагружения напряжений. В работе проведено обобщение модели деформирования и разрушения мелкозернистого бетона при ударно-волновом нагружении на сталефибробетон.

**Ключевые слова:** сталефибробетон, ударные нагрузки, математическая модель, ударно-волновое нагружение, железобетон, бетон, динамическое разрушение.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ БЕТОННИХ, ЗАЛІЗОБЕТОННИХ І СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ ПЛИТ НА ВИСОКОШВИДКІСНИЙ УДАР МОДЕЛЬНИМ СНАРЯДОМ

М. М. Бєлов<sup>а,1</sup>, В. Є. Буньков<sup>а,2</sup>, А. С. Пляскін<sup>а,3</sup>, Н. Т. Югов<sup>б,4</sup>, О. О. Югов<sup>а,5</sup>

<sup>а</sup> ФДБОУ ВО «Томський державний архітектурно-будівельний університет»,  
2, Соляна площа, м. Томськ, Росія, 634003.

<sup>б</sup> ФДБОУ ВО «Томський державний університет систем управління і радіоелектроніки»,  
40, пр. Леніна, м. Томськ, Росія, 634050.

E-mail: <sup>1</sup> n.n.Belov@mail.ru, <sup>2</sup> viktorbunkov@inbox.ru, <sup>3</sup> plyaskinandrei@mail.ru, <sup>4</sup> n.t.Yugov@mail.ru,

<sup>5</sup> Yugalex@mail.ru

Отримана 10 квітня 2020; прийнята 22 травня 2020.

**Анотація.** У роботі за допомогою методики комп'ютерного моделювання досліджені особливості ударної взаємодії сталевих циліндричних ударників з бетонними, залізобетонними і сталефібробетонними плитами в діапазоні швидкостей 100–800 м/с. Наведено порівняння експериментальних результатів з даними математичного моделювання ударної взаємодії сталевих циліндрів з бетонними плитами. Для реалізації моделі використано програмний комплекс «РА-НЕТ-3», призначений для вирішення завдань удару і вибуху в повній тривимірній постановці, модифікований для динамічних завдань методом кінцевих елементів. Динамічне руйнування у бетоні розглядається як процес зростання і злиття мікродефектів (тріщин, пор) під дією напружень, що утворюються в процесі навантаження. У роботі проведено

узагальнення моделі деформації і руйнування дрібнозернистого бетону при ударно-хвильовому навантаженні на сталевібробетон.

**Ключові слова:** сталевібробетон, ударні навантаження, математична модель, ударно-хвильове навантаження, залізобетон, бетон, динамічне руйнування.

## STUDY OF THE STRENGTH OF CONCRETE, REINFORCED CONCRETE AND STEEL FIBER CONCRETE SLABS FOR HIGH-SPEED IMPACT WITH A MODEL SHELL

Nikolay Belov <sup>a,1</sup>, Victor Bunkov <sup>a,2</sup>, Andrey Plyaskin <sup>a,3</sup>, Nikolay Yugov <sup>b,4</sup>, Alexey Yugov <sup>a,5</sup>

<sup>a</sup> Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Salt square, Tomsk, Russia, 634003

<sup>b</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050

E-mail: <sup>1</sup> n.n.Belov@mail.ru, <sup>2</sup> viktorbunkov@inbox.ru, <sup>3</sup> plyaskinandrei@mail.ru, <sup>4</sup> n.t.Yugov@mail.ru,  
<sup>5</sup> Yugalex@mail.ru

Received 10 April 2020; accepted 22 May 2020.

**Abstract.** In the work, by means of a computer simulation technique, the features of the impact interaction of cylindrical steel impactors with concrete, reinforced concrete and steel fiber concrete plates in the range of velocities of 100÷800 m/s are investigated. A comparison of experimental results with the data of mathematical modeling of impact interaction of steel cylinders with concrete slabs is given. To implement the model, the «RANET-3» software package was used, designed to solve impact and explosion problems in a full three-dimensional formulation, modified to solve dynamic problems by the finite element method. Dynamic fracture in concrete is considered as a process of growth and fusion of microdefects (cracks, pores) under the action of stresses generated during loading. The paper generalizes the model of deformation and fracture of fine-grained concrete under shockwave loading on steel fiber concrete.

**Keywords:** steel fiber concrete, shock loads, mathematical model, shock wave loading, reinforced concrete, concrete, dynamic destruction.

### Введение

При проектировании объектов специального назначения (защитные оболочки АЭС, хранилища токсичных отходов и т. д.) возникает необходимость оценки их способности противостоять динамическим нагрузкам [1]. Исследование их прочности экспериментальными методами без глубокого теоретического анализа не даёт необходимого результата несмотря на огромные материальные затраты.

Данная работа посвящена исследованию методом компьютерного моделирования поведения бетонных, железобетонных и сталефибро-

бетонных плит в условиях ударно-волнового напряжения. В [2–5] предложена математическая модель, описывающая в рамках механики сложной среды процессы деформирования и разрушения в мелкозернистом бетоне в условиях высокопрочного удара. Динамическое разрушение в бетоне рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов (трещин, пор) под действием образующихся в процессе нагружения напряжений. Произведен анализ и сравнение экспериментальных результатов с данными математического ударного взаимодействия стальных цилиндров с бетонными плитами.

Фибробетон является одним из самых распространенных строительных материалов. Это бетон, который при изготовлении армирован дисперсными волокнами (фибрами). Фибровое армирование качественно изменяет свойства бетонных материалов. Свойства фибробетона как композиционного материала определяется свойствами составляющих его компонентов. В этом плане весьма значительным компонентом является стальная фибра. Стальная фибра, в отличие от арматуры или проволоочной сетки, равномерно распределяется по бетонной матрице. Прочностные характеристики сталефибробетона зависят от параметров фибрового армирования: типа фибры, её объемного содержания, соотношения между параметрами фибровой арматуры и параметрами структуры бетонной матрицы, уровня дисперсного армирования, соотношения формы и размеров сечения и длины фибры.

### 1. Математическая модель поведения сталефибробетона в условиях ударно-волнового нагружения

Сталефибробетон (СФБ) моделируется гомогенной двухфазной смесью стали и бетона, начальная плотность которой  $\rho_0$  определяется по формуле:

$$\rho_0 = \nu_1 \rho_{0c} + \nu_2 \rho_{0\delta}, \quad (1)$$

где  $\nu_1, \nu_2, \rho_{0c}, \rho_{0\delta}$  начальные объемные концентрации и плотности стали и бетона.

Динамическое разрушение в СФБ рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов под действием образующихся в процессе нагружения напряжений.

Удельный объем пористой среды  $v$  представляется в виде суммы удельного объема материала матрицы  $v_m$ , удельного объема пор  $v_p$  и удельного объема  $v_t$ , образующегося при раскрытии трещин:  $v = v_m + v_p + v_t$ . Пористость материала характеризуется относительным объемом пустот  $\xi = \xi_p + \xi_t$ , либо параметром  $\alpha = v / v_m$ , которые связаны зависимостью  $\alpha = 1 / (1 - \xi)$ . Здесь  $\xi_p = v_p / v$ ,  $\xi_t = v_t / v$  – относительные объемы пор и трещин соответственно.

Система уравнений, описывающих движение пористой упруго-пластической среды, имеет вид [2, 3, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho dV &= 0, \\ \frac{d}{dt} \int_V \rho E dV &= \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{u} dS, \\ \mathbf{s} : \mathbf{s} &= \frac{2}{3} \sigma_T^2, \\ \frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{u} dV &= \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} dS, \\ \mathbf{e} &= \frac{\mathbf{s}^j}{2\mu} + \lambda \mathbf{s}, \\ p &= \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{c_0^2 p_0 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + \rho_0 \gamma_0 \varepsilon \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $t$  – время;

$V$  – объем интегрирования;

$S$  – его поверхность;

$\mathbf{n}$  – единичный вектор внешней нормали;

$\rho$  – плотность;

$\boldsymbol{\sigma} = -pg + \mathbf{s}$  – тензор напряжений;

$\mathbf{s}$  – его девиатор;

$p$  – давление;

$g$  – метрический тензор;

$\mathbf{u}$  – вектор скорости;

$E = \varepsilon + \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} / 2$  – удельная полная энергия;

$\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;

$\mathbf{e} = \mathbf{d} - (\mathbf{d} : \mathbf{g}) \mathbf{g} / 3$  – девиатор тензора скоростей деформаций;

$\mathbf{d} = (\nabla \mathbf{u} - \nabla \mathbf{u}^T) / 2$  – тензор скоростей деформаций;

$\mathbf{s}^j = \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{s} \cdot \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{s}$  – производная девиатора тензора напряжений в смысле Яуманна-Нолла;

$$\mu = \mu_0 (1 - \xi) \left[ \frac{1 - (6\rho_0 c_0^2 + 12\mu_0) \xi}{(9\rho_0 c_0^2 + 8\mu_0)} \right]$$

$\sigma_T = Y_0 / \alpha$  – эффективные модуль сдвига и предел текучести;

$\boldsymbol{\omega} = (\nabla \mathbf{u}^T - \nabla \mathbf{u}) / 2$  – тензор вихря;

$\rho_0, c_0, \mu_0, Y_0, s_0$  – константы материала матрицы;

$\eta = 1 - \rho_0 v / \alpha$ .

Параметр  $\lambda$  исключается с помощью условия текучести.

Коэффициенты  $c_0$  и  $s_0$  линейной зависимости скорости ударной волны  $D$  от массовой скорости  $u$  ( $D = c_0 + s_0 u$ ) для матрицы определяются через ударные адиабаты компонентов смеси  $D_i = c_{0i} + s_{0i} \cdot u$  ( $i = 1, 2$ ). В переменных  $(v_m, p_m)$  ударная адиабата смеси имеет вид:

$$v_m(p_m) = \sum_{i=1}^2 m_i \left\{ v_{0i} - \frac{1}{p_m} \left[ \frac{c_{0i}}{s_{0i}} \left( \sqrt{\frac{s_{0i} p_m}{\rho_{0i} c_{0i}^2} + \frac{1}{4}} - \frac{1}{2} \right) \right]^2 \right\}, \quad (3)$$

Используя для смеси соотношение на ударной волне:

$$D = v_0 \sqrt{\frac{p_m}{v_0 - v_m(p_m)}}, \quad (4)$$

$$u = \sqrt{p_m (v_0 - v_m(p_m))}, \quad (5)$$

можно построить зависимость скорости ударной волны от массовой скорости и определить коэффициенты  $c_0$  и  $s_0$ .

Коэффициент Грюнайзена  $\gamma_0$  для смеси определяется через коэффициенты Грюнайзена компонентов  $\gamma_{0i}$ :

$$\frac{v_0}{\gamma_0} = \sum_{i=1}^2 m_i \frac{v_{0i}}{\gamma_{0i}}. \quad (6)$$

Модуль сдвига  $\mu_0$  и предел текучести  $Y_0$  определяются по формулам:

$$\mu_0 = 1 / \left( \frac{v_1}{\mu_{01}} + \frac{v_2}{\mu_{02}} \right), \quad (7)$$

$$Y_0 = m_1 Y_1 + m_2 Y_2, \quad (8)$$

где  $m_i = v_i \rho_{0i} / \rho_0$  – массовые концентрации стали ( $i=1$ ) и бетона ( $i=2$ ) в СФБ;

$\mu_{0i}, Y_i (i=1, 2)$  – соответственно модули сдвига и пределы текучести компонентов смеси.

Для замыкания системы (1) необходимы уравнения, описывающие изменение параметра  $\alpha$  при растяжении и сжатии. Уравнения для определения параметра  $\alpha$  при упругом деформировании СФБ имеет вид:

$$\rho_0 \gamma_0 \varepsilon + \frac{c_0^2 \rho_0 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + \frac{3 \mu_0 (\alpha - \alpha_0)}{8(1 - \nu) N_0 R^3 \alpha \alpha_0} = 0. \quad (9)$$

При выводе уравнения (2) предполагалось, что в процессе нагружения не происходило образования новых трещин, а деформирование материала сопровождалось ростом изначально существующих с характерным размером  $R$ :

$$\dot{R} / R = F_1 + F_2, \quad (10)$$

где  $F_1 = (\alpha s_i - s_*) / \eta_1$  при  $s_i > s_*$  и  $F_1 = 0$  при  $\alpha s_i \leq s_*$ ;

$F_2 = (|\alpha p| - p_*) / \eta_2$  при  $p < 0, |\alpha p| > p_*$  и  $F_2 = 0$

при  $p \geq 0, |\alpha p| \leq p_*$ ;

$p_* = p_0 (1 - R / R_*)$ ;

$$s_i = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{s} : \mathbf{s};$$

$$s_* = s_{01} (1 - R / R_*);$$

$$R_* = \beta / \sqrt[3]{N_0}$$

$s_{01}, p_0, \eta_1, \eta_2, \beta$  – константы материала;

$N_0$  – число трещин в единице объема;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\alpha_0$  – начальная пористость в СФБ.

Предполагается, что слияние микротрещин в СФБ начинается, когда их характерный размер  $R$  при постоянной концентрации  $N_0$  достигнет критической величины:

$$R_* = \beta / \sqrt[3]{N_0}. \quad (11)$$

Процесс фрагментирования поврежденного трещинами материала и поведение разрушенного материала описывается в рамках модели пористой упруго-пластической среды. Система (1) замыкается уравнениями, связывающими давление  $p$  и пористость  $\alpha$  при сжатии

$$(p \geq \frac{2}{3} \sigma_r \ln(\frac{\alpha}{\alpha - 1})), \quad (12)$$

$$\rho_0 \gamma_0 \varepsilon + \frac{c_0^2 \rho_0 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} - \frac{2}{3} \sigma_r \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) = 0; \quad (13)$$

и при разгрузке:

$$(p \leq -a_s \ln(\frac{\alpha}{\alpha - 1})), \quad (14)$$

$$\rho_0 \gamma_0 \varepsilon + \frac{c_0^2 \rho_0 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + a_s \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) = 0. \quad (15)$$

Фрагментация поврежденного трещинами материала, подвергнутого воздействию растягивающих напряжений, происходит, когда относительный объем пустот достигнет критической величины:

$$\xi_* = \frac{\alpha_* - 1}{\alpha_*}. \quad (16)$$

Если поврежденный трещинами материал подвергнуть воздействию сжимающих напряжений, то критерием фрагментирования является предельная величина интенсивности пластических деформаций  $e_u^*$ :

$$e_u^* = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}, \quad (17)$$

где  $\alpha_s$  – параметр модели;

$T_1$  и  $T_2$  – первый и второй инварианты тензора деформаций.

Разрушенный материал моделируется гранулированной средой, выдерживающей сжимающие нагрузки, но не выдерживающей растягивающих напряжений.

Модель реализована в программном комплексе «РАНЕТ-3» [6], предназначенном для решения задач удара и взрыва в полной трёхмерной постановке модифицированным на решения динамических задач методом конечных элементов [1]. В программном комплексе имеется специальный блок программ для расчёта элементов железобетонного каркаса на взрывные и ударные нагрузки.

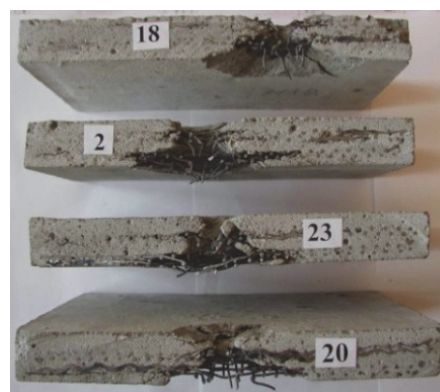
## 2. Расчет прочности железобетонных плит на ударные нагрузки

Бетонные плиты толщиной 24 и 36 мм армировались двумя слоями стальной сетки вблизи лицевой и тыльной поверхностей. Толщина стальной проволоки 1,2 мм, размер ячейки 5×5 мм. Ударник представлял собой либо компактный цилиндр (высота равна диаметру и равна 7,65 мм), либо удлиненный цилиндр диаметром 7,65 мм и высотой 23 мм. Диапазон скоростей соударения 300÷750 м/с. В эксперименте фиксировалась запреградная скорость ударника и параметры лицевых и тыльных отколов. На рис. 1 представлены картины разрушения в железобетонных плитках толщиной 24 мм при пробитии их компактным (№ 2,  $V_0=747$  м/с) и удлиненным (№ 18,  $V_0=306$  м/с; № 20,  $U_0=458$  м/с; № 23,  $U_0=306$  м/с) ударниками.

На рис. 2 приведена расчетная картина разрушения и представлены фотографии лицевого и тыльного отколов в железобетонной плите толщиной 24 мм, при ударе по ней компактного цилиндра со скоростью 462 м/с.

Как и в эксперименте, в плите образовались лицевой и тыльный отколы. Ударник, пробив два слоя армирующей сетки, расположенные у лицевой поверхности преграды, остановился при соприкосновении с армирующими слоями у тыльной поверхности.

Рис. 3 иллюстрирует картину разрушения в железобетонной плите толщиной 24 мм после ударного взаимодействия с удлиненным цилиндрическим ударником со скоростью 458 м/с.



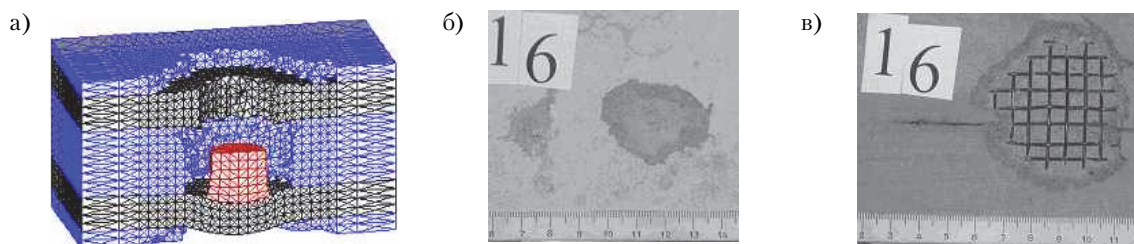
**Рисунок 1.** Разрушение железобетонных плит при высокоскоростном ударе.

Различие по запреградной скорости ударника в расчетах и экспериментах не превосходило 6 %, по диаметру лицевого откола 8 %, по диаметру тыльного откола 26 %. Сравнительно большее различие по диаметру тыльного откола связано с тем, что максимальный размер преграды в расчетах был ограничен 5, 8 диаметрами ударника, в то время как в экспериментах тыльный откол достигал величин 7, 8 диаметров ударника.

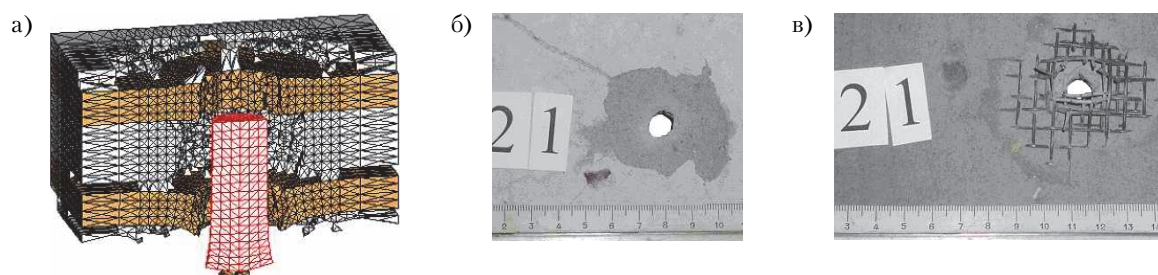
## 3. Расчёт прочности сталефибробетонных плит на ударные нагрузки

В [2, 7–8] расчетно-экспериментальным методом проведено исследование процессов ударного взаимодействия стальных цилиндрических ударников диаметром  $d_0=7,65$  мм и высотой 23 мм с бетонной плитой толщиной 200 мм в диапазоне скоростей встречи 130÷700 м/с. Бетон имел состав: одна часть цемента марки 400, 2 части мелкого песка. Время выдержки 30 суток.

Определялись диаметр лицевого откола в бетонной плите  $D$  и глубина кратера в ней  $L$ . Получено удовлетворительное согласование результатов эксперимента и математического моделирования. В данной работе проведено моделирование процессов ударного взаимодействия рассмотренного выше ударника с сталефибробетонной плитой. В расчете толщина плиты выбиралась такой, чтобы тыльная её поверхность не оказывала влияния на глубину кратера. Параметры модели деформирования и разрушения сталефибробетона с объемным содержанием фибры 3 % рассчитаны на основе рассмотренного выше бетона и представлены в таблице 1.



**Рисунок 2.** Картина разрушения железобетонной плиты компактным цилиндрическим ударником при скорости удара 462 м/с: а) численный эксперимент; б) лицевой стороны; в) тыльной стороны.



**Рисунок 3.** Картина разрушения железобетонной плиты удлиненным цилиндрическим ударником при скорости удара 458 м/с: а) численный эксперимент; б) лицевой стороны; в) тыльной стороны.

Результаты математического моделирования процессов ударного взаимодействия стального ударника с бетонными и сталефибробетонными плитами в диапазоне скоростей встречи 100... 350 м/с представлены в таблице 2 и на рис. 4–6.

Рис. 4 и 5 иллюстрируют картины ударного взаимодействия стального цилиндрического ударника с бетонными и сталефибробетонными плитами для скоростей удара 200 м/с и 350 м/с.

На рис. 6 представлены графики зависимости расчетных глубин проникания ударника в бетонную (1) и фибробетонную (2) плиты от скорости удара.

График зависимости глубины проникания стального цилиндра в бетонную плиту от скорости удара находится значительно выше графика глубины проникания в сталефибробетонную плиту. Из рисунка видно, что процесс образования кратера в бетонной плите начинается приблизительно при скорости удара 90 м/с, в то время как в сталефибробетонной со скорости 135 м/с. При скорости удара 100 м/с глубина кратера в бетонной плите составляет  $0,15 d_0$ . При скорости удара 150 м/с глубина кратера в бетонной плите  $0,89 d_0$ , в то время как в сталефибробетонной она достигает только величины  $0,16 d_0$ .

Расхождение между глубинами кратеров 82 %. С ростом скорости удара оно уменьшается. При скорости удара 350 м/с расхождение составляет только 21 %.

При скорости удара 495 м/с ударник в эксперименте пробивает бетонную плиту толщиной 24 мм. В ней образуется лицевой и тыльный отколы. Диаметры лицевой и тыльного отколов в эксперименте соответственно равны:  $d_{\text{л}} = 3,0 \cdot d_0$ ;  $d_{\text{т}} = 5,2 \cdot d_0$ . Скорость ударника за мишенью  $U_k = 327$  м/с.

На рис. 7 представлена сравнительная картина пробития стальным цилиндрическим ударником бетонной и сталефибробетонных плит толщиной 24 мм с начальной скоростью удара 495 м/с.

В бетонной плите образовался лицевой откол  $d_{\text{л}}/d_0 = 3,06$  и тыльной  $d_{\text{т}}/d_0 = 2,53$  отколы. Запреградная скорость ударника 310 м/с. Расхождение экспериментальных и расчетных данных по величине запреградной скорости ударника 5 %.

Наблюдается расхождение значений по величине диаметров тыльных отколов (30 %). Сравнительно большое различие по диаметру тыльного откола обусловлено тем, что максимальный



**Таблица 1.** Параметры деформирования и разрушения бетона, сталефибробетона при ударно-волновом нагружении

Параметр	Бетон	СФБ(3)	Сталь
$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	2,2	2,368	7,85
$\mu_0$ , ГПа	17	17,41	82
$c_0$ , см/мкс	0,233	0,255	0,457
$s_0$	1,51	1,46	1,49
$\gamma_0$	2	2	2
$\nu$	0,256	0,256	–
$Y_0$ , ГПа	0,0036	0,0672	0,64
$R_0$ , мкм	2,5	2,5	–
$R_*$ , мкм	11,6	11,6	–
$N_0 \cdot 10^{-7}$ , см <sup>-3</sup>	64,0	64,0	–
$\eta_1$ , ГПа·мкс	7000	7000	–
$\eta_2$ , ГПа·мкс	800	800	–
$p_0$ , ГПа	0,00924	0,00924	–
$s_{01}$	0,0924	0,0924	–
$\alpha_0$	1,01	1,01	1,0006
$a_s$ , ГПа	0,0042	0,047	0,29
$\xi_*$	0,0338	0,0338	0,3
$e_u$	0,15	0,15	1,0

**Таблица 2.** Расчетные данные по глубине внедрения стального ударника в бетонную и сталефибробетонную плиты

$V$ , м/с	$L_1/d_0$	$L_2/d_0$	$R$ , %	$V$ , м/с	$L_1/d_0$	$L_2/d_0$	$R$ , %
100	0,15	–	–	150	0,89	0,16	–82
200	1,65	0,67	–59	244	2,25	1,31	–42
300	2,76	2,06	–25	350	3,2	2,54	–21

В таблице 2 обозначены:

$V$  – скорость удара;

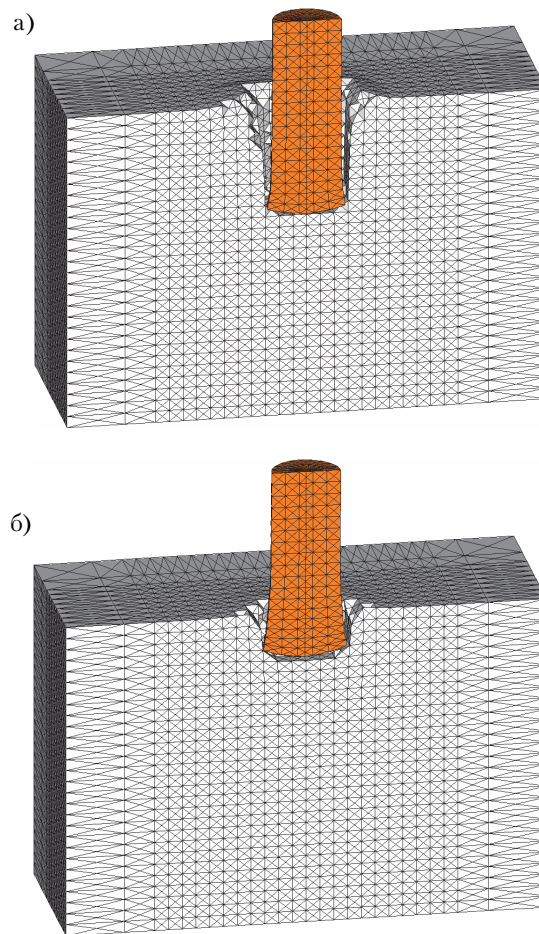
$L_1/d_0, L_2/d_0$  – относительные глубины кратеров в бетонной и сталефибробетонной плитах;

$R$  – расхождение между величинами глубин кратеров.

размер преграды в расчетах ограничен  $5,8 d_0$ , в то время как в экспериментах тыльный откол достигал величин  $7,8 d_0$ .

При пробитии плиты из сталефибробетона образуется лицевой откол диаметром  $d_l = 1,8 \cdot d_0$ . Диаметр тыльного откола  $d_t = 1,47 \cdot d_0$ . За сталефибробетонной плитой скорость ударника составляет 285 м/с, что на 8 % меньше, чем при пробитии бетонной плиты.

На рис. 8 представлена на момент времени 160 мкс сравнительная картина пробития сталь-

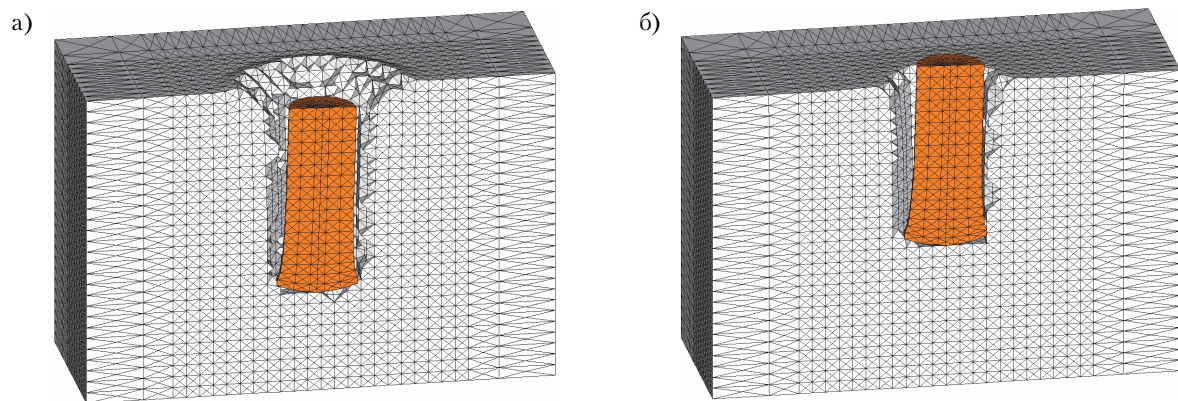
**Рисунок 4.** Картины ударного взаимодействия стального цилиндра с бетонной (а) и сталефибробетонной (б) плитами при скорости удара 200 м/с.

ным ударником с начальной скоростью 439 м/с трех мишеней толщиной 24 мм каждая.

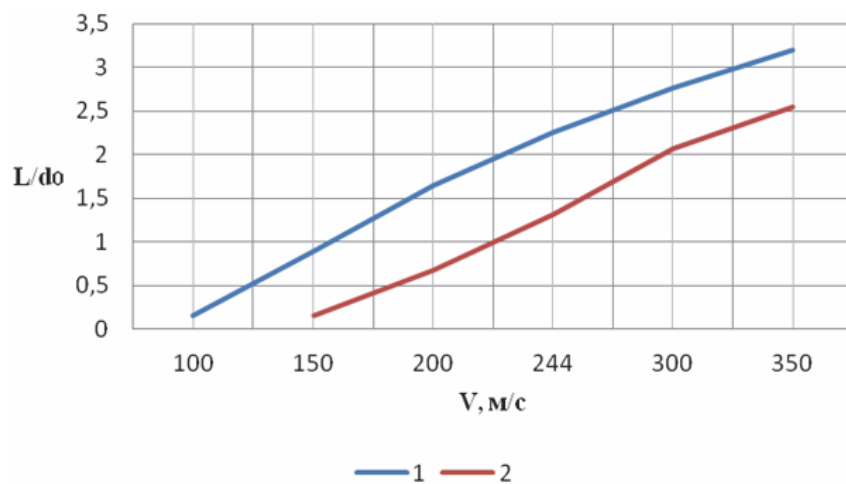
В первом варианте бетонная плитка толщиной 24 мм армирована двумя слоями стальной сетки вблизи лицевой и тыльной поверхностей. Толщина стальной проволоки 1,2 мм, размер ячейки 5×5 мм (рис. 8 (а)).

В эксперименте при пробитии железобетонной плиты образуется лицевой ( $d_l/d_0=4,7$ ) и тыльный ( $d_t/d_0=7,8$ ) отколы. Запреградная скорость ударника 207 м/с. На рис. 8 (а) представлена расчетная картина пробития железобетонной плиты. В расчете за преградой ударник обладает скоростью 202 м/с (различие с экспериментом 3 %).

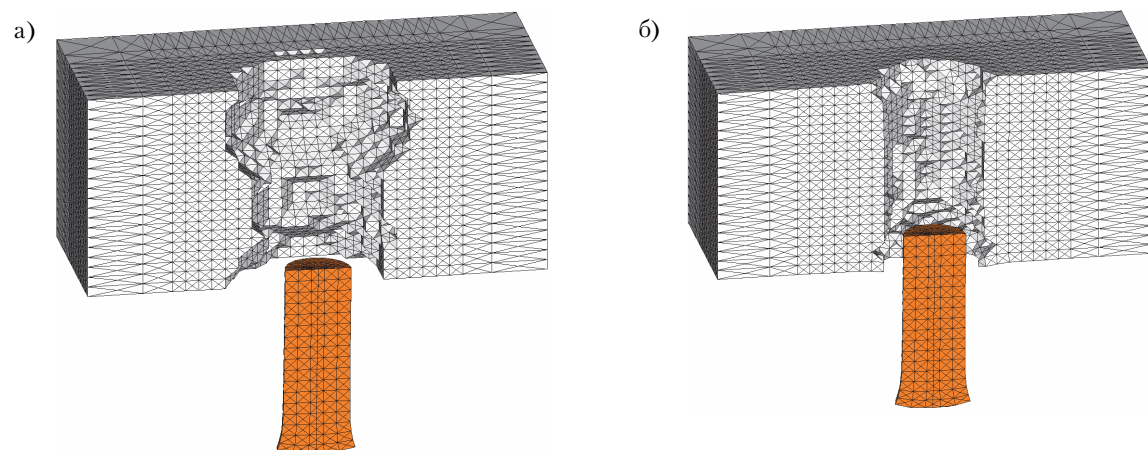
За сталефибробетонной плитой запреградная скорость составляет 247 м/с, что на 22 % выше, чем в предыдущем варианте (рис. (8 б)).



**Рисунок 5.** Картины ударного взаимодействия стального цилиндра с бетонной (а) и сталефибробетонной (б) плитами при скорости удара 350 м/с.

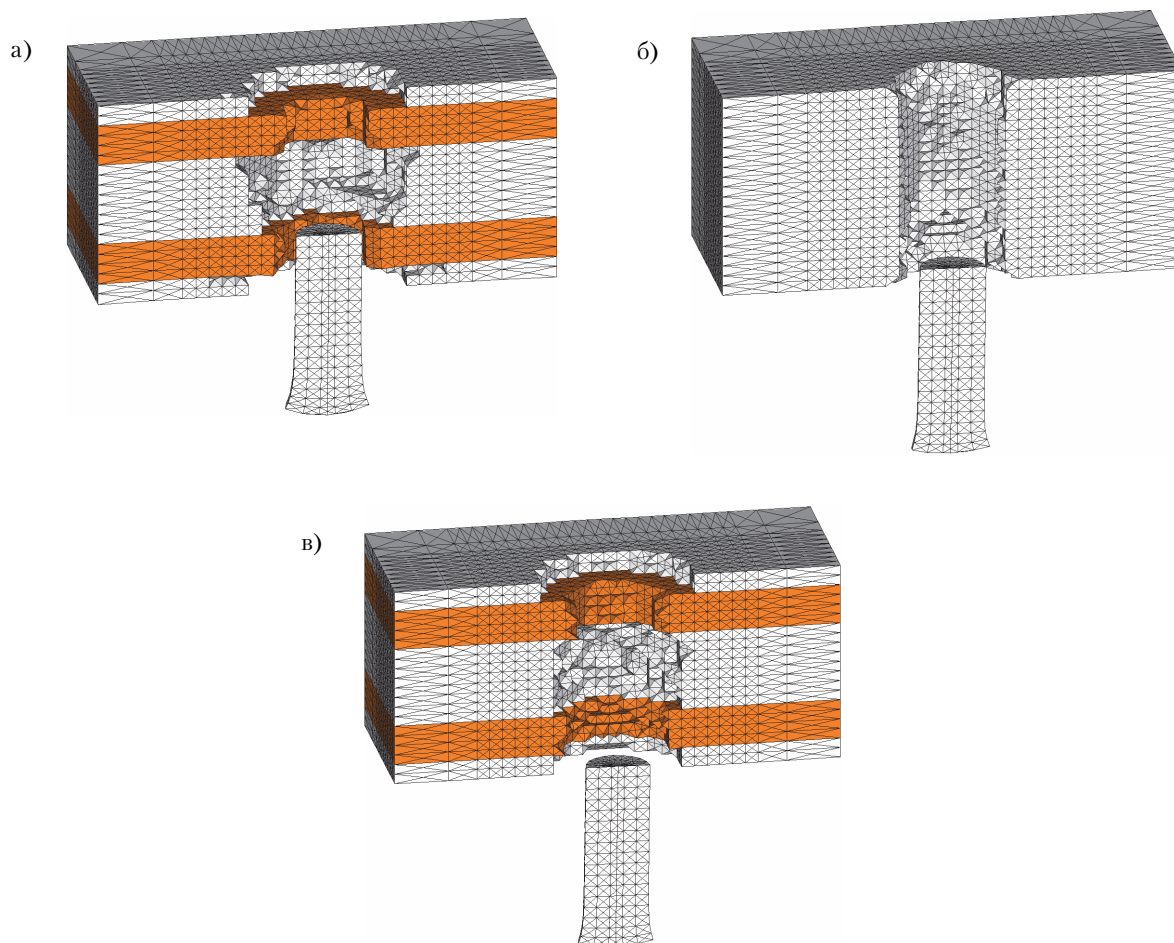


**Рисунок 6.** Зависимости расчетных глубин проникновения стального цилиндра в бетон (1) и фибробетон (2) от скорости удара.



**Рисунок 7.** Конфигурация стального ударника и бетонной (а) и сталефибробетонной (б) плит при соударении со скоростью 495 м/с в момент времени 130 мкс.





**Рисунок 8.** Сравнительная картина пробития на момент времени 160 мкс стальным цилиндрическим ударником с начальной скоростью удара 439 м/с железобетонной (а), сталефибробетонной (б) плит и плиты, в которой слои с арматурой заменены фибробетоном (в).

В третьем варианте в железобетонной плите слои с арматурой заменены на слои из сталефибробетона (рис. (8 в)). В запреградном пространстве за такой мишенью скорость ударника 257 м/с, т. е. она на 27 % выше, чем при пробитии железобетонной плиты.

Резюмируя можно утверждать, что для защиты от ударного взаимодействия стальным

цилиндрическим ударником лучшей является железобетонная плита.

Представленные в работе результаты наглядно демонстрируют возможности математической модели, позволяющей рассчитывать напряженно-деформированное состояние и разрушение в конструкциях, содержащих слои из фибробетона, в условиях ударно-волнового нагружения.

## Литература

1. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки [Текст] / Н. Н. Белов, Д. Г. Копаница, О. Г. Кумпяк, Н. Т. Югов. – Томск-Нортхэмптон : STT, 2004. – 466 с.

## Reference

1. Belov, N. N.; Kopanitsa, D. G.; Kumpyak, O. G.; Yugov, N. T. Calculation of reinforced concrete structures for explosive and shock loads [Text]. Tomsk-Northhampton : STT, 2004. 466 p. (in Russian)

2. Расчетно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций [Текст] / Н. Н. Белов, О. В. Кабанцев, Д. Г. Копаница, Н. Т. Югов. – Томск : STT, 2008. – 292 с.
3. Модель динамического разрушения мелкозернистого бетона [Текст] / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, Д. Г. Копаница [и др.] // Вестник ТГАСУ. 2005. № 1. С. 14–22.
4. Математическое моделирование процессов динамического разрушения бетона [Текст] / Н. Н. Белов, П. В. Дзюба, О. В. Кабанцев [и др.] // Механика твердого тела. 2008. № 2. С. 124–133
5. Расчет прочности бетонных и железобетонных колонн при контактном взрыве цилиндрического заряда открытого взрывчатого вещества [Текст] / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, Д. Г. Копаница [и др.] // Вестник ТГАСУ. 2006. № 2 (13). С. 5–20.
6. Югов, Н. Т. Расчёт адиабатических нестационарных течений в трёхмерной постановке (РАНЕТ-3) : свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010611042 [Текст] / Н. Т. Югов, Н. Н. Белов, А. А. Югов ; Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва, 2010.
7. Исследование процессов деформирования и разрушения хрупких материалов [Текст] / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, С. А. Афанасьева [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. 2001. Т. 7, № 2. С. 131–142.
8. Исследование процессов динамического разрушения в мелкозернистом бетоне методом компьютерного моделирования [Текст] / Н. Н. Белов, Н. Т. Белов, С. А. Афанасьева [и др.] // Вестник ТГАСУ. 2001. № 1. С. 14–19.
9. Hamid Pesaran Behbahani. Steel Fiber Reinforced Concrete [Текст] / Hamid Pesaran Behbahani, Behzad Nematollahi // Proceedings of the International Conference on Structural Engineering Construction and Management (ICSECM 2011) (December 2011, At Kandy, Sri Lanka). 2011. P. 1–13.
10. Enrique Hernández-Montes. Limits to the strength design of reinforced concrete shells and slabs [Текст] / Juan Francisco, Carbonell-Márquez, Luisa María Gil-Martín // Engineering Structures. 2014. Vol. 61. P. 184–194.
11. Indunil, R. Effects of Blast Loading on Reinforced Concrete Facade Systems [Текст] : doctoral thesis / Rajith Indunil. – MELBOURNE, 2015. 432 p.
2. Belov, N. N.; Kabantsev, O. V.; Kopanitsa, D. G.; Yugov, N. T. Calculation and experimental method for the analysis of the dynamic strength of elements of reinforced concrete structures [Text]. Tomsk : STT, 2008. 292 p. (in Russian)
3. Belov, N. N.; Yugov, N. T.; Kopanitsa, D. G. [et. al.]. Fine fracture dynamic fracture model [Text]. In: *Bulletin of the TSUACE*. 2005. № 1. P. 14–22. (in Russian)
4. Belov, N. N.; Dzyuba, P. V.; Kabantsev, O. V. [et. al.]. Mathematical modeling of concrete dynamic destruction processes [Text]. In: *Solid mechanics*. 2008. № 2. P. 124–133. (in Russian)
5. Belov, N. N.; Yugov, N. T.; Kopanitsa, D. G. [et. al.]. Strength calculation of concrete and reinforced concrete columns in contact explosion of a cylindrical charge of an open explosive [Text]. In: *Bulletin of the TSUACE*. 2006. № 2 (13). P. 5–20. (in Russian)
6. Yugov, N. T. Calculation of adiabatic unsteady flows in three-dimensional setting (RANET-3): certificate of state registration of computer programs № 2010611042 [Text] / N. T. Yugov, N. N. Belov, A. A. Yugov; Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. Moscow, 2010. (in Russian)
7. Belov, N. N.; Yugov, N. T.; Afanasyeva, S. A. [et. al.]. Investigation of the processes of deformation and fracture of brittle materials [Text]. In: *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2001. Vol. 7, № 2. P. 131–142. (in Russian)
8. Belov, N. N.; Belov, N. T.; Afanasyeva, S. A. [et. al.]. The study of dynamic fracture processes in fine concrete using computer simulation [Text]. In: *Bulletin of the TSUACE*. 2001. № 1. P. 14–19. (in Russian)
9. Hamid Pesaran Behbahani; Behzad Nematollahi. Steel Fiber Reinforced Concrete [Text]. In: *Proceedings of the International Conference on Structural Engineering Construction and Management (ICSECM 2011)*. 2011. P. 1–13. (in English)
10. Enrique Hernández-Montes; Juan Francisco; Luisa María Gil-Martán. Limits to the strength design of reinforced concrete shells and slabs [Text]. In: *Engineering Structures*. 2014. Vol. 61. P. 184–194. (in English)
11. Indunil, R. Effects of Blast Loading on Reinforced Concrete Facade Systems [Text]: doctoral thesis. MELBOURNE, 2015. 432 p. (in English)

**Белов Николай Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет». Научные интересы: механика деформирования твердого тела. Напряженно-деформированное состояние элементов строительных конструкций.

**Буньков Виктор Евгеньевич** – магистрант по направлению «Современные технологии проектирования и строительства зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет». Научные интересы: использование современных программных комплексов в инженерной деятельности.

**Пляскин Андрей Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет». Научные интересы: механика деформирования твердого тела. Напряженно-деформированное состояние элементов строительных конструкций.

**Югов Николай Тихонович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». Научные интересы: механика деформирования твердого тела. Напряженно-деформированное состояние элементов строительных конструкций.

**Югов Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет». Научные интересы: механика деформирования твердого тела. Напряженно-деформированное состояние элементов строительных конструкций.

**Белов Микола Миколайович** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри вищої математики ФДБОУ ВО «Томський державний архітектурно-будівельний університет». Наукові інтереси: механіка деформації твердого тіла. Напружено-деформований стан елементів будівельних конструкцій.

**Буньков Віктор Євгенійович** – магістрант за напрямом «Сучасні технології проектування і будівництва будівель і споруд» ФДБОУ ВО «Томський державний архітектурно-будівельний університет». Наукові інтереси: використання сучасних програмних комплексів в інженерній діяльності.

**Пляскін Андрій Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри металевих і дерев'яних конструкцій ФДБОУ ВО «Томський державний архітектурно-будівельний університет». Наукові інтереси: механіка деформації твердого тіла. Напружено-деформований стан елементів будівельних конструкцій.

**Югов Микола Тихонович** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри математики ФДБОУ ВО «Томський державний університет систем управління і радіоелектроніки». Наукові інтереси: механіка деформації твердого тіла. Напружено-деформований стан елементів будівельних конструкцій.

**Югов Олексій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих і дерев'яних конструкцій ФДБОУ ВО «Томський державний архітектурно-будівельний університет». Наукові інтереси: механіка деформації твердого тіла. Напружено-деформований стан елементів будівельних конструкцій.

**Belov Nikolay** – D. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Higher Mathematics Department, Tomsk State University of Architecture and Building. Scientific interests: mechanics of solid body deformation. Stress-strain state of building structure elements.

**Bunkov Victor** – master's student of the direction of «Modern technologies for the design and construction of buildings and structures», Tomsk State University of Architecture and Building. Scientific interests: the use of modern software systems in engineering.

**Plyaskin Andrey** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Metallic and Wooden Structures Department, Tomsk State University of Architecture and Building. Scientific interests: mechanics of solid body deformation. Stress-strain state of building structure elements.

**Yugov Nikolay** – D. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Mathematics Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Scientific interests: mechanics of solid body deformation. Stress-strain state of building structure elements.

**Yugov Alexey** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Metallic and Wooden Structures Department, Tomsk State University of Architecture and Building. Scientific interests: mechanics of solid body deformation. Stress-strain state of building structure elements.