

УДК 624.074.43:624.012.44

**Л. Р. ПРАВУК, А. С. ВОЛКОВ, Д. С. ВОЛКОВ**

ГООУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ОБОЛОЧКИ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ КИРИШСКОЙ ГРЭС С УЧЕТОМ  
ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ РАБОТЫ**

**Аннотация.** Представлены результаты анализа сопоставительных расчетов оболочки железобетонной дымовой трубы Н = 320 м Киришской ГРЭС с учетом действительной технологической схемы работы с одним газоотводящим стволом вместо трех. Выявлено влияние начального крена, ветрового динамического воздействия и солнечной радиации на напряжения в вертикальных и горизонтальных сечениях по высоте сооружения, а также на деформации крена. Выполнена оценка степени влияния различных факторов на прочность и надежность ствола дымовой трубы.

**Ключевые слова:** дымовая труба, модальный анализ, прочность, деформации, солнечная радиация, несущая способность, надежность.

Дымовые трубы – сложные инженерные сооружения башенного типа, которые являются неотъемлемой частью технологических схем предприятий промышленности и энергетики. Данные сооружения относятся к повышенной категории ответственности, т. к. работают в условиях сложного НДС при совместном действии силовых, температурных и влажностных воздействий. Поэтому очень важно обеспечить их пригодность к нормальным условиям эксплуатации, т. к. от их долговечности зависит бесперебойная работа подключаемых к ним агрегатов, а также обеспечение тепло- и электроэнергией отдельных промышленных предприятий и целых регионов [1]. Кроме того, большинство дымовых железобетонных труб были построены в 70–80 годах прошлого века, в то время как их срок эксплуатации приближается к нормативному согласно [4]. Нормативные методики расчета дымовых труб [2, 3] основаны на расчете по допускаемым напряжениям, которые давно устарели и не позволяют достоверно оценить их НДС, в то время как в настоящее время широко применяются программные комплексы, основанные на МКЭ, которые позволяют учесть и проанализировать комплекс факторов.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Выполнить анализ НДС оболочки дымовой трубы Киришской ГРЭС высотой 320 метров с учетом особенностей действительной схемы работы с одним газоотводящим стволом вместо трех.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Расчеты НДС ствола дымовой трубы выполнены методом конечных элементов, реализованном в программном комплексе «Лири-САПР 2013». Геометрические размеры ствола принимались согласно рабочим чертежам, прочность бетона, армирование и величина крена по высоте ствола – согласно результатам натурных исследований при обследовании сооружения.

В данной работе в качестве исследуемого сооружения была проанализирована дымовая труба высотой 320 метров Киришской ГРЭС, которая находится в городе Кириши Ленинградской области. Дымовая труба введена в эксплуатацию в 1983 году.

Железобетонная оболочка высотой 312,5 м запроектирована с отметки 0,000 м до отметки 182,000 м конической формы с переменным уклоном; с отметки 182,000 м – цилиндрической формы. Наружный радиус ж/б оболочки на отметке 0,0 – 16,1 м, на отметке 312,5 – 8,6 м. Толщина стенок оболочки согласно проекту меняется от 800 мм у основания до 300 в устье, класс бетона принят марки М300 (В22.5), стержневая арматура класса АIII Ø16...25 мм шагом 200 мм для вертикальной и кольцевой арматуры.

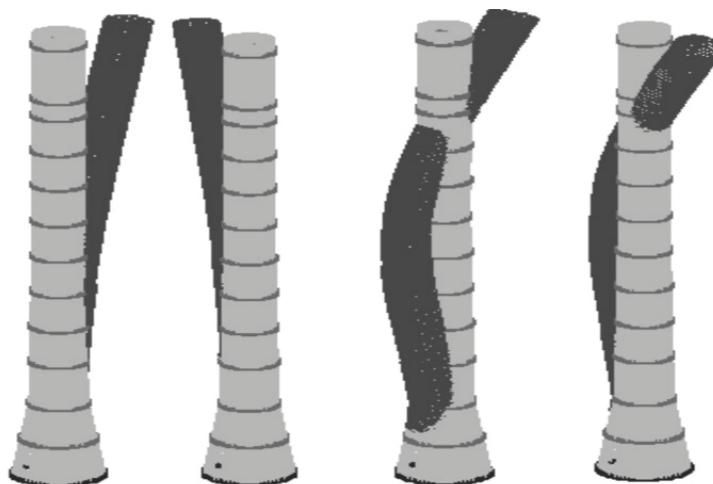
При расчетах дымовой трубы учитывались следующие нагрузки и воздействия: собственный вес ствола и технологических площадок; 2 направления ветровой нагрузки с учетом пульсационной составляющей согласно [4]; полезная нагрузка на технологические площадки; нагрузка от веса газоходов (трех или одного газохода); воздействие солнечной радиации по аналогии с результатами исследований башенной градирни Н = 150 м [6, 7].

Программа исследований включала: 1 – модальный анализ; 2 – расчет ствола согласно данным исходного проекта; 3 – то же с учетом работы с одним газоходом; 4 – расчет с учетом работы с одним газоходом и начальным креном (126,3 мм); 5 – расчет с учетом работы с 1-м газоходом, начальным креном и воздействием солнечной радиации.

Модальный анализ ствола дымовой трубы выполнен с целью определения форм и частот собственных колебаний, сопоставления с нормативным значением согласно требованиям норм [4], а также необходимости расчета на резонансное вихревое возбуждение [6]. Результаты расчетов представлены в таблице и графически на рис. 1.

**Таблица** – Периоды и частоты собственных колебаний оболочки дымовой трубы

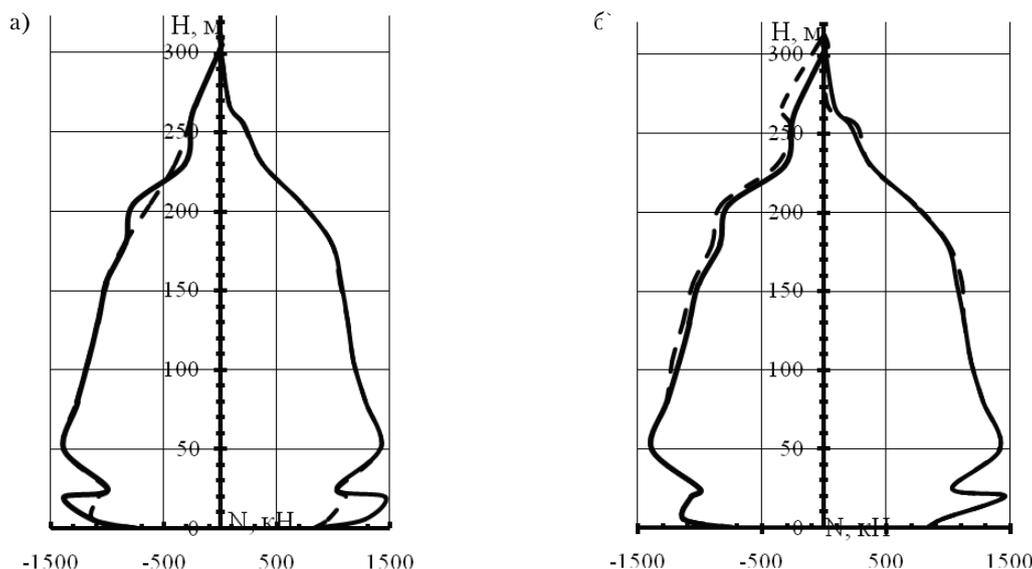
№ формы	Собств. знач.	Круг. част. (рад/с)	Частота (Гц)	Период (с)
1	0,724	1,381	0,220	4,550
2	0,718	1,392	0,222	4,512
3	0,171	5,842	0,930	1,076
4	0,169	5,905	0,940	1,064



**Рисунок 1** – Формы колебания пространственной модели железобетонной дымовой трубы Н = 320 м.

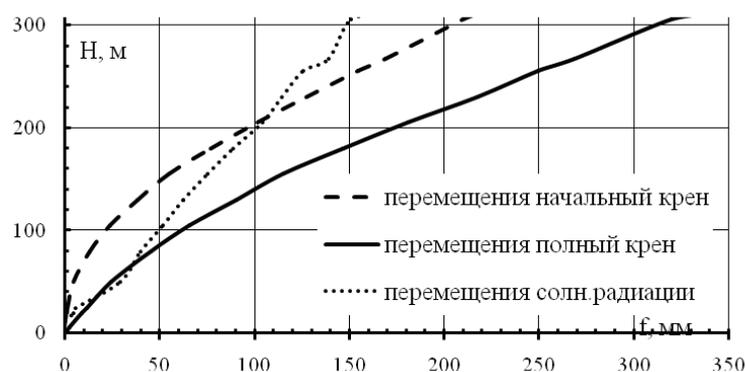
На втором этапе были выполнены сопоставительные расчеты ствола дымовой трубы с одним и с тремя газоходами, а так же с учетом начального крена и солнечной радиации. Рассматривались значения N и M в вертикальных и горизонтальных сечениях оболочки ствола, а также величины их изменений от рассматриваемых факторов влияния. Значения продольных сил N от ветрового воздействия представлены на рисунке 2.

Значения дополнительных продольных сил от действия ветра в проектной схеме работы в среднем на 3...7 % больше, чем при действительной схеме с 1-м газоходом. При этом при учете начального крена в местах концентрации напряжения на отм. +20,0 м наблюдается прирост до 20÷22 %, а в местах крепления опорных площадок до 5÷10 %, по сравнению со значениями в исходной схеме без учета крена.



**Рисунок 2** – Дополнительные продольные силы от действия ветра с наветренной и подветренной сторон: а) проектной (с тремя газоходами); б) действительной (с одним газоходом): - - - - без учета крена, - - - - с учетом начального крена.

Значения величин крена продольной оси ствола дымовой трубы от ветрового воздействия и солнечной радиации в схемах с одним (проектная) и тремя газоходами (действительная), в том числе с учетом начального крена ствола представлены на рис. 3, 4 и составляют 170, 209 и 336 мм для схемы с тремя газоходами без начального крена и с его учетом соответственно, а для схемы с одним газоходом 172, 217 и 344 мм соответственно, что меньше в среднем на 2...4 %.



**Рисунок 3** – Значения полного крена при проектной схеме работы, а также с учетом начального крена и солнечной радиации.

Значения суммарной продольной силы  $N_y$  учетом всех видов загрузок проектной и действительной схем работы с наветренной и подветренной сторон без учета и с учетом крена представлены на рис. 5 и 6.

В расчетной схеме с одним газоходом (действительная схема работы) наблюдается снижение продольной силы  $N_y$  в среднем 4÷7 % по сравнению со схемой с тремя газоходами, а в зонах сопряжения с опорными площадками наблюдается увеличение напряжений до 20 %, и до 27 % на приопорных участках на отм.+20,0 м.

Учет начального крена приводит к некоторому перераспределению напряжений  $N_y$  горизонтальных сечениях оболочки: к снижению до 3÷5% с наветренной стороны и приросту с подветренной до 8 % по сравнению со значениями без учета крена (рис. 6).

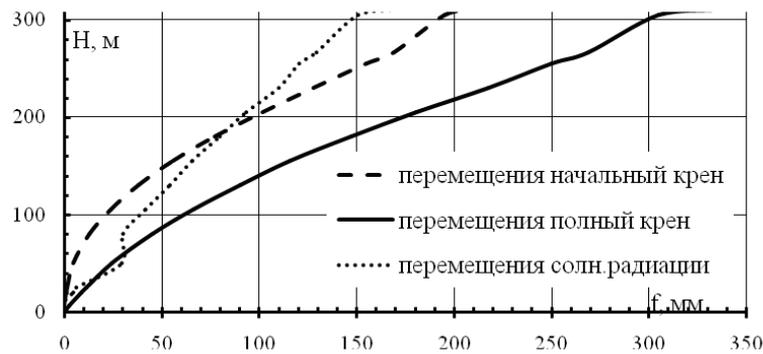


Рисунок 4 – Значения полного крена при действительной схеме работы, а также с учетом начального крена и солнечной радиации.

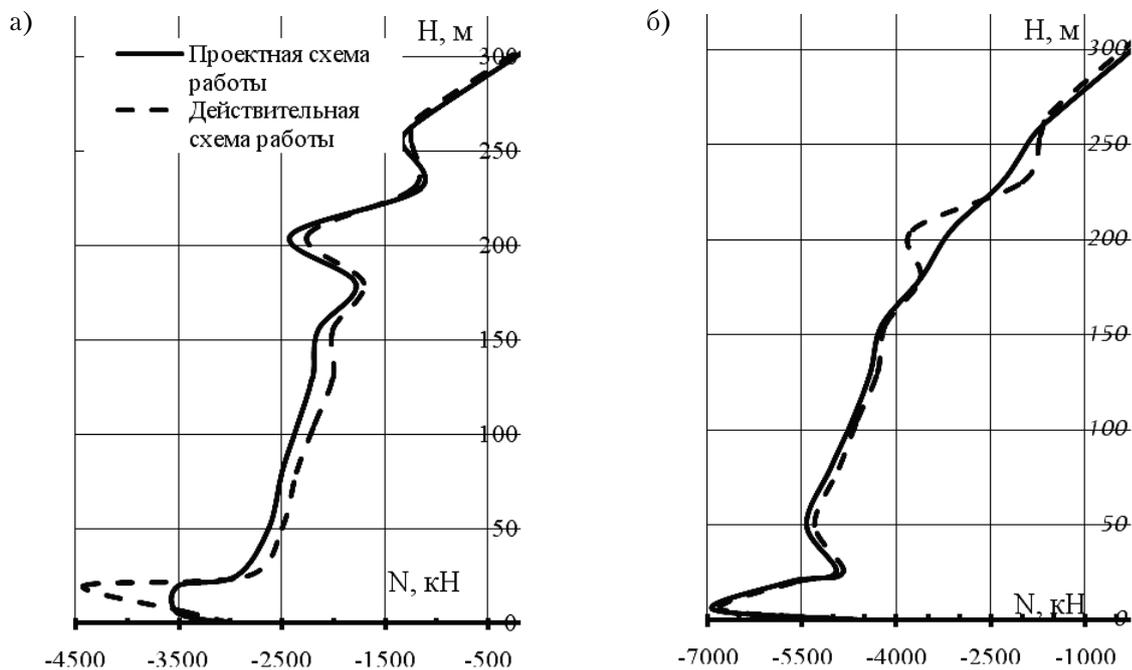


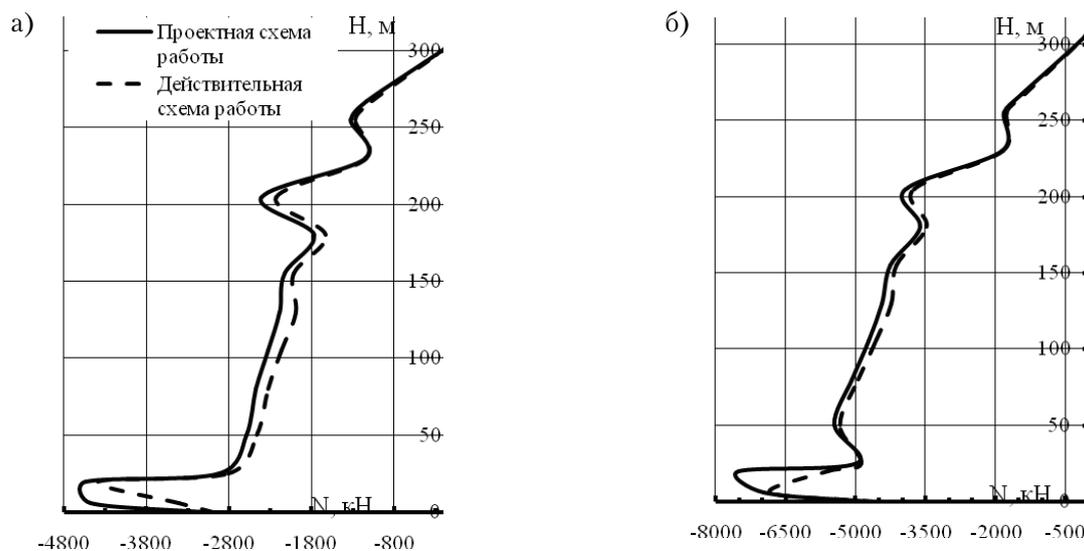
Рисунок 5 – Суммарная продольная сила от всех видов загрузок проектной и действительной схем работы без учета крена: а) с нав. стороны; б) с подв. стороны.

Воздействие солнечной радиации оказывает существенное влияние на НДС оболочки сооружения, вызванные температурным расширением материала при неравномерном нагреве: образуются значительные температурные моменты  $M_x$ , которые составляют  $-101...131$  кН/м на отм.  $+6,0$  м;  $-7,39...60,1$  кН/м на отметке  $155,0$  м;  $-24,0...53,3$  кН/м на отметке  $312,5$  м; значения дополнительных продольных сил  $N_y$  составили не более  $-299$  кН. Отмечается, что температурные напряжения существенно зависят от толщины стенок оболочки, а также перепада температур с теневой и солнечной сторон по поверхности оболочки.

Расчеты по 1-й и 2-й группам предельных состояний рассчитывались с применением ПК «LIRA», в результате которого получены следующие данные в зоне наибольших напряжений на отм.  $+20,0$  м:

- площадь рабочей вертикальной арматуры для схемы без учета крена не превышает  $\varnothing 18$  с шагом  $200$  мм ( $A_s = 23,58$  см<sup>2</sup>), а кольцевой –  $\varnothing 14$  с шагом  $200$  мм ( $A_s = 3,94$  см<sup>2</sup>), что не превышает проектных значений;

- площадь рабочей вертикальной арматуры для схемы с учетом крена не превышает  $\varnothing 18$  с шагом  $200$  мм ( $A_s = 25,99$  см<sup>2</sup>), а кольцевой –  $\varnothing 14$  с шагом  $200$  мм ( $A_s = 7,31$  см<sup>2</sup>), что не превышает проектных значений;



**Рисунок 6** – Суммарная продольная сила от всех видов загрузок проектной и действительной схем работы с учетом крена: а) с нав. стороны; б) с подв. стороны.

– площадь рабочей вертикальной арматуры для схемы с учетом крена и воздействием солнечной радиации не превышает  $\varnothing 20$  с шагом 200 мм ( $A_s = 25,94 \text{ см}^2$ ), а кольцевой –  $\varnothing 16$  с шагом 200 мм ( $A_s = 6,61 \text{ см}^2$ ), что не превышает проектных значений.

## ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ НДС дымовой трубы с учетом проектной и действительной схем работы, который показал, что в оболочке с одним газоотводящим стволом полная продольная сила меньше в среднем на 4...7 %, чем в оболочке запроектированной изначально с тремя газоотводящими стволами.
2. Выявлено, что перемещение оси ствола трубы на 2...4 % больше в действительной схеме работы (с одним газоотводящим стволом), чем в проектной.
3. Учет начального крена и солнечной радиации приводит к значительному перераспределению напряжений, а так же полей армирования и приводит к дополнительным перемещениям срединной оси ствола трубы до 172 мм, к увеличению расчетной площади рабочей арматуры в среднем на 9 %, а кольцевой на 40...47 %, по сравнению со значениями без их учета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мустаця, В. Т. Исследования температурного поля и технического состояния дымовой трубы на ТЭЦ-1 г. Кишинева [Текст] / В. Т. Мустаця, Н. А. Бутенко, А. М. Вареник // Proceedings of International Conference «Energy of Moldova – 2012. Regional Aspects of Development», Moldova, Chisinau, 4–6 October, 2012 / Vladimir Berzan, Mihai Tirsu, Mihail Sit. – Chisinau : Typography of Moldova Academy of Sciences, 2012. – С. 135–140.
2. Инструкция по проектированию железобетонных дымовых труб [Текст] / НИИЖБ ; ТЕПЛОПРОЕКТ. – М. : Госстройиздат, 1962. – 54 с.
3. ВСН 286-72. Указания по расчету железобетонных дымовых труб [Текст]. – Введ. 1972-03-01. – М. : ММСС СССР, 1972. – 64 с.
4. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы [Текст]. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. – Введ. 2011-05-20. – М. : Минрегион России, 2011. – 340 с.
5. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Текст]. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. С изменением № 1. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минстрой России, 2015. – 163 с.
6. Корсун, В. И. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных оболочек градирен [Текст] / В. И. Корсун, А. Н. Мащенко, Ю. Ю. Калмыков // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2001. – Вип. 2001-5(30) : Будівельні конструкції. Будівлі та споруди. – С. 201–205.
7. Корсун, В. И. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов железобетонных сооружений при силовых и температурных воздействиях [Текст] / В. И. Корсун // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2000. – Вип. 2000-1(21) : Будівельні конструкції. Будівлі та споруди. – С. 99–107.

Получено 18.04.2017

Л. Р. ПРАВУК, А. С. ВОЛКОВ, Д. С. ВОЛКОВ  
АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОБОЛОНКИ  
ДИМОВОЇ ТРУБИ КІРІШСЬКОЇ ГРЕС З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ  
ДІЙСНОЇ РОБОТИ СХЕМИ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Представлені результати аналізу для порівняння розрахунків залізобетонної оболонки димової труби  $H = 320$  м Кірішської ГРЕС з урахуванням дійсної технологічної схеми роботи з одним газовідвідним стовбуром замість трьох. Виявлено вплив початкового крену, вітрового динамічного впливу, сонячної радіації на напруження на вертикальних та горизонтальних перерізах по висоті споруди, а також на деформації крену. Виконано оцінку ступеня впливу різних факторів на міцність і надійність стовбура димової труби.

**Ключові слова:** димова труба, модальний аналіз, міцність, деформації, сонячна радіація, несуча здатність, надійність.

LIUDMILA PRAVUK, ANDREI VOLKOV, DMITRIY VOLKOV  
ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SHELL CHIMNEY  
KIRISHI POWER PLANT WITH THE FEATURES OF VALID SCHEMES OF  
WORK

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** It has been represented results of the comparative analysis of calculations of a shell of reinforced concrete chimney  $H = 320$  m Kirishskaya GRES taking into account the actual technological schemes of work with 1 suction trunk instead of 3 the effect of the initial roll, dynamic wind effects and solar radiation on the stresses in the vertical and horizontal sections at the height of the building, as well as on the deformation of the roll. It has been performed assessment of the degree of influence of various factors on the durability of the barrel of the chimney.

**Key words:** chimney, modal analysis, strength, deformation, solar radiation, bearing capacity, reliability.

**Правук Людмила Руслановна** – студентка ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: анализ напряженно-деформированного состояния дымовых труб с учетом фактической схемы работы.

**Волков Андрей Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных конструкций ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование прочностных и деформативных свойств конструкций их модифицированного высокопрочного бетона, оценка технического состояния и проектирование железобетонных конструкций.

**Волков Дмитрий Сергеевич** – студент ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: оценка технического состояния и проектирование железобетонных конструкций.

**Правук Людмила Русланівна** – студентка ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: аналіз напружено-деформованого стану димових труб з урахуванням фактичної схеми роботи.

**Волков Андрій Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних конструкцій ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження міцнісних та деформативних властивостей конструкцій з модифікованих високоміцних бетонів, оцінка технічного стану і проектування залізобетонних конструкцій.

**Волков Дмитро Сергійович** – студент ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: оцінка технічного стану та проектування залізобетонних конструкцій.

**Pravuk Liudmila** – student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: analysis of stress-strain state of chimneys based on the actual circuit operation.

**Volkov Andrei** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Reinforced Concrete Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: determination of strength and strain properties of modified high strength concrete structures, estimation of technical state and design of reinforced concrete constructions.

**Volkov Dmitriy** – student, Donbas National Academy of Construction and Architecture. Scientific interests: assessment of technical condition and design of reinforced concrete structures.