УДК 69.057.5:624.94

# К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ФОРМЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОПАЛУБОК ИЗ ИМПРЕГНИРОВАННЫХ ТКАНЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

# TO THE QUESTION OF ASSESSMENT OF PNEUMATIC SHEATHINGS OF IMPREGNATED FABRIC MATERIALS

*В.Я. МИЩЕНКО, А.Н. ТКАЧЕНКО, Д.А. КАЗАКОВ*
*V.YA. MISHCHENKO, A.N. TKACHENKO, D.A. KAZAKOV*

**(Воронежский государственный архитектурно-строительный университет)**
**(Voronezh State University of Architectural and Civil Engineering)**
E-mail: oseun@ya.ru

***В статье проведен анализ конструктивно-технологических отличий в изготовлении и использовании воздухоопорных и пневмокаркасных опалубок при возведении монолитных конструкций. Установлены наиболее рациональные области применения пневмоопалубок с позиции учета их деформативности. Подчеркнуто, что для более широкого внедрения предложенной технологии в практику строительства необходимо более углубленное изучение ее параметров.***

***In the article the analysis of constructive-technological differences in the production and use of compressed-air supported and inflatable formwork during the construction of monolithic structures. The most rational fields of application of pnevmoapparat position with regard to their deformability. Stressed that for wider implementation of the proposed technology in construction practices required more in-depth study of its parameters.***

**Ключевые слова: воздухоопорная опалубка, пневмокаркасная опалубка, импрегнированные тканевые материалы, деформативность, шовные соединения.**

**Keywords: inflatable formwork, inflatable formwork, impregnated fabric materials, deformation, joints.**

Повышение эффективности монолитного строительства определяется не только снижением его стоимости, но и уменьшением трудозатрат.

Важным резервом сокращения трудоемкости выступают опалубочные работы. Применение высокоэффективных и принципиально новых опалубочных систем в комплексе с современными средствами механизации и автоматизации бетонных работ позволяет в ряде случаев сократить сроки строительства, снизить его материалоемкость и трудоемкость. Одним из таких видов опалубок являются пневматические. Наиболее широкое распространение получили воздухоопорные и пневмокаркасные опалубочные системы.

Воздухоопорные опалубки изготавливают из импрегнированных тканевых материалов, как правило, целиком на все сооружение. Опалубка закрепляется на фундаменте и приводится в рабочее положение путем закачивания воздуха в пространство между грунтом и мягкой оболочкой. Невозможность полной герметизации стыка опалубки с фундаментом приводит к необходимости непрерывной подачи воздуха во внутренний объем в течение всего времени ее функционирования. Воздухоопорные оболочки применяются для возведения только монолитных оболочек вращения.

Пневмокаркасные опалубки выполняются из тех же тканевых материалов в виде сгруппированных на заводе или одиночных пневмоцилиндров, либо пневмоарок, рабочее состояние которых обеспечивается созданием избыточного давления воздуха внутри пневмоцилиндров или пневмоарок. Они более деформативны, чем воздухоопорные опалубки, и поэтому используются при значительно больших давлениях воздуха, незначительных пролетах и небольших эксплуатационных воздействиях.

В изготовлении пневмокаркасные опалубки менее технологичны, хотя могут применяться для возведения как монолитных оболочек вращения, так и оболочек иных форм. Кроме того, возможны комбинации обоих видов между собой или с традиционными жесткими элементами [1].

Первоначально пневматические опалубки обоих типов планировали использовать для возведения фибробетонных конструкций. Однако отсутствие в то время на рынке строительных материалов необходимых компонентов для дисперсного армирования привело к отказу от фибробетона и замене его на железобетон и армоцемент. Увеличилась приведенная толщина монолитных оболочек, а следовательно, и эксплуатационные нагрузки на опалубку. В этих условиях более податливые пневмокаркасные опалубки не выдержали конкуренции с воздухоопорными и были вытеснены с рынка. Воздухоопорные опалубки еще некоторое время использовались для возведения монолитных сводчатых сооружений. Появление в 90-х г. более экономичных металлических быстровозводимых складских зданий привело к отказу от использования воздухоопорных опалубочных систем.

В настоящее время создались благоприятные предпосылки применения пневматических опалубок на новом инновационном уровне. Этому способствуют успехи в разработке новых импрегнированных тканей, высокотехнологичных машин для раскроя и соединения тканевых полотнищ, материалов и механизмов для изготовления, транспортирования и нанесения твердеющих смесей. Так, решение вопросов снижения трудоемкости и стоимости выполнения арматурных работ видится в применении фибробетонных смесей на базе широкого выбора, представленного на строительном

рынке металлических, стеклянных, доломитовых и тому подобных фибр.

Иначе будет решаться вопрос выбора вида пневматической опалубочной системы. Значительный технологический скачок вперед в изготовлении пневматических конструкций из современных материалов способствует появлению недорогих воздухонаполняющих опалубок практически любой сложности. В связи с этим, видимо, целесообразным будет использование отдельных пневмокаркасных арочных модулей, из которых в построечных условиях собирается опалубка для бетонирования части конструкции с дальнейшей перестановкой на другие захватки. Удельный расход тканевого материала у такой опалубки значительно ниже удельного расхода у воздухоопорных формующих систем, изготовленных на все сооружение целиком. Снижается трудоемкость выполнения опалубочных работ, так как нет необходимости в обеспечении воздухонепроницаемости соединения опалубки с фундаментом и в устройстве шлюзовых камер, что присутствует при эксплуатации воздухоопорных опалубок.

Принимая во внимание высокую герметичность пневмокаркасных модулей, можно прогнозировать значительное снижение стоимости эксплуатации воздухоподающего оборудования.

Следует также отметить, что применение фибробетона при возведении сводчатых конструкций на пневматической опалубке способствует значительному снижению величины действующей на нее эксплуатационной нагрузки. Это обстоятельство является очень важным, если не определяющим, при использовании более податливых, чем воздухоопорные, пневмокаркасных опалубочных систем. Предварительные расчеты технико-экономической эффективности возведения фибробетонных сводов на пневмокаркасных опалубках подтверждают их конкурентоспособность в сравнении со строительством быстровозводимых металлических ангаров.

Несмотря на приведенную аргументацию, существующий практический опыт основывается, как правило, на возведении железобетонных и армоцементных сводчатых конструкций на опалубках воздухоопорного типа.

Технология применения пневмокаркасных опалубок при возведении фибробетонных сводов изучена фрагментарно и требует проведения комплекса экспериментально-теоретических исследований.

Известно, что основным требованием, предъявляемым к опалубочным системам, является их геометрическая неизменяемость. Поэтому изучение формообразования и формоизменения "мягких" пневмокаркасных опалубок имеет первостепенное значение. В разные периоды исследователями применялись различные подходы к вопросу теоретического описания напряженно-деформированного состояния пневматических конструкций. Основы теоретического расчета мягких оболочек заложены в работах [2…4]. Они базировались на линейной безмоментной теории. В рамках этой схемы в большинстве случаев не удавалось определить изменение формы оболочки и учесть влияния изменения геометрии на напряженное состояние.

Наиболее полное описание поведения конструкций связано с теорией больших деформаций мягких оболочек, учитывающей нелинейность характеристик материала, и справедливой при перемещениях и деформациях, не ограниченных по величине.

Однако расчетные схемы, в которых используются строгие теории при проведении практических расчетов, оказываются в большинстве случаев весьма сложными. Многие конструкции, кроме того, работают в условиях, при которых большие деформации и большие изменения геометрии недопустимы. К ним, в частности, относятся все пневматические опалубки.

Наиболее приемлемой при расчетах оказывается приближенная, так называемая техническая теория мягких оболочек, справедливая при малых деформациях и использующая линеаризацию при составлении системы уравнений. Являясь как бы первым приближением общей теории, она в то же время учитывает наиболее существенные свойства мягких оболочек и позволяет получить достоверные решения. На ее основе по-

строен ряд алгоритмов, созданы программы расчета сложных конструкций [5].

Напряженно-деформированное состояние пневмокаркасной опалубки во многом определяется материалом оболочки и возникающими в нем усилениями. Импрегнированные тканевые материалы представляют собой композиты, обладающие свойствами упруговязкопластического тела. Учет этих свойств крайне сложен, но позволяет в значительной степени повысить точность оценки деформативности пневмоопалубок. Теоретические исследования в этом направлении находятся в начальной стадии. Задача осложняется многообразием эксплуатационных воздействий, вызывающих деформации пневмоопалубки. Остановимся на одном из них.

Особенностью работы пневматической опалубки является требование по обеспечению такой деформативности ее элементов, при которой возводимая на ней конструкция не претерпевала бы сверхнормативных перемещений в процессе твердения. При этом на указанную деформативность оказывают влияние не только конструкционные свойства материала оболочки, но и присущие ее изготовлению соединения (швы) [6].

Наиболее важным моментом работы пневмокаркасной опалубки является ее конечное состояние, которое характеризуется приложением всего комплекса воздействий, включая внешнюю (эксплуатационную) нагрузку. Рабочим для данной системы будет такое состояние, при котором суммарное перемещение точек палубы от всех воздействий не будет превышать нормативно-допустимого значения.

На основании вышеизложенного была разработана механико-аналитическая модель деформированного состояния цилиндрической пневмоопалубки, снабженной конструктивным соединением (рис. 1 – расчетная схема цилиндрической пневмоопалубки).

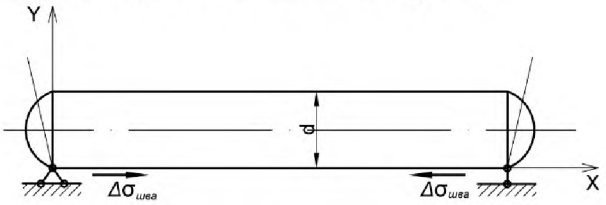


Рис. 1

В данной схеме влияние шва учитывается введением дополнительных усилий $\Delta\sigma_ш$, возникающих от несоразмерности деформативных характеристик материала оболочки и соединения:

$$\Delta\sigma_ш = \sigma_ш' - \sigma_м, \qquad (1)$$

где $\sigma_м$ – усилие в материале пневмоопалубки; $\sigma'_ш$ – условное усилие в шве, при котором деформации шва будут равны деформациям в материале от действия усилий $\sigma'_м$, то есть

$$\varepsilon_м(\sigma_м) = \varepsilon_ш(\sigma_ш), \qquad (2)$$

где $\varepsilon_м$ – относительные деформации материала опалубки (импрегнированной ткани); $\varepsilon_ш$ – относительные деформации шва.

Дальнейшая реализация модели предполагает выполнение исследований деформативных характеристик тканевых материалов и швов. Ввиду отсутствия соответствующих методик проведения испытаний был разработан и запатентован способ оценки растяжимости шовных соединений [7].

Сущность заявляемого способа заключается в одновременном приложении растягивающих усилий в двух взаимоперпендикулярных направлениях к тестовому комплекту образцов специальной формы и измерении деформаций. При этом используется два типа образцов:

– эталонный, выполненный из исследуемой импрегнированной ткани без соединения в соответствии с указаниями [8] (рис. 2-а);

– опытный, выполненный аналогично эталонному в части ориентации основы и утка и габаритных размеров и оснащенный соединением двух Т-образных деталей по оси образца в одном из двух взаимоперпендикулярных направлений (рис. 2-б).

На рис. 2 представлены образцы для проведения испытаний импрегнированной ткани на двухосное растяжение: 1 – шовное соединение; 2 – Т-образные детали опытного образца; 3 – зона крепления образца; 4 – марка для определения деформаций.

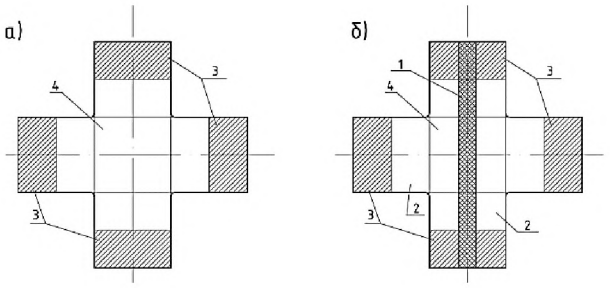


Рис. 2

Особенность конструкции заявленного опытного образца заключается в наличии соединения двух Т-образных деталей. Закрепление образца при создании напряженно-деформированного состояния должно обеспечивать равномерное распределение усилий по всей ширине зоны крепления. Измерение деформаций проводится по специальной марке, выполненной в виде квадрата и нанесенной в центральную часть образца. При этом отслеживаются взаимные перемещения границ марки по осям симметрии образца, например, фотограмметрическими методами.

Следует отметить, что предлагаемая методика в равной степени может быть применена к различным типам соединения импрегнированных тканей: прошивным, клеевым, клеепрошивным или сварным (рис. 3).

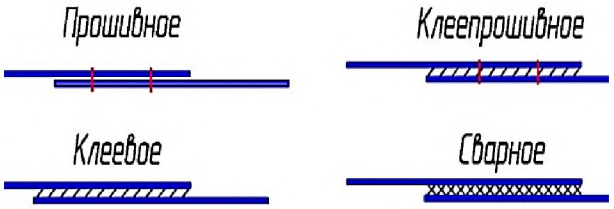


Рис. 3

Испытания по определению деформативности образца соединения импрегнированной ткани выполняются в определенной последовательности.

На первом этапе производится загружение образцов начальной нагрузкой, составляющей не более 10% от разрывного усилия, с последующим выдерживанием в течение срока, необходимого для исключения явления гистерезиса, присущего импрегнированным тканям.

Далее выполняется испытание эталонного и опытного образцов на двухосное растяжение.

На деформативные характеристики образца соединения импрегнированной ткани оказывают влияние две группы факторов:

– первая связана с наличием соединения, которое выступает более жестким элементом образца, снижающим его деформативность;

– вторая – с рассечением образца соединения на детали меньшей ширины, нежели его бесшовная часть, и нахлестом деталей, что делает образец более деформативным.

В связи с наличием влияния указанных факторов выполняется оценка деформаций опытного образца по приведенным, не таким, как у эталонного, усилиям, обеспечивающим эквивалентность их напряженно-деформированных состояний.

Поскольку совокупная ширина деталей опытного образца больше, чем ширина эталонного, к нему следует прилагать большую нагрузку, чтобы обеспечить равные погонные усилия. Эквивалентную эталонной нагрузку, прикладываемую к опытному образцу, получают путем умножения эталонных растягивающих усилий на коэффициент k, определяемый из соотношения значений относительных деформаций исследуемых образцов при условии равенства распределенных по ширине образца усилий:

$$k = \frac{\varepsilon^{эт}\left(\sigma^{эт}_{осн};\sigma^{эт}_{ут}\right)}{\varepsilon^{оп}\left(\sigma^{оп}_{осн};\sigma^{оп}_{ут}\right)}$$

при

$$\sigma^{эт}_{осн} = \sigma^{оп}_{осн}$$

и

$$\sigma^{эт}_{ут} = \sigma^{оп}_{ут}, \qquad (3)$$

где $\varepsilon^{эт}$ – относительные деформации эталонного образца при усилиях, прилагаемых к нему по основе $\sigma^{эт}_{осн}$ и утку $\sigma^{эт}_{ут}$; $\varepsilon^{оп}$ – относительные деформации опытного образца при усилиях, прилагаемых к нему по основе $\sigma^{оп}_{осн}$ и утку $\sigma^{оп}_{ут}$.

Реализация предлагаемого способа позволяет производить учет влияния соединения при оценке деформаций образца импрегнированной ткани при двухосном неразрушающем загружении с целью определения деформативных характеристик пневматической конструкции в целом.

Нормальные характеристики (зависимость "напряжение – деформация" при двухосном растяжении) используют для уточнения теоретических моделей работы пневмоопалубки с шовным соединением.

В случае сверхнормативного изменения формы влияние конструкционных соединений (швов) может быть компенсировано при раскрое оболочки в зависимости от технологии кроя и устройства соединения, геометрических размеров полотнища применяемой импрегнированной ткани. Для этого рекомендуются следующие решения (рис. 4 – конструкционные решения, компенсирующие влияния швов):

– контршов – дополнительное соединение, расположенное диаметрально противоположно конструкционному;

– фальшшов – введение дополнительной накладки, устраиваемой аналогично конструкционному шву и располагаемой диаметрально противоположно ему.

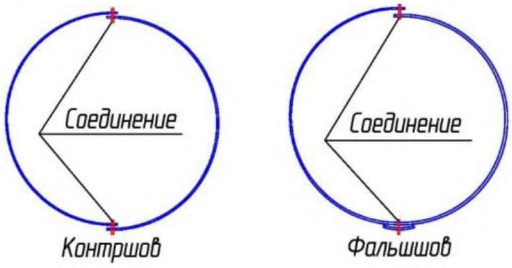


Рис. 4

Полученные экспериментально-теоретические модели нуждаются в дополнительной их проверке в натурных условиях. За весь период развития пневматических конструкций для этих целей применялись различные подходы, среди которых можно выделить:

– измерение деформаций мягких оболочек при помощи прогибомеров;

– тензометрическое измерение деформаций материала оболочки опалубки;

– фотограмметрический метод оценки деформированного состояния конструкции опалубки;

– динамическое отслеживание изменений формы методом хронофотографии.

При использовании прогибомеров измеряется величина перемещения элемента, закрепленного на деформирующемся участке конструкции, относительно неподвижного элемента. Определение кинетики развития деформаций осуществляется путем многократных их измерений через определенные интервалы времени в зависимости от скорости развития деформации. Современные прогибомеры позволяют проводить измерения с точностью до 0,01 мм. Основной недостаток такого подхода заключается в том, что в случае пневматических конструкций имеют место локальные изменения формы оболочки (местные продавливания и выпирания), возникающие по причине как высокой деформативности материала опалубки, так и из-за "мягкости" конструкции в целом.

Метод тензометрии основан на измерении приращения электрического сопротивления проводника (полупроводника), деформируемого совместно с деталью, к которой он механически прикреплен (приклеен). С помощью тензодатчика измеряемые величины преобразуются в электрический сигнал, направляемый после этого аппаратуре, которая занимается его регистрацией. При всех достоинствах данного метода, характеризуемого прежде всего относительной простотой и высокой точностью, в случае с высокодеформативными материалами, из которых изготавливаются пневматические конструкции и которые не подчиняются закону Гука, он зачастую оказывается малоэффективным.

Фотограмметрическим методом определяются координаты точек исследуемой конструкции измерением на фотоснимках и сравниванием с исходными. Этот способ применяется для определения деформаций в одной плоскости, а стереофотограмметрический – по трем координатам. Фотограмметрический метод определения деформаций целесообразно применять при большом количестве точек, измерения для

которых могут выполняться одновременно, что дает возможность оценить их взаимную деформацию во времени. Снимки измеряют на стереокомпараторах различных типов. Так, применение стереокомпаратора 1818 производства компании Карл Цейс Йена обеспечивало точность измерения координат по маркированным точкам порядка 0,003…0,005 мм. Недостатком фотограмметрического способа является сравнительная сложность, высокая стоимость приборов и значительная трудоемкость обработки результатов.

Хронофотография – это киносъемка или фотосъемка движущегося объекта через равные малые промежутки времени. Определение исходных данных движения объекта измерений – пути и времени – ведется по кадрам кинограмм посредством ряда приборов, значительно облегчающих и уточняющих измерения и расчеты. Очевидно, этот способ является развитием фотограмметрии применительно к наблюдению за процессами и позволяет отслеживать изменения взаиморасположения множества точек за определенный период. Также от фотограмметрии киносъемка унаследовала и ее недостатки.

По мере развития и применения прецизионных приборов и компьютерных технологий становится возможным использование следующих методов измерения деформаций:

– применение волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОДД), которые являются более современными аналогами традиционных тензодатчиков и имеют ряд преимуществ: высокая точность, нечувствительность к электромагнитным излучениям радиочастотного диапазона и долговечность;

– использование лазерного 3D-сканирования – технологии, которая позволяет создать цифровую трехмерную модель объекта, представив его набором точек с пространственными координатами, и основана на использовании новых геодезических приборов – лазерных сканеров, измеряющих координаты точек поверхности объекта с высокой скоростью, порядка нескольких десятков тысяч точек в секунду, с точностью до 2 мм на дистанции 50 м. Полученный набор точек впоследствии может быть представлен в виде трехмерной модели объекта, плоского чертежа, набора сечений, поверхностей и т.д.

В заключение можно отметить, что до полной разработки технологических параметров возведения монолитных конструкций на пневмокаркасных опалубках еще далеко. Открытыми остаются многие вопросы, связанные с обеспечением стабильности формы пневмоопалубки. В частности, значительный интерес представляет разработка простого и точного инженерного аппарата, позволяющего прогнозировать геометрические и технологические параметры применения пневматических опалубок при различных сочетаниях эксплуатационных воздействий.

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Казаков Д.А., Ефремов Е.Г.* Исследование деформационных свойств пневматических опалубочных систем комбинированного типа // Мат. XVII Междунар. заочн. научн.-практ. конф.: Технические науки от теории к практике. – Часть II. – Новосибирск: Изд. "СибАК", 2013. С.13…21.

2. *Отто Ф., Тростель Р.* Пневматические строительные конструкции. – М.: Стройиздат, 1967.

3. *Ермолов В.В.* Пневматические здания и сооружения. – М.: Стройиздат, 1980.

4. *Друзь И.Б., Друзь Б.И.* Некоторые схемы расчетов пневмобалок и пневмопанелей. – Владивосток: Мор. гос. ун-т им. адм. Г.И. Невельского, 2010.

5. *Усюкин В.И., Ермолов В.В., Брэд У.Ч., Бубнер Э. и др.* Техническая теория мягких оболочек и ее применение для расчета пневматических конструкций / Пневматические строительные конструкции / Под общ. ред. В.В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983.

6. *Ткаченко А.Н., Казаков Д.А.* Влияние конструкционных швов на формообразование цилиндрического пневмокаркасного опалубочного модуля из импрегнированных тканей // Мат. VI Междунар. заочн. научн.-практ. конф.: Научная дискуссия: вопросы технических наук. – М.: Изд. "Международный центр науки и образования", 2013. С.78…84.

7. Пат. №2564876 Российская Федерация МПК[7] G01N 1/28 и G01N 3/08. Способ испытания соединений импрегнированной ткани и образец для его осуществления / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Воронежский ГАСУ. – №2013135617/13 заявл. 27.07.2013; опубл. 10.10.2015, Бюл. №28.

8. ГОСТ 16971–71. Швы сварных соединений из винипласта, поливинилхлоридного пластиката и полиэтилена. Методы контроля качества. Общие требования.

9. *Tkachenko A.N.* Pneumatik Shuttering Systems: Researches and Use // Scientifik Israel-Technologikal Advanteges" "Scientifik Herald" of Voronezh State Universiti of Architecture and Civil Engineering. – Vol. 11, №2, 2009.

10. *Tkachenko A.N.* Pneumatik Shuttering Systems: Researches and Use // Construction and Arhcitecture" "Scientifik Israel-Technologikal Advanteges" "Scientifik Herald" of Voronezh State Universiti of Architecture and Civil Engineering. – Issue №1, 2009.

R E F E R E N C E S

1. Kazakov D.A., Efremov E.G. Issledovanie deformacionnyh svojstv pnevmaticheskih opalubochnyh sistem kombinirovannogo tipa // Mat. XVII Mezhdunar. zaochn. nauchn.-prakt. konf.: Tehnicheskie nauki ot teorii k praktike. – Chast' II. – Novosibirsk: Izd. "SibAK", 2013. S.13…21.

2. Otto F., Trostel' R. Pnevmaticheskie stroitel'nye konstrukcii. – M.: Strojizdat, 1967.

3. Ermolov V.V. Pnevmaticheskie zdanija i sooruzhenija. – M.: Strojizdat, 1980.

4. Druz' I.B., Druz' B.I. Nekotorye shemy raschetov pnevmobalok i pnevmopanelej. – Vladivostok: Mor. gos. un-t im. adm. G.I. Nevel'skogo, 2010.

5. Usjukin V.I., Ermolov V.V., Brjed U.Ch., Bubner Je. i dr. Tehnicheskaja teorija mjagkih obolochek i ee primenenie dlja rascheta pnevmaticheskih konstrukcij / Pnevmaticheskie stroitel'nye konstrukcii / Pod obshh. red. V.V. Ermolova. – M.: Strojizdat, 1983.

6. Tkachenko A.N., Kazakov D.A. Vlijanie konstrukcionnyh shvov na formoobrazovanie cilindricheskogo pnevmokarkasnogo opalubochnogo modulja iz impregnirovannyh tkanej // Mat. VI Mezhdunar. zaochn. nauchn.-prakt. konf.: Nauchnaja diskussija: voprosy tehnicheskih nauk. – M.: Izd. "Mezhdunarodnyj centr nauki i obrazovanija", 2013. S. 78…84.

7. Pat. №2564876 Rossijskaja Federacija MPK7 G01N 1/28 i G01N 3/08. Sposob ispytanija soedinenij impregnirovannoj tkani i obrazec dlja ego osushhestvlenija / zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO Voronezhskij GASU. – №2013135617/13 zajavl. 27.07.2013 ; opubl. 10.10.2015, Bjul. №28.

8. GOST 16971–71. Shvy svarnyh soedinenij iz viniplasta, polivinilhloridnogo plastikata i polijetilena. Metody kontrolja kachestva. Obshhie trebovanija.

9. Tkachenko A.N. Pneumatik Shuttering Systems: Researches and Use // Scientifik Israel-Technologikal Advanteges" "Scientifik Herald" of Voronezh State Universiti of Architecture and Civil Engineering. – Vol. 11, №2, 2009.

10. Tkachenko A.N. Pneumatik Shuttering Systems: Researches and Use // Construction and Arhcitecture" "Scientifik Israel-Technologikal Advanteges" "Scientifik Herald" of Voronezh State Universiti of Architecture and Civil Engineering. – Issue №1, 2009.

Рекомендована кафедрой технологии и организации строительства, экспертизы и управления недвижимостью. Поступила 18.08.17.