

Для сравнения положений модели были использованы опытные данные [8].

Сравнение опытных данных с данными, получаемыми в результате расчетов по зависимости (15) для случая объемного армирования фиброй представлено на рис. 4.

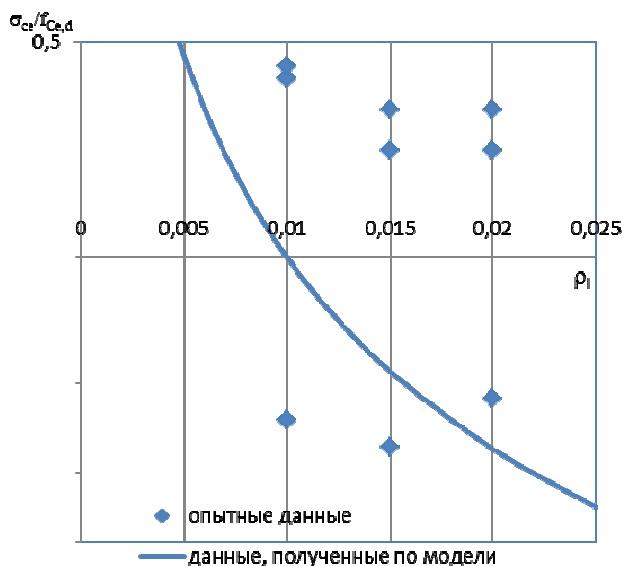


Рисунок 4 – Сравнение опытных данных с прогнозируемыми по модели

Как видно из представленной графической интерпретации зависимостей, невзирая на достаточно обширный разброс экспериментальных данных, модель достаточно адекватно описывает влияние изменения косвенного процента армирования фиброй на величину самонапряжения в условиях объемного ограничения деформаций.

Заключение. К числу несомненных преимуществ модели расширяющегося бетонного композита следует отнести ее универсальность. Данная модель дает возможность рассчитать итоговые деформации и напряжения для различных условий ограничения (модель позволяет получать адекватные характеристики расширения

как в условиях одноосного ограничения [6], так для плоского и объемного ограничений). Кроме того, модель РБК более гибко реагирует на изменение входных параметров и позволяет оценить влияние структуры композита на итоговые связанные деформации.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красильников, К.Г. Природа объемных деформаций при твердении расширяющихся цементов / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина // Физико-химические исследования цементного камня и бетона: сб. тр. / Под ред. А.Е. Десова. – Москва: Стройиздат, 1972. – С. 4–20.
2. Литвер, С.Л. Самонапряженный железобетон и его применение в строительстве // Опыт и перспективы применения бетонов на напрягающем цементе в строительстве: материалы научн.-техн. совещ. / Центр. Росс. Дом знаний. – М., 1992. – С. 12–17.
3. Михайлов, В.В. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер – М.: Стройиздат, 1974. – 389 с.
4. Панченко, А.И. Критерии оценки расширяющихся вяжущих и бетонов на их основе / А.И. Панченко, Г.В. Несветаев // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений: сб. тр. / Под ред. Н.П. Блещика и В.В. Тура. – Брест: БПИ, 1998. – С. 179–190.
5. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. – Брест: Изд. БПИ, 1998. – 243 с.
6. Павлова, И.П. Приложение теории эффективной среды к моделированию жесткостных характеристик бетонного композита / И.П. Павлова, В.В. Тур // Строительная наука и техника. – Минск, 2005. – № 3. – С. 3–8.
7. Garboczi, E.J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations / E.J. Garboczi, J.G. Berryman // Mechanics of Materials, 2001. – P. 455–470.
8. Бондаренко, В.М. Сопротивление осевому сжатию сталебрун бетонных элементов круглого сечения с ядром из напрягающего бетона : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.М. Бондаренко. – Брест, 2010. – 148 с.

Материал поступил в редакцию 30.01.2018

PAULAVA I.P. Prediction self-stress magnitude in expansive fiberconcrete

In present paper expansive concrete composite model for prediction self-stress magnitude in triaxial restriction conditions are presented. Main model conditions on the basis of Effective Medium Theory and Solidification Theory are founded. In work are considered probabilities of expansive sulfo-aluminate type additive and basalt fiber partnering for chemical prestressing and strength concrete properties increasing.

Use of basalt fiber, introduction of which in minimal amount due to disintegration on monofilament with great specific surface lead to concrete composite strength increase course of 3-D structure reinforcement effect and changing fracture toughness. Amount of expansive additive assign proceeding from achievement of necessary self-stress level. Maximum amount of basalt fiber limit to 5% cause to prevent percolation effect, but to provide formation of filament spatial framework. Proposed model allow with adequate degree of accuracy prognoses main characteristic of self-stressed concrete – self-stressing.

УДК 624.04

Найчук А.Я.

О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ И МАТЕРИАЛОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ

Введение. Общеизвестно, что древесина и материалы на ее основе относятся к материалам, прочность которых зависит не только от направления действия нагрузки по отношению к направлению волокон, но и от продолжительности ее действия. Принятая в нормах [1–3] методика определения расчетных значений прочности

базируется на фундаментальных исследованиях [4–9] изменения длительной прочности древесины и материалов на ее основе. Несмотря на огромный комплекс проведенных исследований и полученных при этом результатов, они не в полной мере охватывают все случаи, имеющие место в реальных конструкциях. Так, например,

Найчук Анатолий Яковлевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

при определении расчетных значений прочности древесины в нормах [1–3] не учитывается разный темп относительного снижения прочности материала во времени под нагрузкой для случаев растяжения вдоль и поперек волокон древесины, несмотря на результаты, полученные экспериментальным путем. Таким образом, определению зависимостей изменения длительной прочности древесины и материалов на ее основе в зависимости от вида напряженного состояния является актуальной задачей, решение которой будет способствовать повышению надежности деревянных конструкций и их экономической эффективности при строительстве зданий и сооружений. Вместе с тем, решение данной задачи должно осуществляться неотъемлемо с учетом величины воздействий, их сочетаний и продолжительности действия на конструкцию.

Модели длительной прочности древесины. В настоящее время существует множество моделей длительной прочности древесины, которые положены в основу определения расчетных значений прочности древесины и материалов на ее основе.

Так, согласно [1], расчетное значение прочности древесины и материалов на ее основе f_d по направлению главных осей упругой симметрии определяется по формуле (1).

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M}, \quad (1)$$

где f_d – расчетное значение прочности древесины; k_{mod} – коэффициент модификации, учитывающий эффекты длительности действия нагрузки и температурно-влажностные условия эксплуатации конструкции; f_k – характеристическое значение прочности материала; γ_M – частный коэффициент свойств материала и изделий.

Согласно [3] расчетное значение сопротивления (прочности) древесины вдоль и поперек волокон определяется по формуле (2).

$$R^p = \frac{R^h}{\gamma_m} m_{\partial n} \Pi_{mi}, \quad (2)$$

где R^p – расчетное значение прочности древесины; R^h – нормативное значение прочности древесины, определяемое с обеспеченностью 0,95; γ_m – коэффициент надежности по материалу, определяемый из условия перехода от обеспеченности 0,95 для R^h к обеспеченности 0,99 для R^p ; $m_{\partial n}$ – коэффициент длительной прочности древесины, учитывающий продолжительность действия нагрузки; Π_{mi} – произведения коэффициентов условия работы.

Анализируя выражения (1) и (2), можно отметить их сходство в лишь общем виде. В месте с тем значения коэффициентов k_{mod} , приведенные в табл. 3.1 [1] и $m_{\partial n}$ в табл. 4 [3], отличаются по своим значениям. Например, для случаев действия постоянной нагрузки их значения равны: $k_{mod} = 0,60$; $m_{\partial n} = 0,53$. Различия в значениях коэффициентов k_{mod} и $m_{\partial n}$ объясняется разными подходами в их определении, а также некоторыми особенностями принятой в [1] и [3] классификации нагрузок и моделей длительной прочности древесины. Общим в выражениях (1) и (2), при определении расчетных значений прочности древесины, является то, что значения коэффициентов k_{mod} и $m_{\partial n}$ зависят только от продолжительности действия нагрузки и не учитывают вид напряженного состояния. Аналогичный подход принят при определении расчетных значений прочности древесины под углом α к направлению волокон. Так, согласно [1], расчетное значение прочности $f_{\alpha,d}$ древесины под углом α к направлению волокон определяется по формуле (3), а согласно [3] расчетное значение прочности R_{α}^p под углом α к направлению волокон – по формуле (4).

$$f_{\alpha,d} = \frac{f_{0,d}}{\frac{f_{0,d}}{f_{90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}, \quad (3)$$

$$R_{\alpha}^p = \frac{R_0^p}{1 + \left(\frac{R_0^p}{R_{90}^p} - 1 \right) \sin^2 \alpha}, \quad (4)$$

где $f_{\alpha,d}$ и R_{α}^p – расчетное значение прочности древесины под углом α к направлению волокон в обозначениях [1] и [3]; $f_{0,d}$ и $f_{90,d}$ – расчетные значения прочности древесины вдоль и поперек волокон, определяемые по формуле (1); R_0^p и R_{90}^p – расчетные значения прочности древесины вдоль и поперек волокон, определяемые по формуле (2); α – угол между направлением усилия и волокнами древесины.

Такая методика определения расчетных значений прочности древесины справедлива лишь в первом приближении, поскольку позволяет учитывать изменения прочности древесины во времени при продолжительном действии нагрузки. Вместе с тем она не корректна в том, что не учитывает вид напряженного состояния, поскольку разрушение древесины зависит не только от продолжительности действия нагрузки, но и под каким углом она приложена к волокнам, т. е. к основным ее структурным элементам.

Для решения данной задачи необходимо проведение исследований по уточнению закономерностей изменения темпа относительного снижения прочности древесины во времени под нагрузкой в зависимости от вида напряженного состояния и соотношения компонент напряжений. Решение данной задачи следует рассматривать в два этапа. На первом этапе необходимо рассмотреть вопрос о закономерностях изменения длительной прочности древесины при постоянном действии нагрузки в зависимости от вида напряженного состояния и соотношения его компонент. На втором этапе исследований выяснить, каким образом сочетания нагрузок (постоянные, длительные, средней продолжительности и кратковременные) оказывают влияние на темп относительного снижения прочности древесины во времени.

В результате проведенного анализа работ [5–9] было установлено, что исследование длительной прочности древесины в странах ближнего зарубежья проводилось по двум методам. Первый метод был разработан Ф.П. Белянкиным [8], который использовался для определения длительной прочности древесины [7, 8]. Второй метод основан на выдвинутой С.Н. Журковым [4] кинетической теории прочности твердых тел, который позволил установить функциональную зависимость длительной прочности твердых тел с характеристиками их молекулярного строения.

Согласно исследованиям Ф.П. Белянкина [8], снижение прочности древесины при длительном действии нагрузки может быть представлено уравнением (5).

$$\sigma = \sigma_n + (\sigma_{ep} - \sigma_n) e^{-bt}, \quad (5)$$

где σ – напряжение, МПа; t – время, сут.; σ_n – длительная прочность (сопротивление); σ_{ep} – прочность при стандартных испытаниях; b – постоянная.

Принятый в уравнении (5) термин «предел длительного сопротивления» не совсем корректный, поскольку противоречит не только современным представлениям о прочности твердых тел, но и результатам экспериментальных исследований [9], которые проводились на образцах со значительно большей продолжительностью действия постоянной нагрузки, чем в работе [8]. Это же касается и условного коэффициента длительного сопротивления, значение которого не является константой, а зависит от продолжительности действия нагрузки (предполагаемого срока эксплуатации конструкций), вида напряженного состояния [5, 6, 10] и сочетания нагрузок [7].

Согласно кинетической теории прочности твердых тел [4] (метод С.Н. Журкова), долговечность определяется уравнением (6).

$$t = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}}, \quad (6)$$

где t – время до разрушения, с; σ – напряжение, Мпа; τ_0 – период тепловых колебаний атомов 10^{-13} с; U_0 – начальная энергия активации процесса разрушения, равная потенциальному барьеру разрыва химических связей твердых тел, кДж; R – газовая постоянная, равная $8,314 \cdot 10^{-3}$ кДж/(моль·град); T – температура град К; γ – структурно-чувствительный коэффициент, кДж/(моль·Мпа).

В условиях постоянной температуры уравнение (6) приобретает более простой вид:

$$t = Ae^{-\alpha\sigma}, \quad (7)$$

где t – долговечность; σ – напряжение; A и α – константы, определяемые из опытов.

Выполняя логарифмирование уравнений (6) и (7), получаем линейную закономерность снижения прочности древесины во времени $\lg t = \lg A - \alpha\sigma$, (8)

где t – время до разрушения; σ – напряжение, %; A и α – константы при постоянной температуре, значения $\lg A = 17,1$ (при одноосном сжатии, растяжении и скалывании вдоль волокон и поперечном изгибе), $\lg A = 10,2$ (при растяжении поперек волокон) и $\alpha = 0,166$ согласно [5].

На основании проведенного Ю.М. Ивановым [5, 6] анализа и обобщения большого количества экспериментальных данных, полученных при испытании древесины под длительным действием постоянных напряжений при одноосном растяжении вдоль и поперек волокон, скалывании вдоль волокон и поперечном изгибе, было обосновано использование указанной теории для описания закономерности длительной прочности древесины. Использование линейной зависимости между $\lg t$ и σ облегчает выполнение прогнозирования долговечности путем экстраполяции. Следует отметить, что уравнения (6–8) не могут быть использованы для описания закономерности долговечности при малом уровне напряжений, поскольку при приближении их значений к нулю долговечность является ограниченной. На основании результатов исследований, полученных в работе [5], было установлено, что отклонения зависимости $\sigma - \lg t$ от закона прямой линии наблюдается при малой ($\lg t \leq 0,1$ с) и большой ($\lg t \geq 10$ с) долговечности. Нижнее ограничение по своей продолжительности соответствует действию мгновенной нагрузки, а верхнее – нагрузке, продолжительность которой составляет более 300 лет, что для выполнения инженерных расчетов не имеет практического значения.

Таким образом, описанные Ю.М. Ивановым закономерности длительной прочности древесины при различных видах напряженного состояния с использованием уравнения (6), могут быть применены для прогнозирования не только долговечности материала, но и вероятности отказа конструкции. Кроме того, впервые Ю.М. Ивановым было доказано, что темп относительного снижения прочности древесины во времени под нагрузкой, действующей поперек волокон древесины, значительно выше, чем нагрузки, действующей вдоль волокон.

Что же касается исследований длительной прочности древесины, выполненных учеными в дальнем зарубежье, то здесь следовало бы отметить работы [11–13]. В указанных работах для математического описания длительной прочности древесины используются модели накопления повреждений в виде функции уровня напряжений и длительности нагружения, которые представлены уравнениями (9–11).

Предложенные Gerhards [11], Barrett и Foschi [12] и Foschi и Yao [13] модели накопления повреждений имеют соответственно следующий вид:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \exp\left(-A + B\frac{\sigma}{f_0}\right), \quad (9)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = A\left(\frac{\sigma}{f_0} - \eta\right)^B + C\alpha, \quad \frac{\sigma}{f_0} > \eta; \quad (10)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0, \quad \frac{\sigma}{f_0} \leq \eta;$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = A\left(\frac{\sigma}{f_0} - \eta\right)^B + C\left(\frac{\sigma}{f_0} - \eta\right)^D, \quad \frac{\sigma}{f_0} > \eta; \quad (11)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0, \quad \frac{\sigma}{f_0} \leq \eta,$$

где A, B, C и D – постоянные; η – предельное отношение; σ – величина напряжения в момент времени t ; f_0 – кратковременное значение прочности.

Характерной особенностью приведенных моделей накопления повреждений (9–11) является то, что α является показателем степени накопления повреждений, т. е. при $\alpha = 0$ повреждения отсутствуют, а при $\alpha = 1$ наступает отказ.

Решая уравнения (9–11) для случая длительного действия нагрузки, остаточную прочность $\sigma(t)$ можно определять по уравнениям (12–14).

$$\sigma(t) = f_0 \left\{ \frac{1}{B} \ln [1 + (1 - \alpha)(\exp B - 1)] \right\}, \quad (12)$$

$$\sigma(t) = f_0 \left\{ \eta + [(1 - \alpha)(1 - \eta)^B]^{1/B} \right\}, \quad (13)$$

$$\sigma(t) = f_0 \left[\eta + (1 - \eta)(1 - \alpha)^{\frac{1}{1+B}} \right]. \quad (14)$$

Анализируя уравнения (12–14) можно отметить, что для моделей (9–11) описание длительной прочности древесины базируется на существовании некоторого предельного отношения η , т. е. предела длительной прочности (сопротивления), что, как выше упоминалось, является не совсем корректным предположением. Кроме того, все указанные модели являются обобщением данных, полученных при испытании древесины под действием длительной нагрузки, вызывающей растяжение или скалывание вдоль волокон, а также поперечного изгиба, т. е. темп изменения длительной прочности древесины при постоянном действии напряжений не зависит от вида напряженного состояния. В то же время, на основании результатов [5–10], полученных при испытании образцов на поперечный изгиб и скалывание вдоль волокон, центральное растяжение вдоль, поперек и под углом $\alpha = 45^\circ$ к направлению волокон от действия постоянных напряжений во времени, было установлено, что скорость относительного снижения прочности древесины зависит от вида напряженного состояния. Такого мнения придерживается и автор настоящей статьи.

Несмотря на результаты исследований, полученные в работах [5–10], единого мнения о зависимости темпа относительного снижения прочности древесины во времени при действии постоянных напряжений от вида напряженного состояния не существует. Основной причиной такого положения является недостаток экспериментальных данных по исследованиям длительной прочности древесины в зависимости от вида напряженного состояния. Решение данной задачи является основополагающим требованием при определении расчетных значений прочности древесины и, в конечном итоге, срока службы конструкции. Кроме того, решение данной задачи продиктовано еще одним обстоятельством, определением прочности древесины в конструкциях, находящихся в эксплуатации, т. е. при оценке их технического состояния.

Для решения данной задачи необходимо проведение экспериментальных исследований путем испытания образцов при действии постоянных во времени напряжений под углом $\alpha = 15^\circ; 30^\circ; 60^\circ$ и 75° к волокнам.

Следует отметить, что в отечественных нормах [2] при определении расчетных значений прочности древесины и несущей способности деревянных конструкций методом испытаний используется временная зависимость прочности древесины (8), учитывающая некоторые отличия в темпе относительного снижения длительной прочности древесины при растяжении вдоль и поперек волокон. Что же касается норм, в частности [1], то при определении расчетных значений прочности используются модели, приведенные в [11–13],

которые не учитывают изменения темпа относительного снижения длительной прочности древесины от вида напряженного состояния.

Следует отметить, что приведенные в данной статье подходы по уточнению моделей длительной прочности древесины могут быть использованы и для определения расчетных значений прочности плитных материалов на основе древесины, как ОСП, ЦСП, МДФ, LVL, CLT, ГСП и ГВЛ.

Заключение. Проведенный анализ результатов исследований [5–13] показал, что используемые модели длительной прочности древесины для определения расчетных значений прочности древесины, в частности значений коэффициентов K_{mod} и M_{del} , не охватывают все виды напряженного состояния, в которых могут находиться элементы деревянных конструкций. Для совершенствования существующих моделей длительной прочности древесины необходимо проведение целого комплекса экспериментальных исследований по выявлению закономерностей изменения темпа относительного снижения длительной прочности древесины от вида напряженного состояния. Приведенная в [1–3] методика по определению расчетных значений прочности древесины приемлема для случаев растяжения, скалывания или сжатия вдоль волокон.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1995-1-1-2009 (02250). – Введ. 01.01.10. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – 110 с.
2. Деревянные конструкции. Нормы проектирования : ТКП 45-5.05-146 -2009 (02250). – Введ. 01.01.10. – Минск : Минстройархитектуры, 2009. – 72 с.

3. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 : СП 64.13330.2011. – Москва, 2011. – 88 с.
4. Журков, С.Н. Проблема прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. – 1957. – Вып. 11. – С. 78–82.
5. Иванов, Ю.М. Длительная прочность древесины // Лесн. журн. – 1972. – № 4. – С. 76–82.
6. Иванов, Ю.М. Длительная прочность древесины при растяжении поперек волокон / Ю.М. Иванов, Ю.Ю. Славик // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 10 – С. 22–26.
7. Орлович, Р.Б. О применении критериев длительной прочности в расчетах деревянных конструкций / Р.Б. Орлович, А.Я. Найчук // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 5 – С. 15–19.
8. Иванов, Ю.М. Надежность деревянных конструкций и темп накопления повреждений в материале / Ю.М. Иванов, А.В. Мельчиков, Ю.Ю. Славик // Изв. вузов. Строительство. – 1992. – № 3 – С. 16–20.
9. Белянкин, Ф.П. Деформативность и сопротивляемость древесины / Ф.П. Белянкин, В.Ф. Яценко. – К.: Из-во АН УССР, 1957. – 86 с.
10. Леонтьев, Н.Л. Длительное сопротивление древесины. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1957. – 132 с.
11. Gerhards, C.C. Time-related effects on wood strength: a linear cumulative damage theory. Wood Sci 1979;11(3). – 139–44 p.
12. Barrett, J.D. Duration of load and probability of failure of wood. Part 1. Modelling creep rupture / J.D. Barrett, R.O. Foschi – Can. J. of Civil Engineering. – 1978. – Vol. 5. – N 4. – 505–514 p.
13. Foschi, R.O. Reliability-based design of wood structures. Structural research series / R.O. Foschi, B.R. Folz, F.Z. Yao // Rep. no. 34, Dep. of Civil Eng., Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada; 1989.

Материал поступил в редакцию 29.01.2018

NAYCHUK A.Ya. About some approaches of definition of calculated values of durability of wood and materials on its basis

To be provided the analysis of researches in the field of the long durability of wood, destruction models which are the basis for definition of calculated values of wood are considered. The main objectives and ways of their decision on improvement of a technique of definition of calculated values and also models of long durability depending on a type of tension are formulated.

УДК 624.072.21.7

Босаков С.В., Козунова О.В.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАСАТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ ПЛАСТИН ВАРИАЦИОННО-РАЗНОСТНЫМ МЕТОДОМ

Введение. Одним из приближенных способов расчета строительных конструкций является вариационно-разностный метод (ВРМ). Сущность ВРМ, реализующего вариационный принцип Лагранжа с помощью метода конечных разностей, заключается в сведении задачи минимизации функционала полной потенциальной энергии, являющейся квадратичной функцией относительно перемещений, к задаче минимизации функции многих переменных, отнесенных к узлам конечно-разностной сетки [1].

Следует подчеркнуть достоинства вариационно-разностного метода: простота математической формулировки задачи; ясный физический смысл используемого функционала; автоматическое выполнение уравнений равновесия и статических граничных условий; возможность использования метода для расчета тел сложной формы, в том числе неоднородных по деформационно-прочностным характеристикам материалов; нелинейные расчеты сводятся к решению системы линейных алгебраических уравнений, для реализации которой существует достаточно надежный математический аппарат линейной алгебры.

У ряда научных работников в области нелинейных расчетов строительных конструкций, бытует мнение о невозможности использования касательного модуля при определении плотности энергии в расчетах конструкций вариационно-разностным методом.

Ниже численно показана на двух тестовых примерах для нагруженных пластинок ошибочность такого мнения.

Пример 1. На рис. 1 изображена прямоугольная пластина, находящаяся в условиях однородного плоского напряженного состояния под действием равномерной сжимающей нагрузки интенсивностью p (Н/м²).

Зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций примем в виде [2]

$$\sigma_i = \sigma_u \operatorname{th} \left(\frac{E_0}{\sigma_u} \varepsilon_i \right), \quad (1)$$

где σ_i , ε_i – интенсивности напряжений и деформаций [3];

σ_u , E_0 – предел прочности и начальный модуль упругости материала пластинки.

Босаков Сергей Викторович, д.т.н., профессор, профессор кафедры строительной механики Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220014, г. Минск, пр. Независимости, 150.

Козунова О.В., к.т.н., доцент кафедры промышленного гражданского строительства Белорусского государственного университета транспорта.

Беларусь, БелГУТ, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.