

3. Betonrohre und Formstucke. Maße. Technischerbedingungen: DIN 4032. – 1990. – 19 s
4. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01-84. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 79 с.
5. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Минстройархитектуры. 2003. – 139 с.
6. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП II-21-75. – М.: Стройиздат, 1976. – 90 с
7. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 45 с.
8. Грушко, И.М. О физических основах прочности бетона при растяжении / И.М. Грушко // Вопросы теории и технологии железобетона. – Харьков. – 1972. – С. 11-14
9. Тевелев, Ю.А. Железобетонные трубы Проектирование и изготовление / Тевелев Ю.А. – М.: Изд. Ассоциации строительных вузов, 2004. – С. 86-96.

УДК 624.014.2

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ПОЛОГИМ ОТГИБОМ ЧАСТИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ АРМАТУРЫ

Малиновский В. Н., Шалобыта Н.Н., Холодарь Б.Г.

Введение. Повышение трещиностойкости железобетонных балочных конструкций осуществляется путем создания предварительного обжатия бетона при помощи рабочей арматуры. Традиционно для этих целей используются прямолинейные продольные стержни, располагающиеся в нижней зоне сечения балок. Данный подход существенно сказывается на трещиностойкости нормальных сечений, но практически не оказывает влияния на трещиностойкость наклонных сечений. Для повышения трещиностойкости наклонных сечений целесообразным является обжатие бетона в вертикальном направлении. Создать такое обжатие эффективно возможно при помощи перевода (отгиба) части продольной арматуры из нижней зоны в пролете в верхнюю на опорах. Благодаря отгибу решаются и другие важные вопросы: рассредоточивается напрягаемая арматура по торцу балки, уменьшается вероятность образования горизонтальных трещин на ее концевых участках, улучшаются технико-экономические показатели конструкции, прежде всего за счет снижения арматуры на поперечное армирование в виде хомутов и поперечных стержней, улучшаются условия бетонирования опорных зон балок [2, 3, 4].

В отечественных нормах [1] отгибы отнесены к одному из видов поперечного армирования, однако роль их в оценке сопротивления действию внешних усилий имеет неоднозначность и даже определённую противоречивость. Наличие поперечной и отогнутой арматуры, по мнению большинства исследователей, приводит к уменьшению угла наклона диагональных трещин, образующихся в опорной зоне балок и, вследствие этого, при применении оценки прочности наклонных сечений по методу стержневой модели («ферменной аналогии») несущая способность сжатого подкоса выше несущей способности растянутого опорного раскоса, что не удовлетворяет заложенным принципам данного метода. Кроме того, при отсутствии поперечного армирования стержневая модель оценки несущей способности наклонных сечений норм [1], неприменима в целом, так как ортогональная поперечная арматура, заменяющая растянутый раскос условно выделенной из балки фермы, отсутствует.

Принятые отечественные нормы [1] позволяют производить расчет прочности наклонных сечений и по двум другим методикам: на основе расчетной модели наклонных сечений (метод предельных усилий) и используя упрощенный деформационный метод расчета.

Согласно расчетной модели наклонных сечений обеспечение прочности наклонных сечений по поперечной силе обеспечивается сопротивлением бетона как сплошного тела, так как концептуально принято, что при отсутствии поперечной арматуры разрушение по наклонным сечениям происходит одновременно с образованием наклонной трещины. Однако наличие полого отгиба по всему пролету среза отодвигает момент разрушения балки после образования магистральных наклонных трещин [4].

В наибольшей степени учет роли отогнутой арматуры в сопротивлении действующим усилиям возможен при использовании упрощенного метода деформационной модели расчета прочности наклонных сечений норм. При данном подходе расчет прочности на действие поперечных сил основывается на учете «вклада» бетона, поперечной и отогнутой арматуры одновременно.

Согласно условиям этого метода [1] прочность по наклонным сечениям оценивается по выражению:

$$V_{sd} \leq V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,sy} \quad (1)$$

Поперечное усилие, воспринимаемое наклонным сечением (V_{Rd}), включает в себя поперечное усилие воспринимаемое поперечным армированием ($V_{Rd,sy}$) и бетоном ($V_{Rd,c}$), которое определяется величиной главных растягивающих напряжений:

$$i_{Rd,s} = \sigma_1 \cdot b_w \cdot l_m \quad (2)$$

Определяющим параметром при нахождении главных растягивающих напряжений является ширина раскрытия диагональных трещин w , которая зависит от главных растягивающих ϵ_1 и главных сжимающих ϵ_2 деформаций, а также продольных деформаций ϵ_x в уровне продольной растянутой арматуры

$$\epsilon_1 = \epsilon_x + [\epsilon_x - \epsilon_y] \cot^2 \theta \quad (3)$$

$$w = \epsilon_1 \cdot S_{m\theta} \quad (4)$$

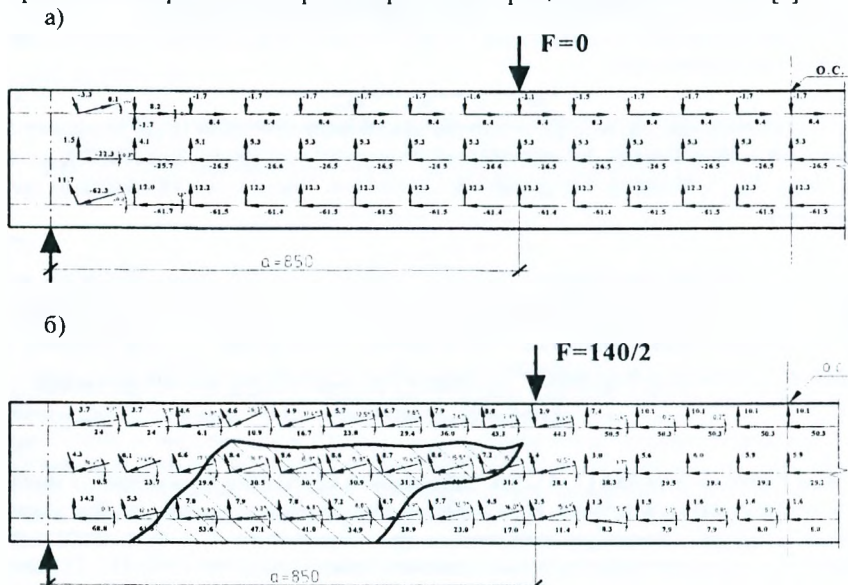
Как видно из условия (2, 3), для определения прочности по условию 2 необходимо установить величину угла наклона диагональных трещин θ . Для упрощения расчетных процедур допускается при определении θ пользоваться таблицей 7.1 [7], либо графическими зависимостями (рисунок 7.12) [7]. Однако данная таблица и графические зависимости могут использоваться только для элементов с продольной прямолинейной арматурой, а для элементов с отогнутой преднапряженной арматурой неприменимы. В этой связи, задача исследования заключалась в определении отличительных особенностей параметров напряженно-деформированного состояния балок с полого отогнутой арматурой, в сравнении с балками, имеющими прямолинейную арматуру.

Методика и объект исследования. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) проводилось путем сравнения параметров НДС балок с прямолинейной (БП) и отогнутой (БО) арматурой. В качестве метода решения задачи принято конечно-элементное моделирование с использованием на первом этапе вычислительного комплекса «MSC.visualNastran for Windows». Сравнительный анализ проводится на железобетонных балках длиной 3,0 м с расчетным пролетом 2,7 м армированных рабочей арматурой из четырех напрягаемых стержней диаметром 14 мм класса S800 (размещение в два ряда с рабочей высотой сечения $d=250$ мм). В балках с отогнутой арматурой (БО) стержни верхнего ряда в третях пролёта переведены из нижней зоны к верхней грани опорного сечения под углом 12° .

Задание в расчетах предварительного напряжения в балках обеспечивалось пу-

тем создания разности температур материалов – арматуры и бетона [5]. Необходимый уровень температуры устанавливался путем сравнения максимального выгиба в моделируемой балке после создания в ней преднапряжения, с выгибом, полученным в данных экспериментальных балок работы [4]. Для анализа напряженно-деформированного состояния балок принято сопоставление главных деформаций.

На рисунках 1 – 2 приведены величины и направления главных деформаций для балок с прямолинейной (БП) и отогнутой (БО) арматурой на двух стадиях загрузки: после окончания обжатия $2F=0$ и при нагрузке $2F=140$ кН, при которой происходит образование первых нормальных трещин в балках БП и БО [4].



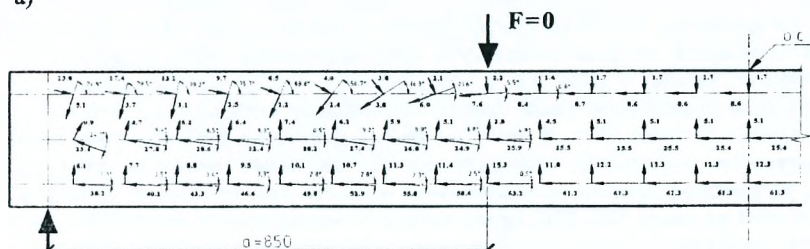
а) на стадии предварительного обжатия бетона, б) на стадии загрузки
Рисунок 1 – Направление и величины главных деформаций ($\epsilon_e \cdot 10^5$) в балке БП

Из рисунка 1а следует, что при обжатии бетона в нижней и средней частях сечения по всей длине балки БП с предварительно напряженной прямолинейной арматурой векторы главных деформаций сжатия имеют одинаковую величину и направлены горизонтально. В верхней зоне сечения по всей длине балки величины главных деформаций растяжения преобладают над деформациями сжатия.

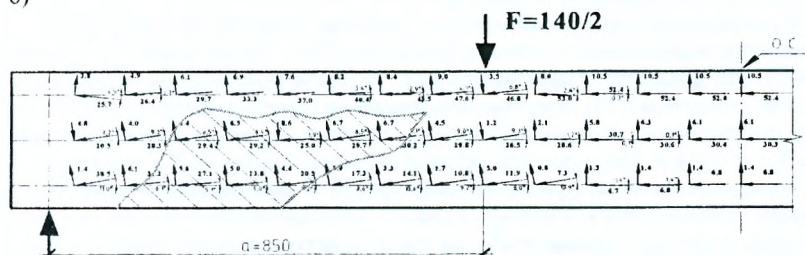
С приложением внешней нагрузки (рисунок 1б) изменение напряженно-деформированного состояния соответствует общим представлениям о работе балки: в нижней части сечения горизонтальные главные деформации сжатия, вызванные усилиями предварительного обжатия, уменьшаются и переходят в деформации растяжения, а в верхней – главные деформации растяжения сменяются деформациями сжатия, значения которых возрастают. Одновременно, соответственно, перпендикулярные им главные деформации растяжения – внизу, уменьшаются и переходят в деформации сжатия, а деформации сжатия – сверху, изменя-

ются незначительно. В средней же части сечения приопорной зоны балки (на рисунке 1б эта зона выделена) с ростом внешней нагрузки величины главных деформаций сжатия изменяются (увеличиваются) незначительно, однако направления их принимают вполне определённую ориентацию – «опора – пролётный груз», а угол наклона к продольной оси составляет $15,5^{\circ}$ - 16° . Значения главных деформаций растяжения в этих точках увеличиваются с ростом нагрузки и, достигая предельных значений, создают условия для образования наклонных трещин, начинающихся в средней трети высоты сечения, так как величины главных деформаций растяжения в средней трети высоты сечения превалируют над одноимёнными деформациями нижней зоны [5].

а)



б)



а) на стадии предварительного обжата бетона, б) на стадии загрузки
Рисунок 2 – Направление и величины главных деформаций ($\epsilon_c \cdot 10^5$) в балке БО

В балках БО (рисунок 2а) наличие преднапряжённой отогнутой арматуры изменяет характер напряжённо-деформированного состояния при предварительном обжатии и отразилось на работе балки при действии внешней нагрузки. Если у нижней грани балки после окончания обжата векторы главных деформаций сжатия направлены почти горизонтально, то в средней трети высоты сечения опорной зоны векторы сжатия имеют направление к точке приложения усилия в отогнутой арматуре, и угол наклона к продольной оси балки составляет $-8^{\circ} \div -9^{\circ}$. С приложением внешней нагрузки в приопорной зоне в середине высоты сечения главные деформации сжатия и растяжения практически не изменяют своих значений. Данное обстоятельство значительно уменьшает возможность образования наклонных трещин, начинающихся в средней трети высоты сечения. С приложением нагрузки происходит поворот главных площадок против часовой стрелки. Угол наклона к продольной оси деформаций сжатия при действии нагрузки в зоне возможного появления магистральной наклонной

трещины (на рисунке 2б данная зона выделена) составляет только 8.5° . Исключения составляют величины и угол наклона главных деформаций бетона, находящегося на траектории отогнутой арматуры, где параметры НДС значительно отличаются по величине от одноименных параметров вне траектории арматуры. Тем не менее, поворот главных площадок в средней трети высоты сечения опорной зоны в балках с отогнутой арматурой, практически соответствует углу поворота площадок для балок с прямолинейной арматурой. Однако направление главных деформаций сжатия в балках БО более пологое к продольной оси элемента, чем в балках БП [5].

Следует отметить, что при численном моделировании не получены параметры НДС и картина их изменения, в соответствии с правилами сопромата, в бетоне, точки которого находятся на траектории трассировки отогнутой напрягаемой арматуры. Одной из причин данного обстоятельства, на наш взгляд, является нечеткость моделирования сути преднапряжения путем задания разности температур бетона и арматуры и невозможность учесть использованным вычислительным комплексом такой важной особенности железобетона, как сцепление арматуры с бетоном. В этой связи, и с целью выяснения влияния отмеченных параметров на напряженно-деформированное состояние рассчитываемых балок, был разработан вариант моделирования и составлена программа расчета балок на ПЭВМ на языке DELPHI, позволяющая компенсировать неучтенные особенности расчетной схемы, принятой применительно к вычислительному комплексу «MSC.VisualNastran for Windows».

В составленной программе расчета расчетная схема балки представлена в виде совокупности различных конечных элементов (КЭ) – треугольных для бетона и линейных для арматуры. Арматура связана с бетоном при помощи специальных связующих элементов (СЭ), допускающих взаимные сдвиги арматуры относительно бетона, имитирующих сцепление арматуры с бетоном. Принятая модель позволяет связать КЭ бетона и арматуры при различной длине линейного КЭ арматуры. Длина КЭ прямолинейной не отогнутой напрягаемой и ненапрягаемой арматуры равна размеру треугольного КЭ бетона, и связь КЭ осуществляется в каждом узле сетки по длине арматуры. Длина отогнутой части арматуры принята такой, что связь узлов арматуры выполняется через два или три КЭ бетона.

Связующие элементы (СЭ), соединяющие узлы бетона и прямолинейной арматуры, имеют одну податливую связь (тип 1), направленную вдоль арматурного стержня, а СЭ, соединяющие наклонную часть отогнутой арматуры с бетоном (тип 2), имеют две также податливые связи по направлению координатных осей.

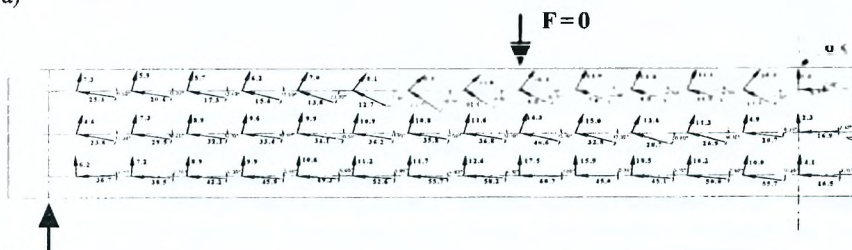
Усилия от предварительного натяжения арматуры прикладывались как внешняя сжимающая сила к крайнему КЭ у торца арматуры. Нагрузка от внешнего загрузения прикладывалась к узлам расчетной схемы.

Другие особенности составленной программы: разработка расчетной модели балки, способ расположения связующих элементов, задание жесткостей связующих элементов, подготовка исходной информации и оформление результатов расчета подробно рассмотрены в работе [6].

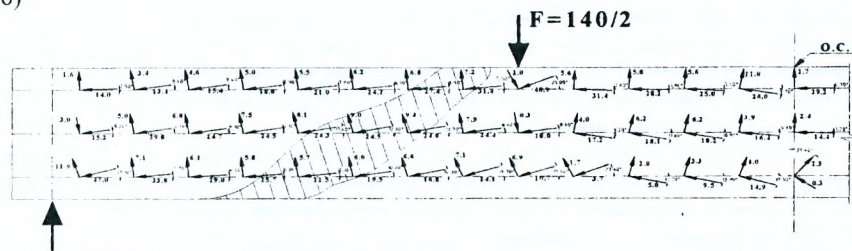
На основании сравнения расчетных данных, полученных по результатам расчета по вычислительному комплексу «MSC.VisualNastran for Windows» (рисунок 2) и по разработанной программе (рисунок 4), выявлены сходство и отличия в на-

пряженно-деформированном состоянии балок с полого отогнутой преднапряженной арматурой. Общая картина по направлению и величинам главных деформаций ($\epsilon_y \cdot 10^3$) в балке с отогнутой арматурой, полученных по результатам расчета по разработанной программе и по вычислительному комплексу «MSC. VisualNastran for Windows» как на стадии предварительного обжатия бетона, так и при загрузке внешней нагрузкой при совместном действии сил обжатия бетона, соответствуют общим принципам работы балки, но и имеются отличия, связанные, прежде всего, с особенностями принятой расчетной модели. Учет в разработанной программе усилий предварительного обжатия бетона путем приложения внешних усилий к арматуре и моделирования сцепления при помощи специальных связующих элементов, позволяющих учесть влияние взаимных сдвигов арматуры и бетона на уровне условной поверхности контакта, сказывается на величинах и углах наклона главных деформаций опорных зон балки как на стадии предварительного обжатия, так и при совместном действии внешних сил и сил обжатия бетона. Принципиальных отличий в деформированном состоянии бетона балки, расположенного по направлению трассировки отогнутой арматуры по данным расчетов по составленной программе не имеется.

а)



б)



а) на стадии предварительного обжатия бетона; б) на стадии загрузки
 Рисунок 3 – Направление и величины главных деформаций ($\epsilon_y \cdot 10^3$) в балке с отогнутой арматурой, определенные по разработанной программе расчета

При обжатии бетона в балке, рассчитанной по составленной программе, векторы главных деформаций сжатия в средней части высоты сечений опорных зон (зон среза) наклонены больше к точке приложения усилия в отогнутой арматуре (углы наклона составляют $10,1 - 12,1^\circ$, рисунок 3 а) по сравнению с данными, полученными расчетом по вычислительному комплексу «MSC. Visual Nastran for Windows» (углы наклона $8,5 - 9,2^\circ$, рисунок 2 а). С приложением внеш-

ней нагрузки векторы главных деформаций сжатия бетона опорных зон балки, полученные с помощью разработанной программы, наклонены у продольной оси в большей степени (угол наклона 9,1 -13,7°, рисунок 4б), чем в балках, рассчитанных по вычислительному комплексу «MSC. visualNastran for Windows» (угол наклона 8,1-9,3°, рисунок 2 б). Полученные данные расчетов как по вычислительному комплексу, так и по составленной программе позволяют определить траекторию и место расположения магистральной наклонной трещины, что дает возможность правильно составить расчетную схему при разработке методики расчета прочности наклонных сечений железобетонных изгибаемых элементов с пологим отгибом продольной преднапряженной арматуры.

Выводы. По результатам анализа установлено:

1. При обжатии бетона в балках с полого отогнутой арматурой векторы главных деформаций сжатия в средней части высоты сечения направлены к точке приложения усилий в отогнутой арматуре. При приложении внешней нагрузки векторы главных деформаций сжатия балок с полого отогнутой арматурой наклонены к продольной оси в меньшей степени, чем в балках с прямолинейной арматурой. В стадии нагружения в балках с отогнутой арматурой образование магистральной наклонной трещины ожидается с нижней зоны сечения и проекция наклонной трещины на продольную ось имеет большую величину в сравнении с балками с прямолинейной арматурой.

2. Общая картина по направлению и величинам главных деформаций ($\epsilon_b \cdot 10^{-3}$) в балке с отогнутой арматурой, полученных по результатам расчета по разработанной программе и по вычислительному комплексу «MSC. Visual Nastran for Windows» как на стадии предварительного обжатия бетона, так и при нагружении внешней нагрузкой при совместном действии сил обжатия бетона, принципиальных отличий не имеет, но учет в разработанной программе усилий предварительного обжатия бетона путем приложения внешних усилий к арматуре и моделирования сцепления при помощи специальных связующих элементов, позволяющих учесть влияние взаимных сдвигов арматуры и бетона на уровне условной поверхности контакта, сказывается на величинах и углах наклона главных деформаций опорных зон балки.

3. При обжатии бетона в балке, рассчитанной по составленной программе, векторы главных деформаций сжатия в средней части высоты сечений опорных зон (зон среза) наклонены больше к точке приложения усилия в отогнутой арматуре (углы наклона составляют 10,1°-12,1°) по сравнению с данными, полученными расчетом по вычислительному комплексу «MSC. VisualNastran for Windows» (углы наклона 8,5°-9,2°).

4. По данным расчета по составной программе при обжатии бетона в зоне возможного появления наклонных трещин векторы главных сжимающих и растягивающих деформаций имеют большую величину и изменяются устойчиво с небольшим нарастанием от торца к средней части балки. В балке, рассчитанной по вычислительному комплексу [6] в бетоне, расположенном в непосредственной близости к траектории отогнутой арматуры значения главных деформаций занижены на величину до 20% от одноименных данных в точках, удаленных от траектории арматуры.

5. С приложением внешней нагрузки изменение напряженно-деформированного состояния, по данным расчета по составленной программе и по вычислительному комплексу, соответствует общим представлениям о работе балки. При этом, по данным вычислительного комплекса, в средней части высоты сечения приопорной зоны балки величины главных сжимающих деформаций изменяются в сторону уменьшения в меньшей степени, а главные растягивающие деформации практически не изменяются. По данным составленной программы изменение главных сжимающих и растягивающих деформаций происходит таким образом, что создаются условия для образования наклонной трещины, начинающейся в средней трети высоты сечения по узкой полосе.

6. Величины и направления векторов главных деформаций, полученных по составленной программе, как при обжатии бетона, так и при приложении внешней нагрузки находятся в лучшей сходимости с одноименными данными, полученными экспериментальным путем [4].

Список цитированных источников

1. СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции». Стройтехнорм. 2002. – С. 274.
2. Междуэтажные перекрытия переменной высоты тепловых и атомных станций / В.Ф. Старостин, Ю.К. Тригачев, Л.В. Сасонко [и др.] / Бетон и железобетон / – 1986. – № 1. – С. 8-10.
3. Чупак, Н.М. Работа железобетонных балок с отогнутой преднапрягаемой арматурой / Совершенствование строительных конструкций и строительного производства. – Кишинев: Штиинца. – 1984. – С. 76–81.
4. Малиновский, В.Н. Сопротивление предварительно напряженных балок из высокопрочного бетона с отогнутой стержневой арматурой при изгибе с поперечной силой: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / В.Н. Малиновский; Ленинградский инж.-стр. инс-т. – Ленинград, 1988. – 24 с.
5. Малиновский, В.Н. Влияние предварительнонапряженной полого отогнутой арматуры на напряженно-деформированное состояние железобетонных балок / В.Н. Малиновский, Б.Г. Холодарь, Н.Н. Шалобьга // Вестник БрГТУ. – 2008. – № 1(49): Строительство и архитектура. – с. 74–77.
6. Малиновский, В.Н. Численное исследование напряженно-деформированного состояния в железобетонных балках с предварительно напряженной полого отогнутой арматурой / В.Н. Малиновский, Н.Н. Шалобьга, П.В. Кривицкий // Вестник БрГТУ Строительство и архитектура. – 2009. – № 1.
7. Железобетонные конструкции. Основы теории расчёта и конструирования // Учебное пособие для студентов строительных специальностей; под редакцией проф. Т.М. Пецольда и проф. В.В. Тура – Брест: БГТУ, 2003. – 380 с.

УДК 624.012

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Уласевич В.П., Костюк О.В.

Введение. Независимо от строительного материала, из которого будут изготовлены строительные конструкции зданий и сооружений, они должны быть запроектированы так, чтобы была обеспечена *достаточная степень надежности* при возведении, эксплуатации или при оценке их технического состояния [1]. При этом требуемая степень надежности должна учитывать: