

ния в стали и сжимающие в бетоне. Появление начальных напряжений меняет кинетику взаимодействия ядра с оболочкой при нагружении и требует соответствующего учёта в расчётной модели сопротивления СТБЭ. В исследовании по данной тематике [2, 3, 5–7] выявлен ряд недостатков и отсутствует комплексный подход к оценке НДС, вызванного нагрузкой.

На основании выполненных исследований определена последовательность проектирования СНСТБЭ при осевом сжатии. При этом разработанная методика расчёта сопротивления СНСТБЭ при осевом сжатии учитывает реальное напряжённо-деформированное состояние, вызванное нагрузкой, и может применяться при проектировании данных конструктивных элементов, что обеспечит рациональный расход материалов.

Результаты исследований также позволяют определить требуемые минимальное ($p_{int,0,min}$) и эффективное ($p_{int,0,eff}$) значения начального самонапряжения, что необходимо на стадии изготовления СНСТБЭ.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Silva, R. D. A study on the steel-concrete bond in concrete filled steel tubular columns: master dissertation / R. D. Silva. – São Carlos Engineering School, São Paulo University, 2006. – 136 p.
2. Мартиросов, Г.М. Трубобетонные элементы из бетона на напрягающем цементе / Г.М. Мартиросов, А.И. Шахворостов // Бетон и железобетон. – 2001. – № 4. – С. 12–13.
3. Сахаров, А.А. Несущая способность трубобетонных элементов с бетоном, твердеющим под давлением: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.А. Сахаров; Самар. гос. арх.-строй. акад. – Самара, 1999. – 23 с.
4. Кришан, А.Л. Сталетрубобетонные колонны с предварительно обжатым ядром / А.Л. Кришан, М.Ш. Гареев, А.И. Сагадатов // Бетон и железобетон. – 2004. – № 6. – С. 9–13.
5. Гареев, М.Ш. Прочность сжатых сталетрубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / М.Ш. Гареев. – Магнитогорск, 2004. – 161 с.

6. Сагадатов, А.И. Напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с внутренним стальным сердечником: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.И. Сагадатов; Магнитогор. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2006. – 22 с.
7. Кузнецов, К.С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / К.С. Кузнецов; Магнитогор. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2007. – 19 с.
8. Фонов, В.М. Прочность и деформативность трубобетонных элементов при осевом сжатии / В.М. Фонов, И.Г. Людковский, А.П. Нестерович // Бетон и железобетон. – 1989. – № 1. – С. 4–6.
9. Лукша, Л.К. Прочность трубобетона / Л.К. Лукша. – Минск: Высшая школа, 1977. – 96 с.
10. Бондаренко, В.М. Сопротивление осевому сжатию сталетрубобетонных элементов круглого сечения с ядром из напрягающего бетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / В.М. Бондаренко. – Брест, 2010. – 148 с.
11. Бондаренко, В.М. Исследование и разработка общей методики расчёта трубобетонных элементов с ядром из бетона на напрягающем цементе / В.М. Бондаренко // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 15–16 ноября 2007 г. / Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2007. – С. 242–244.
12. Бондаренко, В.М. Расчёт прочности сталетрубобетонных элементов с ядром из бетона на напрягающем цементе при центральном сжатии / В.М. Бондаренко, Л.К. Лукша // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XV междунар. науч.-метод. семинара, Полоцк, 27–28 ноября 2008 г.: в 2-х т. / Полоцк. гос. ун-т; под общ. ред. Д.Н. Лазовского, А.А. Хотько. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т.1. – С. 206–214.

Материал поступил в редакцию 28.01.12

BONDARENKO V.M. Self-stressing CFST elements design

The calculation system of resistance of self-stressing CFST elements of round cross-section at axial compression is worked out. The algorithms of transition from initial value of the self-stress received at a stage of structural components manufacturing to a corresponding size in a stage-limit of the work which is necessary for the estimation of resistance are offered.

Demanded (minimum and effective) values of elements of initial self-stress depending on mechanical properties of materials and geometrical parameters of composite section are proved.

УДК 624.012.45

Павлова И.П., Бондаренко В.М.

МОДЕЛЬ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ БЕТОННОГО КОМПОЗИТА (РБК) ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ САМОНАПРЯЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Введение. При проектировании составов напрягающего бетона преобладающей характеристикой является величина его самонапряжения [1–5]. Далее для определения величины самонапряжения бетона использована трехкомпонентная пространственная модель композита, состоящего из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны.

Основные положения модели. При построении модели в данной работе приняты следующие предпосылки:

- расширяющийся композит можно условно представить в виде континуума активной матрицы, в теле которой дискретно расположен пассивный заполнитель;
- рассматриваемая моделируемая система расширяется равномерно по объему без нарушения сплошности контактов.

При прогнозировании процесса расширения для упрощения рас-

четов в модели был использован ряд допущений, не искажающих физический смысл рассматриваемого явления:

- моделируемая система содержит равномерно распределенные по объему матрицы равновеликие шарообразные зерна заполнителя;
- в процессе расчета в качестве пассивной компоненты рассмотрен заполнитель с транзитной зоной вокруг него, для которого согласно основным положениям рассчитывают некоторые усредненные деформативные характеристики.

Жесткостные характеристики элементов модели и их изменение во времени. В силу специфики структурообразования расширяющегося композита, транзитную зону в дальнейшем рассматриваем как неактивную компоненту, вынужденными деформациями которой с целью упрощения расчетов можно пренебречь. В расчетной модели в качестве заполнителя рассматривается некоторый

Павлова Инесса Павловна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

идеализированный сферический наполнитель с размером зерна, равным размеру зерна наполнителя с транзитной зоной вокруг него, и с усредненными, так называемыми эффективными, упругими характеристиками (см. рис. 1). Для определения эффективных деформативных характеристик идеализированного моноразмерного наполнителя использованы положения Дифференциальной Теории Эффективной Среды (англ. *Differential Effective Medium Theory*, в дальнейшем D-EMT) [6, 7].

В соответствии с правилами, сформулированными в D-EMT, частица наполнителя с размером \bar{r} и деформативными характеристиками G_{agg} , K_{agg} , помещенная в транзитную зону размером $\bar{r} + \delta_{ITZ}$ с деформативными характеристиками G_{itz} , K_{itz} , заменяется новой эффективной частицей с размером $a = \bar{r} + \delta_{itz}$ и соответствующими деформативными характеристиками (модулем сдвига и объемным модулем) G_{id} , K_{id} .

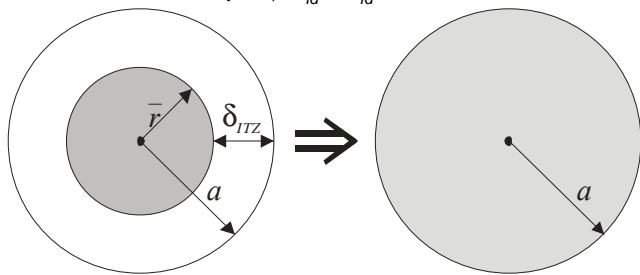


Рис. 1. Трансформация композитного включения в эффективную частицу с размером a в соответствии с правилами D-EMT

Для пространственной модели эффективный модуль сдвига G_{id} композитного включения с учетом транзитной зоны находят из решения соответствующего квадратного уравнения:

$$A \left(\frac{G_{id}}{G_{itz}} \right)^2 + 2B \left(\frac{G_{id}}{G_{itz}} \right) + C = 0, \quad (1)$$

где A, B, C – коэффициенты, предложенные в работе [7].

Эффективный объемный модуль K_{id} для данного «приведенного» наполнителя с учетом свойств транзитной зоны может быть рассчитан по следующей зависимости:

$$K_{id} = K_{itz} + \frac{p(K_{agg} - K_{itz})}{1 + (1-p) \frac{K_{agg} - K_{itz}}{K_{itz} + \frac{4}{3}G_{itz}}}, \quad (2)$$

Пользуясь зависимостями (1) и (2), рассчитывают характеристики бетона к некоторому фиксированному моменту времени τ (как правило, к возрасту 28 сут). Однако процессы структурообразования в расширяющемся композите развиваются во времени, в течение которого в бетоне возникают как силовые, так и не силовые воздействия, приводящие к изменению деформаций системы.

При прогнозировании рассматривается процесс расширения во времени, поэтому следующим допущением является вид функции $E(\tau)$. В настоящих исследованиях использована функция, применяемая для описания упрочняющегося во времени материала:

$$E(\tau) = \beta(\tau) [1 - \delta(\tau)] \bar{E}, \quad (3)$$

где \bar{E} – модуль упругости материала, установленный без учета эффектов старения при $\beta = 1$ и $\delta = 0$; $\beta(\tau)$ – степень упрочнения материала;

$\delta(\tau)$ – степень старения материала. Параметры β и δ варьируются в пределах от 0 до 1 и монотонно возрастают с течением времени.

В работах Laube для описания процессов упрочнения бетонного композита предложена функция $\beta(\alpha)$, описывающая процесс упрочнения материала в зависимости от степени гидратации $\alpha(\tau)$ цементного вяжущего:

$$\beta(\alpha) = \left[\frac{\alpha(\tau) - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right]^{\frac{2}{3}} \geq 0, \quad (4)$$

Напряжения и деформации расширяющейся композитной системы. Для начала рассмотрим наиболее простой с точки зрения реализации решения случай одиночного включения, располагаемого в активной матрице цементного камня. В работе [7] указывается граничная концентрация наполнителя $C_{agg}=0,05$, при которой не наблюдается эффекта влияния соседних частиц. Для случая изолированного сферического включения, окруженного оболочкой произвольной толщины, погруженного в однородную матрицу (все три фазы имеют некоторые произвольные, условные модули и деформации расширения) получены аналитические решения, позволяющие рассчитать напряженно-деформированное состояние расширяющейся системы. В реальной структуре бетона близкое расположение частиц наполнителя будет играть важную роль, однако на начальном этапе расчета и для случая изолированного наполнителя будут сохраняться все закономерности формирования напряжений и перемещений, свойственных композиту. В данном случае в моделируемой системе рассматриваются только перемещения и напряжения, вызываемые расширением активной матрицы.

Для единичного сферического включения, помещенного в бесконечную активную матрицу, при определении напряженно-деформированного состояния композита использованы стандартные решения осесимметричной задачи с привлечением функции напряжений A_{ig} . В сферических координатах радиальная компонента перемещения, обозначенная u , будет являться функцией от радиуса r . Тогда три диагональные составляющие тензора деформаций (деформации сдвига равны 0) будут соответственно равны:

$\epsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}$, $\epsilon_{\theta\theta} = \epsilon_{\phi\phi} = \frac{u}{r}$, где θ и ϕ – углы в сферических координатах.

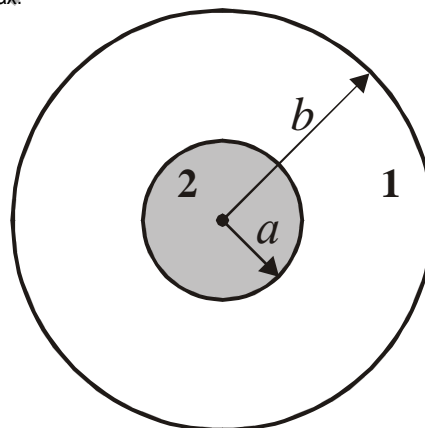


Рис. 2. Схематическое представление анализируемой системы: (1) – активная матрица, $a < b$, (2) – наполнитель, $0 < a$, где r – радиальная координата

В i -ой фазе две независимых составляющих (при $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\phi\phi}$) тензора деформаций могут быть соответственно записаны:

$$\sigma_{rr} = \left(K_i + \frac{4}{3} G_i \right) \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \left(K_i - \frac{2}{3} G_i \right) \frac{u}{r} - 3K_i \epsilon_i^0, \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(K_i - \frac{2}{3} G_i \right) \frac{\partial u}{\partial r} + \left(2K_i + \frac{2}{3} G_i \right) \frac{u}{r} - 3K_i \epsilon_i^0, \quad (6)$$

где ϵ_i^0 – свободные деформации расширения i -ой фазы.

Для решения дифференциальных уравнений (5), (6) воспользуемся решением Лямэ: для i -ой фазы общее решение для радиальной компоненты вектора перемещений $u(r)$ будет иметь вид

$$u(r) = \alpha_i r + \frac{\beta_i}{r^2}, \quad \text{где } \alpha_i \text{ и } \beta_i \text{ – некоторые неизвестные коэф-}$$

фициенты, различные для каждой фазы, определяемые из соответствующих граничных условий. Тогда с учетом принятой функции

перемещений, и учитывая, что для заполнителя $\beta = 0$, уравнения (5) и (6) примут вид:

$$\sigma_{rr} = 3K_i\alpha_i - 4G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i\epsilon_i^0, \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 3K_i\alpha_i + 2G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i\epsilon_i^0, \quad (8)$$

Для нахождения оставшихся неизвестных коэффициентов в уравнениях (7), (8) могут быть использованы:

- условия неразрывности перемещений и напряжений на границе раздела «заполнитель – матрица» при $r = a$;
- условие равенства нулю напряжений в радиальном направлении при $r = b$.

С учетом принятых граничных условий может быть записана следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_m + \frac{\beta_m}{a^3} - \alpha_{id} = 0 \\ K_m\alpha_m - \frac{4}{3}G_m \frac{\beta_m}{a^3} - K_{id}\alpha_{id} - K_m\epsilon_m^0 = 0, \\ K_m\alpha_m - \frac{4}{3}G_m \frac{\beta_m}{b^3} - K_m\epsilon_m^0 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Относительные деформации расширения, развивающиеся в композитной системе, в общем случае будут равны:

$$\epsilon_{0,CE} = \frac{u(r=b)}{b} \quad \text{или} \quad \epsilon_{0,CE} = \alpha_m + \frac{\beta_m}{b^3}, \quad (10)$$

где α_m, β_m – коэффициенты, определяемые из решения системы (9).

Получив решение для одиночного включения в соответствии с основными положениями D–EMT, выполняют замену существующей системы, состоящей из одиночного включения и активной матрицы (система «первого уровня»), некоторой идеализированной однородной средой, имеющей в процессе расширения относительные деформации $\epsilon_{0,CE}$ и жесткостные характеристики:

$$K_0 = K_m + K_m k(K_{id}, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (11)$$

$$G_0 = G_m + G_m g(G_{id}, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (12)$$

где k и g – безразмерные коэффициенты, зависящие от формы моделируемых частиц и соотношения K_m/K_{id} и G_m/G_{id} .

В соответствии с положениями D–EMT для данной однородной системы часть объема ($c=0,05$) заменяем заполнителем и в свою очередь находим K_j и G_j , воспользовавшись соответствующими уравнениями. Затем, подставив в систему уравнений (9) соответствующие значения K_m, G_m и $\epsilon_m^0 = \epsilon_{0,CE}$, найдем относительную деформацию расширения ϵ_j ($j = 1, 2, \dots, n$, причем $\sum_{j=1}^n c = c_{agg}$)

(«второй уровень»). Так, путем последовательной замены, переходя от уровня к уровню, для реальной концентрации заполнителя c_{agg} определяют текущие значения жесткостных характеристик K, G и относительную деформацию расширения ϵ композитной системы в момент времени τ . Полученная деформация ϵ соответствует деформации «свободного» расширения композита ϵ_{CE} .

Для расчета прогнозируемой величины самонапряжения в условиях стандартного ограничения идеализированный однородный массив с установленными жесткостными характеристиками и деформацией расширения ϵ_{CE} помещают в стальную оболочку с жесткостью, эквивалентной жесткости упругого ограничения при коэффициенте армирования ρ_l . Для модели «расширяющееся ядро в упругой оболочке», воспользовавшись уравнениями (7) и (8), была определена относительная деформация расширения бетона ϵ_c в условиях внешнего упругого ограничения. Для случая трехосного ограниче-

ния относительные связанные деформации можно определить по следующей зависимости:

$$\epsilon_c(\tau) = \frac{1}{1 + \rho_l \frac{K_s}{K_c(\tau)}} \cdot \epsilon_{TOT}(\tau), \quad (13)$$

где K_c – объемный модуль бетона;

K_s – объемный модуль стали;

ϵ_{TOT} – деформация «свободного» расширения бетона.

Тогда величина самонапряжения для рассматриваемой модели определяется по традиционной формуле:

$$\sigma_{CE} = \epsilon_c \rho_l E_s. \quad (14)$$

Отношение прогнозируемой величины самонапряжения к марке по самонапряжению в стандартных условиях ограничения будет равно:

$$\frac{\sigma_{CE}}{f_{CE,d}} = \frac{1 + \left(\frac{K_s}{K_c}\right)}{1 + \rho_l \cdot \left(\frac{K_s}{K_c}\right)} \cdot \rho_l \cdot 10^2 \quad (15)$$

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

Сравнение опытных данных с данными, получаемыми в результате расчетов по зависимости (15) для случая трехосного ограничения, представлено на рис. 3.

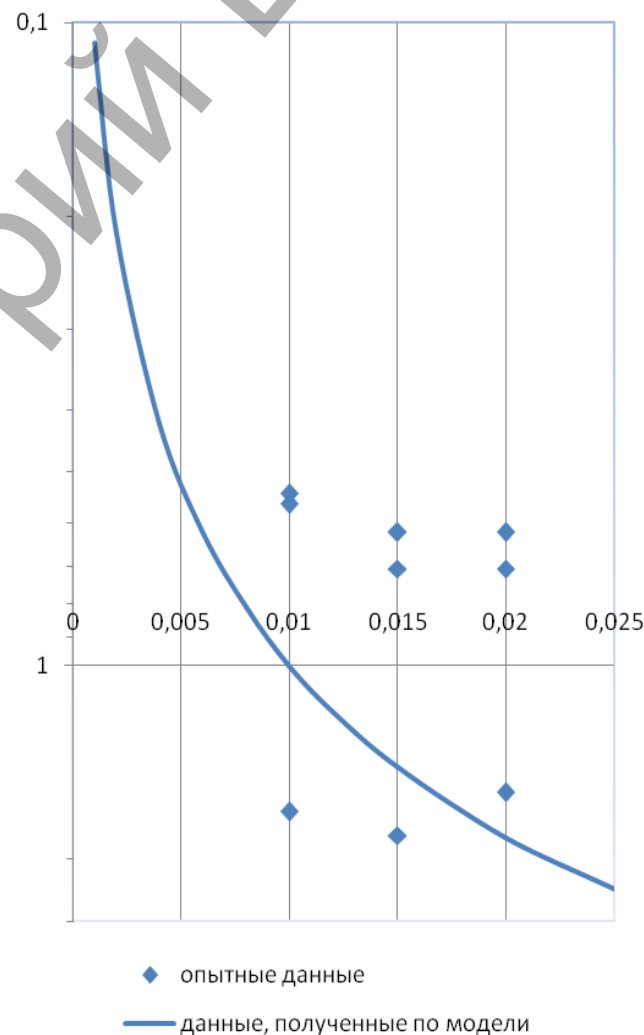


Рис. 3. Отношение прогнозируемой величины самонапряжения к величине марки по самонапряжению напрягающего цемента в зависимости от коэффициента армирования

Как видно из представленной графической интерпретации зависимостей, не взирая на достаточно обширный разброс экспериментальных данных, модель достаточно адекватно описывает влияние изменения процента армирования на величину самоупруга 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. Самоупруганный железобетон и его применение в строительстве // Опыт и перспективы применения бетонов на

напрягающем цементе в строительстве: материалы науч.-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., Berryman J. G. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations // Mechanics of Materials, 2001. – P. 455–470.
8. Бондаренко, В.М. Сопротивление осевому сжатию сталетрубо-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 02.02.12

PAVLOVA I.P., BONDARENKO V.M. Expansive concrete composite model for prediction self-stress magnitude in triaxial restriction conditions

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. Model allow with adequate degree of accuracy prognoses main characteristic of self-stressed concrete – self-stressing.

УДК 624.072.011.1

Жук В.В., Ласкевич И.Г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛОДЕРЕВЯННОЙ ФЕРМЫ С СОСТАВНЫМ ВЕРХНИМ ПОЯСОМ

Введение. Основной ориентир для агропромышленного комплекса Республики Беларусь на нынешнюю пятилетку – выйти на самокупаемость и самофинансирование. В ходе рабочей поездки в Брестскую область в конце прошлого года Президентом была поставлена задача перед сельхозорганизациями: в течение 2012 года каждая из них за счет собственных средств должна реконструировать и модернизировать хотя бы одну из молочнотоварных ферм – в общей сложности 228 объектов. С учетом того, что в нашей области только 33% дойного стада содержится в ресурсосберегающих помещениях, поэтому с обновлением имеющихся молочнотоварных ферм, будет продолжено и строительство современных животноводческих комплексов.

Особенности технологических процессов в зданиях промышленных комплексов для крупного рогатого скота обуславливают необходимость создания достаточно просторных производственных помещений, не разделенных внутренними капитальными стенами, при этом на одно животное должно приходиться (40–60) м³ воздуха. Наиболее удовлетворяют требованиям индустриализации каркасы из сборных железобетонных, клееных деревянных и стальных элементов заводского изготовления, а также каркасы смешанного типа, в которых вертикальные элементы (колонны) изготавливают из сборного железобетона, а несущие конструкции – из дерева и стали [1].

Руководителем области К.Сумаром с целью удешевления строи-

тельства поставлена задача: работы по реконструкции и модернизации молочнотоварных ферм вестихозспособом [2]. Очевидно, снизить стоимость строительства позволит и применение конструкций, изготовленных из местных материалов, например, древесины, обладающей целым рядом положительных свойств. Несущие конструкции из древесины могут быть изготовлены в столярных мастерских с применением средств малой механизации или непосредственно на строительной площадке с использованием передвижных слесарно-механических мастерских.

На кафедре строительных конструкций разработана и в мастерских ПМК-6 объединения «Брестоблсельстрой» изготовлена металлодеревянная ферма пролетом 8,56 м с составным верхним поясом из досок. Ферма предназначена для использования в качестве несущей конструкции под кровлю из штучных кровельных материалов (асбестоцементных волнистых листов, металлочерепицы и т.п.) в покрытиях крайних пролетов зданий для крупного рогатого скота бесчердачного типа пролетом 21 (7,5+6,0+7,5) м, в которых из-за ограниченного сортамента пиломатериалов применение конструкций из цельной древесины невозможно.

Ферма (рисунок 1) включает деревянный составной по длине и ширине верхний пояс: доски сечением $b \times h = 50 \times 175$ мм, длиной 5800 и 2760 мм соединены по длине между собой «вразбежку» через деревянные прокладки сечением $b \times h = 50 \times 175$ мм длиной 400 мм

Жук Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Ласкевич Ирина Геннадьевна, магистрант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

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