

- спрогнозировать возможность прогрессирующего обрушения и спроектировать конструктивные мероприятия по его предотвращению;
- спрогнозировать оценку возможных температурных воздействий;
- выполнить искусственное регулирование усилий с целью их оптимального перераспределения в элементах проектируемых систем.

К сожалению, в процессе проектирования часто недостаточно внимания уделяется влиянию геометрической и возможной конструктивной нелинейности на степень надежности проектируемой системы. В случае сложных стержневых систем это может привести к значительным ошибкам в оценке их НДС, и следовательно, снизить их надежность. Изложенный в настоящей статье деформационный метод расчета и компьютерная программа SdCAD, в которой он реализован, призваны обеспечивать интегрированный подход, что позволяет до предела снизить ошибки, скрытые в результате недооценки влияния деформированной схемы равновесия на точность расчета, и таким образом, повысить степень надежности проектируемых систем.

#### **Список цитируемых источников**

1. Надежность строительных конструкций. Общие принципы: СТБ ISO 2394-2007 (ISO 2394:1998, IDT). Введ. 29.12.2007, № 67. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2007. – 65 с.
2. Перельмутер, А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Киев: Сталь, 2002. – 600 с.
3. Уласевич, В.П. Деформационный расчет гибких балочно-вантовых систем методом конечных элементов в среде MathCAD / В.П. Уласевич, О.В. Костюк // Вестник БрГТУ, Строительство и архитектура. – 2004. – № 1 (25). – С. 111–117.
4. Уласевич, В.П. Прямолинейный гибкий стержень как универсальный конечный элемент в расчетах гибких стержневых систем методом конечных элементов / В.П. Уласевич, О.В. Костюк // Вестник БрГТУ, Строительство и архитектура. – 2007. – № 1 (43). – С. 45–49.
5. Уласевич, В.П. Деформационный метод расчета балочно-вантовых систем и его роль в проектировании усиления конструкций перекрытий / В.П. Уласевич, О.В. Костюк // Вестник БрГТУ, Строительство и архитектура. – 2008. № 1 (49). – С. 57–62.

УДК 624.012.36

## **КОСВЕННОЕ АРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА**

**Санникова О.Г., Кондратчик А.А.**

**Введение.** Сцепление арматуры с бетоном является одним из наиболее важных факторов, обеспечивающих не только их совместную работу, но и условия формирования напряженного состояния на приопорных участках элементов с предварительно напряженной арматурой. Как правило, говоря о сцеплении, имеют в виду химическое взаимодействие между сталью и бетоном, склеивание материалов в контактном слое, смятие или срез бетона между искусственными неровностями на поверхности арматуры, трение между арматурным стержнем и окружающим его бетоном. Эти факторы определяют величину потерь предварительного напряжения. длину зоны анкеровки напрягаемой арматуры, изменение величины напряжений обжатия бетона и т. д. Для железобетонных конструкций из напрягающего бетона системные исследования в данной области не проводились.

### Конструкции с арматурой, напрягаемой физико-химическим способом.

При изготовлении конструкций из напрягающего бетона происходит предварительное напряжение арматуры физико-химическим способом. Деформирование арматуры происходит одновременно с окружающим ее бетоном, благодаря силам сцепления, действующим в контактной плоскости. В таблице 1 даны основные факторы, учитываемые нормативными документами разных стран при проектировании в оценке условий сцепления.

Таблица 1 – Основные факторы, учитываемые при расчете сцепления в нормативных документах [2]

Страна	Прочность бетона		Диаметр арматуры		Поперечная арматура		Вид поверхности арматуры		Напряженное состояние бетона	
	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К
Беларусь										
Россия							*			
Германия										
Франция										
Англия										
США										

Р – учитывается при расчете величины напряжений сцепления;  
 К – учитывается при выполнении конструктивных требований.

В нашем случае интерес представляет прочность бетона и напряженное состояние бетонного массива. Непосредственно после бетонирования расширение напрягающего бетона происходит одновременно с нарастанием прочности структурных связей при использовании для реакции влаги затвердения бетонной смеси. Увлажнение бетона, стимулирующее процесс активного расширения, производится при достижении бетоном так называемой “технологической” прочности, равной 7,5..10 МПа [1]. Увеличение “технологической” прочности бетона ведет к улучшению условий сцепления арматуры с бетоном, однако вызовет необходимость дополнительного расхода энергии напрягающего бетона на деформирование структуры бетона. Это приведет к снижению размера деформаций бетона, а следовательно, к снижению величины предварительного напряжения арматуры физико-химическим способом. Очевидно, что для повышения сил сцепления арматуры с бетоном, необходимо использовать иные способы.

Напряженное состояние окружающего арматуру бетона будет оказывать влияние на величину касательных напряжений, действующих по длине стержня. Ярким примером сказанному является механизм влияния усадки на сцепление, когда боковое давление бетона на поверхность стержня увеличивает силы трения до 0,5..1,5 МПа [3]. В самонапряженных конструкциях расширение имеет объемный характер, что приведет к аналогичному эффекту. В то же время имеется возможность создания локальных по длине арматуры участков, где давление на арматуру в поперечном направлении будет иметь значительно большее значение. Так как при расширении напрягающего бетона арматура, независимо от ее ориентации в сечении конструкции, будет напрягаться физико-химическим способом, то, благодаря ее упругим свойствам, будут моделироваться в плоскости, перпендикулярной оси упругого ограничения расширению, и напряжения обжатия. Это произойдет, если в конструкциях из напрягающего бетона установить, например, косвенное армирование в виде сеток или спиралей.

**Конструкции с арматурой, напрягаемой комбинированным способом.** Предварительное напряжение арматуры одним из традиционных способов до укладки в оснастку напрягающего бетона и последующее напряжение арматуры физико-химическим способом получило название – комбинированный способ преднапряжения арматуры. Для таких конструкций, как было показано в [3 и 4], расширение напрягающего бетона ведет к снижению величины ранее созданного механическим способом напряжения на участках между упорами стенда и торцами конструкции. Это приводит к тому, что арматура, благодаря упругим характеристикам, стремится вернуться в исходное состояние и воздействует на торцы конструкции.

$$\Delta P_{m,CE} = \Delta \sigma_{s,CE}^* \cdot A_p = \sigma_{s,CE} \cdot k_n \cdot A_p \quad (1)$$

$$\Delta \sigma_{s,CE}^* = \varepsilon_{s,CE}^* \cdot E_s = \frac{\varepsilon_{s,CE} \cdot l_s}{l_{ce}} \cdot E_s = \sigma_{s,CE} \cdot k_n, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{s,CE}^*$  и  $\Delta \sigma_{s,CE}^*$  – относительные деформации и изменение напряжения в арматуре на свободных участках соответственно;

$\varepsilon_{s,CE}$  и  $\Delta \sigma_{s,CE}$  – относительные деформации и напряжения в арматуре внутри элемента, созданные физико-химическим способом, соответственно;

$l_s$  и  $l_{ce}$  – длина элемента и свободных участков между упорами и торцами элемента соответственно.

Это приведет к тому, что величина напряжений обжатия бетона ( $\sigma_c$ ) может быть, в зависимости от коэффициента  $k_n = l_s/l_{ce}$ , больше самонапряжения ( $\sigma_{ce}$ ) в 10 и более раз, а следовательно, будет происходить проскальзывание стержня и снижение предварительного напряжения в арматуре.

Эффективным, на наш взгляд, противодействием этому может стать установка сеток косвенного армирования на торцевых участках, арматура которых будет напрягаться физико-химическим способом, создавая обжатие продольной арматуры и тем самым увеличивая сцепление арматуры, напрягаемой комбинированным способом, с бетоном.

**Влияние косвенного армирования на сцепление арматуры с бетоном.** На необходимость установки косвенной арматуры указывали Е. Мерш (1904 г.), Ф. Эмпергер, В. Мурашев, И. Ахвердов, Т. Гараи (1933-1939 гг.), Б. Соловьев, И. Овчинников, С. Дмитриев, А. Оатул, М. Холмянский (1970-1981 гг.), Р. Шарипов, Ю. Изотов, Г. Судаков, А. Веселов и т. д. (1982-2006 гг.), отводя ей в основном роль противодействия продольным трещинам в зоне анкеровки продольной арматуры. И. Г. Овчинников [5], проводя целенаправленно исследование влияния косвенной арматуры на сцепление арматуры с бетоном, установил следующее. Косвенная арматура препятствует поперечным деформациям бетона в пределах области силового взаимодействия (область, ограниченная окружностью, на поверхности которой вертикальные перемещения не превышают 5% от величины смещения стержня) и срезу бетона между рифлениями. Увеличивается (до 2 раз) количество трещин, а ширина их раскрытия уменьшается по сравнению с элементом без косвенной арматуры. В образцах без косвенной арматуры разрушающая нагрузка на 25% выше нагрузки, при которой появились радиальные тре-

шины и на 10% выше нагрузки начала скольжения, а в образцах с косвенной арматурой эти показатели были соответственно на 70% и 60% выше.

Все исследователи отмечают, что активное включение косвенной арматуры в работу происходит при появлении и раскрытии трещин (рисунок 1), т. е. в элементах из обычного бетона косвенная арматура играет пассивную роль до определенного момента.

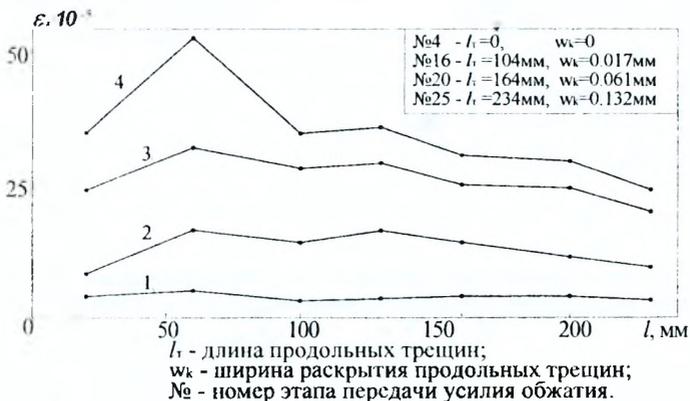
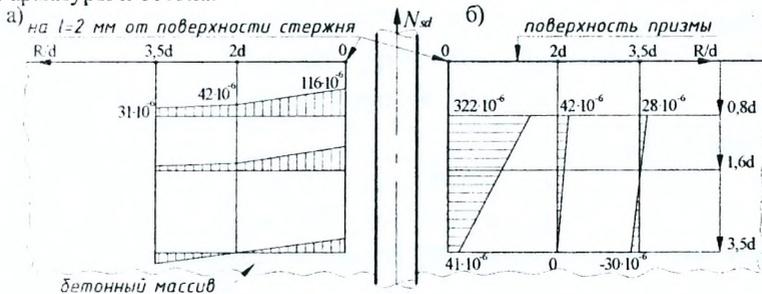


Рисунок 1 – Деформации ( $\varepsilon_x$ ) стержней сеток косвенного армирования при передаче усилия натяжения арматуры с упоров на бетон [5]

На рисунке 2 приведено распределение кольцевых и вертикальных деформаций у арматурного стержня при его выдергивании из бетонного массива, которое свидетельствует о размерах локального участка активного взаимодействия арматуры и бетона.



а) – кольцевые деформации; б) – вертикальные деформации

Рисунок 2 – Распределение относительных деформаций у арматурного стержня при выдергивании из бетонной призмы [5]

Установка сеток косвенного армирования на длине зоны анкеровки в элементах из напрягающего бетона приведет к созданию плоского напряженного состояния [6] в результате преднапряжения арматуры физико-химическим способом (рисунок 3), параметры которого определяются по следующим зависимостям.

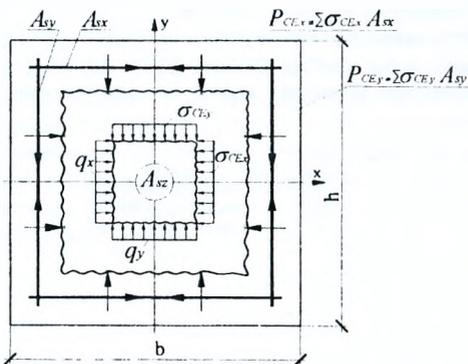


Рисунок 3 – Схема действия усилий в сечении с арматурной сеткой стержней которой напрягаются физико-химическим способом

Усилие предварительного обжатия бетона, созданного физико-химическим способом, при предварительном напряжении арматуры сеток косвенного армирования:

$$\begin{aligned} P_{CE,x} &= \sum \sigma_{CE,x} \cdot A_{sx} = \sum \epsilon_{CE,x} \cdot E_s \cdot A_{sx}; \\ P_{CE,y} &= \sum \sigma_{CE,y} \cdot A_{sy} = \sum \epsilon_{CE,y} \cdot E_s \cdot A_{sy}. \end{aligned} \quad (3)$$

Величина самонапряжения в бетоне по направлению осей X и Y:

$$\begin{aligned} \sigma_{CE,x} &= P_{CE,x} / A_x = F_{CE,x} / (h \cdot S); \\ \sigma_{CE,y} &= P_{CE,y} / A_y = F_{CE,y} / (b \cdot S). \end{aligned} \quad (4)$$

где S – шаг сеток косвенного армирования.

Величина связанных деформаций при центральном положении упругого ограничения деформациям с учетом соотношения  $\rho_x$  и  $\rho_y$ :

а) при  $\rho_x \leq \rho_y$

$$\begin{aligned} \epsilon_{CE,x} &= (0,98 + 16\rho_y - 12\rho_x) \epsilon_{CE,x0}; \\ \epsilon_{CE,y} &= (0,98 + 16\rho_x - 12\rho_y) \epsilon_{CE,y0}; \end{aligned} \quad (5)$$

б) при  $\rho_x > \rho_y$

$$\begin{aligned} \epsilon_{CE,x} &= (0,98 + 16\rho_x - 12\rho_y) \epsilon_{CE,x0}; \\ \epsilon_{CE,y} &= (0,98 + 16\rho_y - 12\rho_x) \epsilon_{CE,y0}. \end{aligned} \quad (6)$$

Величина условных связанных деформаций по направлению соответствующих осей:

$$\epsilon_{CE,x0} = \frac{\sigma_{CE,x}}{E_s} = \frac{\sigma_{CE,x}}{\rho_x \cdot E_s}; \quad \epsilon_{CE,y0} = \frac{\sigma_{CE,y}}{E_s} = \frac{\sigma_{CE,y}}{\rho_y \cdot E_s} \quad (7)$$

Величина самонапряжения бетона:

$$\begin{aligned} \sigma_{CE,x} &= f_{CE,d} \cdot k_{px} \cdot k_s \cdot k_e \cdot k_w \cdot k_{c0}; \\ \sigma_{CE,y} &= f_{CE,d} \cdot k_{py} \cdot k_s \cdot k_e \cdot k_w \cdot k_{c0}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $f_{CE,d}$  – расчетное самонапряжение (МПа), соответствующее марке напрягающего бетона по самонапряжению ( $S_p$ );

$k_{\rho_x}, k_{\rho_y}$  – коэффициенты, учитывающие влияние величины упругого ограничения расширению:

$$k_{\rho_x} = \sqrt{\frac{1,57\rho_{lx}}{0,0057 + \rho_{lx}}}; \quad k_{\rho_y} = \sqrt{\frac{1,57\rho_{ly}}{0,0057 + \rho_{ly}}}; \quad (9)$$

$k_x = 1,0$  (так как элементы упругого ограничения расположены симметрично);  $k_y = 1,0 - 0,18$  (зависит от условий увлажнения элемента);  $k_{c_0} = 1,0$  (при прочности бетона к началу интенсивного увлажнения в пределах 7,5..10 МПа).

**Экспериментальные исследования влияния косвенной арматуры на деформации расширения напрягающего бетона.** Исследования были выполнены на образцах размером 120x120x1500 мм из напрягающего бетона. Все образцы имели продольное армирование из 1Ø14 S800 ( $\rho_l = 1,06\%$ ). Образцы отличались наличием или отсутствием предварительного напряжения арматуры до изготовления образцов и сеток косвенного армирования, а именно:

- образец марки СН – преднапряжение продольной арматуры и сетки косвенного армирования отсутствуют;

- образец марки КНК0 – продольная арматура предварительно напряжена механическим способом, сетки косвенного армирования отсутствуют;

- образец марки КНК40 – продольная арматура предварительно напряжена механическим способом, сетки косвенного армирования установлены (в левой части – сетки С-1, шаг 40 мм,  $\rho_{sk} = 0,82\%$ ,  $r/\varnothing = 2,86$ ; в правой части – сетки С-2, шаг 40 мм,  $\rho_{sk} = 0,82\%$ ,  $r/\varnothing = 2,14$ );

- образец марки КНК80 – продольная арматура предварительно напряжена механическим способом, сетки косвенного армирования установлены (в левой части – сетки С-1, шаг 80 мм,  $\rho_{sk} = 0,41\%$ ,  $r/\varnothing = 2,86$ ; в правой части – сетки С-3, шаг 80 мм,  $\rho_{sk} = 0,41\%$ ,  $r/\varnothing = 1,43$ ).

Конструктивное решение сеток дано на рисунке 4. Сетки установлены на участке длиной 160 мм, начиная с сечения, отстоящего от торца образца на 40 мм.

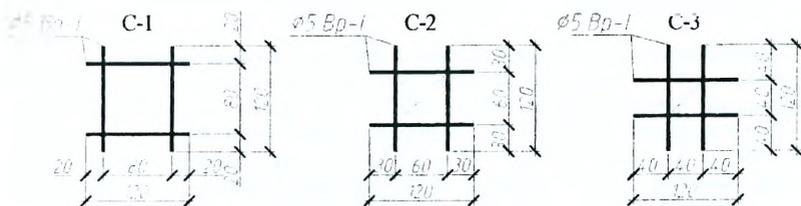


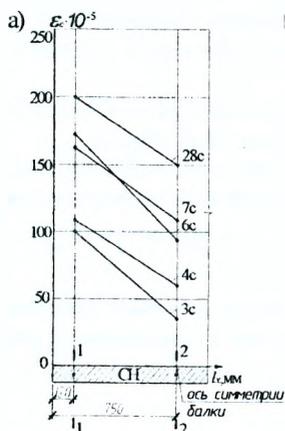
Рисунок 4 – Конструктивное решение сеток косвенного армирования

Предварительное напряжение арматуры выполнялось механическим способом (величина предварительного напряжения арматуры составила 508,25 МПа, 496,43 МПа, 514,15 МПа для образцов марки КНК0, КНК40 и КНК80 соответственно) с последующим закреплением на торцах силовой рамы (рисунок 5).

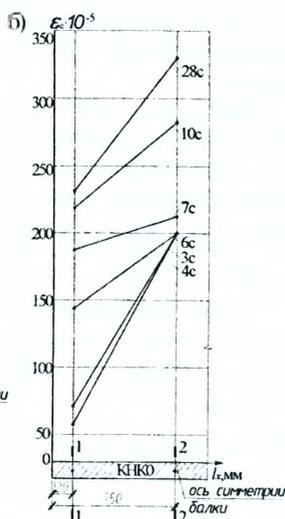


Рисунок 5 - Армирование опытных образцов

Самонапряжение бетона составило 1,75 МПа, 1,80 МПа, 1,85 МПа в возрасте 10 суток, 17 суток и 28 суток соответственно, а кубиковая прочность бетона – 24,2 МПа и 40,7 МПа в возрасте 9 суток и 28 суток соответственно. Измерение деформаций бетона выполняли переносной миссурой по реперам, наклеенным на бетонную поверхность образцов. Первые сутки образцы хранились в воздушно-сухих условиях; начиная со 2 по 28 сутки, образцы увлажнялись раз в сутки и укрывались полиэтиленовой пленкой. Результаты измерения деформаций бетона



а) образец марки СН  
б) образец марки КНК0.



на приопорном и среднем участках приведены на рисунках 6 и 7. При построении графиков использовались средние значения деформаций на участке.

Рисунок 6 – Деформации напрягающего бетона образцов СН и КНК0 при расширении

Деформации бетона приопорного участка образца марки СН с арматурой, напрягаемой физико-химическим способом (рисунок 6 а), отличаются от деформаций бетона образца марки КНК0 на таком же участке на +47,5% и –11,5% в возрасте 3 и 28 суток, от деформаций бетона образца марки КНК40 (левая часть, рисунок 7 а) на +25% и –25%, а для образца марки КНК80 (левая часть, рисунок 7 в) на –12,5% и –8,75% соответственно. Это указывает на существенное влияние сеток косвенного армирования на величину деформаций напрягающего бетона. На рисунке 8 приведено сопоставление средних деформаций бетона на приопорном и среднем по длине образца участках. Отношение  $\epsilon_c' / \epsilon_c''$  указывает не только на эффективность содержания косвенной арматуры (кривые 2 ( $\rho_{sk} = 0,82\%$ ) и 4 ( $\rho_{sk} = 0,41\%$ )), но и на влияние наличия арматуры в активной зоне взаимодействия продольной арматуры с бетоном (кривая 2 ( $\rho_{sk} = 0,82\%$ ,  $r/\varnothing = 2,86$ ) и кривая 3 ( $\rho_{sk} = 0,82\%$ ,  $r/\varnothing = 2,14$ )).



**Заключение.** Для железобетонных элементов из напрягающего бетона могут быть искусственно созданы участки с фиксированным обжатием продольной арматуры бетоном, что приведет к увеличению сцепления на локальном участке. Такой участок предлагается называть линейным самонапряженным анкером, а в зависимости от его положения по длине элемента – торцевым или внутренним.

#### **Список цитированных источников**

1. Тур, В. В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В. В. Тур. – Брест: Из-во БПИ, 1998. – 246 с.
2. Драган, А. В. Экспериментальное исследование анкерующей способности ненапрягаемой арматуры серповидного профиля при статическом нагружении / А. В. Драган // Вестник БрГТУ, Строительство и архитектура – 2006. – № 1 (37). – С. 64–69.
3. Кондратчик, А. А. Экспериментально-теоретические основы расчета конструкций из напрягающего бетона при совместном действии изгибающего момента, продольных и поперечных сил / А. А. Кондратчик. – Брест: Издательство БрГТУ, 2007. – 172 с.
4. Кондратчик, А. А. Железобетонные конструкции с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом // Строительная наука и техника. – 2008. – № 5. – С. 44–53.
5. Овчинников, И. Г. Влияние косвенного армирования на сцепление стержневой арматуры с бетоном / И. Г. Овчинников // Материалы Воссююзного научно-технического совещания в г. Челябинск. “Сцепление арматуры с бетоном” – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1971. – С. 88–94.
6. Марчук, В. А. Деформации и собственные напряжения несимметрично двухосно армированных плоских элементов из напрягающего бетона на стадии его расширения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Марчук Виталий Алексеевич. – Брест, 2002. – 176 с.

УДК 624.012.45.046

### **СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МЕСТНОМ СРЕЗЕ (ПРОДАВЛИВАНИИ) ПО ОТЕЧЕСТВЕННЫМ И ЗАРУБЕЖНЫМ НОРМАМ**

**Тамкович С.Ю., Рак Н.А.**

**Введение.** В настоящее время в практике строительства Республики Беларусь получила широкое распространение конструктивная схема многоэтажных зданий с плоскими неразрезными монолитными перекрытиями. Жилые здания, возведенные при такой конструктивной схеме, обеспечивают возможность свободной планировки квартир и обладают повышенными потребительскими качествами.

При такой конструктивной схеме многоэтажного здания наиболее ответственным элементом плоского неразрезного перекрытия является узел примыкания перекрытия к колонне. В этой зоне перекрытия наблюдается значительная концентрация напряжений, направленных перпендикулярно плоскости плиты, которые могут вызвать разрушение плиты от продавливания. В связи с этим при проектировании плоских монолитных перекрытий обязательным является выполнение расчета плиты на продавливание.

Целью проведенных авторами исследований явилось сопоставление и анализ методов расчета прочности железобетонных элементов при продавливании, используемых в нормативных документах различных стран.

**Сопоставление и анализ расчетных зависимостей норм.** Выполнено сопоставление расчетных зависимостей, представленных в нормативных документах СССР, Республики Беларусь, Российской Федерации и других стран (всего 19 документов).