

Изменение количества новообразований а, следовательно, и исходных клинкерных минералов можно проследить и по изменению количества гидроксида кальция. Однако при некоторых определенных условиях твердения и хранения частично происходит процесс карбонизации гидроксида кальция с образованием кальцита. Это обстоятельство следует учитывать при расчетах степени гидратации по $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Рентгенограммы цементного теста, гидратированного в 1, 3, 14, 28 суток, представлены на рисунках 4÷7 соответственно.

Установлено, что в процессе гидратации гидроксид кальция растет в виде индивидуальных кристаллов в порах между гелем и частицами клинкерных минералов, частично захватывая слой геля, покрывающий частицы. Таким образом, образуются зоны с разной пористостью и прочностью. Образование разных по структуре и, следовательно, прочности зон характерно для начального периода гидратации. При увеличении возраста твердения структура цементного теста становится более однородной.

Вывод. Исследование процессов твердения цементного камня разного возраста твердения (1, 3, 7, 14 и 28 суток) методом дифференциального термического анализа и методом рентгеновского фазового анализа позволили сделать вывод: химическая добавка STG-3 обладает способностью ускорителя твердения цементных композиций в нормальных условиях.

ULASEVICH V.P., ULASEVICH Z.N., JAKUBOVSKAJA O.A. An estimation of process structure education cement of a stone with the additive STG-3 physics by chemical methods

In clause the results physics of chemical researches of processes gidratation and structure of education cement of a stone modified by the chemical additive for concrete STG-3 THAT RB are stated 02071613.379-2004. The researches were carried out by a method of the differential thermal analysis and method of the x-ray phase analysis of samples hardening in 1, 3, 7, 14, 28 day. Control samples prepared on portlandcement PC 550 D0; samples with the additive STG-3 - on portlandcement PC 550 D0 with her optimum charge equal 0.075% from weight of cement recalculation on dry substance.

The analysis of results of tests of samples has allowed to make a conclusion: the chemical additive STG-3 THAT RB 02071613.379-2004 has ability of the accelerator hardening cement of compositions in normal conditions.

УДК 624.04

Уласевич В.П., Костюк О.В.

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА БАЛОЧНО-ВАНТОВЫХ СИСТЕМ И ЕГО РОЛЬ В ПРОЕКТИРОВАНИИ УСИЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПЕРЕКРЫТИЙ

Введение. В процессе технической эксплуатации зданий и сооружений необходимо соблюдение нормативных требований к техническому состоянию и обслуживанию строительных конструкций с оценкой в соответствии с [1]. В случае неудовлетворительного состояния обследованной конструкции возникает необходимость в восстановлении ее работоспособности путем устранения дефектов, повреждений, а также естественного износа, влияющих на требуемую надежность и долговечность. Иногда необходимость в усилении возникает из-за ошибок, допущенных при проектировании и строительстве или неправильной технической эксплуатации. Существует и объективная реальность, суть которой состоит в том, что запроектировать все несущие конструкции зданий и сооружений с равной долговечностью практически невозможно. Кроме того, те из них, которые в процессе эксплуатации работают в более неблагоприятных условиях, получают износ более интенсивно, а поэтому чаще нуждаются в ремонтах. Следует учитывать и то, что в процессе разработки строительных проектов на реконструкцию и модернизацию зданий возникает необходимость в установке нового технологического оборудования, учета изменений постоянных и временных атмосферных нагрузок, изменений в СНиП и СНБ.

Независимо от причин, снизивших эксплуатационную надежность несущих конструкций до оценки, согласно [1] *категориями IV-неработоспособное (неудовлетворительное)*, или *V-предельное (предавариное)*, восстановление их работоспособности до требований [2] связано с разработкой различных конструктивных решений на усиление. Решение о необходимости усиления принимается на осно-

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Добавка для бетонов STG-3 ТУ РБ 02071613.379-2004. Опытная партия / В.П. Уласевич, З.Н. Уласевич, БрГТУ. – Введ. 15.07.2004. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2004. – 8 с.
2. Уласевич, В.П. Некоторые свойства конструкционных бетонов, модифицированных добавкой STG-3 / В.П. Уласевич, З.Н. Уласевич [и др.] В сб. // Вестник БГТУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. №1 (43). – С. 55–60.
3. Ларионова, З.М. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона / З.М. Ларионова, Л.В. Никитина, В.Р. Гарашин. – М.: Стройиздат, 1977. – 264 с.
4. Рамачандран, В.С. Применение дифференциального термического анализа в химии цементов. Перевод с англ. / В.С. Рамачандран; под ред. д-ра хим. наук В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1977. – 407 с.
5. Ковба, Л.М. Рентгенофазовый анализ. – 2-е изд., доп. и перераб. /Л.М. Ковба, В.К. Трунов. – М.: Издательство Московского университета, 1976. – 183 с.
6. Гиллер Я.И. Таблицы межплоскостных расстояний. В двух томах Том II (никелевый, медный, молибденовый и серебряный аноды). М.: Из-во «Недра», 1966. – 360 с.
7. Химия цементов. Под ред. Х.Ф.У. Тейлора. Сокращ. пер. с английского д.т.н. Ю.М. Бутта и к.т.н. Кржеминского.– М.: Из-во литературы по строит-ву, 1969. – 501 с.

Материал поступил в редакцию 17.01.08

вании анализа результатов обследования. Поскольку *усиление* представляет собой комплекс научных, проектных и инженерно-строительных мероприятий, позволяющих восстановить несущую конструкцию или ее отдельные элементы до требуемой надежности, то конструктивное решение на усиление не желательно отделять от процесса обследования, а необходимо рассматривать как его составную часть. В этом случае разработка проектной документации на ремонт, реконструкцию или модернизацию зданий и сооружений, которая должна выполняться с соблюдением требований [3], будет наиболее близкой к оптимальному инженерно-техническому решению.

Многообразие конструктивных схем усиления и их тщательный анализ показали, что наиболее часто усилению подвергаются несущие конструкции перекрытий и покрытий, основными несущими элементами которых являются балки и балочные системы, работающие на изгиб [4, 5]. Это убедительно доказывают и усредненные сроки долговечности важнейших несущих конструкций, приведенные в [8]. Из способов усиления несущих конструкций серьезного внимания заслуживают те, которые можно включить в классификацию, предложенную в [8], как *способ изменения расчетной схемы*. Это достигается чаще всего путем устройства дополнительных упругих промежуточных опор с последующим искусственным перераспределением усилий в элементах вновь образованных конструктивных систем путем предварительного натяжения. Существующее множество конструктивных схем усиления с учетом их статико-геометрических особенностей авторами в [6] предложено объединить в общий класс задач – *комбинированные балочно-вантовые системы (БВС)*.

Костюк Ольга Васильевна, инженер-конструктор, ведущий специалист ОДО «Брестстройсервис».

Заметим, что при разработке методик проектирования конструктивных систем главное внимание обычно уделяется особенностям конструирования систем усиления из конкретных строительных материалов (металл, железобетон, дерево), но при выборе расчетных схем и методов их расчета в литературе, посвященной проектированию, недооценивается необходимость учета деформированной схемы равновесия. Это связано с тем, что в последнее время появились вычислительные комплексы Lira, SCad и др., позволяющие строить сложные расчетные модели методом конечных элементов (МКЭ), обладающим высокой универсальностью при решении различных задач главным образом в линейной постановке. В то же время их использование для расчетов БВС с учетом деформированного состояния не всегда приводит к приемлемому решению, так как в этом случае возникают задачи более сложные в сравнении с линейным расчетом, а поэтому не всегда разрешимы с помощью универсальных расчетных комплексов.

Таким образом, сложность задач усиления конструкций с применением БВС во многом связана с методами решения задач строительной механики, ибо именно на этой стадии проектирования складывается возможность выбора расчетных схем, предельно близко описывающих работу конструктивной схемы усиления на всех стадиях эксплуатации. С другой стороны, напряженно-деформированные состояния БВС должны быть восприняты физико-механическими свойствами строительных материалов конструктивной схемы. Это особенно важно, если учитывать современную тенденцию на использование высокопрочных сталей, по стоимости отличающихся незначительно. В этой связи при проектировании конструктивных схем для усиления актуальна задача об их разработке, максимально использующих стержни, работающие главным образом на растяжение. Важное значение в вопросах усиления балочных конструкций играют и такие факторы, как снижение стоимости трудозатрат на монтаже, уменьшение транспортных расходов, возможность выполнить строительно-монтажные работы без остановки технологических процессов. Этим требованиям различные схемы БВС отвечают наиболее полно.

В этой связи оценка роли разработанного авторами деформационного метода расчета БВС [6, 7] актуальна как на стадии исследования особенностей их работы в системах усиления, так и при учете этих особенностей в процессах проектирования и строительства.

Основные разрешающие уравнения деформационного метода расчета. Система основных разрешающих уравнений в матричной форме МКЭ, разработанного авторами деформационного метода расчета, изложена в [6, 7] в виде

$$[K(\Delta)] \cdot \{\Delta\} = \{P_u\} + [T_\alpha]^T \cdot \{P'_s\} + \{R\}, \quad (1)$$

где $\{\Delta\}$ – вектор неизвестных перемещений узловых точек системы; $[K(\Delta)]$ – матрица внешней жесткости системы, зависящая, при переходе из исходного состояния в рассчитываемое, от искомого вектора перемещений $\{\Delta\}$, каждый элемент которой K_{ij} представляет собой реакцию i -го направления от единичного перемещения узла в j -м направлении; $\{R\}$ – вектор компонентов суммарных реакций всех узлов системы на все примыкающие к ним стержни; $\{P_u\}$ – вектор всех внешних нагрузок, действующих в узлах системы; $\{P'_s\}$ – вектор узловых усилий в стержнях системы с учетом граничных условий закрепления элемента в узлах, вызванных воздействием распределенных по длине элементов поперечных нагрузок, температурными воздействиями, усилиями предварительного напряжения; $[T_\alpha]$ – матрица преобразований координат; $\{R\}$ – вектор опорных реакций, действующих в узлах, на которые наложены опорные связи. Если в узле нет опорных связей, то соответствующие им величины в векторе $\{R\}$ системы (2) равны нулю. Если на рассчитываемую стержневую систему действует только узловая нагрузка, то вектор $\{P'_s\}$ равен нулю, а решение системы уравнений (1) относительно искомого перемещений возможно только при воздействии на рассчитываемую стержневую систему узловой нагрузки.

Структура системы уравнений (1), адекватная геометрической структуре рассчитываемой стержневой системы формируется по исходным данным в автоматическом режиме из матриц внутренней жесткости $[K_\alpha]$ отдельных КЭ.

Для прямолинейного КЭ матрицы внутренней жесткости $[K_\alpha]$ с учетом специальных функций, учитывающих продольно-поперечный

изгиб и возможные способы сопряжения концов КЭ с узлами, представлены в таблице 1.

Безразмерные трансцендентные функции для сжато-изогнутых КЭ, учитывающие влияние углов поворота на усилия, вычисляются по формулам [9]

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{(a_1 l)^2 \operatorname{tg}(a_1 l)}{3(\operatorname{tg}(a_1 l) - a_1 l)}; & \varphi_2 &= \frac{a_1 l (\operatorname{tg}(a_1 l) - a_1 l)}{8 \operatorname{tg}(a_1 l) \left(\operatorname{tg}\left(\frac{a_1 l}{2}\right) - \frac{a_1 l}{2} \right)}; \\ \varphi_3 &= \frac{a_1 l (a_1 l - \sin(a_1 l))}{4 \sin(a_1 l) \left(\operatorname{tg}\left(\frac{a_1 l}{2}\right) - \frac{a_1 l}{2} \right)}; & \varphi_4 &= \frac{\left(\frac{a_1 l}{2}\right)^2 \operatorname{tg}\left(\frac{a_1 l}{2}\right)}{3 \left(\operatorname{tg}\left(\frac{a_1 l}{2}\right) - \frac{a_1 l}{2} \right)}; \\ \eta_1 &= \frac{(a_1 l)^3}{3(\operatorname{tg}(a_1 l) - a_1 l)}; & \eta_2 &= \frac{\left(\frac{a_1 l}{2}\right)^3}{3 \left(\operatorname{tg}\left(\frac{a_1 l}{2}\right) - \frac{a_1 l}{2} \right)}; \\ a_1 &= \sqrt{\frac{|H|}{EI}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где H – составляющая продольного усилия в КЭ, направленная вдоль хорды, соединяющей концы КЭ (распор); EI – изгибная жесткость КЭ.

Для растянуто-изогнутых КЭ в вышеприведенных формулах необходимо произвести следующие замены: $(a_1 l)^2 \rightarrow -(a_1 l)^2$; $\sin(a_1 l) \rightarrow \sinh(a_1 l)$; $\operatorname{tg}(a_1 l) \rightarrow \operatorname{th}(a_1 l)$.

Матрица внешней жесткости отдельного i -го конечного элемента $[K_\alpha]_i$ системы с началом в узле a_i и концом в узле b_i по аналогии с [10] принята следующей блочной структуры:

$$[K_\alpha(\Delta)]_i = \begin{bmatrix} A^i_{a_i, a_i} & A^i_{a_i, b_i} \\ A^i_{b_i, a_i} & A^i_{b_i, b_i} \end{bmatrix}, \quad i = 1 \dots s,$$

где a_i и b_i – номера узлов, к которым примыкают соответственно начала и концы i -х конечных элементов;

$A^i_{a_i, a_i}$ – блок реакций на a_i -том конце i -го элемента (узловых усилий в соответствующих связях, соединяющих этот конец элемента с узлом a_i) от перемещений этого же a_i конца элемента (и соответственно узла a_i);

$A^i_{b_i, b_i}$ – аналогично, только применительно к концу b_i элемента (и к узлу b_i);

$A^i_{a_i, b_i}$ – блок реакций (узловых усилий) на a_i -том конце конечного элемента (и соответственно в a_i -том узле) от перемещений b_i -того его конца (b_i -того узла);

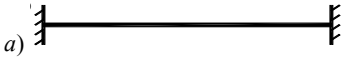
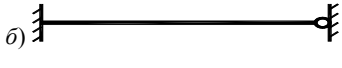
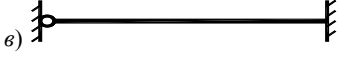

$A^i_{b_i, a_i}$ – аналогично $A^i_{a_i, b_i}$, если поменять местами a_i и b_i ;

S – количество конечных элементов в системе.

Для системы, состоящей из m узлов, матрица внешней жесткости системы $[K(\Delta)]$, свободной от внешних связей, также имеет блочную структуру вида

$$[K(\Delta)] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \dots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \dots & A_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{m1} & A_{m2} & A_{m3} & \dots & A_{mm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Таблица 1. Матрицы жесткости КЭ с учетом способов закрепления концов КЭ в узлах

 $[K'_3(\Delta)] =$	 $[K'_3(\Delta)] =$
$= \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EJ}{l^3} \eta_2 & -\frac{6EJ}{l^2} \varphi_4 & 0 & -\frac{12EJ}{l^3} \eta_2 & \frac{6EJ}{l^2} \varphi_4 \\ 0 & -\frac{6EJ}{l^2} \varphi_4 & \frac{4EJ}{l} \varphi_2 & 0 & \frac{6EJ}{l^2} \varphi_4 & \frac{2EJ}{l} \varphi_3 \\ \hline -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EJ}{l^3} \eta_2 & \frac{6EJ}{l^2} \varphi_4 & 0 & \frac{12EJ}{l^3} \eta_2 & -\frac{6EJ}{l^2} \varphi_4 \\ 0 & \frac{6EJ}{l^2} \varphi_4 & -\frac{2EJ}{l} \varphi_3 & 0 & -\frac{6EJ}{l^2} \varphi_4 & \frac{4EJ}{l} \varphi_2 \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EJ}{l^3} \eta_1 & -\frac{3EJ}{l^2} \varphi_1 & 0 & -\frac{3EJ}{l^3} \eta_1 & 0 \\ 0 & -\frac{3EJ}{l^2} \varphi_1 & \frac{3EJ}{l} \varphi_1 & 0 & \frac{3EJ}{l^2} \varphi_1 & 0 \\ \hline -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EJ}{l^3} \eta_1 & -\frac{3EJ}{l^2} \varphi_1 & 0 & -\frac{3EJ}{l^3} \eta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
 $[K'_3(\Delta)] =$	 $[K'_3(\Delta)] =$
$= \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EJ}{l^3} \eta_1 & 0 & 0 & -\frac{3EJ}{l^3} \eta_1 & -\frac{3EJ}{l^2} \varphi_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3EJ}{l^3} \eta_1 & 0 & 0 & \frac{3EJ}{l^3} \eta_1 & \frac{3EJ}{l^2} \varphi_1 \\ 0 & -\frac{3EJ}{l^2} \varphi_1 & 0 & 0 & \frac{3EJ}{l^2} \varphi_1 & \frac{3EJ}{l} \varphi_1 \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{H}{l} & 0 & 0 & \frac{H}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H}{l} & 0 & 0 & -\frac{H}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

и состоит из блоков A матриц $[K_{\alpha}(\Delta)]_i$, при этом, индексы a_i и b_i , принадлежащие блокам A , определяют их положение в матрице $[K]$. Каждый узел в плоской стержневой системе в общем случае обладает $n=3$ возможными перемещениями, поэтому порядок матрицы $[K(\Delta)]$ определен произведением $k=m \cdot n$.

Алгоритм формирования матрицы внешней жесткости (3) исходного состояния, свободной от внешних связей, изложен в [6]. Для формирования произвольной геометрической структуры системы с учетом произвольного способа закрепления концов стержня в узлах и жесткостных параметров КЭ в [7] разработан универсальный конечный элемент (КЭ) «Прямолинейный гибкий стержень». Стержневая система, сформированная из набора КЭ «Гибкий стержень», позволяет получить вектор $\{P'_s\}$ от воздействия поперечной нагрузки произвольной интенсивности, температурных воздействий, воздействий предварительного натяжения КЭ. Для формирования вектора $\{P'_s\}$ необходимо в основной системе метода перемещений решить для каждого КЭ нелинейную систему трех уравнений, полученную нами в [7] относительно основных неизвестных: продольного усилия H и нелинейно связанных с ним опорных моментов M_a, M_b .

При наложенных на систему внешних связях в системе уравнений (2.2) матрица внешней жесткости свободной системы (2.6) преобразуется в матрицу жесткости закрепленной системы $[K^*(\Delta)]$ вычеркиванием строк и столбцов, соответствующих наложенным связям, при этом, вычеркиваемом соответствующих строк в векторах $\{P_u\}$, $\{P_s\}$, $\{R\}$ образуются вектора $\{P_u^*\}$, $\{P_s^*\}$, $\{R^*\}$. Поскольку в результате этих преобразований в векторе $\{R^*\}$ остаются только нулевые элементы, то на данной стадии он может быть исключен. Тогда искомым вектор перемещений в глобальной системе координат будет определен из (1) по выражению

$$\{\Delta^*\} = [K^*(\Delta)]^{-1} \cdot (\{P_u^*\} + \{P_s^*\}), \quad (4)$$

где $\{\Delta^*\}$ – вектор, образованный из $\{\Delta\}$ после вычеркивания строк, соответствующих направлениям, в которых на систему наложены связи.

Вектор усилий $\{r\}$ по концам каждого КЭ в местной системе координат вычисляется по выражению

$$\{r\} = [K'(\Delta)] \cdot [T_{\alpha}] \cdot \{\Delta\} - \{P'_s\}, \quad (5)$$

где $[K'(\Delta)]$ – матрица жесткости КЭ в местной системе координат в деформированном рассчитываемом состоянии.

Найденный вектор $\{r\}$ (5) позволяет определить усилия в произвольном сечении КЭ, используя зависимости, определенные нами в [7].

В алгоритме компьютерной программы SdCAD [8] решение нелинейной системы уравнений (1) с учетом деформированного состояния выполняется двумя способами, в каждом из которых за исходное состояние системы принято недеформированное состояние, а результаты его решения принимаются за параметры первого приближения:

а) Способ «последовательных увязок силовых и деформационных параметров», суть которого применительно к решению системы уравнений (1) изложена нами в [6]. Достоинство метода – быстрая сходимость итерационного процесса и отсутствие необходимости вычислять частные производные, как это требуют все градиентные методы. В этом способе в матрице (3) на стадии итераций трансцендентные функции (2) принимаются равными единице. После решения системы (4) матрица внешней жесткости (3) пересчитывается с учетом (2) при значениях продольных сил, полученных в векторе $\{r\}$ с последующим вычислением определителя. Это позволяет по результатам определителя оценить состояние общей устойчивости системы: если определитель матрицы $[K(\Delta)]$ существенно положителен, то при любых значениях перемещений и поворотов концов КЭ – система устойчива; в критическом состоянии матрица жесткости становится вырожденной (ее детерминант меньше или равен нулю), что свидетельствует о неустойчивом состоянии системы.

Таблица 2. Сравнение результатов расчета

Автор	Вид расчета	Продольные усилия в КЭ, кН			Изгибающие моменты в узлах, кНм			Вертик. перемещ. узлов, мм		
		N _{2,3}	N _{5,6}	N _{8,9}	M ₁	M ₂	M ₇	Δ ₂	Δ ₇	Δ ₉
SdCAD	Лин.	-0.7689	-4.36	2.1149	-0.0006	-9E-04	-0.001	-0.004	0.021	-0.01
	Деф.	3.78691	2E-05	0.53015	-1.1884	2.378	-3.171	0.018	77.15	-0.003
Перельмутер А.В.		3.78717	0	0.53015	-	-	-	-	-	-
Точность расчета, %		-0.01%		0.0000%						

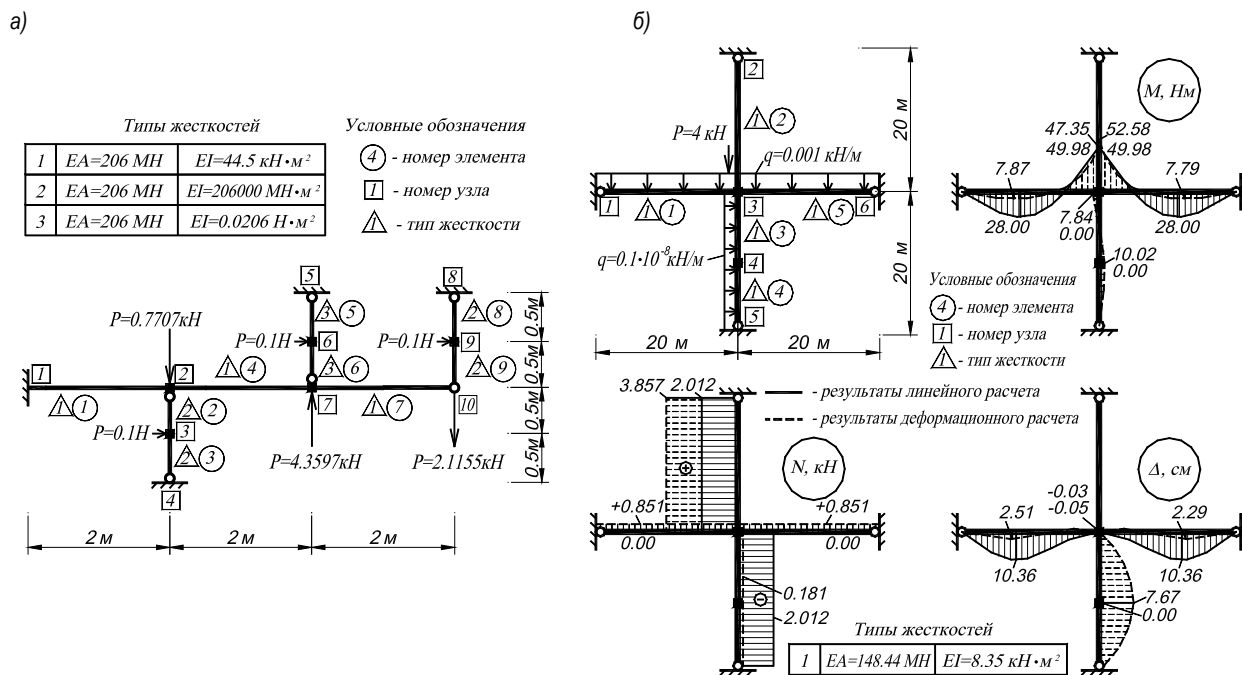


Рис. 1. Расчетные схемы задач на выключение связей

б) Способ последовательных приближений при переходе системы из исходного состояния в деформированное путем вычислений на каждой итерации матрицы жесткости $[K(\Delta)]$ с трансцендентными функциями (2).

В обоих способах решения системы (1) итерационный процесс продолжается до достижения требуемой точности.

Численные исследования показали, что алгоритм расчета по деформированному состоянию, построенный на использовании трансцендентных функций (2), проявляет себя положительно при значении узловых нагрузок на систему, весьма далеких от критических, однако имеет определяющее значение при оценке ее устойчивости.

Деформационный метод расчета позволяет рассчитывать стержневые системы как на узловые, так и на внеузловые нагрузки, а после выключения отдельных стержней из работы продолжает расчет с перераспределением усилий в системе на оставшиеся стержни (учет конструктивной нелинейности), если система не теряет общую устойчивость. Для демонстрации такой возможности ниже рассмотрена известная задача А.В. Перельмутера, для решения которой им предложено использовать вариационный принцип Лагранжа при ограничениях на усилия U_k и перемещения Z_k в связях-вантах. Поскольку именно принцип Лагранжа лежит в основе МКЭ в форме перемещений, а ограничения на U_k и Z_k могут быть описаны стержнями малой изгибной жесткости, то возникает идея смоделировать напряженно-деформированное состояние стержневой системы с односторонними связями по программе SdCAD. Конечно-элементная модель, принятая нами для расчета по программе SdCAD, представлена на рисунке 1, а. Результаты расчета, представленные в таблице 2, свидетельствуют практически о полном совпадении результатов расчета.

Другим примером может служить задача о расчете предварительно-напряженной крестообразной системы связей из гибких стержней, часто применяемой для развязки различных балочных систем (конечно-элементная модель и результаты ее расчета представлены на рисунке 1, б).

Важно, что разработанный деформационный метод расчета позволяет определять напряженно-деформированное в произвольном сечении КЭ между узлами [7].

Особенности проектирования БВС. Основанием для проектирования комбинированной БВС служат результаты обследования и тщательный их анализ. На этой стадии необходимо решать ряд задач, важнейшими из которых являются следующие:

1. Оценить результаты обследования объекта, подлежащего усилению, на предмет возможности выполнить усиление без остановки основного технологического процесса предприятия.
2. Разработать оптимальную конструктивную схему балочно-вантовой системы усиления с подбором требуемых строительных материалов (металл, железобетон, дерево), учетом их основных достоинств, и особенностей свойств материала усиливаемой конструкции.
3. Выполнить для нее расчет нескольких, наиболее близко соответствующих, конечно-элементных расчетных схем по программе SdCAD в линейной и геометрически нелинейной постановке в интерактивном режиме с всесторонним анализом результатов расчета с целью:
 - выбора геометрических параметров и конструктивных материалов для элементов системы, а также их механических характеристик, необходимых в процессе расчета для конструктивной и расчетной схем первого приближения;
 - выполнения повторных или оценочных расчетов напряженно-деформированного состояния БВС (одного или нескольких) с корректировкой ее геометрии и статико-геометрической структуры по результатам предыдущих деформационных расчетов;

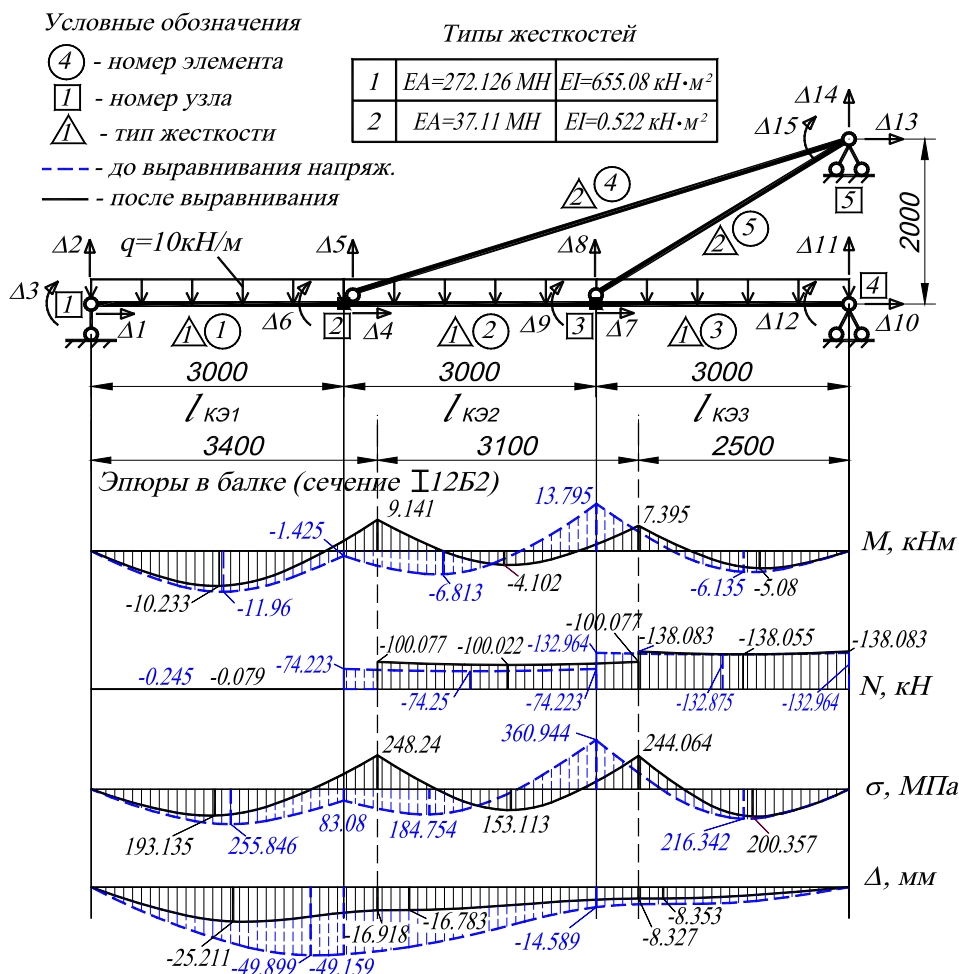


Рис. 2. Выравнивание напряжений в балке путем предварительного натяжения ванты КЭ 4 совместно со смещением узлов № 2 и № 3

- выполнения поверочных расчетов всех элементов системы, состоящих из разных материалов с их физико-механическими характеристиками, на полученные усилия и деформации, выявленные в результате деформационных расчетов;
- выполнения расчетов по созданию в конструктивной схеме самонапряженных зон и искусственному регулированию усилий в них до приемлемых значений [11].

И так до получения результатов, достаточных, чтобы инженеру-конструктору приступить к расчетам элементов и узлов проектируемой БВС из выбранных строительных материалов, и подготовке рабочих чертежей на объект проектирования.

Основные положения изложенной здесь методики были апробированы авторами при проектировании блока покрытия цеха № 1 хлебозавода г. Гродно, в котором комбинированная БВС разрабатывалась с использованием деформационного метода расчета для усиления деревянных балок металлдеревянного чердачного перекрытия. Конструктивная схема блока покрытия и особенности его напряженно-деформированного состояния описаны в [8]. На рис. 2 продемонстрирована возможность решения задачи об определении требуемых величин усилий предварительного натяжения стержней-вант в БВС по программе SdCAD.

Показано, что поиск оптимального распределения усилий, деформаций и (или) напряжений в деформированном состоянии БВС способом регулирования натяжения вант целесообразно выполнять совместно со смещением узлов сопряжения по оси балки жесткости.

К сожалению, инженеры-конструкторы в процессе проектирования БВС для усиления несущих конструкций недостаточно внимания уделяют оценке влияния геометрической нелинейности на точность расчета, во многих случаях не в состоянии выявить конструктивную нелинейность и оценить ее последствия, в расчетных средствах отсутству-

ет возможность расчета на температурные воздействия, возможность искусственного регулирования усилий с целью их оптимального перераспределения в элементах проектируемой БВС. В случае сложных стержневых систем это может привести при определении внутренних усилий и деформаций конструктивных схем БВС к значительным ошибкам, а, следовательно, снизить надежность проектируемых БВС для усиления балочных конструкций перекрытий и покрытий. Изложенный в настоящей статье деформационный метод расчета и компьютерная программа SdCAD, в которой он реализован, призваны обеспечивать при проектировании БВС интегрированный подход и работу инженера в интерактивном режиме, что исключает ошибки при проектировании БВС, скрытые в результате недооценки влияния деформированной схемы равновесия на точность расчета.

Вывод. При проектировании комбинированных БВС для усиления несущих конструкций балочных систем перекрытий применение программы SdCAD, в которой реализован разработанный авторами деформационный метод расчета, дает возможность инженеру-конструктору разрабатывать конструктивные системы, предельно близкие к оптимальным. При этом имеется возможность выполнить решение сложных многофункциональных нелинейных задач строительной механики, связанных с оценкой их напряженно-деформированного состояния, предельно близкого к действительной работе элементов в конструктивных схемах. Это позволит проектировать надежные системы усиления в виде комбинированных БВС, состоящих из разных материалов: материал усиливаемой конструкции – древесина, прокатная сталь, железобетон; материал вант – высокопрочная сталь, композитные материалы на основе углеродных волокон и др.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Здания и сооружения. Основные требования к техническому состоянию и обслуживанию строительных конструкций и инженерных систем, оценке их пригодности к эксплуатации. СНБ 1.04.01-04. – Мн.: Стройтехнорм, 2002. – 20 с.
2. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету: ГОСТ 27751–88. – Введ. 01.01.1995. – СССР.: ЦНИИСК, 1988. – 9 с.
3. Ремонт, реконструкция и реставрация жилых и общественных зданий и сооружений. СНБ 1.04.02-02. – Мн.: Стройтехнорм, 2004. – 18 с.
4. Онуфриев, Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений / Н.М. Онуфриев. – М.: Стройиздат, 1965. – 342 с.
5. Хило, Е. Р. Усиление строительных конструкций / Е.Р. Хило, Б.С. Попович. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. университете, 1985. – 156 с.
6. Уласевич, В.П. Деформационный расчет гибких балочно-вантовых систем методом конечных элементов в среде MathCAD / В.П. Уласевич, О.В. Костюк // Вестник БрГТУ. – 2004. № 1(25): Строительство и архитектура. – С. 111–117.
7. 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. – 2007. – № 1(48): Строительство и архитектура. – С. 45–49.
8. Уласевич, В.П. Гибкие балочно-вантовые системы в конструктивных схемах усиления перекрытий / В.П. Уласевич, О.В. Костюк // Вестник БрГТУ. – 2007. – № 1 (48): Строительство и архитектура. – С. 50–55.
9. Сидорович, Е.М. Динамика и устойчивость сооружений. Численные методы решения задач: учебное пособие / Е.М. Сидорович. – Мн.: БНТУ, 2006. – 246 с.
10. Игнатюк, В.И. Метод конечных элементов в расчетах стержневых систем: учебное пособие / В.И. Игнатюк. – Брест: БрГТУ, 2004. – 172 с.
11. Роль искусственного регулирования усилий при усилении несущих строительных конструкций с применением гибких балочно-вантовых систем / В.П. Уласевич, О.В. Костюк // Вестник БрГТУ. – 2005. – № 2(32): Строительство и архитектура. – С. 36–39.

Материал поступил в редакцию 17.01.08

ULASEVICH V.P., KOSTIUK O.V. Deformation a method of account a beam-vant of systems and his role in designing amplification of designs of overlappings

In clause the system of the basic permitting equations deformation of a method of account of the systems, combined a beam-vant is stated. The matrixes of internal rigidity by functions which are taking into account a longitudinal - cross bend and possible ways of interface of the ends KE with units are given. The basic circuit of formation of a matrix of external rigidity, and its nonlinear communication with a vector of central efforts through system of the nonlinear permitting equations KE " a Rectilinear flexible core " concerning basic reactions of a beginning and end KE is shown. The analysis of the ways, accepted in a method, of the decision of system of the permitting equations is given.

The role deformation of a method of account is shown during designing the systems, combined a beam-vant, for amplification a beam of designs of overlappings and coverings.

УДК 741.02:519

Игнатюк В.И., Игнатов А.Ю.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СТЕРЖНЕВОГО КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА, УПРУГО-ПОДАТЛИВО ПРИСОЕДИНЕННОГО К УЗЛАМ

Введение. Расчет сооружений методом конечных элементов широко распространен в настоящее время. При этом учет всех особенностей работы сооружений остается актуальной задачей. Соединение в стержневых системах конечных элементов между собой в узлах в большинстве случаев не бывает идеально шарнирным или абсолютно жестким. Поэтому учет упруго-податливого присоединения стержневых конечных элементов к узлам является необходимым и актуальным.

Постановка задачи. Рассматривается расчет пространственных стержневых систем методом конечных элементов [1] с учетом упругой податливости узловых соединений [2]. Пусть основное разрешающее уравнение метода конечных элементов

$$[K] \cdot \{\Delta\} = \{F\} \quad (1)$$

решено и определены перемещения узлов (Δ_i) расчетной дискретной модели системы, которые равняются соответствующим перемещениям концов пространственных конечных элементов (δ_3) , присоединяемых к этим узлам. Таких перемещений в каждом узле будет шесть – три линейных перемещения по направлениям осей X , Y и Z общей системы координат и три угла поворота относительно этих осей (рис. 1). В (1) обозначено: $[K]$ – матрица жесткости системы; $\{\Delta\}$ – вектор перемещений узлов системы; $\{F\}$ –

вектор внешних узловых нагрузок.

Получим зависимости для определения перемещений сечений пространственного стержневого конечного элемента, упруго-податливого присоединяемого к узлам расчетной дискретной модели системы, в зависимости от перемещений узловых точек расчетной дискретной модели и действующих на стержни распределенных нагрузок. При этом зависимости для конечного элемента получим сначала в местной системе координат с последующим их преобразованием в общую (глобальную) систему координат.

Узловые перемещения для конечного элемента из глобальной в местную систему координат преобразуем с помощью зависимости [1]

$$\{\delta'_3\} = [T_{\alpha\beta}] \cdot \{\delta_3\}, \quad (2)$$

где $[T_{\alpha\beta}]$ – матрица преобразования координат.

Получение расчетных зависимостей. Расчет конечного элемента выполним методом перемещений [3], приняв за неизвестные перемещения конечных точек стержня (Z_j) , в которых стержень присоединяется к узлам конечно-элементной модели системы с помощью упругих связей (перемещения точек a и b на рис. 1). Характеристики упругих связей представлены величинами: C_1, C_2, C_3 и C_7, C_8, C_9 – жесткости линейных упругих связей по направлениям осей X', Y' и Z' соответственно в начале и в конце

Игнатюк Валерий Иванович, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой строительной механики Брестского государственного технического университета.

Игнатов Алексей Юрьевич, магистрант Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.