

- точность при создании расчетной величины усилия предварительного натяжения при заданном уровне  $\sigma_{sp,0}/\sigma_{0,2}$ .
3. Повышенная трещиностойкость оказала влияние на жесткость нормального сечения. Так, прогибы самонапряженных балок при нагрузке, составлявшей  $0,65 P_u$ , были ниже, чем теоретические в среднем на 60%. Вместе с тем, значение предельных нагрузок оказались примерно одинаковыми.
  4. Для испытанных балок прирост напряжений в растянутой арматуре составил  $\Delta\sigma_{sp} = 265 \text{ Н/мм}^2$ , что составляет около 45% от величины начального предварительного напряжения. Учет эффекта от влияния возрастающего обжатия наблюдается в повышении жесткости на 40%.
  5. Следует отметить, что при разрушении балок напряжения в арматуре не достигали предельных значений, что является характерным для предельного состояния конструкций без сцепления арматуры с бетоном.
  6. Анализируя данные по ширине раскрытия трещин в эксплуатационной стадии ( $0,65 P_u$ ), следует отметить, что во всех испытанных балках, ширина раскрытия трещин находилась в пределах допустимой и не превышала  $[W_k] = 0,3 \text{ мм}$ .
  7. Расчетные методы, основанные на применении деформационной модели для сечений, позволяют достаточно точно прогнозировать поведение таких конструкций под нагрузкой с учетом физической нелинейности материалов. Физическая нелинейность материалов с достаточной для практики точностью может быть описана диаграммами, приведенными в проекте СНБ 5.03.01-98 "Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования". Использование деформационных методов расчетов позволяет исключить неопределенности и допущения эмпирического характера, содержащиеся в СНиП 2.03.01-84\* и

предложениях по расчету конструкций без сцепления арматуры с бетоном.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ТУ 21-26-13-90. Цемент напрягающий. – Взамен ТУ 21-26-13-80; введ. 01.01.91.– М.: Минстройматериалов СССР, 1990, 15 с.
2. ТУ 67-938-87. Бетон на напрягающем цементе.– Взамен ТУ 67-654-85; введ. 01.04.88.– М.: Минстройматериалов СССР, 1987, 24 с.
3. ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение.
4. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. Брест, 1998 - 244 с.
5. Образцов Л.В. Исследование железобетонных предварительно напряженных балок без сцепления арматуры с бетоном на действие изгибающего момента и поперечной силы. Дис. Канд. техн. наук - Брест, 1980.
6. Мордич А.И., Поляков А.Л., Левашова Н.Б. Сопrotивление поперечному изгибу балок с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном / Сб. научн. статей, БелДорНИИ «Строительство и эксплуатация автомобильных мостов», - Минск, 1986 - с. 154-165.
7. Тур В.В., Деркач В.Н., Образцов О.Л., Щербач А.В. Применение деформационной модели к расчету изгибаемых комбинированно напряженных элементов, не имеющих сцепления напрягаемой арматуры с бетоном. Вестник БГТУ. Строительство и архитектура №1 (13), 2002 г.
8. Образцов О.Л., Щербач А.В. Основы деформационного метода расчета конструкций без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном и его компьютерная реализация. Вестник БГТУ. Строительство и архитектура №1 (13), 2002 г.

УДК 624.012.45:539.376

**Образцов О.Л., Щербач А.В.**

## ОСНОВЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ И ЕГО КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно определению, приведенному в проекте СНБ 5.03.01 [1] под **предварительно напряженными конструкциями без сцепления арматуры с бетоном** принято понимать конструкции, в которых натяжение арматуры выполняется непосредственно на бетон установленной прочности, а усилие обжатия передают на конструкцию при помощи механического закрепления без последующего инъецирования каналов. При этом защиту арматуры от воздействия окружающей среды выполняют при помощи антикоррозионных покрытий, либо располагая ее в специальных оболочках.

В настоящее время в международной строительной практике накоплен опыт практического применения таких конструкций в широких областях - современное мостостроение, оболочки защиты ядерных реакторов, емкостные сооружения, башни и т.д. [2].

В отечественной практике названные конструкции не получили достаточно широкого распространения. Причиной тому в первую очередь следует считать недостаточное осве-

щение методов их расчета нормативными документами, а также, по мнению [3], сложившиеся инженерные традиции.

В работе [3] определено, что для применения конструкций без сцепления требуется решить следующую важнейшую задачу: необходимо разработать надежные практические методы расчета и конструирования изгибаемых конструкций с арматурой, не имеющей сцепления с бетоном.

### 1. ПРЕДПОСЫЛКИ И ДОПУЩЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ИЗГИБАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ.

Предлагаемая аналитическая модель для расчета самонапряженных конструкций без сцепления напрягаемой арматуры при действии нагрузок базируется на следующих предположениях и допущениях, принятых в работе [6]:

1. Для средних (по длине элемента) деформаций считается справедливой гипотеза плоских сечений;
2. Напряжения и относительные деформации для материалов связаны соответствующими диаграммами деформиро-

**Щербач Александр Валерьевич.** Аспирант каф. технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.  
Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

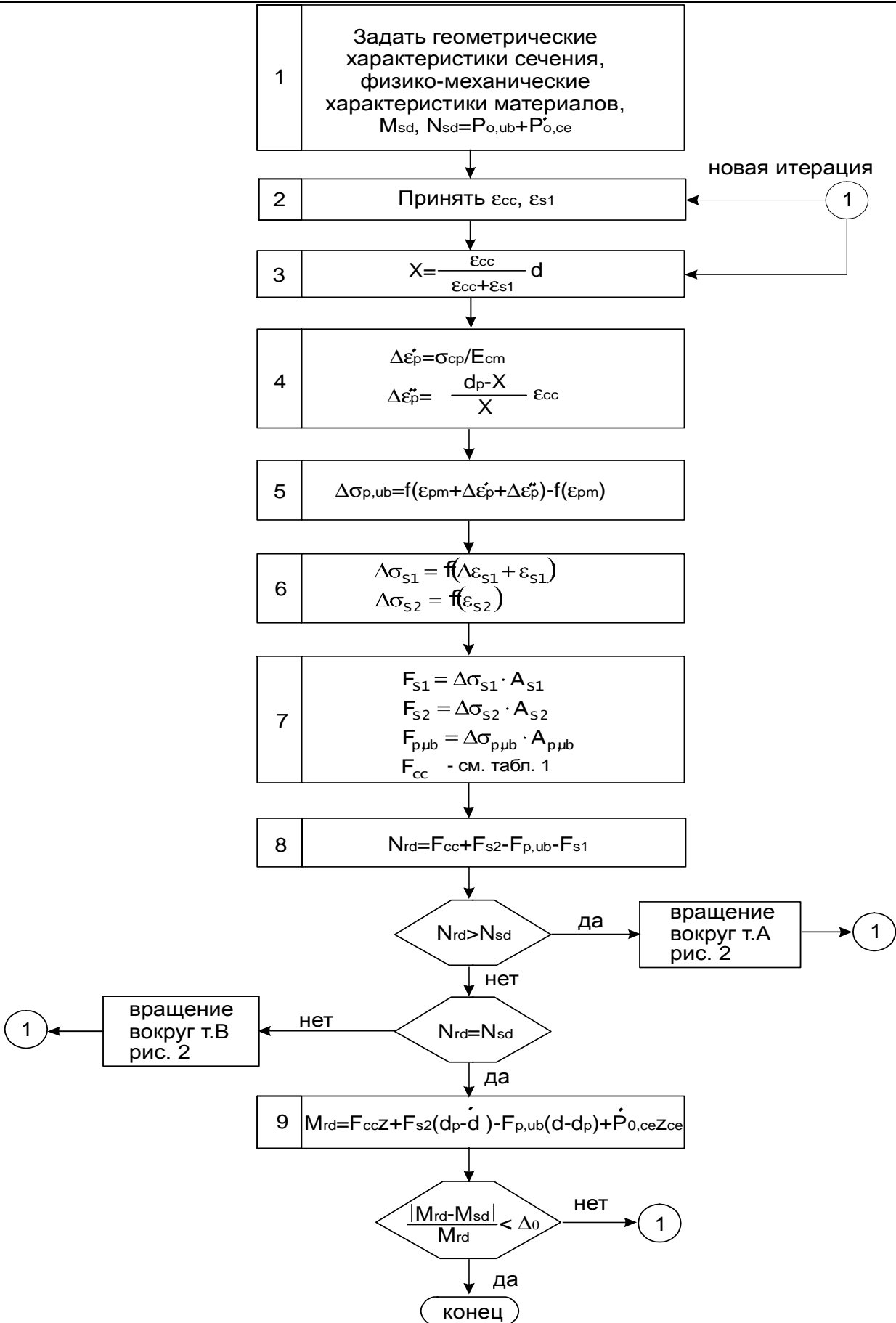


Рисунок 1 – Алгоритм расчета деформированного состояния сечения “j” по длине балки в области трещинообразования.

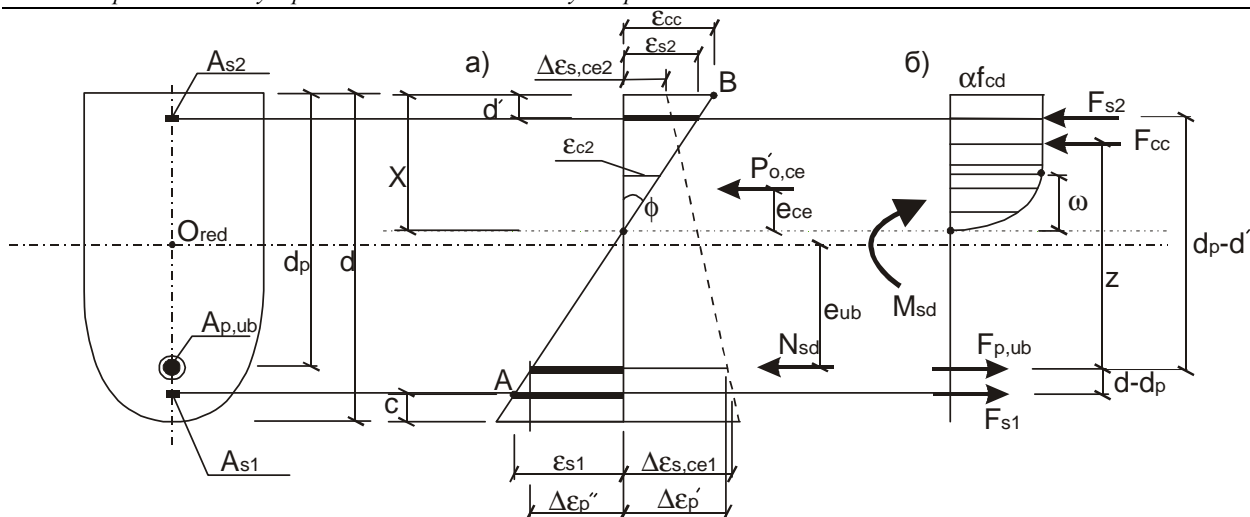


Рисунок 2 – Распределение деформаций (а), схема сил (б), действующих при расчете нормального сечения изгибаемого элемента без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном.

Таблица 1 – К определению равнодействующей усилий в сжатой зоне балки прямоугольного сечения при использовании линейно-параболической диаграммы деформирования бетона.

(а)	$x < \omega$		$F_{cc} = \alpha f_{cd} b x \left( \eta - \frac{1}{3} \eta^2 \right)$ $a_1 = \frac{x \left( \frac{2}{3} - \frac{1}{4} \eta \right)}{1 - \frac{1}{3} \eta}$ <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-left: auto;"> <math>\eta = \frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{c2}}</math> </div>
(б)	$x = \omega$		$F_{cc} = \frac{2}{3} \alpha f_{cd} b x$ $a_1 = \frac{5}{8} x$
(в)	$x > \omega$		$F_{cc} = \alpha f_{cd} b \left( x - \frac{1}{3} \omega \right)$ $a_1 = \frac{6 x^2 - \omega^2}{12 \left( x - \frac{1}{3} \omega \right)}$ <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-left: auto;"> <math>\omega = \frac{\epsilon_{c2}}{\epsilon_{cc}} x</math> </div>

вания (состояния). Аналитические описания диаграмм деформирования приняты в соответствии с требованиями норм [1, 4];

- По длине пролета балки рассматриваются две характерные области (рис. 1), подобно тому, как это предложено в работе [5]: область (1), длиной  $L_{ex}$ , работающая без трещин в упругой стадии и область (2), длиной  $L_{crx}$ , имеющая нормальные трещины;
- При расчете сечений, располагаемых в зоне, имеющих нормальные трещины ( $L_{crx}$ ), сопротивление бетона, располагаемого в растянутой зоне не учитывается;

- Расчет напряжений и деформаций, для сечений, располагаемых в зоне, работающей без трещин ( $L_{ex}$ ) выполняют, используя принципы классической механики для упругого материала.
- При расчете учитываются дополнительное напряженно-деформированное состояние, вызванное расширением напрягающего бетона.
- При расчете в первом приближении не учитывается геометрическая нелинейность. Для элементов, в которых напрягаемая арматура без сцепления, располагается в каналах это не вносит дополнительных погрешностей [5].

Таблица 2 – Сопоставление предельных нагрузок по испытаниям опытных балок с теоретическими значениями.

Обозначение балок	Предельный момент, $M_u$ , кНм		
	теоретический $M_{u,th}$	фактический $M_{u,ex}$	$\frac{M_{u,th}}{M_{u,ex}}$
<b>Серия А</b>			
БН-А-I-1	21,02 <sup>*)</sup>	21,2	0,9915
БН-А-I-2	20,97	20,3	1,033
БН-А-I-3	20,97	22,0	0,9532
БН-А-II-1	23,20	29,7	0,7811
БН-А-II-2	23,20	32,2	0,7205
БН-А-II-3	23,40	29,2	0,8014
БН-А-III-1	25,10	31,0	0,8097
БН-А-III-2	25,10	34,2	0,7339
БН-А-III-3	25,25	30,2	0,8361
<b>Серия R3</b>			
PP2R3-3	23,64	22,6	1,046
PP2R3-0	22,08	22,0	1,0036
PP3R3-3	32,63	39,9	0,8178
PP3R3-0	34,33	42,5	0,8078
P1R3-3	11,70	9,3	1,2581
P1R3-0	11,41	8,0	1,4263
P2R3-3	20,15	20,0	1,0075
P2R3-0	19,16	18,6	1,0301
P3R3-3	26,36	25,3	1,0419
P3R3-0	24,96	26,6	0,9383
<b>Серия R2</b>			
PP1R2-3	32,92	32,6	1,0098
PP1R2-0	32,25	33,3	0,9685
PP2R2-3	42,55	47,2	0,9015
PP2R2-0	41,38	45,9	0,9015
PP3R2-3	64,20	70,5	0,9106
PP3R2-0	64,50	75,8	0,8509
			$(M_{u,th}/M_{u,ex})_{срeдн}=0,9432$
Примечание: <sup>*)</sup> теоретические значения определены из расчета по деформационной модели для сечений			

## 2. КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

Для реализации деформационной расчетной модели нормального сечения железобетонных элементов, работающих без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном, была разработана расчетная программа на языке программирования Visual Basic 6.0. Программа позволяет производить расчет параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов прямоугольного сечения при использовании линейно-параболической диаграммы деформирования для бетона.

С помощью названной программы можно получить зависимость «момент-кривизна» с учетом переменных жесткостных характеристик и зависимость «момент-приращение напряжения в напрягаемой арматуре» (рис. 3). Эта программа также позволяет учитывать эффект применения напрягающего бетона в конструкциях.

В программе реализован итерационный метод, описанный в статье [6].

В процессе расчета нормального сечения железобетонного элемента в соответствии с алгоритмом приведенным на рис. 1 программа производит вычисления в следующей последовательности:

1. задается некоторая относительная деформация верхней грани элемента, соответствующая моменту трещинообразования; эта деформация в процессе расчета возрастает до величины предельной сжимаемости бетона;
2. производится итерационный подбор величины относительной деформации в бетоне на уровне нижней конструктивной арматуры до тех пор пока не выполнится условие равновесия по продольной силе (см. рис. 1) с заданной точностью;
  - 2.1. в процессе подбора искомой величины деформации определяется высота сжатой зоны бетона;
  - 2.2. деформации в напрягаемой арматуре рассчитываются с учетом понижающего коэффициента [6];

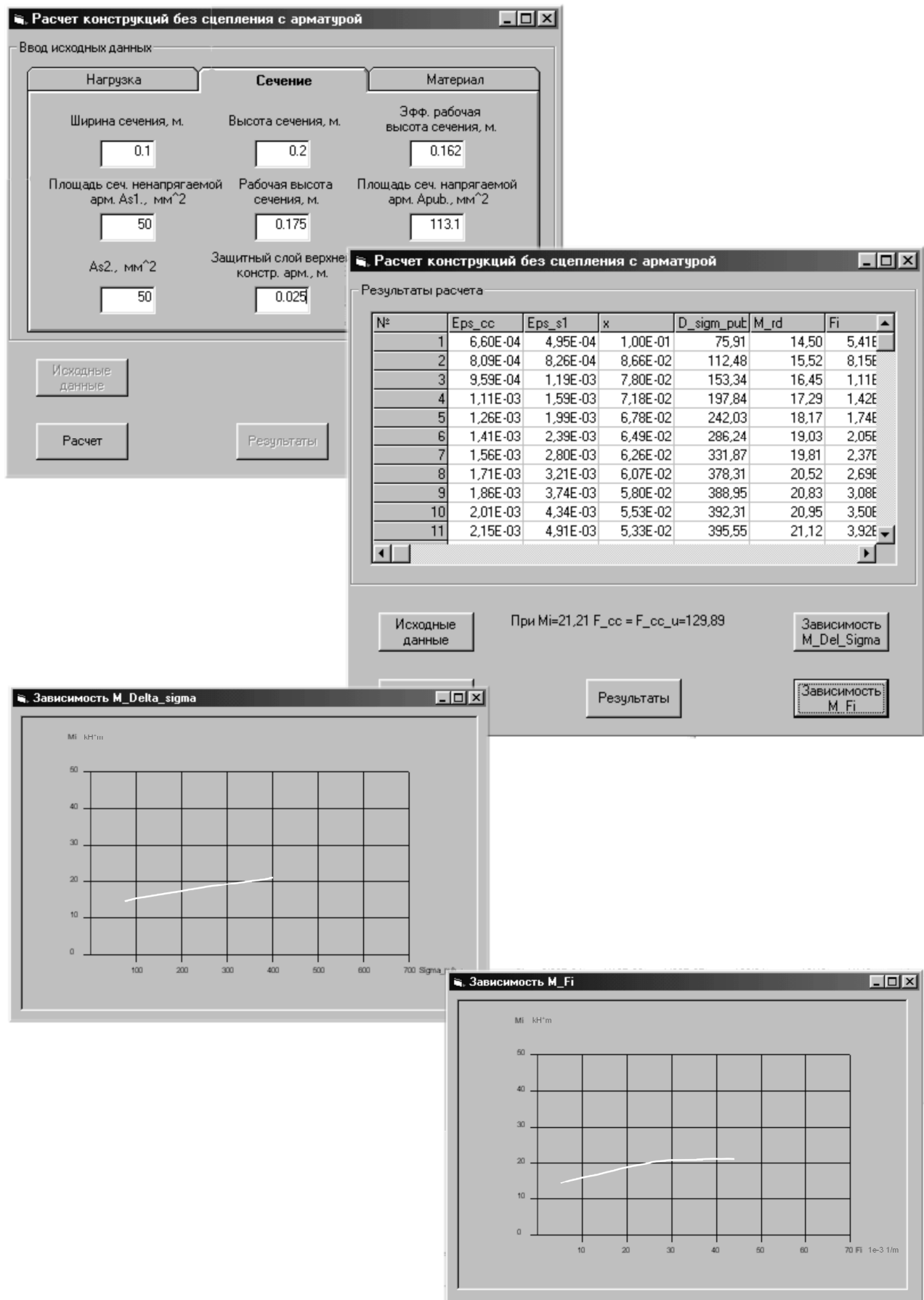


Рисунок 3 – Интерфейс программы.

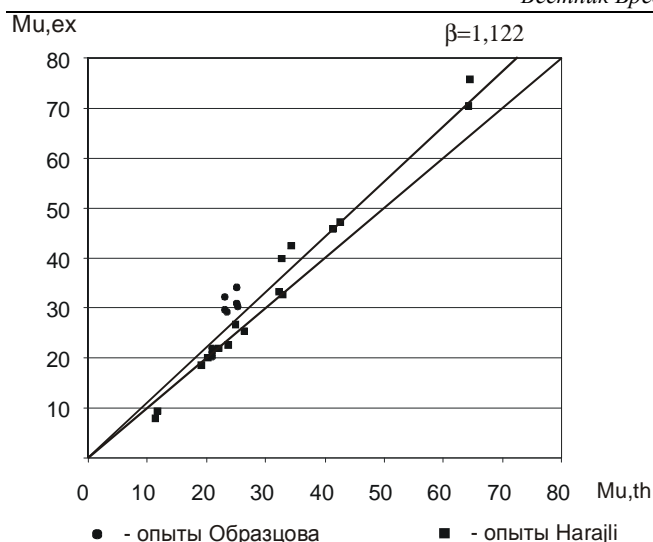


Рисунок 4 – Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов по разработанной программе.

- 2.3. рассчитываются усилия в конструктивной арматуре, в напрягаемой арматуре, равнодействующая усилий в сжатой зоне бетона;
3. определяется момент от действия внутренних усилий в сечении с трещиной;
4. по полученным значениям деформаций, напряжений и моментов строятся зависимости «момент-кривизна» и «момент-приращение напряжения в напрягаемой арматуре».
- В качестве способа приближения к искомой величине был принят метод Ньютона-Рафсона.

### 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов по предложенному деформационно-методу расчета, реализованному в программе, сравнили с результатами испытаний изгибаемых элементов без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном. Выборка включала 9 самонапряженных балок сечением 10x20 см и длиной 150 см [7], 10 балок сечением 12,8x23 см длиной 308 см и 6 балок сечением 12,8x28,2 длиной 256 см [8]. Балки имели различный коэффициент продольного армирования и разное количество напрягаемой арматуры. Сопоставление опытных и расчетных предельных моментов показаны на рис.3 и представлены в табл. 2.

УДК 624.012.464.4

**Тур В.В., Деркач В.Н., Образцов О.Л., Щербач А.В.**

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ К РАСЧЕТУ ИЗГИБАЕМЫХ КОМБИНИРОВАННО-НАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, НЕ ИМЕЮЩИХ СЦЕПЛЕНИЯ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

### ВВЕДЕНИЕ

Предварительно напряженные конструкции, у которых напрягаемая арматура не имеет сцепления с окружающим ее бетоном, относятся к специфическим конструкциям, для которых практическое применение намного опередило теорию

Статическая оценка предложенной нелинейной модели, выполненная в соответствии с разделом D8 EN1990: 2001 [9] показала, что расчетное значение предельного момента при проектировании конструкций следует вводить с глобальным коэффициентом безопасности:  $\gamma_{sr}=1,71$ .

Сопоставление результатов расчета нормального сечения преднапрягаемых железобетонных элементов полученных по разработанной программе с экспериментальными данными показывает, что расчетная модель адекватно описывает сопротивление элементов (рис. 4).

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СНБ 5.03.01 «Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования.»-Минск, Стройтехнорм-2002 г.-274 с.
2. Образцов Л.В. Исследование железобетонных предварительно напряженных балок без сцепления арматуры с бетоном на действие изгибающего момента и поперечной силы. Дис. Канд.техн.наук - Брест, 1980.
3. Мордич А.И., Поляков А.Л., Левашова Н.Б. Сопротивление поперечному изгибу балок с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном / Сб. научн. статей, БелДорНИИ «Строительство и эксплуатация автомобильных мостов», - Минск, 1986 - с. 154-165.
4. Eurocode 2 EN 1992 : 2001 (Final Draft) Design of concrete structures- Part 1 : General rules and rules for building – Brussels-2001-230 p.
5. Alkhari F.M., Naaman A.E. Analysis of Beams Prestressed with Unbonded Internal or External Tendons.// Journ. of Struct. Engrg vol. 119, №9, September.-1993-p.p.2680-2700.
6. Тур В.В., Деркач В.Н., Образцов О.Л., Щербач А.В. Применение деформационной модели к расчету изгибаемых комбинированно напряженных элементов, не имеющих сцепления напрягаемой арматуры с бетоном. Вестник БГТУ. Строительство и архитектура №1 (13), 2002 г.
7. Образцов О.Л. Самонапряженные изгибаемые элементы без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном. Отчет по научно-исследовательской теме ГБ 01/205, Брест, 2001 г., 70 с.
8. Harajli M.H., Kanj M.Y. Service load behavior of concrete members prestressed with unbonded tendons.// Journ. of Struct. Engrg vol. 118, №9, September.-p.p.2569-2589.
9. EN 1990 : 2001 Eurocode 1 : Basis of structural design.

расчета. По конструктивному решению принято рассматривать предварительно напряженные элементы с внешней напрягаемой арматурой, располагаемой вне тела бетонного сечения и элементы, в которых напрягаемые стержни размещают в заранее выполненных каналах без последующего инъ-

**Тур Виктор Владимирович.** Д.т.н., профессор, зав. каф. технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

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

**Деркач Валерий Николаевич.** К.т.н., зам. директора РУНИиОКП "Научно-технический центр".