

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЖЕСТКОСТИ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ЛИРА PRO»

Представлена методика расчета жесткости плосконапряженных железобетонных конструкций, основанная на использовании эквивалентной модели. Рассмотрены варианты ее определения для плосконапряженных стеновых и стержневых железобетонных конструкций, на участках с наклонными трещинами, которые отображаются неявно. Предложен специальный прием моделирования явных трещин-щелей, которые располагаются по диагоналям конструкции. Приведенная методика расчета реализована в программном комплексе «Лира Pro» в виде подробного алгоритма.

Ключевые слова: жесткость, плосконапряженные железобетонные конструкции, трещина-щель, эквивалентная модель.

Введение. Железобетонные конструкции эксплуатируются, как правило, при наличии трещин. Экспериментальные исследования показывают, что до момента разрушения возникают несколько уровней образования трещин. Трещины первого уровня возникают в местах концентрации напряжений и деформаций (в углах конструкции, в местах скачкообразного изменения геометрических размеров, в углах окон и дверных проемов и т.п., рис. 1). При сейсмических воздействиях образуются, как правило, диагональные трещины по схеме «конверта» [1].

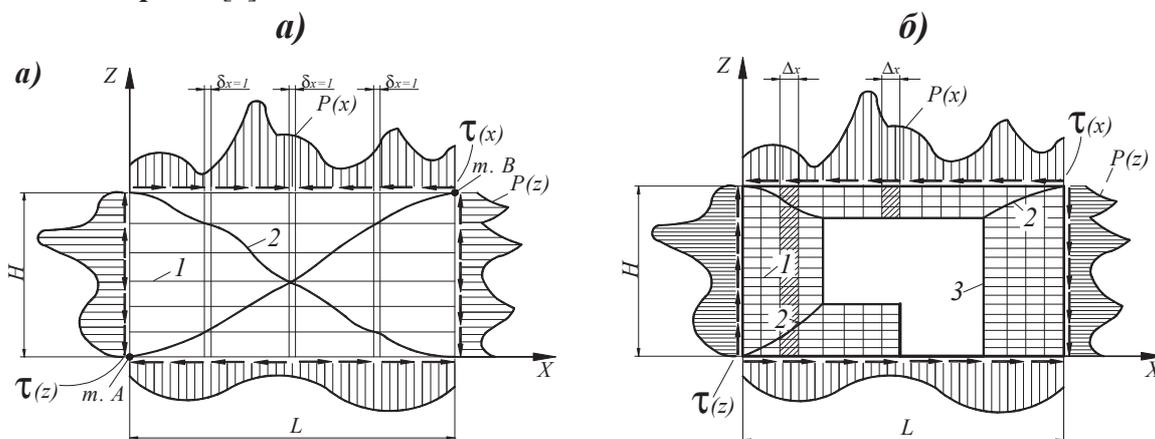


Рисунок 1 – К расчету плосконапряженных железобетонных конструкций без отверстий (а) и с оконными и дверными проемами (б) на статические и сейсмические воздействия: 1 – границы конечных элементов; 2 – трещины; 3 – проем

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы и постановка задачи. Применительно к оценке сейсмостойкости зданий и сооружений, проектируемых и эксплуатируемых с учетом их фактического технического состояния, жесткости плосконапряженных стеновых и стержневых железобетонных конструкций, с учетом трещин, или тех, которые принимаются по схеме «конверта», рекомендуется определять по двум вариантам.

Первый вариант выполняется без изменения заданного вначале порядка и номеров плоских конечных элементов (КЭ), на которые разбивается плосконапряженная конструкция

для расчета по методу конечных элементов (МКЭ). В этом варианте схема трещин отображается неявно (за счет уменьшения толщины конечных элементов, прилегающих к используемой схеме трещин). При этом в конечных элементах, прилегающих к неявным трещинам, уменьшается их толщина, которая для практических расчетов определяется с использованием разности работ только двух КЭ, прилегающих к горизонтальным и вертикальным отрезкам моделируемой неявной трещины.

Работа каждой пары КЭ вычисляется дважды с использованием двухэлементной консольной модели (рис. 2): монолитное соединение двух КЭ (W_1) и после их расшивки (W_2) (при этом процент распределенного армирования заменяется двумя стержневыми КЭ, расположенными по краям плоских КЭ). Усредненные усилия (реакции) в узлах в горизонтальном и вертикальном направлениях двухэлементной консольной модели определяются из нелинейного расчета всей плосконапряженной конструкции. Для этого используются напряжения в конечных элементах бетона и арматуры.

Перемещения узлов определяются из расчета двухэлементной консольной модели с приложенными в узлах реакциями (нагрузками). При этом опорное закрепление двух узлов консоли (шарнирно подвижное и шарнирно неподвижное) в целях усреднения, необходимо задавать как слева, так и справа.

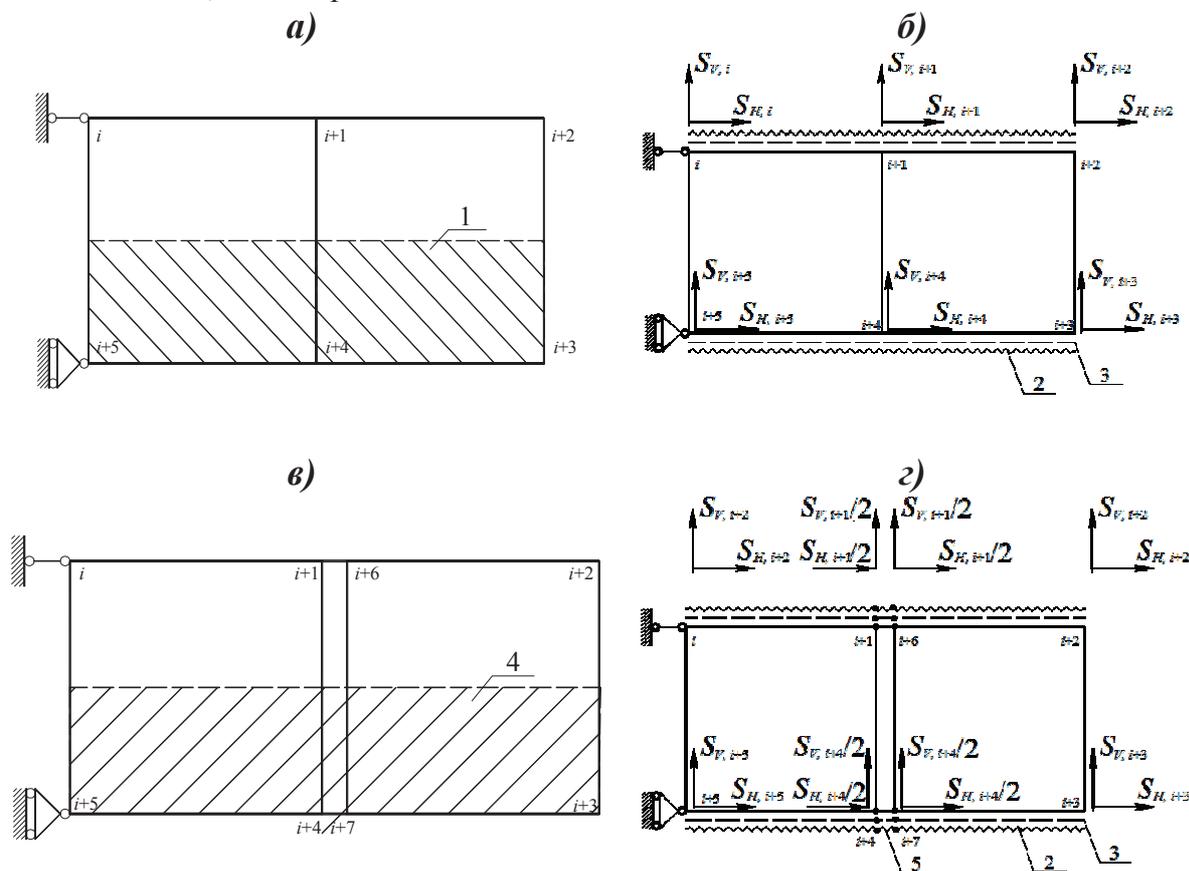


Рисунок 2 – Построение двухэлементной модели:

а) сбор нагрузки для 255 КЭ; б) расчетная схема двухэлементной модели без расшивки; в) сбор нагрузки для 255 КЭ, установленного в щели; г) расчетная схема двухэлементной модели с расшивкой; 1 – грузовая площадь 255 КЭ; 2 – 255 КЭ ($A_{b\ 255,1} = A_{b\ 255}/4$, где $A_{b\ 255}$ – площадь 255 КЭ в основной модели; $A_{b\ 255,1}$ – площадь 255 КЭ в двухэлементной модели); 3 – 201 КЭ ($A_{s\ 201,1} = A_{s\ 201}/2$, где $A_{s\ 201}$ – площадь 201 КЭ в основной модели; $A_{s\ 201,1}$ – площадь 201 КЭ в двухэлементной модели); 4 – грузовая площадь 255 КЭ; 5 – 255 КЭ ($A_{b\ 255,2} = A_{b\ 255}/2$, где $A_{b\ 255}$ – площадь 255 КЭ в основной модели; $A_{b\ 255,2}$ – площадь 255 КЭ в двухэлементной модели)

В местах перехода горизонтального участка моделируемых трещин к вертикальному работа угловых плоских КЭ определяется путем усреднения. В результате новая толщина КЭ, прилегающих к трещине, определяется по формуле

$$b_i = \frac{W_1}{W_i} \cdot b_1. \quad (1)$$

При расчете и определении ширины элементов, принадлежащих мнимой щели, получаем величину b_2 , которая изменяется по интерполяции от точки A к точке B (от 8 до 10 см) (рис. 1).

По второму варианту жесткость зданий и сооружений с плосконапряженными и стержневыми конструкциями определяется с использованием специального приема моделирования явных трещин-щелей, которые располагаются по диагоналям конструкции (см. рис. 1). При этом арматурные стержни плосконапряженных конструкций моделируются дополнительными КЭ, а также учитывается раскрытие и закрытие трещин с учетом имеющихся возможностей вычислительных комплексов на основе МКЭ (с использованием 255-го конечного элемента).

Основной материал и результаты. Компьютерная реализация предлагаемых расчетных моделей балки-стенки 1600×550 мм (рис. 3) осуществляется следующим образом.

По *варианту два* последовательность реализации следующая.

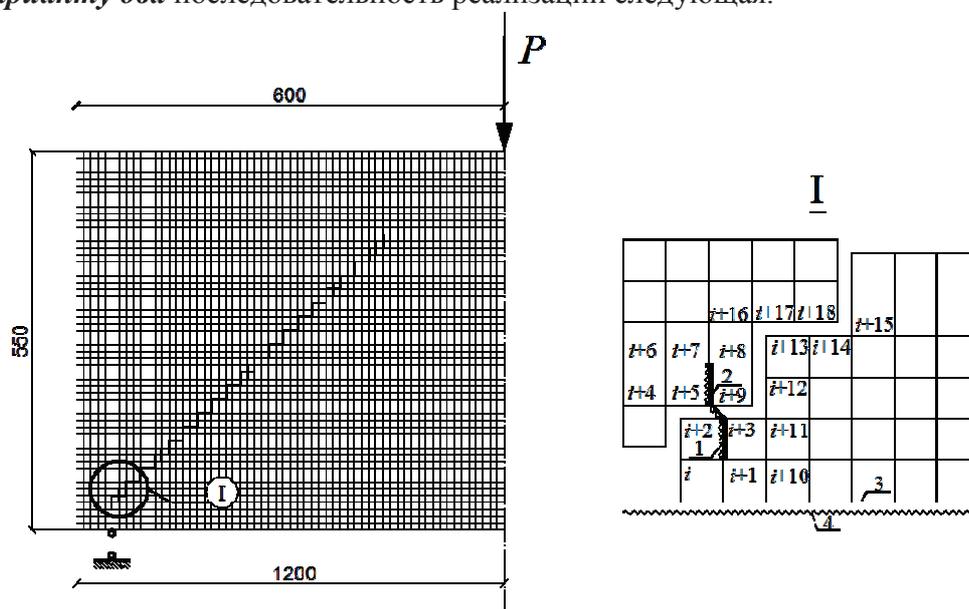


Рисунок 3 – Моделирование балки-стенки 1200×550 мм (основная модель):

- I** – место прохождения расшивки схемы; **1** – 255-й КЭ, работающий на сжатие;
- 2** – 201-й КЭ, моделирующий арматурный стержень; **3** – 201-й КЭ, моделирующий продольную арматуру; **4** – 255-й КЭ, моделирующий арматурный стержень

Для того чтобы создать новую задачу, необходимо в главном меню программного комплекса «Лира 9.6» выполнить пункт меню **Файл** → **Новый**. При этом загружается диалоговое окно (рис. 4), в котором указывается имя создаваемой задачи (шифр задачи по умолчанию совпадает с именем задачи), и путем указания на радио-кнопку (рис. 4) устанавливаем признак схемы. Применительно, например, к нелинейному расчету балки-стенки размером 550×1200 мм выбирается признак схемы **1 – Две степени свободы в узле (два перемещения)**.

Задание геометрии схемы

Для задания геометрии схемы балки-стенки вначале вызывается пункт меню «**Схема** → **Создание** → **Регулярные фрагменты и сети**» (рис. 5).

В появившемся окне выбирается закладка «**Балка-стенка**». После ее нажатия открывается диалоговая панель «**Генерация балки-стенки**». Затем в соответствующих

полях списков указываются следующие параметры: шаг вдоль 1-й (горизонтальной) оси значением 0,01 м, количеством 120; шаг вдоль 2-й (вертикальной) оси значением 0,01 м, количеством 55 (рис. 6).

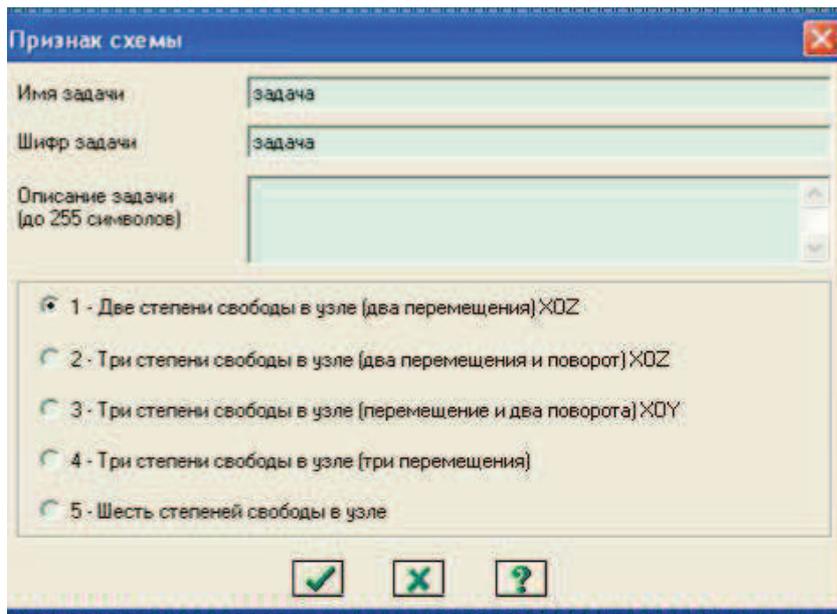


Рисунок 4 – Диалоговое окно «Признак схемы»

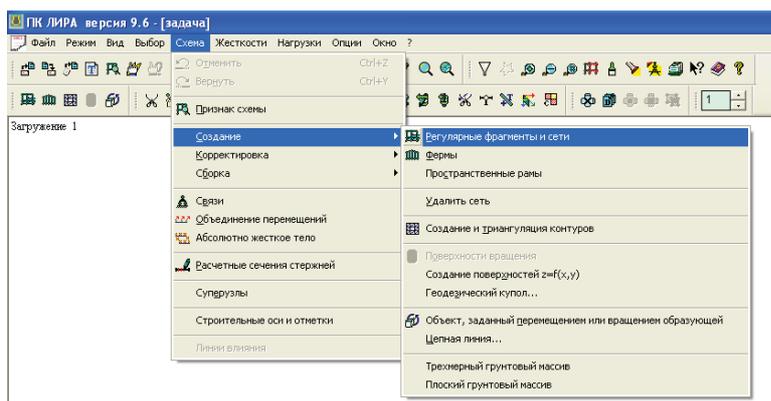


Рисунок 5 – Ниспадающее меню «Схема→Создание→Регулярные фрагменты и сети»



Рисунок 6 – Диалоговое окно «Создание плоских фрагментов и сетей»

В результате работы с диалоговым окном «Создание плоских фрагментов и сетей» на экране получим геометрическую схему балки-стенки (рис. 7).

Для назначения закреплений выделяются узлы, которые необходимо закрепить, и выполняется следующая цепочка действий: **Главное меню** → **Схема** → **Связи** и в диалоговом окне (рис. 8) назначаются связи при помощи флажков в узлах по направлениям X, Z, что соответствует 1-му признаку схемы.

Назначение конечных элементов пластин представленной балки-стенки осуществляется с помощью следующей цепочкой действий: Главное меню → **Выбор** → **Отметка элементов** (выделяются (изменением цвета) конечные элементы пластин балки-стенки). После этого вызывается главное меню **Схема** → **Корректировка схемы** → **Смена**

типа конечного элемента (рис. 9). При этом выбирается закладка 4 (четыреугольный КЭ) и устанавливается 230-й физически нелинейный четырехугольный КЭ плоской задачи (балка-стенка).

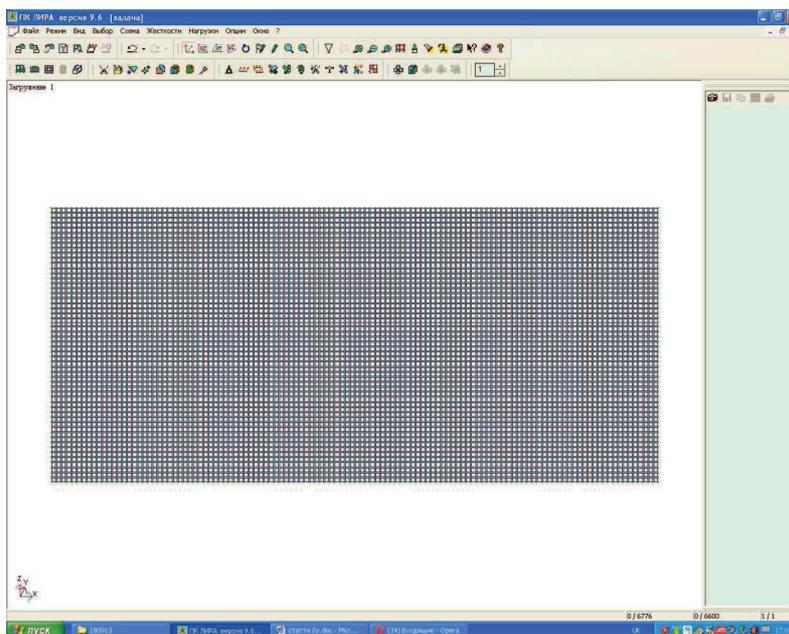


Рисунок 7 – Геометрическая схема балки-стенки



Рисунок 8 – Диалоговое окно «Связи в узлах»

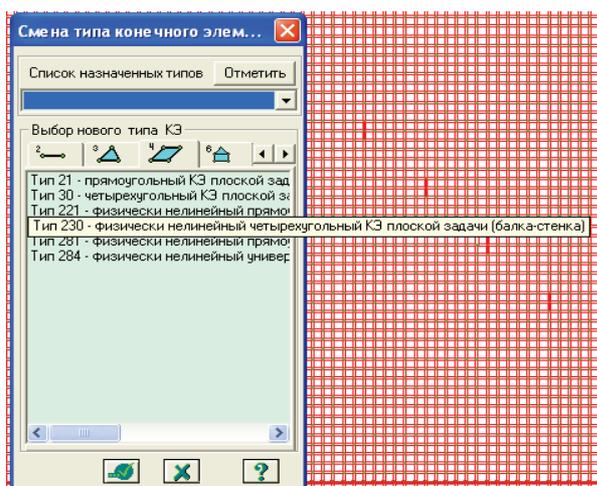


Рисунок 9 – Диалоговое окно «Смена типа конечного элемента»

Назначается тип жесткости 230-ти конечным элементам. Указывается курсором на кнопку **Добавить**, выбирается закладка **EI** и тип элементов – **пластина**.

Для этого выполняем следующую цепочку действий: **Главное меню** → **Жесткости** → **Жесткости элементов** → **Задание жесткости для пластин** → **радио-кнопка Тип КЭ** → **Балка-стенка** → выбирается флажок **Учет нелинейности** → **Характеристики физической нелинейности основного и армирующего материала**. В появившемся окне (рис. 11) выбираем закладку «**Закон нелинейного деформирования**» и устанавливаем 31-й закон – экспотенциальный (расчетная прочность) в случае использования расчетных характеристик, а в случае использования фактических характеристик выбираем 15-й – экспотенциальная зависимость для железобетона. Назначаем **Класс бетона – В20** и **Тип бетона – ТА**.

Для задания **продольной рабочей арматуры** балки-стенки используется следующая цепочка действий: **Главное меню** → **Схема** → **Корректировка** → **Добавить**

элемент (рис. 12). В появившемся окне выбирается пункт **Добавить стержень** и указываются курсором узлы расположения арматуры вдоль всей длины балки-стенки.

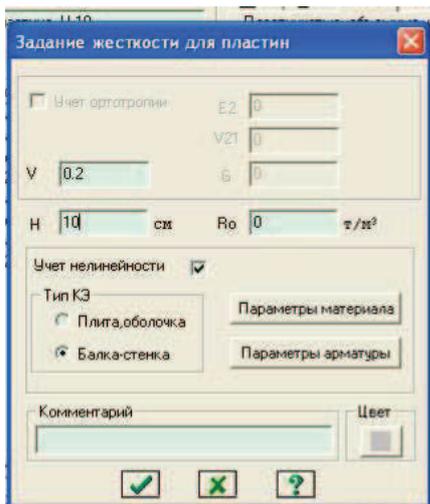


Рисунок 10 – Задание параметров жесткости 230-го КЭ балки-стенки

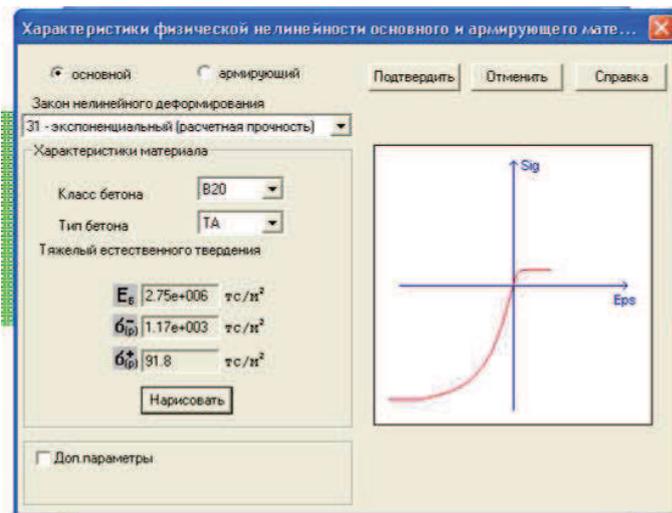


Рисунок 11 – Диалоговое окно «Характеристики физической нелинейности основного и армирующего материала»

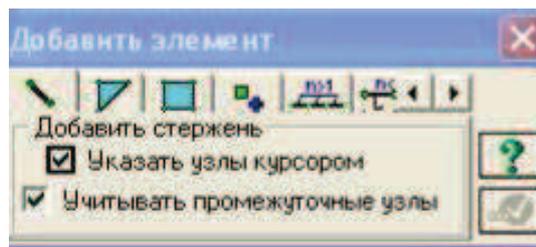


Рисунок 12 – Диалоговое окно «Добавить элемент»

Для назначения параметров жесткости продольной арматуры выделяется стержень (моделируемый с помощью 201-го конечного элемента) и вызывается **Главное меню Жесткости → Жесткости элементов → Добавить → Кольцо** (рис. 13).

В появившемся диалоговом окне «Задание стандартного сечения» устанавливаются диаметр арматуры, ее удельный вес и отмечается флажок «Учет нелинейности» (рис. 14).

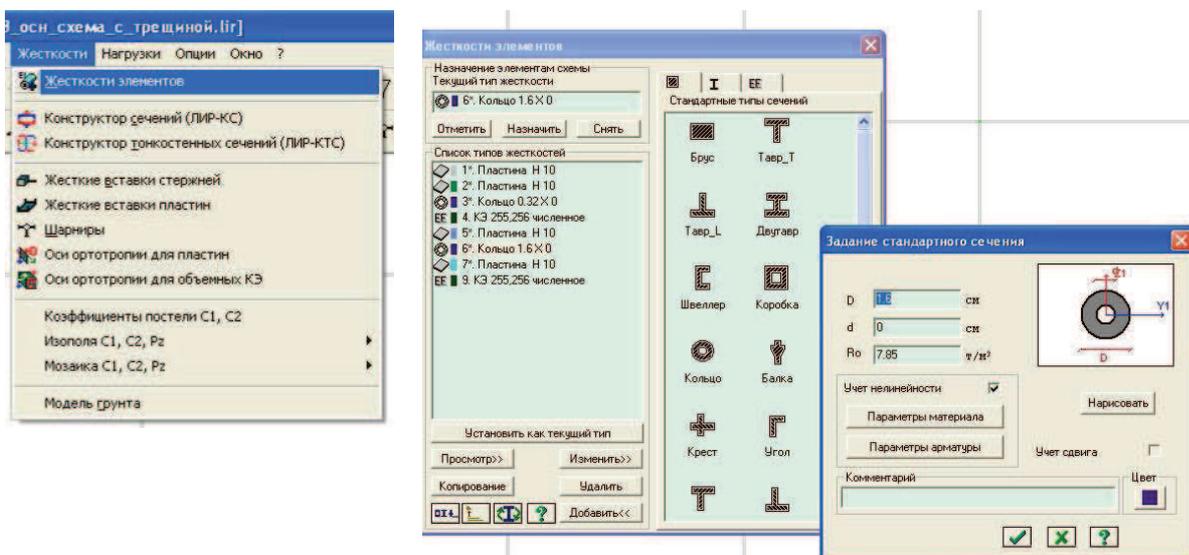


Рисунок 13 – Назначение параметров жесткости рабочей арматуры

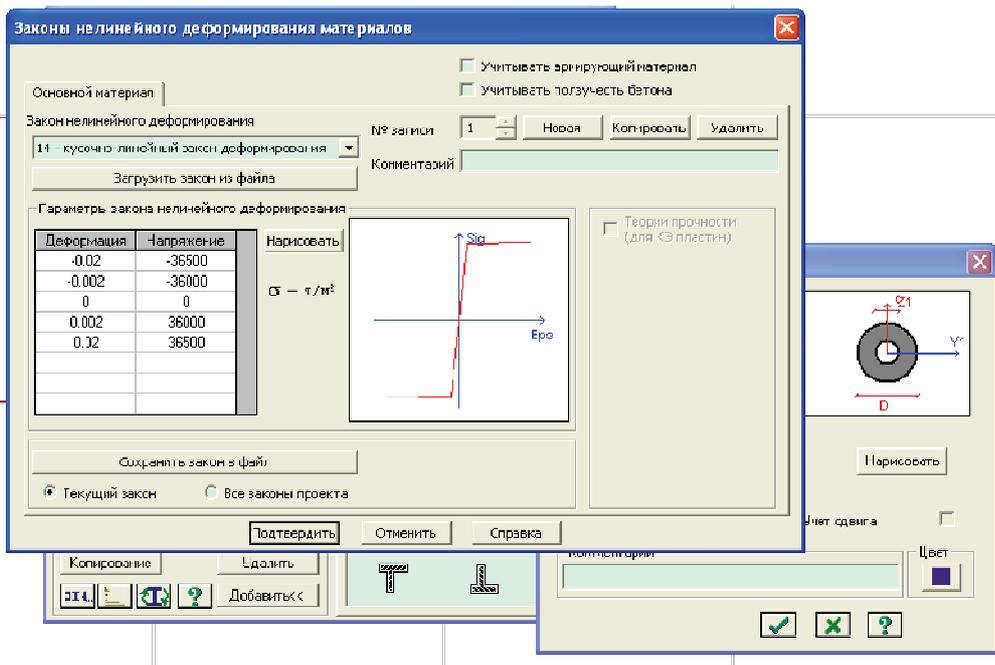


Рисунок 14 – Назначение нелинейности параметрам материала

При этом устанавливается кусочно-линейный закон деформирования материала и указываются деформации и соответствующие им напряжения (рис. 14).

После назначения параметров жесткости арматурному стержню необходимо выполнить объединение перемещений с узлами балки-стенки. Для этого выделяются все узлы вдоль расположения арматуры и **выполняется следующая цепочка действий: Главное меню → Схема → Объединение перемещений.**

Для моделирования процесса возможного закрытия трещин используется 255-й конечный элемент (рис. 4). При этом грузовая площадь, приходящаяся на 255-й КЭ выполняется аналогично тому, как это сделано в двухэлементной модели, используемой для варианта 1 (рис. 2).

При задании характеристик жесткости элементам номер **255** необходимо воспользоваться главным меню в следующей последовательности:

1) выделить этот элемент; 2) сменить тип конечного элемента на **255-й (Схема → Корректировка → Смена типа конечного элемента)**; 3) выбрать пункт меню **Жесткости → Жесткости элементов** и назначить жесткость КЭ номер 255 (с помощью этих элементов в рассматриваемых моделях моделируется возможность закрытия трещин-щелей). При этом задаются следующие параметры:

– погонная жесткость по направлению X: $R_x = \frac{EA}{l}$ (при этом E принимается с учетом коэффициента 0,85);

– погонная жесткость по направлению Z: $R_z = \frac{12EI}{l^3}$ (при этом E принимается с учетом коэффициента 0,85);

– предельное усилие N по X: $N_x = R_b \cdot A_b$;

– предельное усилие N по Z: $N_z = 2,2 \cdot R_{bt} \cdot A$.

Для назначения щели в железобетонной балке-стенке выделяются элементы и узлы, которые находятся ниже (или под) самой щелью. После вызывается **Главное меню → Схема → Корректировка → Расшить схему (рис. 15).**

После этого изменяются координаты узлов таким образом, чтобы между ними было расстояние 2 мм (так как щель имеет зигзагообразное направление слева снизу направо

вверх, то изменяются координаты узлов как по направлениям x и y одновременно, так и по направлению x или y по отдельности – в зависимости от их геометрического расположения).

По предусмотренным в программном комплексе «Лира Pro 9.6» параметрам можно задать размеры щели не менее 2 мм.

Для уменьшения размера щели, например до 0,1 мм, моделирующей трещину, пронизанную арматурными стержнями, необходимо после задания щели 2 мм уменьшить размеры стержневых конечных элементов, с помощью которых моделируются арматурные стержни, и изменить координаты узлов щели по соответствующим направлениям (**в главном меню Выбор → Информация об узле или элементе** устанавливаются координаты по соответствующим направлениям x и y смещением в 0,1 мм). Такой прием позволяет обойти отмеченное ограничение их минимального размера. При этом в образованном стержневом конечном элементе, попадающем в щель, будет присутствовать информация о перемещениях его узлов, а реакции в узлах отыскиваются как среднее значение между реакциями стержней, прилегающих к этому конечному элементу (чтобы посмотреть результаты, сохраняем результаты расчета и закрываем файл расчета; окно ПК «Лира» должно остаться открытым. В этом окне выбираем: **Главное меню → Расчет → Расчетный процессор**; в появившемся окне выполняем следующую цепочку действий: **Параметры расчетного процессора → Таблицы результатов → Открыть → Тип файлов** (перемещения, усилия, состояние материалов, главные и эквивалентные напряжения и т.п.).

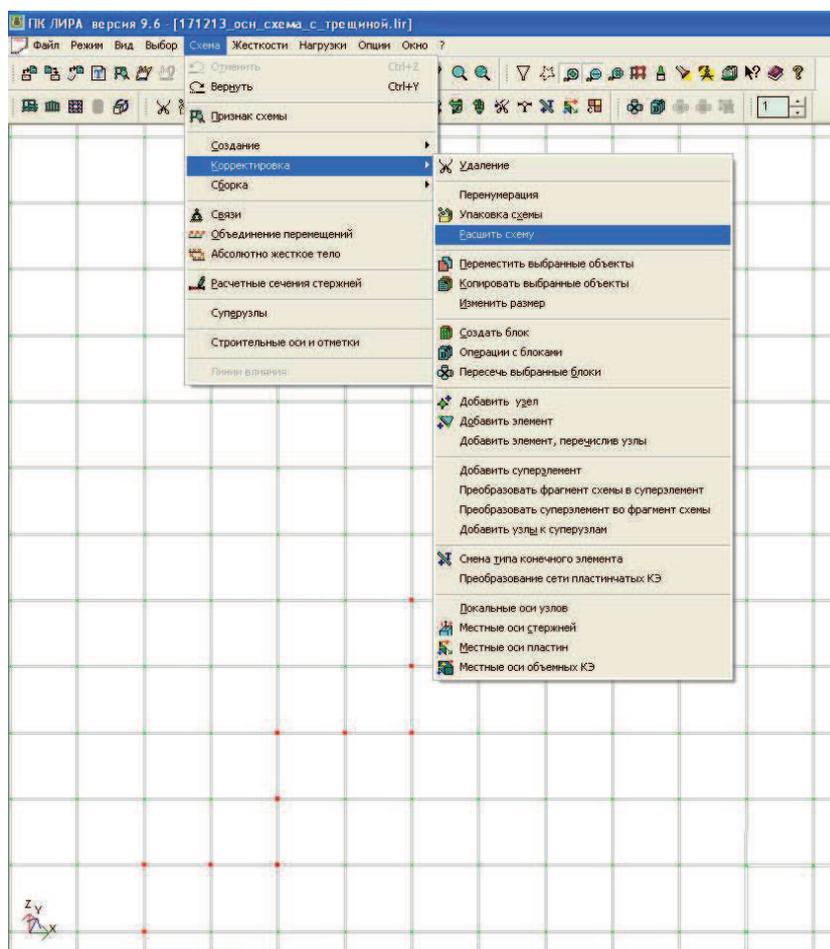


Рисунок 15 – Моделирование щели с помощью расшивки схемы

Моделируются поперечные хомуты высотой 2 КЭ, находящиеся между горизонтальной проекцией щели шагом в 2 или 3 таких элемента. Для этого посередине горизонтальной проекции щели выделяются узлы, находящиеся на удалении одного конечного элемента по вертикали от горизонтальной щели. После этого с помощью 201-го КЭ моделируется стержень арматурный Ø8A240C.

Задается вид загрузки на балку-стенку. Для этого в главном меню **Нагрузка** → **Нагрузка на узлы и элементы** → **Нагрузка в узлах** выбирается вторая закладка, соответствующая заданию сосредоточенной силы на узел по направлению вертикальной оси Z (рис. 16).



Рисунок 16 – Диалоговое окно «Задание нагрузок»

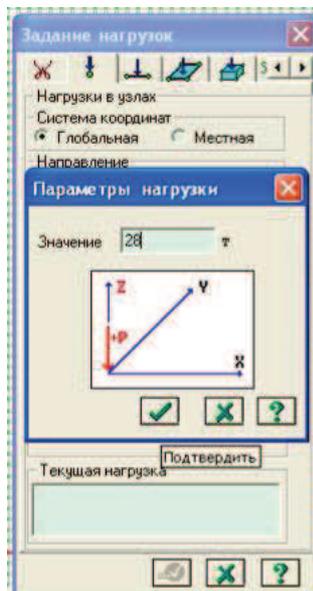


Рисунок 17 – Диалоговое окно «Параметры нагрузок»

Указывается сосредоточенный тип нагрузки (верхняя левая радиокнопка), и в появившемся окне **Задание нагрузок** задается значение сосредоточенной нагрузки (рис. 17).

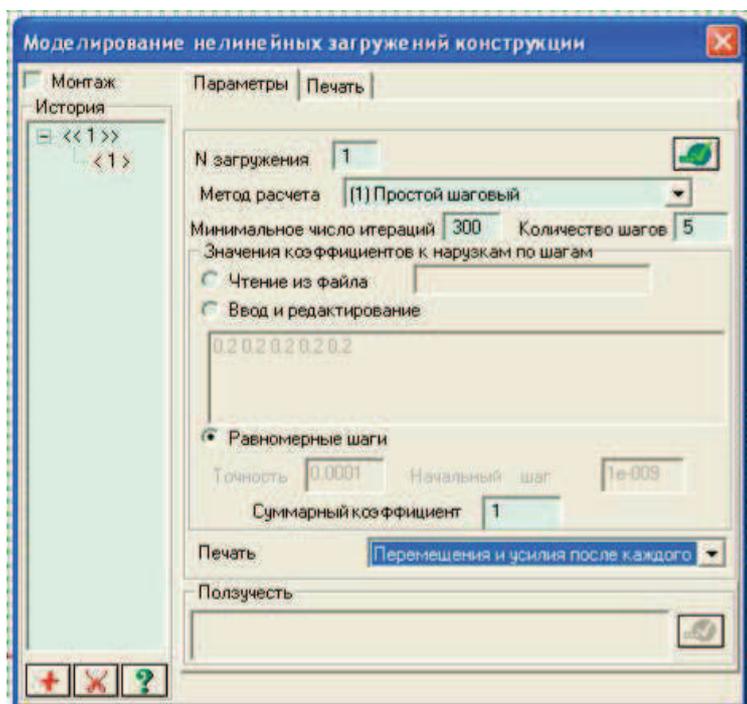


Рисунок 18 – Диалоговое окно «Моделирование нелинейных загрузений конструкции»

После проделанной операции моделируется нелинейное загрузение железобетонной балки-стенки с имеющимися наклонными трещинами. Для этого в главном меню **Нагрузка** выбираем пункт **Моделирование нелинейных загрузений конструкции** (рис. 18). В закладке **Параметры** появившегося окна устанавливается метод расчета простой шаговый с количеством минимальных итераций – 300 и количеством шагов – 10.

Следует отметить, что в заголовке **Печать** выбирается последняя закладка **Перемещения и усилия после каждого шага** для проведения детального анализа всех усилий и перемещений после каждого шага итераций.

После проделанных операций запускаем задачу на расчет. Для этого в главном меню **Режим** выбирается пункт **Выполнить расчет**.

Аналогичный прием по второму варианту используется и для стержневых конструкций при определении жесткости в угловых зонах и в зонах наклонных трещин, в том числе пересекающихся (характерных при сейсмических воздействиях для опорных участков и узлов соединений), с использованием модели эквивалентной плосконапряженной конструкции (рис. 19).

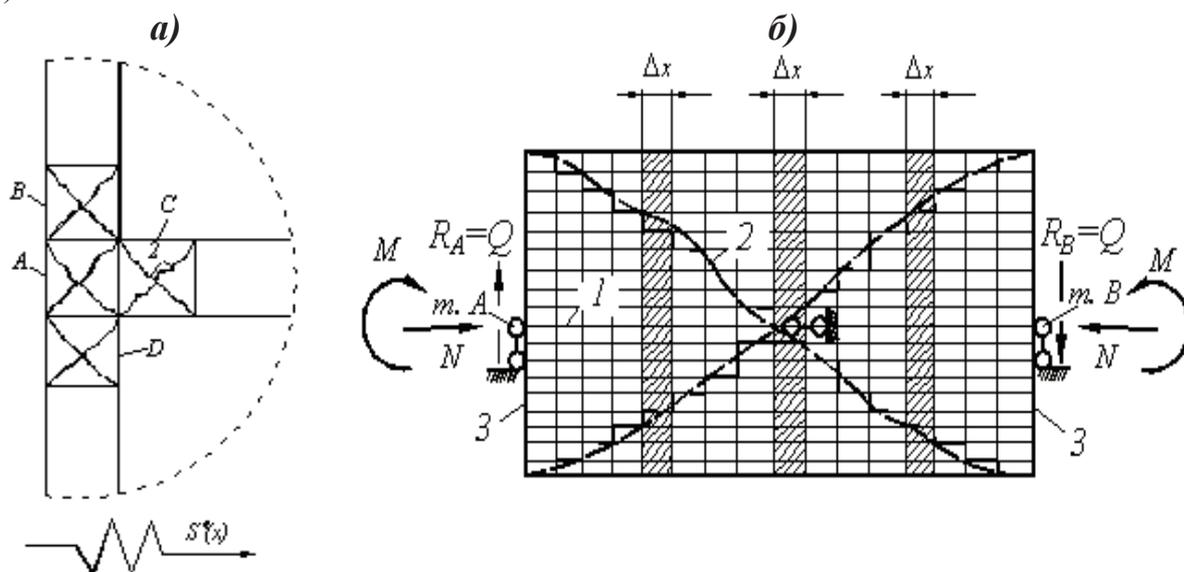


Рисунок 19 – К расчету стержневых железобетонных конструкций в узловых зонах и на участках с наклонными трещинами на статические и сейсмические воздействия: а – выделение характерных зон и схем трещин; б – расчетная модель для уточнения жесткости выделенных зон; 1 – горизонтальные границы конечных элементов; 2 – трещины; 3 – абсолютно жесткие торцевые вставки

Алгоритм расчета предполагает наличие итерационного процесса, регулируемого достигнутой точностью толщины указанных КЭ, прилегающей к неявным трещинам, и динамических характеристик здания и сооружения.

Компьютерная реализация предлагаемых расчетных моделей применительно к расчету вышерассмотренной балки-стенки 1200×550 мм (рис. 3) также была выполнена **по первому варианту** моделирования жесткости плосконапряженных железобетонных конструкций с мнимой щелью. При этом прогибы в сечении под силой в основной модели с мнимой щелью и прогибы в основной модели с реальной щелью практически одинаковые, что говорит о достаточной эффективности не только предложенного второго варианта, но и первого варианта – с мнимой щелью-трещиной. В связи с этим не требуется дополнительная перенумерация узлов и расшивка конечноэлементной расчетной схемы (выполняемой для второго варианта), что весьма существенно, особенно если количество конечных элементов исчисляется сотнями тысяч.

По первому варианту жесткость стержневых конструкций на участках с наклонными трещинами, в том числе с пересекающимися (характерными при сейсмических воздействиях для опорных участков и узлов соединений), определяется с помощью специальной расчетной модели плосконапряженных конструкций (см. рис. 19), где трещина уже рассматривается как мнимая (неявная).

В этом варианте схема трещин отображается неявно (за счет уменьшения толщины конечных элементов, прилегающих к используемой схеме трещин). При этом в конечных элементах, прилегающих к неявным трещинам, уменьшается их толщина, которая для прак-

тических расчетов определяется с использованием разности работ только двух КЭ, прилегающих к горизонтальным и вертикальным отрезкам моделируемой неявной трещины.

Работа каждой пары КЭ вычисляется дважды с использованием двухэлементной консольной модели (рис. 2): монолитное соединение двух КЭ (W_1) и после их расшивки (W_2) (при этом процент распределенного армирования заменяется двумя стержневыми КЭ, расположенными по краям плоских КЭ).

В местах перехода горизонтального участка моделируемых трещин к вертикальному работа угловых плоских КЭ определяется путем усреднения. В результате новая толщина КЭ, прилегающих к трещине, вычисляется по формуле (1).

При расчете и определении ширины элементов, принадлежащих мнимой щели, получаем величину b_2 , которая изменяется по интерполяции от точки A_1 к точке B_1 (от 8 до 10 см) (рис. 19).

В дальнейшем работа конечных элементов специальной расчетной модели заменяется на эквивалентный стержень с одинаковой работой.

Допускается также определять жесткость отдельных сечений в эквивалентном стержне методом единичных полосок с использованием теории составных стержней А.Р. Ржаницына [3].

Жесткость указанных участков (полос) заменяется эквивалентной жесткостью

$$B(\lambda) = \frac{M^2 \cdot \Delta x}{2 \cdot W_3}, \quad (2)$$

где W_3 – работа усилий выделенного участка (составной полосы).

Алгоритм предполагает итерационный процесс, который заканчивается при достижении заданной погрешности $B_1(\lambda)$.

Выводы. Предложенная методика по обоим вариантам реализована при участии авторов в действующих нормативных документах [2].

Литература

1. Колчунов В.И. Метод определения жесткостных характеристик железобетонных конструкций при сейсмических воздействиях / В. И. Колчунов, Н. Г. Марьенков // Будівництво України. – 2008. – Вып. 3. – С. 24–29.
2. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1–12:2014. – [Чинний з 2014-10-01]. – К.: Мінгеріонбуд України, 2014. – 118 с. – (Національний стандарт України).
3. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки / А. Р. Ржаницын. – М.: Строиздат, 1986. – 316 с.

В.І. Колчунов, д.т.н., професор

І.О. Яковенко, к.т.н.

Т.В. Тугай, асистент

Національний авіаційний університет, м. Київ

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЖОРСТКОСТІ ПЛОСКОНАПРУЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «ЛІРА PRO»

Наведено методику розрахунку жорсткості плосконапружених залізобетонних конструкцій, засновану на застосуванні еквівалентної моделі. Розглянуто варіанти її визначення для плосконапружених стінових та стержневих залізобетонних конструкцій на ділянках із похилими тріщинами, які відображаються неявно, і запропоновано спеціальний прийом моделювання явних тріщин-цилін, що розташовуються на діагоналях

конструкції. Наведену методику розрахунку реалізовано в програмному комплексі «ЛІРА Pro» у вигляді детального алгоритму.

Ключові слова: жорсткість, плосконапружені залізобетонні конструкції, тріщина-щілина, еквівалентна модель.

*V.I. Kolchunov, ScD, professor
I.A. Yakovenko, PhD
T.V. Tygai, assistant
National Aviation University, Kyiv*

The technique of hardness plane-stressed reinforced concrete constructions, based on the use of equivalent models. The variants of its determination for plane-stress and core wall of reinforced concrete structures in areas with inclined cracks that appear implicitly and offered a special reception explicit modeling of cracks, crevices, which are located along the diagonals of the construction. Present calculation method implemented in the software package "Lira Pro» by detailed algorithm.

Keywords: rigidity, plane-stressed reinforced concrete constructions, crack-gap equivalent model.

*Надійшла до редакції 27.09.2014
© В.И. Колчунов, И.А. Яковенко, Т.В. Тугай*