

УДК 624.012.045

д.т.н. Колчунов В.И., Тугай Т.В., к.т.н. Яковенко И.А.,
Национальный авиационный университет
Марьенков Н.Г., Государственное предприятие
«Научно-исследовательский институт строительных конструкций»

РАСЧЕТ ЖЕСТКОСТИ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННЫХ СТЕН С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ПК «ЛИРА-ПРО» ПО МЕТОДИКЕ НОВЫХ НОРМ

Выполнена сопоставительная оценка расчета жесткости плоскостнонапряженных стен, основные положения которого включены в действующие ДБН по строительству в сейсмических районах Украины. Рассмотрены варианты реализации предложенной методики с привлечением ПК «Лири-Про», что способствует ее скорейшему внедрению в практику проектирования

Ключевые слова: плоскостнонапряженные железобетонные конструкции, сейсмические воздействия, трещины, расчет, жесткость.

Актуальность темы. В действующих с 1 октября 2014г. государственных нормах по сейсмостойкому строительству [1] приведена методика расчета жесткости плоскостнонапряженных и стержневых конструкций с учетом трещинообразования. Для использования методики в проектной практике необходима ее реализация в программных комплексах. С этой целью в статье рассмотрено использование возможностей ПК «ЛИРА-Про» для расчета жесткости железобетонных конструкций.

Материал исследования.

Задачи численных исследований включали:

- разработка расчетной модели плоскостнонапряженной стеновой конструкции с железобетонной вставкой при совместном действии вертикальных статических нагрузок и статического эквивалента горизонтальных сейсмических нагрузок по ДСТУ [2] и ДБН [1];
- компьютерная реализация расчета жесткости плоскостнонапряженной конструкции с использованием возможностей ПК «ЛИРА-Про» с учетом физической нелинейности бетона и арматуры.

В качестве объекта численных исследований принят фрагмент стены жилого дома с железобетонной вставкой (рис. 1, а). Испытания фрагмента выполнены в испытательном зале Научно-исследовательского института строительных конструкций (ГП НИИСК, г. Киев). Схема расположения механических приборов и групп электротензорезисторов на железобетонном

сердечнике приведена на рис. 1, б и 1, в (реализована специалистами Черноморского государственного университета в Краснодаре)

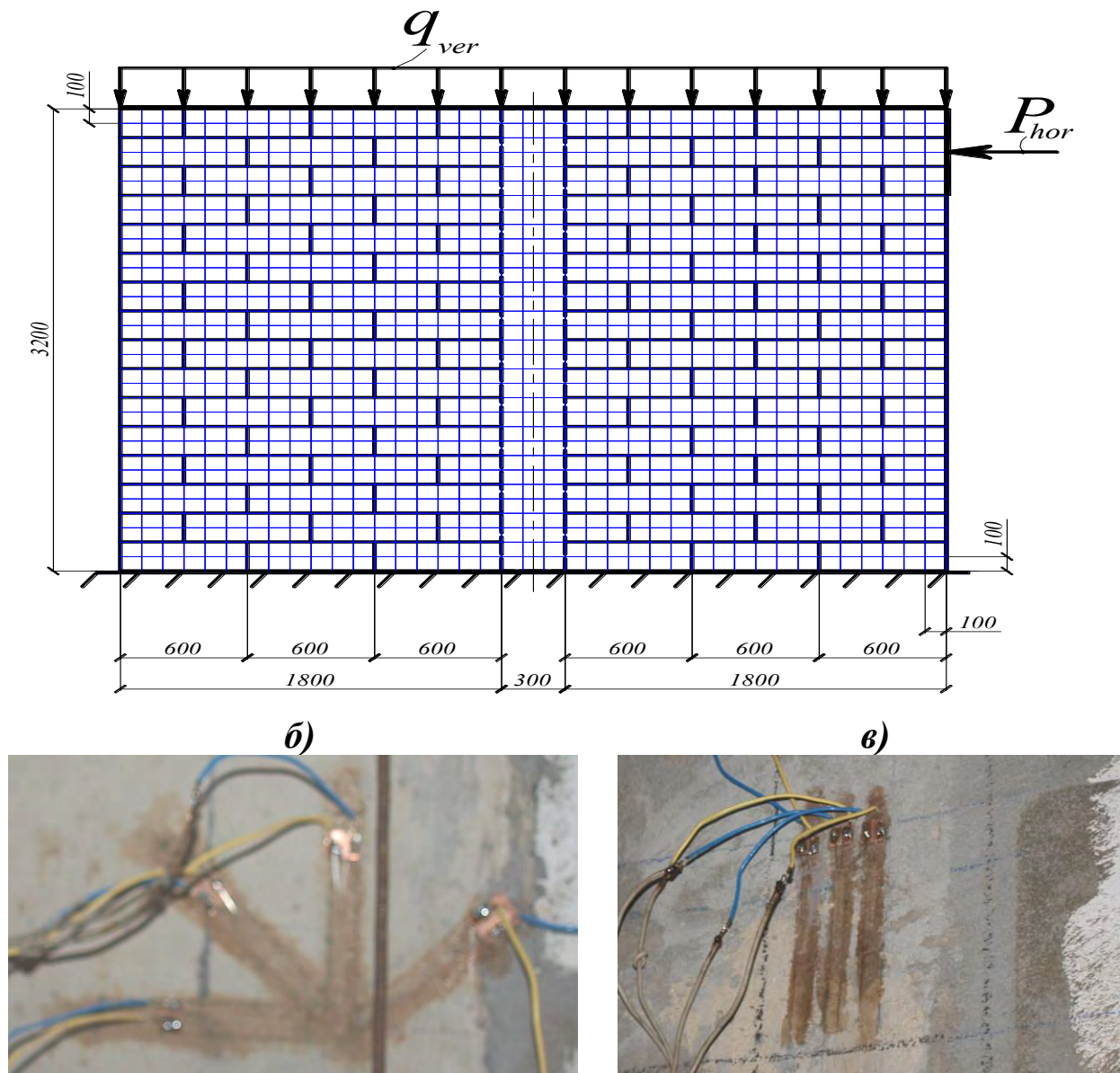
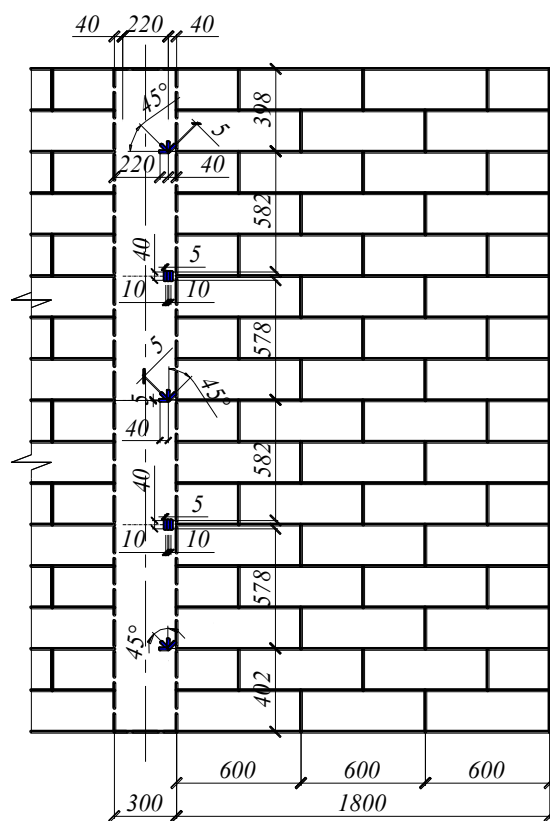
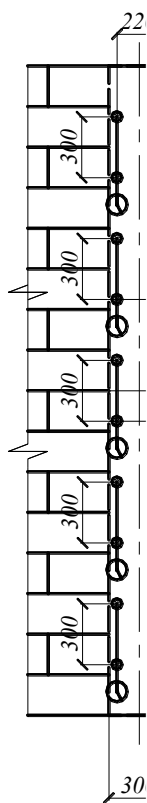


Рис. 1. Нанесение сетки для фиксации трещинообразования (а), установка розеток и электротензорезисторов на бетон (б, в)

После каждой ступени нагружения фиксировалось появление и развитие трещин (фото поверхности образца с нанесенной сеткой цветных вертикальных и горизонтальных линий с шагом 100 мм, (рис. 2, а), и измерялась ширина их раскрытия с помощью микроскопа МПБ–2; на каждой ступени нагружения выполнялось фотографирование картины трещин; характер разрушения фиксировался видеокамерой.



в)

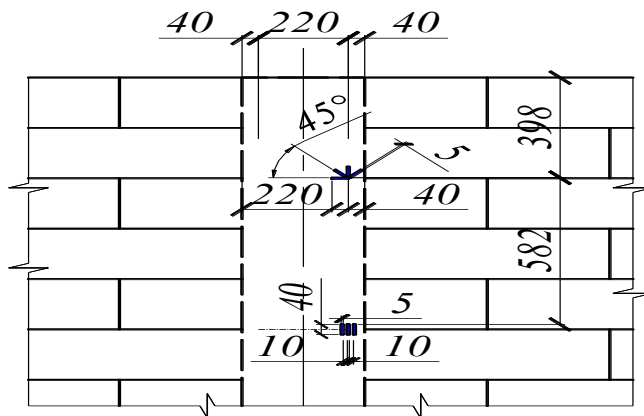
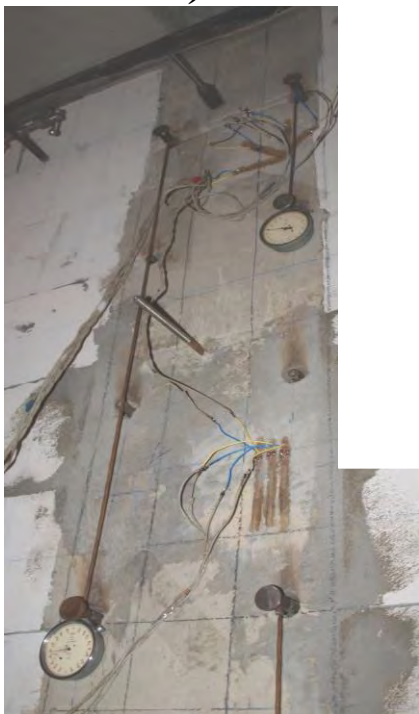


Рис 2. Схема расположения механических приборов (а), (б) и групп электротензорезисторов (в) и (г) на железобетонном сердечнике

Анализ аналогичных экспериментов плосконапряженных железобетонных стен с оконными и дверными проемами показал, что до момента разрушения возникают несколько уровней образования трещин. Трещины первого уровня возникают как правило в местах концентрации напряжений и деформаций (в

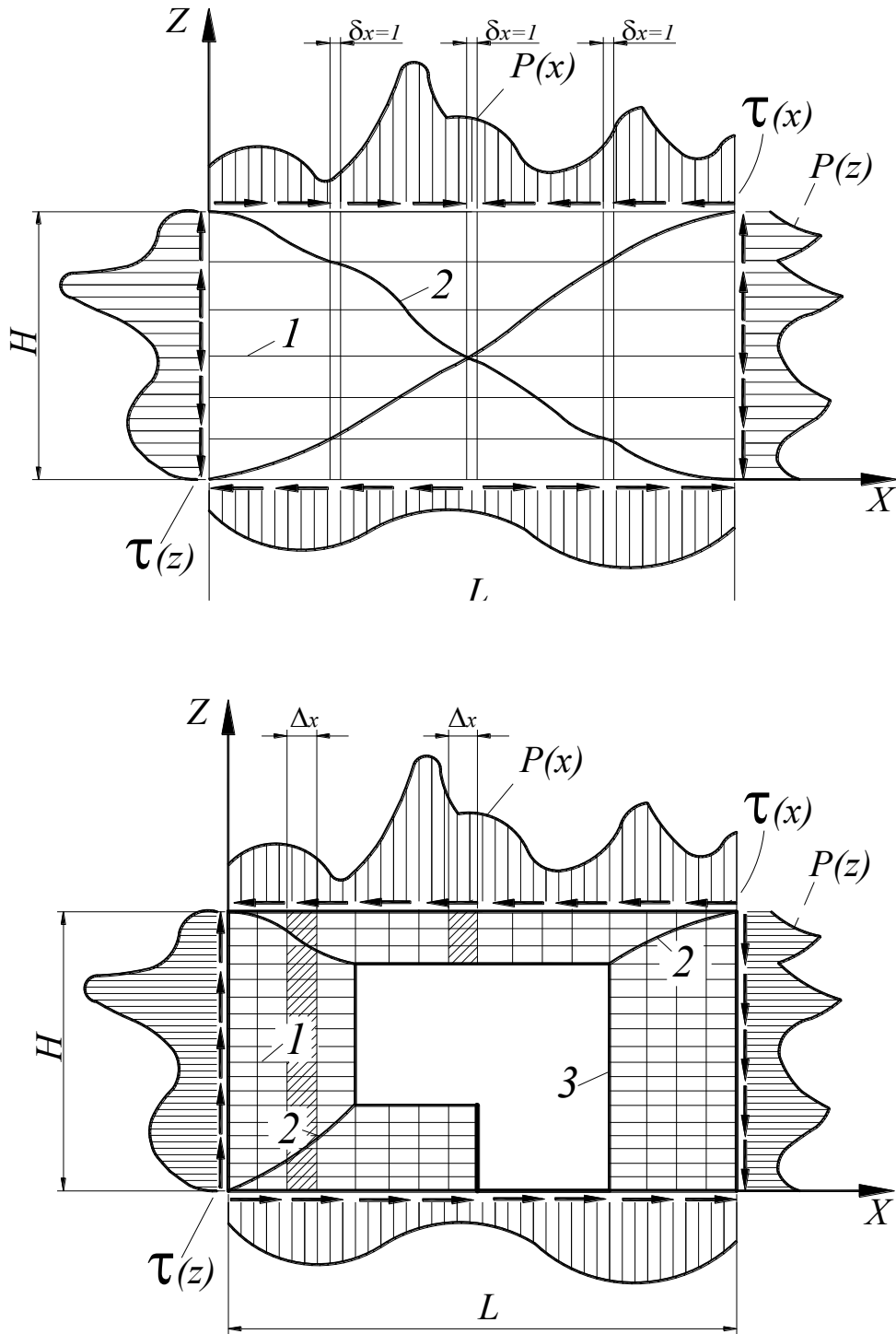


Рис. 3. К расчету плосконапряженных железобетонных конструкций без отверстий (а) и с оконными и дверными проемами (б) на статические и сейсмические воздействия:

1 – границы конечных элементов; 2 – трещины; 3 – проем

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», допускается определять по двум вариантам.

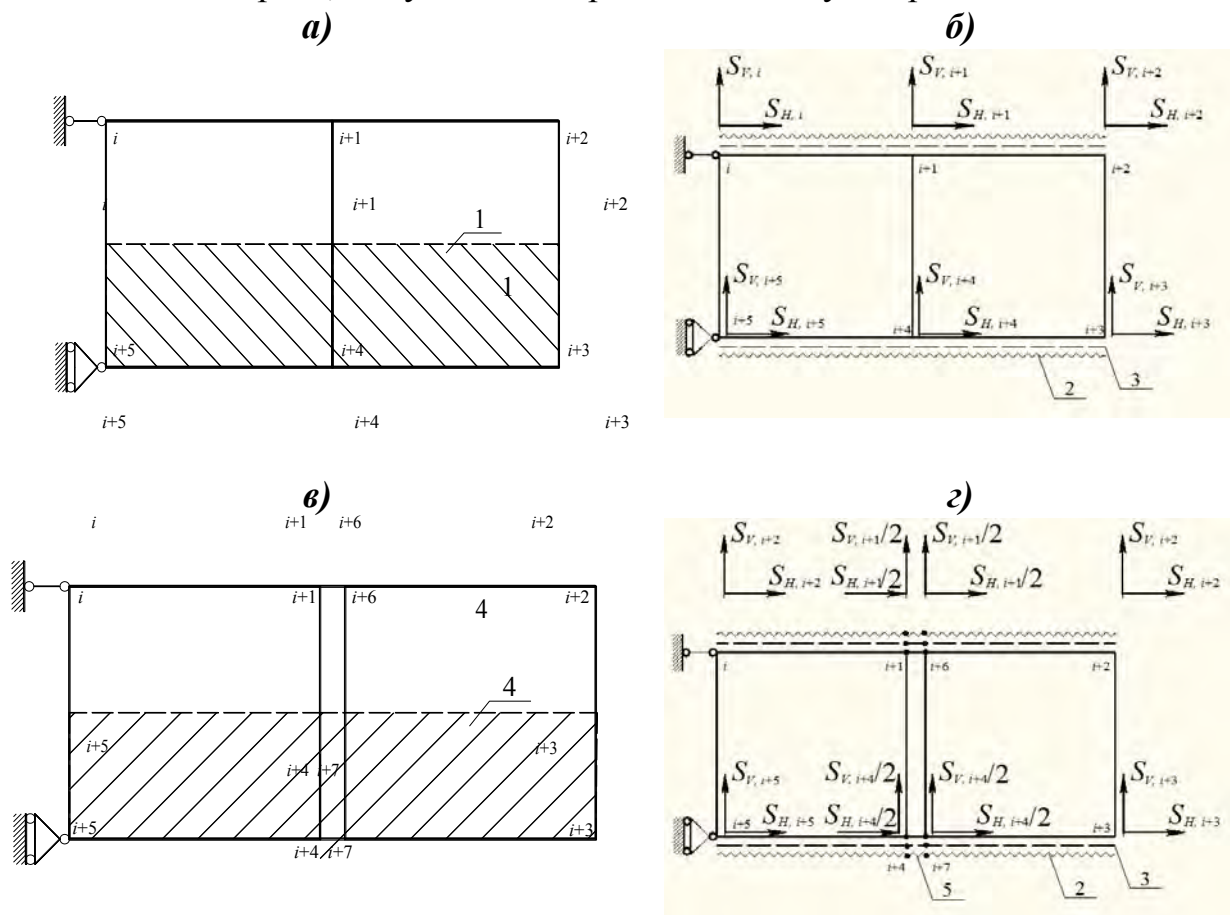


Рис. 4. Построение двухэлементной модели: а – сбор нагрузки для 255 КЭ; б – расчетная схема двухэлементной модели без расшивки; в – сбор нагрузки для 255 КЭ, установленного в щели; з – расчетная схема двухэлементной модели с расшивкой; 1 – грузовая площадь 255 КЭ; 2 – 255 КЭ ($A_{b\ 255,1} = A_{b\ 255}/4$, 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)

Первый вариант выполняется без изменения заданного вначале порядка и номеров плоских конечных элементов (КЭ), на которые разбивается плосконапряженная конструкция для расчета по МКЭ. При этом в конечных элементах, прилегающих к неявным трещинам (схема трещин проектируется неявно), 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. 4): монолитное соединение двух КЭ (W_1) и после их расшивки (W_2) (при этом полевое армирование заменяется двумя стержневыми КЭ, расположенными по краям плоских КЭ).

Усредненные усилия 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 нагрузками. При этом опорное закрепление двух узлов консоли (шарнирно подвижное и шарнирно неподвижное), в целях усреднения, необходимо задавать как слева, так и справа.

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

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

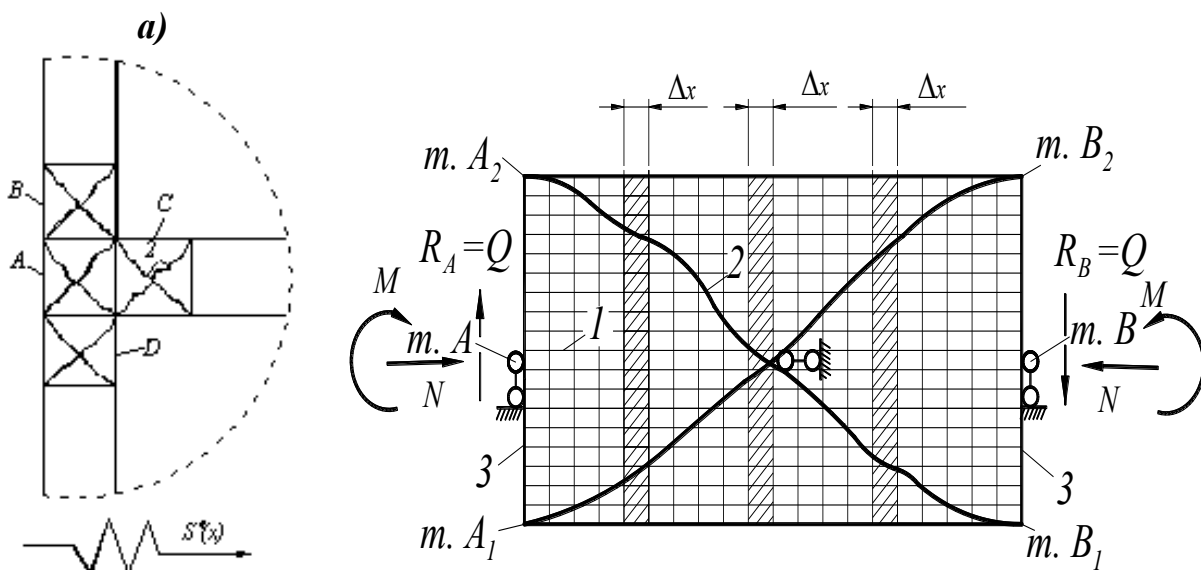


Рис. 5. К расчету стержневых железобетонных конструкций в узловых зонах и на участках с наклонными трещинами на статические и сейсмические воздействия: а – выделение характерных зон и схем трещин; б – расчетная модель для уточнения жесткости выделенных зон; 1 – горизонтальные границы конечных элементов; 2 – трещины; 3 – абсолютно жесткие торцевые вставки

При расчете и определении ширины элементов, принадлежащих мнимой щели, получаем v_2 , которое изменяется по интерполяции от т.А к т.В.

Аналогичный прием используется и для стержневых конструкций при определении жесткости в угловых зонах и в зонах наклонных трещин – с использованием модели эквивалентной плосконапряженной конструкции (рис. 5).

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

По второму варианту жесткость зданий и сооружений с плоско напряженными и стержневыми конструкциями определяется с использованием специального приема моделирования явных трещин – щелей, которые располагаются по диагоналям конструкции (см. рис. 6).

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).

Пример компьютерной реализации этого варианта предлагаемых расчетных моделей применительно к вышерассмотренной плосконапряженной стене (рис. 1, а) размером 3900 мм × 3200 мм с железобетонным сердечником, рассмотрен ниже.

Назначение конечных элементов пластин моделируемой балки-стенки (рис. 5) осуществляется с помощью следующей цепочки 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**. При этом выбирается **закладка 4** (четырёхугольный конечный элемент) и устанавливается 230-й физически нелинейный четырёхугольный КЭ плоской задачи (балка-стенка) - конечный элемент пластин.

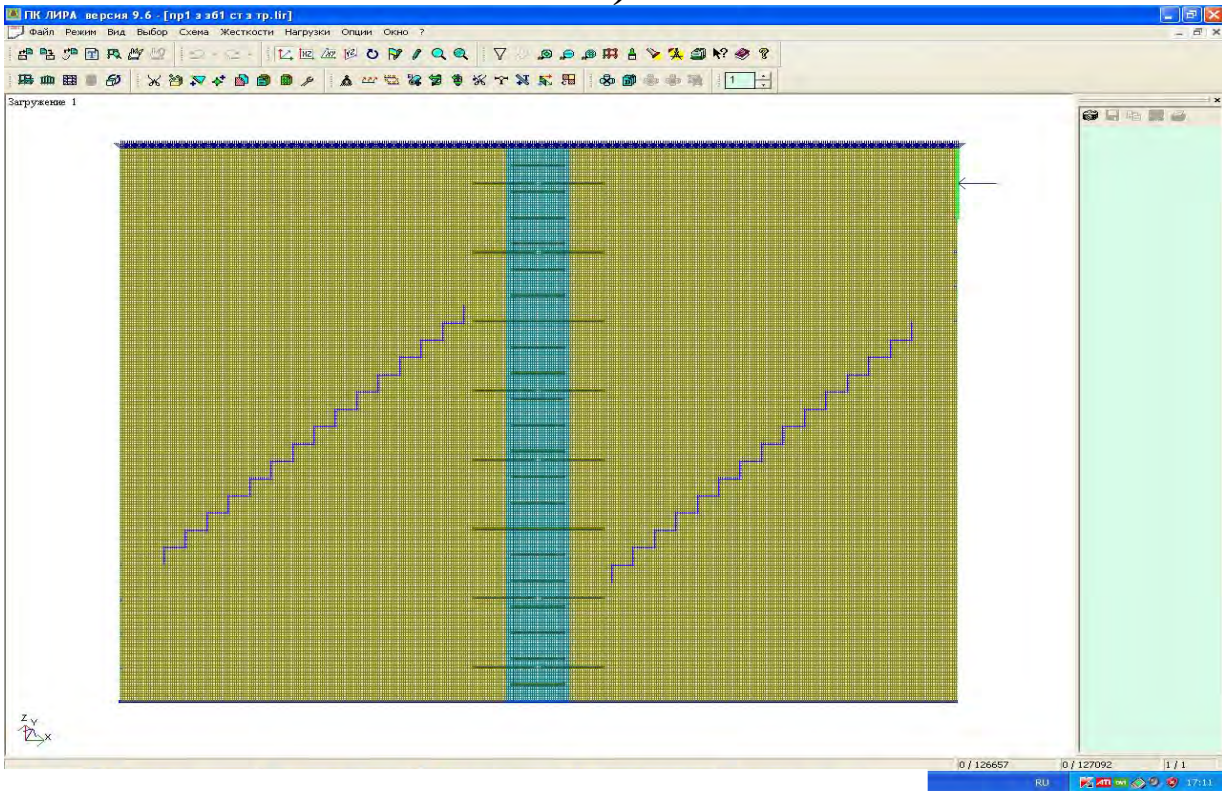
Назначается тип жесткости 230-й конечным элементам. Указывается курсором на кнопку *Добавить* и выбирается закладка EI, и тип элементов **пластина**.

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** (рис 7).

В появившемся окне (рис. 7) выбираем закладку закон нелинейного деформирования и устанавливаем 31 закон – экспоненциальный (расчетная прочность) и в случае использования расчетных характеристик выбираем 31-й закон, а в случае использования фактических характеристик выбираем 15 – экспоненциальная зависимость для железобетона. Назначаем **Класс бетона** –

В20 и Тип бетона – ГА. При этом устанавливается кусочно-линейный закон деформирования материала и указываются деформации и соответствующие им напряжения (рис. 7, б).

а)



Узел I

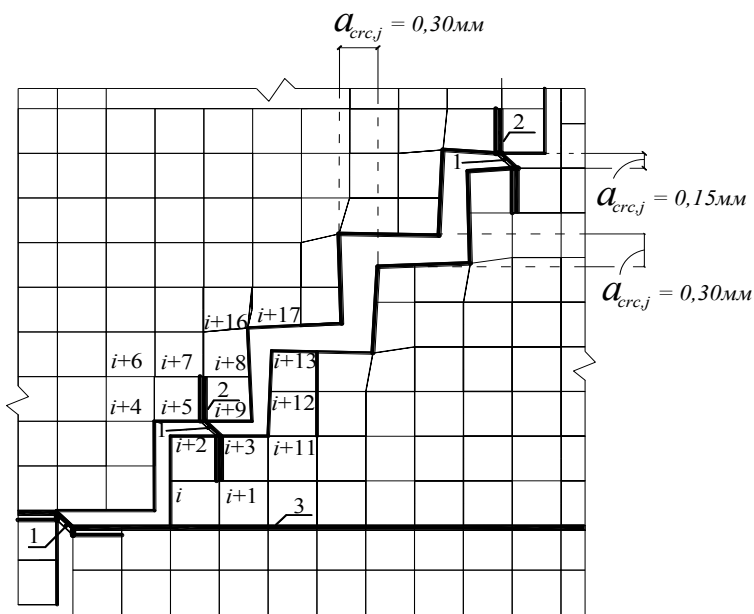


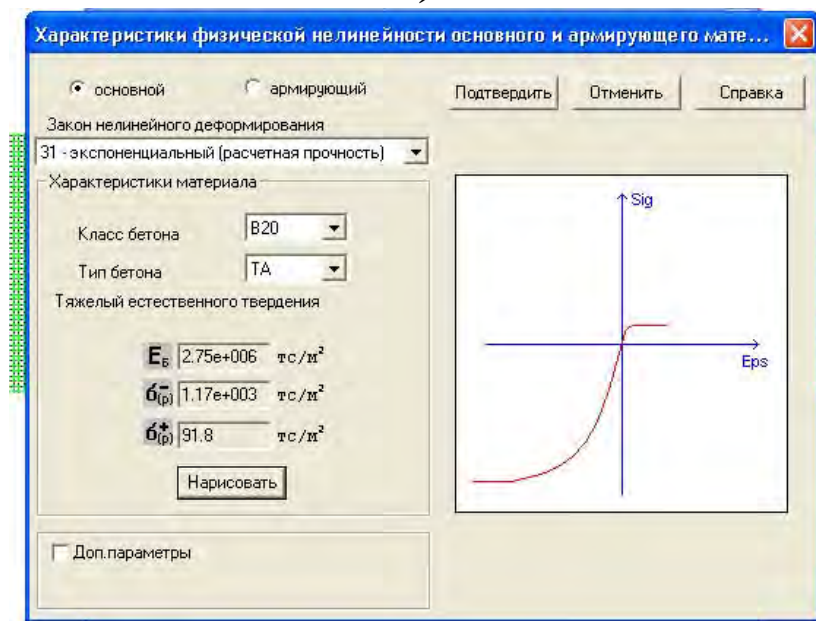
Рис. 6. Моделиро-
плосконапряжен-
ной с железобетонным
ником: *a* – основная
; *б* – фрагмент узла I
ментами расшивки

– 255 КЭ, работа-
на сжатие; 2 – 201 КЭ,
рующей ар-
матурный
нь; 3 – 201 КЭ,
рующей продольную
ру;
255 КЭ, арматурный
нь

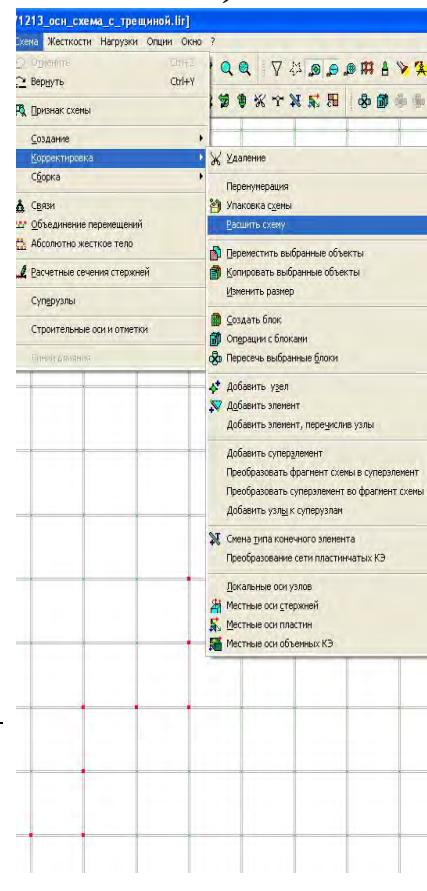
После назначения параметров жесткости арматурному стержню необходимо выполнить объединение перемещений с узлами балки-стенки. Для этого выделяются все узлы вдоль расположения арматуры и выполняется

следующая цепочка действий: **Главное меню** → **Схема** → **Объединение перемещений**.

а)



б)



в)

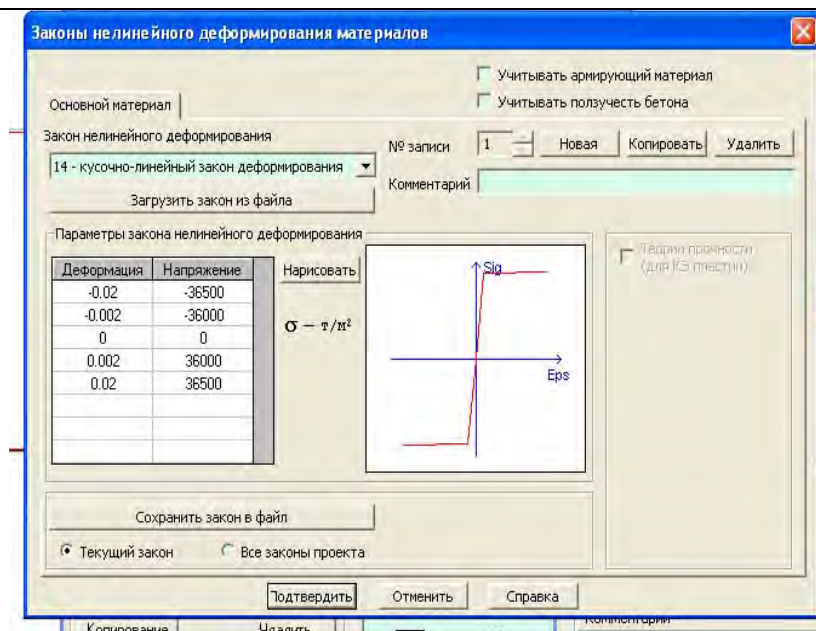


Рис. 7. Диалоговое окно «Характеристики физической нелинейности основного и армирующего материала» (а); моделирование щели с помощью расшивки схемы (б) назначение нелинейности параметрам стержневой рабочей арматуры (в)

Для моделирования процесса возможного закрытия трещин используется 255-й конечный элемент. При этом грузовая площадь, приходящаяся на 255-й КЭ, назначается в соответствии с рис. 4.

Для задания жесткостных характеристик элемента номер 255, необходимо воспользоваться главным меню в следующей последовательности:

1) сначала выделить этот элемент; 2) после этого необходимо сменить тип конечного элемента на 255 (**Схема** → **Корректировка** → **Смена типа конечного**

элемента); 3) выбрать пункт меню **Жесткости**→**Жесткости элементов** и назначить жесткость КЭ номер 255. При этом задаются следующие параметры:

- погонная жесткость по направлению X: $R_x = \frac{EA}{l}$;
- погонная жесткость по направлению Z: $R_z = \frac{12EI}{l^3}$;
- предельного усилия N по X: $N_x = R_b \cdot A_b$;
- предельного усилия N по Z: $N_z = 2,2 \cdot R_{bt} \cdot A$.

Для назначения щели в железобетонной балке-стенке (рис. 6, в), выделяются элементы и узлы, которые находятся ниже щели (или примыкающие к щели). После этого вызывается Главное меню→**Схема**→**Корректировка**→**Расширить схему** (рис. 7,б).

Далее изменяются координаты узлов таким образом, чтобы между ними было расстояние 2мм (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 ЛираPRO 9.6 возможностям, 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 (КЭ № 201), 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 0,1мм). 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. Для анализа 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.).

Далее моделируются хомуты железобетонного сердечника, расположенные на границе двух или трех конечных элементов (рис. 6, б), вдоль горизонтальной

проекции щели. 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 арматурный стержень.

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

Задается вид нагружения на балку-стенку. Для этого в главном меню **Нагрузка** → **Нагрузка на узлы и элементы** → **Нагрузка в узлах**. Для этого выбирается вторая закладка, соответствующая заданию сосредоточенной силы на узел по направлению вертикальной оси Z (рис.8).

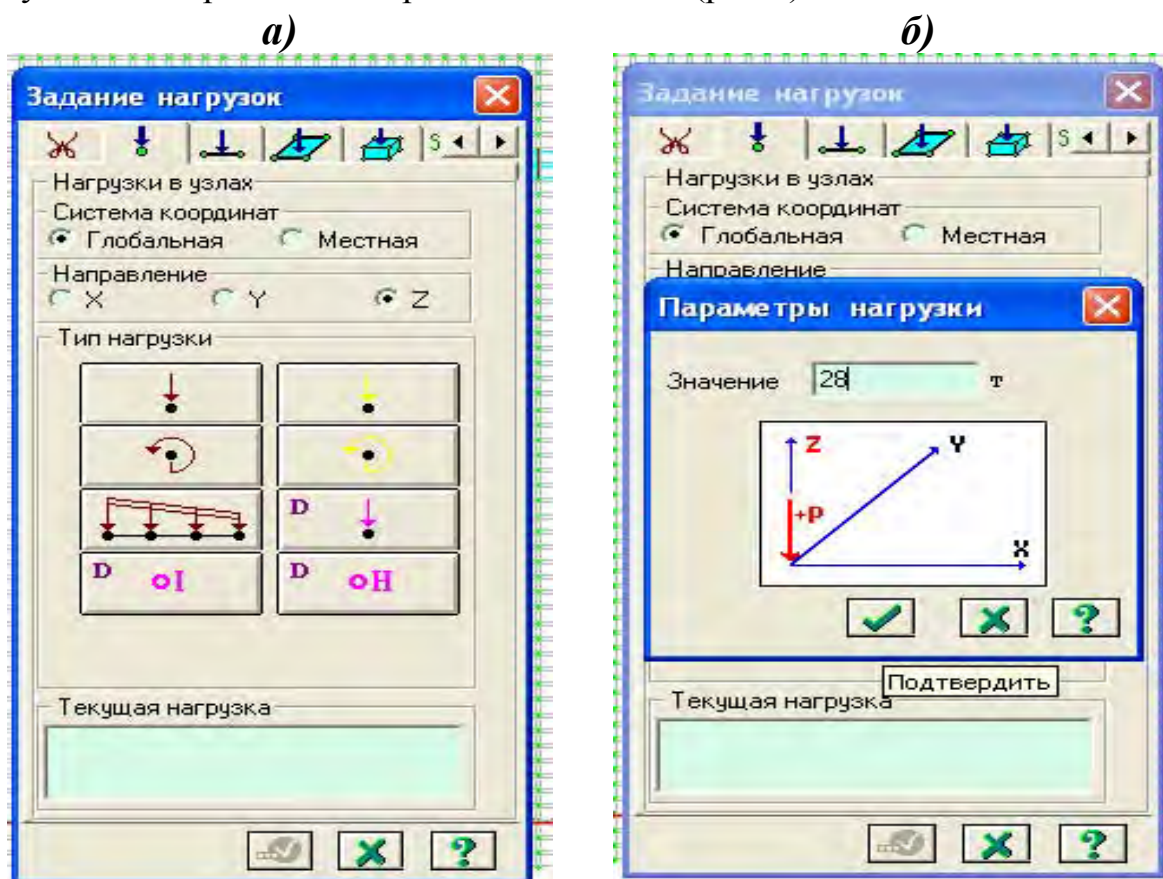


Рис.8. Диалоговые окна **Задание нагрузок** (а) и **Параметры нагрузок** (б)

Указывается сосредоточенный тип нагрузки (верхняя левая радио-кнопка) и в появившемся окне **Задание нагрузок** задается значение сосредоточенной нагрузки (рис. 8, б).

После проделанной операции, моделируется нелинейное нагружение железобетонной балки-стенки с имеющимися наклонными трещинами. Для этого в главном меню **Нагрузка** выбираем пункт **Моделирование нелинейных**

загружений конструкции. 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**.

Компьютерная реализация предлагаемых расчетных моделей применительно к расчету выше рассмотренной плосконапряженной стены из газобетонных блоков, разделенных железобетонным сердечником (рис. 6), также была выполнена по первому варианту моделирования жесткости плосконапряженных составных 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. При этом не требуется дополнительная перенумерация узлов, и расшивка конечно-элементной расчетной схемы, что весьма существенно, особенно если количество конечных элементов исчисляется сотнями тысяч.

По второму варианту жесткость стержневых конструкций на участках с наклонными трещинами, в том числе с пересекающимися трещинами, (характерными при сейсмических воздействиях для опорных участков и узлов соединений), определяется с помощью специальной расчетной модели плосконапряженных конструкций (см. рис. 5), где трещина уже рассматривается как явная. В дальнейшем, работа конечных элементов специальной расчетной модели заменяется на эквивалентный стержень с одинаковой работой.

Выполняя сопоставление численного расчета с экспериментальными данными, необходимо отметить, что величины разрушающих нагрузок при монотонном нагружении и результаты эксперимента практически совпадают: опытное значение разрушающей нагрузки – 12,4 тс, расчетное – 11 тс.

Допускается также определять жесткость отдельных сечений в эквивалентном стержне методом единичных полосок с использованием теории составных стержней А.Р. Ржаницына [6].

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 (полосы).

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

Предложенные авторами статьи методика и алгоритм включены в действующий нормативный документ [1].

Список использованной литературы

1. Будівництво у сейсмічних районах України : ДБН В.1.1-12-2014. – [Чинний з 2014-10-01]. – К. : Мінгеріонбуд України, 2014. – 110 с. – (Національний стандарт України).
2. Шкала сейсмічної інтенсивності : ДСТУ Б В.1.1–28:2010. – [Чинний з 2011-10-01]. – К. : Мінгеріонбуд України, 2011. – 46 с. – (Національний стандарт України).
3. Будівництво у сейсмічних районах України : ДБН В.1.1–12:2006. – [Чинний з 2007-01-02]. – К. : Мінгеріонбуд України, 2006. – 84 с. – (Національний стандарт України).
4. Конструкції будинків і споруд. Вироби будівельні бетонні та залізобетонні збірні. Методи випробувань навантажуванням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості : ДСТУ Б В.2.6–7–95 (ГОСТ 8829-94). – [Чинний з 1998-04-01]. – К. : Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. – 30 с. (Національний стандарт України).
5. Колчунов В. И. Метод определения жесткостных характеристик железобетонных конструкций при сейсмических воздействиях / В. И. Колчунов, Н. Г. Марьенков // Будівництво України. – 2008. – Вип. 3. – С. 24–29.
6. Ржаницын А. Р. Составные стержни и пластинки / Алексей Руфович Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.

Анотація

Виконана порівняльна оцінка розрахунку жорсткості плосконапружених стін, основні положення якого включені в діючі ДБН по будівництву в сейсмічних районах України. Розглянуті варіанти реалізації запропонованої методики з залученням ПК «Ліра-Про», що сприяє її найшвидшому втіленню в практику проектування.

Ключові слова; плосконапружені залізобетонні конструкції, сейсмічні дії, тріщини, розрахунок, жорсткість.

Abstract

Performed a comparative evaluation of the rigidity calculation plane-strained walls, the main provisions of which are included in the current DBN on building in seismic regions of Ukraine. The variants of realization of the proposed method are involving PC "Lira-Pro", which contributes to its rapid implementation in practice of design.

Keywords: plane-strained reinforced concrete constructions, seismic effects, cracks, calculation, rigidity.