

УДК 624.072.21.7

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, О. В. КОЗУНОВА, старший преподаватель, Е. А. СИГАЙ, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО БЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Для многоэтажных энергоэффективных зданий с поэтажно опертыми стенами предложена конструкция стенового ограждения на основе применения блока стенового трехслойного с гибкими связями. Оригинальная конструкция блока требует современного подхода в исследовании его напряженно-деформированного состояния.

В предлагаемом линейном расчете трехслойный стеновой блок моделируется совокупностью вертикальных упругих слоев (УС) конечных размеров с постоянным модулем деформации и коэффициентом Пуассона. Используется новая модификация энергетического подхода – вариационно-разностный подход (ВРП) к решению краевой задачи теории упругости (плоская деформация), который имеет важность практического применения в расчетах балок, балочных плит и приближенных к ним расчетных моделей упругих элементов конструкций на упругом, в том числе и искусственном, основании. Для реализации указанного подхода составлена программа на языке Mathematica 8.0 и проведена ее численная апробация.

Одним из типов современных конструкций ограждений многоэтажных энергоэффективных зданий с наружными стенами, поэтажно опирающимися на диски перекрытий, является предлагаемая в работе [1] авторами А. В. Геращенко и А. А. Васильевым конструкция из штучных стеновых материалов на основе применения блока стенового трехслойного с гибкими связями. Блок представляет собой трехслойную конструкцию, в которой несущие слои выполнены из дисперсно-армированного бетона (стеклофибробетона), а теплоизолирующий слой – из пеностекла. Наружный и внутренний слои соединяются системой гибких связей, выполняемых из стеклотканевой сетки.

В предлагаемом линейном расчете трехслойный стеновой блок моделируется совокупностью вертикальных упругих слоев (УС) конечных размеров с постоянными модулем деформаций и коэффициентом Пуассона. Используется вариационно-разностный подход к решению краевой задачи теории упругости (плоская деформация), который имеет важность практического применения в расчетах балок, балочных плит и приближенных к ним расчетных моделей упругих элементов конструкций на упругом, в том числе и искусственном основании.

Вариационно-разностный подход был предложен, получил дальнейшую апробацию и внедрение в инженерную практику в работах Босакова С. В., Козуновой О. В. [3–5], где рассматривалось нежесткое упругое основание – грунтовое основание, характеристики которого приближены к реальным условиям. В зависимости от жесткости основание может иметь резко отличительные упругие характеристики (модуль деформации, коэффициент Пуассона, предел текучести и прочности). В предлагаемом расчете упругое основание – железобетонная плита перекрытия, которое моделируется как жесткое искусственное основание, что учитывается в кинематических граничных условиях.

Общая постановка краевой задачи: рассматривается трехслойный стеновой блок шириной b на искусственном основании под действием сжимающей нагрузки, распределенной вдоль верхней грани несущего слоя. На расчетной модели (рисунок 1) распределенная нагрузка собирается в узловую в виде системы сосредоточенных сил.

При расчете слоистая упругая конструкция заменяется прямоугольной расчетной областью метода конечных разностей (МКР). Трехслойный стеновой блок аппроксимируется равномерной симметричной разбивочной сеткой с постоянным шагом вдоль оси x – Δx и вдоль оси y – Δy . В результате получено 159 i -тых узловых и 140 j -тых сеточных ячеек.

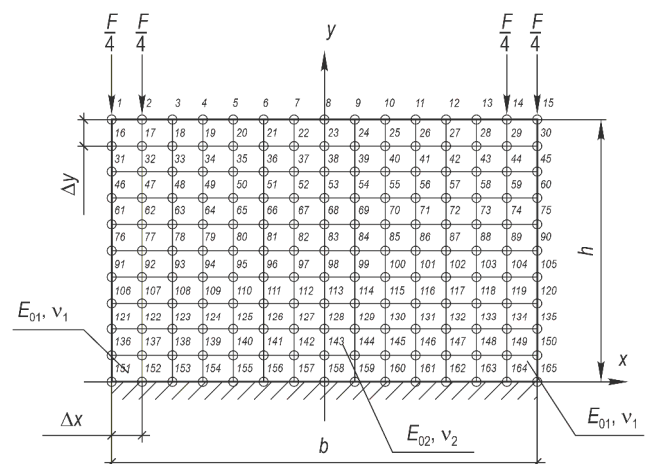


Рисунок 1 – Разбивочная сетка

За неизвестные принимаются: $u_i(x)$, $v_i(y)$ – компоненты вектора перемещения i -той узловой точки блока. Граничные условия задачи: на нижних границах принятой расчетной области перемещения $u = 0$, $v = 0$ (см. рисунок 1).

В результате расчета требуется определить параметры напряженно-деформированного состояния трехслойного блока:

- распределение вертикальных, горизонтальных и суммарных перемещений узловых точек блока;
- распределение вертикальных и эквивалентных напряжений в центрах ячеек расчетной области блока;
- построение эпюр прогибов и напряжений в несущем слое стенового блока.

Согласно вариационному принципу Лагранжа при нагружении стенового блока статической нагрузкой, его полная потенциальная энергия в состоянии статического равновесия принимает минимальное значение. Вели-

чина функционала полной потенциальной энергии трехслойного блока под действием статической нагрузки состоит из двух слагаемых и определяется формулой

$$\mathcal{E} = U_f + \Pi, \quad (1)$$

где U_f – функционал энергии деформаций упругого блока; Π – потенциал работы внешней нагрузки.

Для решения сформулированной краевой задачи в линейной постановке используются слагаемые функционала полной потенциальной энергии в виде [4]:

а) функционал энергии деформаций упругого блока

$$U_f = \iint_S \left[\frac{E_k \nu_k}{2(1 + \nu_k)(1 - 2\nu_k)} (\epsilon_x^{(k)} + \epsilon_y^{(k)})^2 + \frac{E_k}{2(1 + \nu_k)} ((\epsilon_x^{(k)})^2 + (\epsilon_y^{(k)})^2) + \frac{E_k}{4(1 + \nu_k)} (\gamma_{xy}^{(k)})^2 \right] dS, \quad (2)$$

где E_k, ν_k – упругие постоянные в т. К основания;

б) потенциала работы внешней нагрузки

$$\Pi = - \int_{-l}^l q(x) y(x) dx. \quad (3)$$

При составлении функционала энергии деформаций (2) не учитывается работа сил собственного веса упругого блока. Дело в том, что силы собственного веса блока уравновешены начальным напряженным состоянием в упругом блоке, а работа самоуравновешенной системы сил на малых возможных перемещениях равна нулю. Это означает, что при поиске полного напряженного состояния рассматриваемой задачи необходимо на полученное решение наложить напряженное состояние от сил собственного веса блока.

Так как в состоянии статического равновесия функционал полной потенциальной энергии \mathcal{E} должен иметь минимум, то неизвестные перемещения $u_i(x), v_i(y)$ будут найдены из условия обращения в нуль производных от полной потенциальной энергии по каждому из перемещений, то есть

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial v_i} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial u_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (4)$$

где N – число узловых точек стенового блока. В ходе преобразований (4) получается система дифференциальных уравнений, порядок которой равен $2N$, то есть числу неизвестных перемещений.

Для реализации указанного подхода составлена программа на языке Mathematica 8.0 и проведена ее численная апробация. В численном счете использовались следующие исходные параметры: боковая стенка (несущий слой) из стеклофибробетона – $\sigma_{u1} = 30$ МПа; $\nu_1 = 0,198$; $E_{01} = 14200$ МПа; заполнитель (пеностекло) – $\sigma_{u2} = 2$ МПа; $\nu_2 = 0,25$; $E_{02} = 11500$ МПа; $F = 1500$ Н.

На рисунке 2 приведена эпюра вертикальных перемещений точек верхнего слоя стенового блока (точки 1–15). Максимальные значения перемещений ($v_{\max} = 2,78 \cdot 10^{-7}$ м) возникают в точках приложения узловой нагрузки. Вертикальные перемещения в заполнителе в 6 раз ниже, чем в несущем слое.

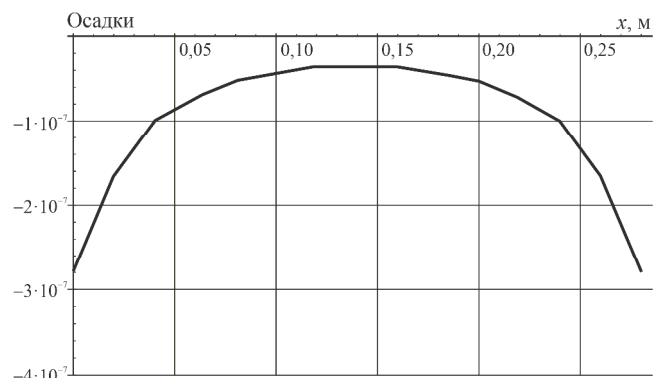


Рисунок 2 – Эпюра вертикальных перемещений верхнего слоя стенового блока

На рисунке 3 приведена эпюра горизонтальных перемещений боковой стенки стенового блока (точки 1–15). Максимальные значения перемещений ($u_{\max} = 1,41 \cdot 10^{-7}$ м) возникают в точках приложения узловой нагрузки. Горизонтальные перемещения имеют максимальные значения в верхней части блока. В нижней части горизонтальные перемещения уменьшаются более чем в 120 раз.

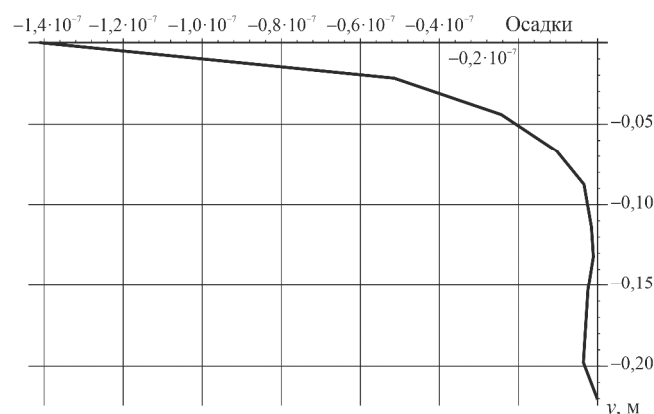


Рисунок 3 – Эпюра горизонтальных перемещений боковой стенки стенового блока

На рисунке 4 приведена эпюра прогибов боковой стенки (несущего слоя) стенового блока. Вид этой эпюры полностью соответствует деформированному состоянию освобожденной сверху сжатой стойки, имеющей жесткое защемление внизу. Максимальные значения прогибов ($f_{\max} = 3,12 \cdot 10^{-7}$ м) возникают в точках приложения узловой нагрузки, где наблюдается концентрация деформаций.

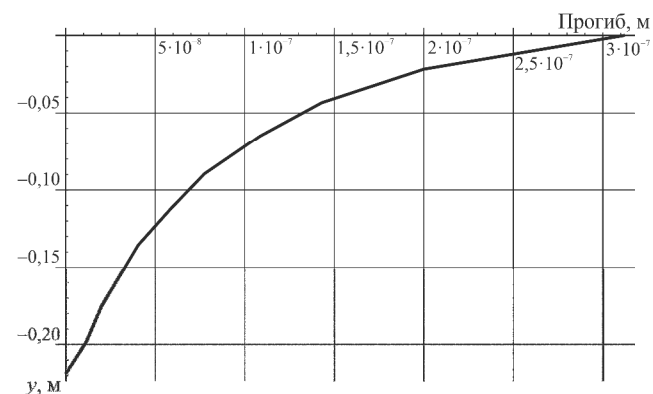


Рисунок 4 – Эпюра прогибов боковой стенки

На рисунке 5 представлена эпюра вертикальных напряжений в несущем слое стенового блока. Вид и характер этой эпюры аналогичен эпюре прогибов сжатой стойки с жестко заземленным нижним концом. Максимальные значения вертикальных напряжений ($\sigma_{\max} = 34,4$ кПа) возникают в центрах верхних ячеек, где наблюдается концентрация напряжений.

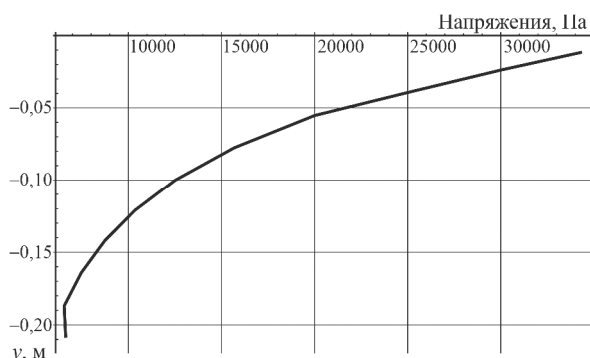


Рисунок 5 – Эпюра вертикальных напряжений (боковая стенка)

На рисунке 6 представлена эпюра вертикальных напряжений в верхнем слое стенового блока (точки 1–15). Максимальные значения вертикальных напряжений в несущем слое возникают в центрах верхних ячеек, где наблюдается концентрация напряжений, и составляют $\sigma_{\max} = 34,4$ кПа. Во внутреннем слое (заполнителе) напряжения составляют всего лишь около 60 Па.

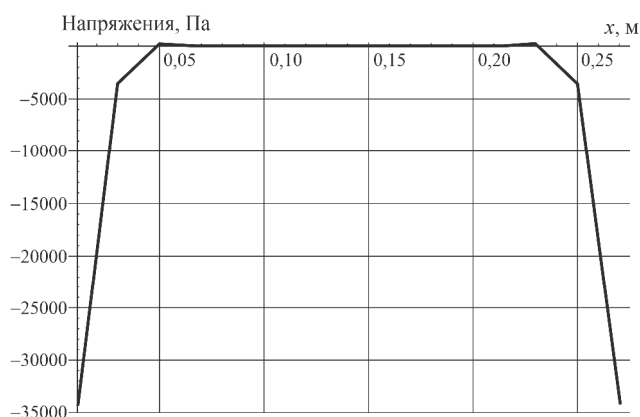


Рисунок 6 – Эпюра вертикальных напряжений (верхний слой)

Получено 28.03.2012

A. A. Vasilyev, O. V. Kozunova, Y. A. Sigai. Study of stress-strained state of three-layer wall unit using energy approach.

For energy-efficient multi-storey buildings states with each floor walls simply supported proposed a construction fence wall on the basis of a three-layer wall unit with flexible connections. The original construction of the wall unit requires the modern approach in its study of the stress-strain state.

The proposed three-layer linear calculation of a set of simulated wall block vertical elastic layers of finite dimensions with constant modulus of deformation and Poisson's ratio. Used a variational-difference approach (VDA) to the solution of the boundary problem of elasticity theory (plane strain), which has important practical applications in the calculation of beams, beam plates and close to them computational models of the elastic elements of structures on elastic, including an artificial basis. To implement this approach, a program in the language of Mathematica 8.0 and held it approbation numerically.

Анализ напряженно-деформированного состояния трехслойного стенового блока, находящегося под действием статической нагрузки и рассчитанного с использованием вариационно-разностного подхода, показывает, что блок работает с огромным запасом прочности на сжатие. Максимальные нормальные напряжения в несущем слое (по результатам расчета с использованием ВРП) $\sigma_{\max} = 34,4$ кПа, а предел прочности этого же слоя (по результатам эксперимента) $\sigma_u = 9,3$ МПа.

В ходе компьютерного моделирования авторами для линейного расчета трехслойного стенового блока была использована новая модификация энергетического метода – вариационно-разностный подход (ВРП), который численно реализуется методом конечных разностей (МКР) в программном пакете Mathematica.

Окончательно можно сделать вывод, что разработанная для вариационно-разностного подхода компьютерная программа может быть использована для инженерного расчета конструкций ограждения из трехслойных стеновых блоков по первому предельному состоянию (по несущей способности).

Список литературы

- 1 **Васильев, А. А.** Энергоэффективная конструкция ограждения многоэтажного жилого здания / А. А. Васильев // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международ. науч.-техн. конф.* – Могилев, 2011. – Ч. 2. – С. 95–96.
- 2 **Васильев, А. А.** Новый материал для конструкций стеновых ограждений энергоэффективных зданий / А. А. Васильев // *Строительная наука и техника.* – 2011. – № 4 (37). – С. 17–20.
- 3 **Козунова, О. В.** Особенности проектирования плитных фундаментов на многослойных основаниях со слабыми слоями грунтов: Р5.01.056.09 Рекомендации по проектированию и устройству рациональных фундаментов на основаниях, сложенных озерно-ледниковыми и лессовидными грунтами / О. В. Козунова. – Минск : СТРОЙТЕХНОРМ, 2009. – 79 с.
- 4 **Босаков, С. В.** Вариационно-разностный подход в решении контактной задачи для нелинейно-упругого неоднородного основания. Плоская деформация. Теория расчета. Ч. 1 / С. В. Босаков, О. В. Козунова // *Вестник БНТУ.* – 2009. – № 1. – С. 5–13.
- 5 **Босаков, С. В.** Вариационно-разностный подход в решении контактной задачи для нелинейно-упругого неоднородного основания. Плоская деформация. Результаты расчета. Ч. 2 / С. В. Босаков, О. В. Козунова // *Вестник БНТУ.* – 2009. – № 2. – С. 15–19.