

УДК 624.072.21.7

О. В. КОЗУНОВА, А. А. ВАСИЛЬЕВ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СТЕНОВОГО БЛОКА С ГИБКИМИ СВЯЗЯМИ ВАРИАЦИОННО-РАЗНОСТНЫМ МЕТОДОМ

В работе выполнен расчет на прочность энергоэффективного стенового блока на гибких связях с применением вариационно-разностного метода (ВРМ), который представляет собой энергетический метод в конечно-разностной постановке. Расчетная модель блока представлена совокупностью вертикальных упругих слоев конечных размеров с постоянными параметрами упругости. Численная реализация ВРМ осуществлена в линейной постановке с помощью системы Mathematica 8.0.

Ключевые слова: стеновой блок, вариационно-разностный метод, упругие слои, напряженно-деформированное состояние, параметры упругости.

Актуальность проблемы. Одним из основных путей повышения энергоэффективности жилых зданий является снижение потребления тепловой энергии. Это достигается различными методами: уменьшением площади наружных ограждающих конструкций по сравнению с первоначальным проектом; утеплением оболочки здания; утилизацией тепла вентиляционных выбросов; утилизацией тепла сточных вод [1].

При возведении новых зданий доминирующим способом повышения энергоэффективности является уменьшение площади наружных ограждающих конструкций, которое может быть достигнуто только применением современных эффективных теплоизолирующих материалов, обеспечивающих не только необходимое значение сопротивления теплопередаче, но и высокие прочностные свойства, архитектурную выразительность, требуемую долговечность при минимальных производственных, строительных и эксплуатационных затратах. Тем сложнее это выполнить с учетом перехода от нормативного значения сопротивления теплопередаче $2,0 \text{ м}^2\cdot\text{град}/\text{Вт}$ к значению $3,2 \text{ м}^2\cdot\text{град}/\text{Вт}$.

Поэтому разработка современных конструкций, сочетающих в себе все необходимые свойства ограждающих конструкций и обеспечивающих высокие технико-экономические показатели, без потери несущей способности, является актуальной задачей.

Физико-механические характеристики стенового блока. Блок представляет собой трехслойную конструкцию (рисунок 1), 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 (регистрационный № 7498 в Государственном реестре полезных моделей).



Рисунок 1 – Общий вид блока стенового трехслойного с гибкими связями

Применение предлагаемого стенового блока позволяет проектировать стеновые ограждения для энергоэффективных зданий с поэтажно опирающимися на диски перекрытий наружными стенами. Такие ограждения отвечают всем современным нормативным требованиям не только в удовлетворении требуемых теплотехнических свойств, но и в обеспечении необходимой коррозионной стойкости и долговечности, позволяя зданиям сохранять выразительный архитектурный облик в течение всего срока эксплуатации.

При этом значительно снижается стоимость возведения не только ограждающих конструкций (по сравнению с существующими), но и зданий в целом. В научно-исследовательской лаборатории «Строительные конструкции, основания и фундаменты им. д.т.н., проф. И. А. Кудрявцева» БелГУТа были проведены испытания экспериментальных блоков, изготовленных на ОАО «Гомельстекло», с целью установления физико-механических свойств предлагаемой конструкции [1]. По результатам предварительных исследований получены физико-механические характеристики стенового блока, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики стенового блока

Название характеристики	Значение
Габаритные размеры, мм	280×360×220
Термическое сопротивление блока, м ² °C/Вт	Не менее 3,5
Водонепроницаемость	Не ниже W8
Огнестойкость	Не горючий
Морозостойкость, циклов	Не менее 250
Предел прочности на сжатие, МПа	Не ниже 1,0
Предел прочности несущей обкладки блока на сжатие, МПа	Не ниже 9,3
Разрушающая нагрузка, кН	100

Расчетная модель стенового блока. Стеновой блок представляется совокупностью вертикальных упругих слоев конечных размеров с постоянными упругими характеристиками: модулем упругости и коэффициентом Пуассона. Для решения краевой задачи теории упругости (плоская деформация) используется *вариационно-разностный метод*, который применяют при рас-

четах балок, балочных плит и приближенных к ним расчетных моделей упругих элементов конструкций. Ранее в работе авторов [2] рассматривался линейный расчет предлагаемого блока на жестком основании, что учитывается в кинематических граничных условиях.

Вариационно-разностный подход был предложен, получил дальнейшую апробацию и внедрение в инженерную практику в работах С. В. Босакова, О. В. Козуновой, Е. А. Сигая [2–5], где рассматривалось нежесткое упругое основание – грунтовое основание, характеристики которого приближены к реальным условиям. В зависимости от жесткости основание может иметь существенно отличающиеся упругие характеристики (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести и прочности). В предлагаемом расчете упругое основание – железобетонная плита перекрытия, которое моделируется как искусственное основание большой жесткости.

Постановка задачи. Рассматривается стеновой блок шириной b в каменной кладке (нижний ряд), т. е. на искусственном основании под действием сжимающей нагрузки, распределенной вдоль верхней грани несущих слоев. На расчетной модели (рисунок 2) распределенная нагрузка q заменяется системой узловых сосредоточенных сил с общим значением F .

При расчете слоистая упругая конструкция заменяется прямоугольной расчетной областью метода конечных разностей (МКР). Стеновой блок аппроксимируется равномерной симметричной разбивочной сеткой с постоянным шагом вдоль оси $X - \Delta x$ и вдоль оси $Y - \Delta y$. В результате получено 165 i -х узловых и 140 j -х сеточных ячеек.

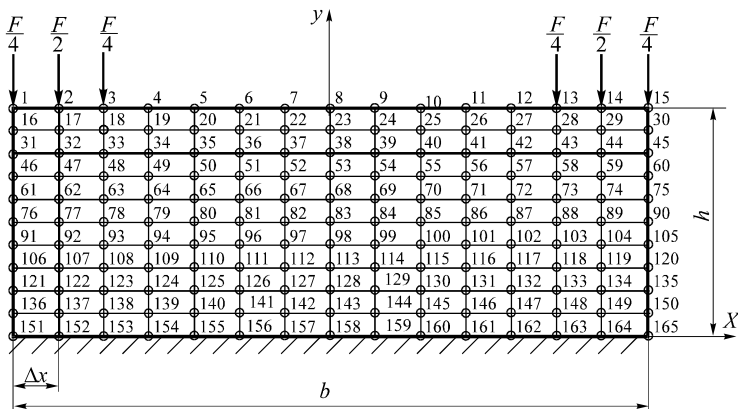


Рисунок 2 – Разбивочная сетка расчетной модели

За неизвестные принимаются: $u_i(x)$ и $v_i(y)$ – компоненты вектора перемещения i -й узловой точки, направленные вдоль осей X и Y соответственно. Граничные условия задачи: на нижних границах принятой расчетной области перемещения $u = 0, v = 0$ (см. рисунок 2).

В результате линейного расчета требуется определить параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) стенового блока: а) распределение вертикальных и горизонтальных перемещений узловых точек расчетной области блока; б) распределение вертикальных и эквивалентных напряжений в центрах ячеек расчетной области блока; в) эпюры суммарных прогибов и напряжений в несущих слоях стенового блока.

Алгоритм расчета с использованием вариационно-разностного метода.

Согласно вариационному принципу Лагранжа, при нагружении стенового блока статической нагрузкой, его полная потенциальная энергия в состоянии статического равновесия принимает минимальное значение. Величина функционала полной потенциальной энергии композиционного 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 внешней нагрузки. Для решения сформулированной краевой задачи в линейной постановке используются слагаемые функционала полной потенциальной энергии в виде [3]:

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 – модуль упругости и коэффициент Пуассона, соответствующие k -й точке расчетной модели; $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ – относительные деформации;

б) потенциал внешней нагрузки

$$\Pi = - \int_{-b/2}^{b/2} q(x) v(x) dx. \quad (3)$$

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.

Числовая апробация. В ходе компьютерного моделирования для линейных расчетов трехслойного стенового блока был использован вариационно-разностный метод (ВРМ), численная реализация которого осуществлена в программном пакете Mathematica. При 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; $\nu_1 = 0,25$; $E_{01} = 11500$ МПа; $F = 1500$ Н, размеры ячейки разбивочной сетки: $\Delta x = 0,020$ м, $\Delta y = 0,022$ м.

На рисунке 3 приведена эпюра прогибов боковой стенки (несущего слоя) стенового блока. Вид этой эпюры полностью соответствует деформированному состоянию освобожденной сверху сжатой стойки, имеющей жесткое защемление внизу. На рисунке 4 также представлена эпюра вертикальных напряжений в несущем слое.

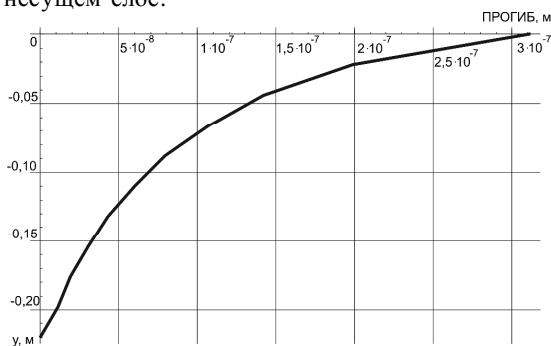


Рисунок 3 – Эпюра прогибов несущего слоя

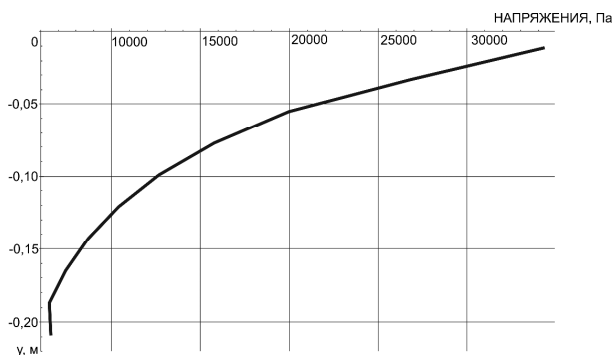


Рисунок 4 – Эпюра вертикальных напряжений в несущем слое

Анализ напряженно-деформированного состояния трехслойного стенового блока показывает, что блок работает с большим запасом прочности на сжатие. Максимальные нормальные напряжения в несущем слое (по резуль-

татам расчета с использованием ВРМ) $\sigma_{\max} = 34,4$ МПа; а предел прочности того же слоя (по результатам эксперимента) $\sigma_u = 9,3$ МПа.

Заключение. Выполненные исследования показали эффективность использования вариационно-разностного метода при выборе рациональных конструктивных решений элементов зданий и сооружений, в частности, энергоэффективных ограждающих конструкций и опорных узлов примыкания таких конструкций с учетом особенностей структуры бетона. Разработанная 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.** Новый материал для конструкций стеновых ограждений энергоэффективных зданий / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2011. – № 4(37). – С. 17–20.

2 Р5.01.056.09 Рекомендации по проектированию и устройству рациональных фундаментов на основаниях, сложенных озерно-ледниковыми и лессовидными грунтами. Особенности проектирования плитных фундаментов на многослойных основаниях со слабыми слоями грунтов / О. В. Козунова. – Минск : Стройтехнорм, 2009. – С. 39–47, 49–58.

3 **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.

4 **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.

5 **Козунова, О. В.** Нелинейный расчет инженерной системы «плита – основание» с использованием переменного модуля деформации / О. В. Козунова, Е. А. Сигаи // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1(26). – С. 72–82.

O. V. KOZUNOVA, A. A. VASILYEV

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

ANALYSIS OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF THE ENERGY EFFICIENT WALL UNIT WITH FLEXIBLE RELATIONSHIP BY THE VARIATION-DIFFERENCE METHOD

In this work, the strength of an energy efficient wall block on flexible couplings is calculated using the variational difference method (VDM), which is an energy method in a finite-difference formulation. The design model of the block is represented by a set of vertical elastic layers of finite dimensions with constant elastic parameters. The numerical realization of the VDM is carried out in a linear formulation using the Mathematica 8.0 system.

Получено 18.10.2017