

## **НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ ТРЕХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО БЛОКА НА КЛЕЕВЫХ СВЯЗЯХ**

Васильев А.А., Сигаи Е.А.

УО «Белорусский государственный университет транспорта»

Козунова О.В.

ОАО «Буровая компания «Дельта»

г. Гомель, Республика Беларусь

**АННОТАЦИЯ:** У роботі виконано нелінійний розрахунок тришарового стінового блоку несиметричного на клейових зв'язках із застосуванням варіаційно-різницевого підходу (ВРП). Розрахункова модель блоку представлена як сукупність вертикальних пружних шарів кінцевих розмірів з перемінним модулем пружності.

**АННОТАЦИЯ:** В работе выполнен нелинейный расчет трехслойного стенового блока несимметричного на клеевых связях с применением вариационно-разностного подхода (ВРП). Расчетная модель блока представлена совокупностью вертикальных упругих слоев конечных размеров с переменным модулем упругости.

**ABSTRACT:** A nonlinear calculation of the three-layer wall block on asymmetric adhesive connection using the variational-difference approach (VDA) was. The calculation model of the block is represented by a set of vertical elastic layers of finite dimensions with variable modulus of deformation.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Трехслойный стеновой блок, клеевая связь, модуль упругости.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Стеновое ограждение каркасных зданий в Беларуси, как правило, выполняется в виде одно- или двухслойной кладки, поэтажно опирающейся на диски перекрытий. Кладка однослойных стен обычно ведется из ячеисто-бетонных блоков на тонких растворных швах с последующими защитно-декоративной облицовкой штукатурным раствором и окраской.

Значительно реже возводятся здания, стеновое ограждение которых выполняется двухслойным – из ячеисто-бетонных блоков с защитно-декоративной облицовкой из кирпича.

Наиболее массово применяемая однослойная кладка из блоков ПГС на тонких растворных швах с последующими оштукатуриванием и окраской, несмотря на относительно невысокую стоимость, имеет конструктивные недостатки, значительно снижающие ее теплотехнические характеристики и долговечность, вызывая необходимость выполнения частых дополнительных ремонтов. Кроме того, для обеспечения требуемого термического сопротивления ограждающей конструкции, необходимо выполнять кладку толщиной 550...800 мм (в зависимости от плотности ПГС), что нерационально, поскольку приводит к значительному уменьшению «полезной» площади.

Ужесточение требований к энергоэффективности возводимых зданий требует создания новых современных конструкций стеновых ограждений. Одним из современных вариантов ограждений многоэтажных энергоэффективных зданий с наружными стенами, поэтажно опирающимися на диски перекрытий, может стать конструкция на основе предлагаемого авторами в работе [1] трехслойного стенового блока на клеевых связях (рис. 1).

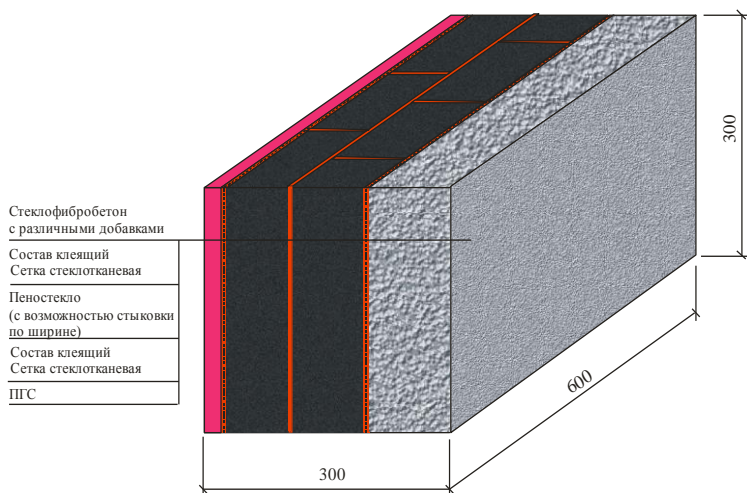


Рис. 1. Общий вид трехслойного стенового блока на клеевых связях

В данном блоке наружный несущий слой выполнен из стеклофибробетона с применением добавок, повышающих его водонепроницаемость и определяющих цвет наружной поверхности ограждения, внутренний – из

пеногазосиликата (ПГС). В качестве утеплителя применено пеностекло. Наружные и внутренний слои соединяются клеевыми составами (на основе клея ПОЛИМИКС) с армированием стеклотканевой сеткой. Послойная технология изготовления блока позволяет формировать теплоизолирующий слой из различных толщин слоев пеностекла (обрезков), что дает возможность снизить стоимость блока.

Блок обеспечивает следующие характеристики: термическое сопротивление – не менее  $3,5\text{ м}^2\text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ , водонепроницаемость – не ниже W8, морозостойкость – не менее 250 циклов. Блок – негорюч, экологически безопасен. Масса блока при заявленных размерах – не более 22 кг.

Помимо вышеперечисленных, блоки стеновые трехслойные обладают рядом дополнительных качеств, позволяющих их эффективно эксплуатировать, которые отражены в работе [1].

Для решения поставленной задачи используется вариационно-разностный подход, который имеет важность практического применения в расчетах балок, балочных плит и приближенных к ним расчетных моделей упругих элементов конструкций на упругом и искусственном основании.

Вариационно-разностный подход к решению ряда контактных задач нелинейной теории упругости был предложен, получил дальнейшую апробацию и внедрение в инженерную практику в работах Босакова С.В., Козуновой О.В., Сигая Е.А. [2–5], где в контактных задачах рассматривалось нежесткое упругое основание – грунтовое основание, характеристики которого приближены к реальным условиям. В предлагаемом расчете упругое основание – железобетонная плита перекрытия, которое моделируется как жесткое искусственное основание.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается трехслойный стеновой блок шириной  $b$  на искусственном основании под действием сжимающей нагрузки, распределенной вдоль верхней грани несущего слоя. На расчетной модели распределенная нагрузка  $q$  собирается в систему узловых сосредоточенных сил общим значением  $F$ .

При расчете слоистая упругая конструкция заменяется прямоугольной расчетной областью метода конечных разностей (МКР). На рис. 2 трехслойный стеновой блок аппроксимируется равномерной симметричной разбивочной сеткой с постоянным шагом вдоль оси  $X - \Delta x$  и вдоль оси  $Y - \Delta y$ . В результате получено  $176\ i$ -х узловых и  $150\ j$ -х сеточных ячеек. 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  $u = 0, v = 0$  (рис. 2).

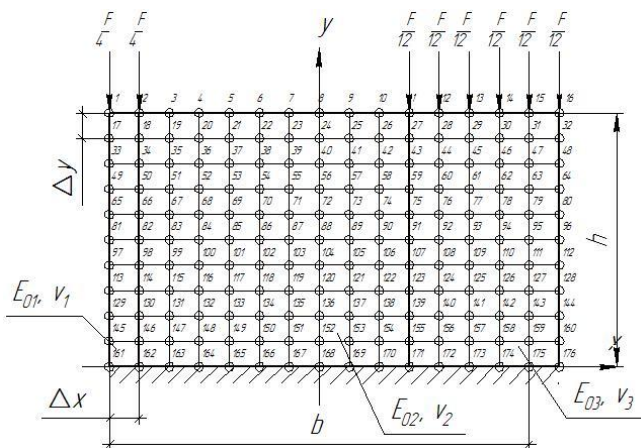


Рис. 2. Разбивочная сетка расчетной области

В результате нелинейного расчета требуется определить параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) трехслойного стенового блока:

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

## АЛГОРИТМ НЕЛИНЕЙНОГО РАСЧЕТА СТЕНОВОГО БЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВРП

Зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций (рис. 3) для физически нелинейного упругого слоя стенового блока будем определять формулой, предложенной в работе [4],

$$\sigma_i = \sigma_{uk} \operatorname{th} \left( \frac{E_{0k}}{\sigma_{uk}} \varepsilon_i \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_{uk}$ ,  $E_{0k}$  – предел прочности и начальный модуль упругости  $k$ -того упругого слоя стенового блока.

Так как стеновой блок неоднороден, то каждому из упругих слоев соответствуют значения упругих характеристик прочности  $\sigma_{uk}$ ,  $E_{0k}$ ,  $\nu_k$ .

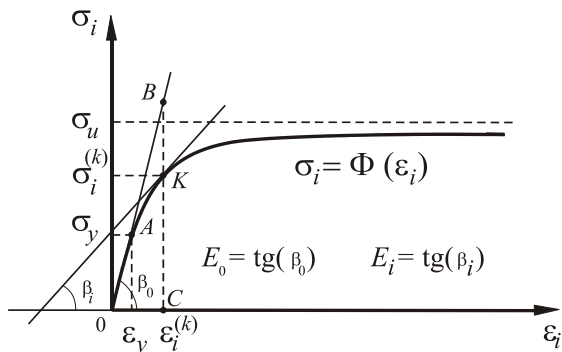


Рис. 3. Зависимость  $\sigma_i(\varepsilon_i)$  для упругого слоя стенового блока

В ходе решения краевых задач теория малых упругопластических деформаций [6] предполагает итерационный процесс. При каждой итерации модуль деформации  $k$ -того слоя блока изменяется, и при вычислениях авторы будут пользоваться переменным модулем упругости, а именно касательным модулем, который в соответствии с формулой (1) равен

$$E_{ik}^{(n)} = \operatorname{tg} \beta_i = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = \frac{E_{0k}}{\operatorname{ch}^2 \left( \frac{E_{0k}}{\sigma_{uk}} \varepsilon_{ik}^{(n-1)} \right)}, \quad (2)$$

где  $n$  – номер последующей итерации, с учетом того, что в первом приближении  $n = 1$ . То есть, авторы отождествляют, как это принято в теории малых упругопластических деформаций, зависимость  $\sigma_i(\varepsilon_i)$  аналогичной при простом сжатии.

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 трехслойного стенового блока на клеевых связях под действием статической нагрузки состоит из двух слагаемых и определяется формулой

$$\mathcal{E} = U_f + \Pi, \quad (3)$$

где  $U_f$  – функционал энергии деформаций упругого блока;

$\Pi$  – потенциал работы внешней нагрузки.

Для решения сформулированной краевой задачи в линейной постановке используются слагаемые функционала полной потенциальной энергии в виде [2, 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.

## ЧИСЛОВАЯ АПРОБАЦИЯ

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

Вначале решается задача в линейной постановке. По вычисленным значениям перемещений  $i$ -той узловой точки  $u_i(x), v_i(y)$  определяется интенсивность деформаций и интенсивность напряжений в центрах ячеек.

Имея значения напряжений и перемещений, полученных в результате решения задачи в первом приближении, по формуле (2) определяется касательный модуль деформации для каждой ячейки и задача решается во втором и последующих приближениях. Итерационный процесс заканчивается, как только разница между последующим и предыдущим приближением исследуемой функции будет соответствовать требуемой точности решения задачи. На рис. 4 приведены эпюры суммарных прогибов боковых стенок (несущих слоев) трехслойного блока.

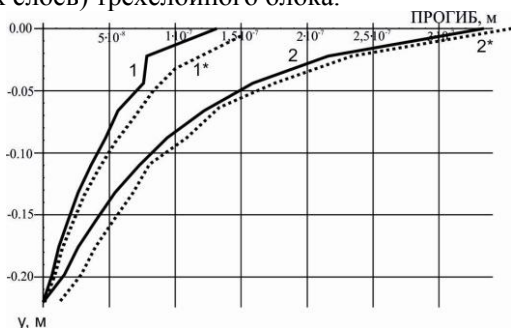


Рис. 4. Эпюры суммарных прогибов несущего слоя: 1 – стенка из ПГС; 2 – стенка из стеклофибробетона (\* - нелинейный расчет)

На рис. 5 представлены эпюры вертикальных напряжений в несущих слоях стенового блока.

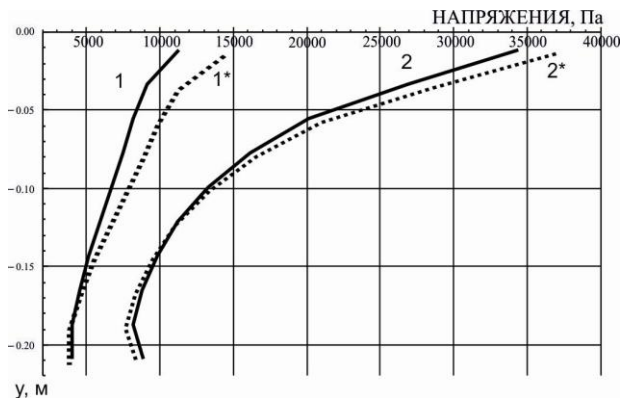


Рис. 5. Эпюра вертикальных напряжений в несущем слое: 1 – стенка из ПГС; 2 – стенка из стеклофибробетона (\* - нелинейный расчет)

Сравнение результатов линейного и нелинейного расчета трехслойного стенового блока на клеевых связях (таблица 1) показывает, что:

а) итерационный процесс сходится достаточно быстро, так как на третьей итерации наблюдается полное совпадение значений последующей и предыдущей итерации (2-ой и 3-ей, и далее);

б) максимальные значения прогибов\*:  $1,524 \cdot 10^{-7}$  м (стенка из ПГС);  $3,732 \cdot 10^{-7}$  м (стенка из стеклофибробетона) (\* - нелинейный расчет);

в) максимальные значения напряжений\*: 14,5 кПа (стенка из ПГС); 37,2 кПа (стенка из стеклофибробетона) (\* - нелинейный расчет);

Таблица 1

### Сравнение результатов

Вид расчета	Прогибы, $\cdot 10^{-7}$ м (стенка из стеклофибробетона)				Прогибы, $\cdot 10^{-7}$ м (стенка из ПГС)			
Линейный	3,41848				1,28657			
Нелинейный	номер итерации				номер итерации			
	1	2	3	4	1	2	3	4
	3,655	3,732	3,732	3,732	1,364	1,524	1,524	1,524
$\Delta i$	6,5%	1,8%	0%	0%	6,1%	11,7%	0%	0%
$\Delta i$ – разница в результатах расчета последующей и предыдущей итерации								

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ напряженно-деформированного состояния трехслойного стенового блока на клеевых связях, 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 нелинейного расчета с использованием ВРП)  $\sigma_{\max} = 37,2$  кПа, а предел прочности этого же слоя (по результатам эксперимента)  $\sigma_u = 9,3$  МПа. Для исследования напряженно-деформированного состояния трехслойного стенового блока на клеевых связях была разработана компьютерная программа в математическом пакете Mathematica 8.0, которая может быть использована в инженерных расчетах конструкций ограждения из трехслойных стеновых блоков по первому предельному состоянию (по несущей способности).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния трехслойного стенового блока с учетом физической нелинейности материала / Васильев А.А., Козунова О.В., Сигаи Е.А. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: межд. сб. научн. трудов. – Ровно, 2012. – Вып. 23. – С. 119-127.
2. 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: Р5.01.056.09 / Козунова О.В. – 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 (Часть 1) / Босаков С.В., Козунова О.В. // Вестник БНТУ. – Минск: 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 (Часть 2) / Босаков С.В., Козунова О.В. // Вестник БНТУ. – Минск: БНТУ, 2009. – №2 – С. 15–19.
5. Козунова О.В. Нелинейный расчет инженерной системы «плита – основание» с использованием переменного модуля деформации/ Козунова О.В., Сигаи Е.А. // Вестник гражданских инженеров. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2011. – № 1 (26). – С. 72–82.
6. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высшая школа, 1990. – 398 с.

Статья поступила в редакцию 18.03.2013 г.