

4. Драган В.И., Шалобыта Н.Н. Экспериментальные исследования работы структурной конструкции с узловым соединением «БргТУ» // Сборник статей XIV международного научно-практического семинара «Перспективы развития новых техноло-

гий в строительстве и подготовке инженерных кадров республики Беларусь» (Минск, 22-23 июня 2006 г.) / Ред. Коллегия: Т.М. Пецольт, Н.П. Блещик, Э.И. Батяновский (отв. ред.). – Мн.: БНТУ. 2006. Том 2. – 284 с.: ил. – С. 133-138.

Материал поступил в редакцию 16.01.08

**SHALOBYTA N.N., DRAGAN V.I., SHALOBYTA T.P. Experimental research of bearing ability of units of structural designs of system "BrGTU"**

The methods of the determination happens to in article carrying abilities of the node element to structured design of the type "BrGTU". Given node element is executed in the manner of broad wall spherical shell, having holes in wall for gap highstrange connecting bolt. The Estimation to toughness in a general way with use molded the theories to bounce for such designs does not introduce possible so described in article experimental method has allowed to get the diagrams of deformation node element and with their help to define coming the limiting condition of the node.

УДК 624.014:621.792

**Левчук А.А.**

**РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С УТЕПЛИТЕЛЕМ ИЗ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ И ПЕНОПЛАСТА**

**Введение.** Металлические бескаркасные панели с утеплителем из минераловатных плит и пенопласта нашли широкое применение при строительстве производственных, административных и общественных зданий. До 1998 года в Республике Беларусь не было собственного производства таких конструкций, поэтому их приходилось импортировать. В настоящее время налажен выпуск панелей на восьми предприятиях страны.

Основные конструктивные особенности выпускаемых в Республике Беларусь панелей следующие - обшивки стальные плоские или слабопрофилированные толщиной 0.45...0.55 мм; утеплитель изготовлен из минераловатных или пенополистирольных плит, являющихся анизотропными материалами; соединение среднего слоя и обшивок клеевое.

Используемые при проектировании зданий методики статического расчета трехслойных панелей бескаркасного типа с металлическими обшивками [1, 2] не в полной мере учитывают эти особенности и, кроме того, в них рассмотрен очень узкий класс задач со следующими ограничениями:

- внешние нагрузки могут быть только двух видов - равномерно распределенная по всей длине панели силовая и температурная с одинаковым перепадом на наружной и внутренней обшивках (перепад температур по всей длине панели одинаков);
- расчетная схема панели только равнопролетная (один, два или три пролета);
- крепление панели к несущим конструкциям жесткое из плоскости и допускает свободные деформации в плоскости панели.

Указанные выше ограничения не позволяют производить статический расчет конструкций по более сложным расчетным схемам (отличающиеся длины пролетов; нежесткое крепление панелей к ветровым ригелям, колоннам, стропильным конструкциям и др.) с учетом требований [3] по приложению нормируемых нагрузок (линейное изменение нагрузки в зоне расположения снеговых мешков для кровельных панелей или ветровой нагрузки по высоте для стеновых панелей; наличие силовой нагрузки не во всех пролетах; приложение сосредоточенных сил). При значительной длине панели (до 12 м) и наличии помещений с различным температурным режимом, для которых она является единой ограждающей конструкцией (например, холодильник и помещение для обслуживающего персонала) задача становится неразрешимой по существующим методикам [1, 2].

В связи с этим в [1] рекомендуется выполнять статический расчет трехслойных панелей численными методами, что позволяет снять практически все перечисленные выше ограничения.

Настоящая работа посвящена выбору оптимальной расчетной конечноэлементной модели трехслойных панелей с легким конструктивным средним слоем. В ней выполнено сравнение плоской и трехмерной моделей. Для оценки сходимости получаемых при использовании предлагаемой плоской модели параметров напряженно-деформированного состояния проведено их сравнение с ре-

зультатами расчета панелей по существующим методикам [1, 2] на "стандартных" расчетных схемах.

Выполнены численные исследования влияния анизотропных свойств среднего слоя на напряженно-деформированное состояние панелей.

**1. Анализ существующих расчетных моделей трехслойных панелей.** При определении внутренних усилий (напряжений) в обшивках и среднем слое, а также перемещений (деформаций) трехслойных панелей следует, в соответствии с [4], использовать расчетные модели, позволяющие учитывать:

- анизотропию материала среднего слоя (ортотропию для двумерной модели);
- локальное напряженно-деформированное состояние конструкций в местах приложения сосредоточенных нагрузок.

Для расчета трехслойных бескаркасных панелей с металлическими обшивками используются различные расчетные модели. Наиболее распространенные из них – плоская расчетная модель, применяемая в случаях цилиндрического изгиба конструкции, и трехмерная расчетная модель.

И трехмерная, и плоская модели имеют свои достоинства и недостатки. Обе модели позволяют учитывать анизотропию (ортотропию) материала среднего слоя, локальное напряженно-деформированное состояние конструкций в местах приложения сосредоточенных нагрузок, а также моделировать как плоские, так и профилированные обшивки панелей.

С целью сравнения трехмерной и плоской расчетных моделей был выполнен расчет однопролетной трехслойной панели с использованием каждой из этих моделей при следующих исходных данных: толщина панели 100 мм; толщина обшивок 1.0 мм; ширина панели – 1.0 м; длина (пролет) панели – 1.2 м. Материал обшивок имеет следующие упругие характеристики: модуль упругости  $E = 2.06 \times 10^5$  МПа; модуль сдвига  $G = 7.8 \times 10^4$  МПа. Материал среднего слоя был принят изотропным с упругими характеристиками: модуль упругости  $E = 7$  МПа; модуль сдвига  $G = 2$  МПа. Панель загружена равномерно распределенной по площади нагрузкой, равной 1.2 кПа.

Расчет трехмерной модели панели выполнялся с использованием пакета конечноэлементного анализа MCS.Nastran. Обшивки были смоделированы двумерными конечными элементами (Plate). Средний слой смоделирован объемными конечными элементами (Solid). Соединения слоев смоделированы элементами жесткой связи (Rigid).

На рис. 1 показана трехмерная расчетная модель панели, а на рис. 2 деформированная схема.

Расчет плоской модели панели выполнялся с использованием программы для расчета трехслойных панелей, разработанной в филиале РУП «Институт БелНИИС» - научно-технический центр.

На рис. 3 показана плоская расчетная модель и результаты расчета панели.

**Левчук Александра Александровна**, младший научный сотрудник отдела испытаний строительных конструкций филиала РУП «Институт БелНИИС» - научно-технический центр.

Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267/2.

Таблица 1. Результаты расчета панели

Конечноэлементная расчетная модель	Плоская	Трехмерная
Максимальный прогиб панели, мм	1.1	1.07
Нормальные напряжения в обшивках в середине пролета, МПа	2.2	2.3
Касательные напряжения в среднем слое на опоре, кПа	7.15	7.5

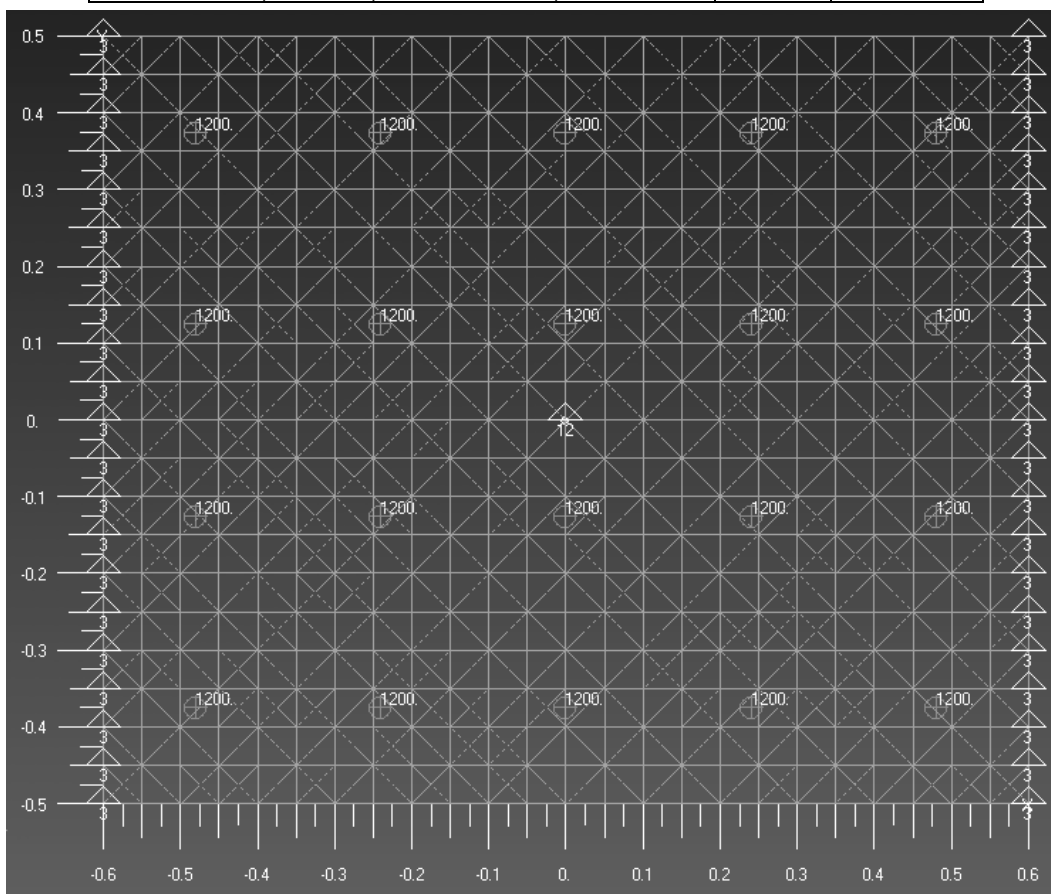


Рис. 1. Трехмерная расчетная модель панели

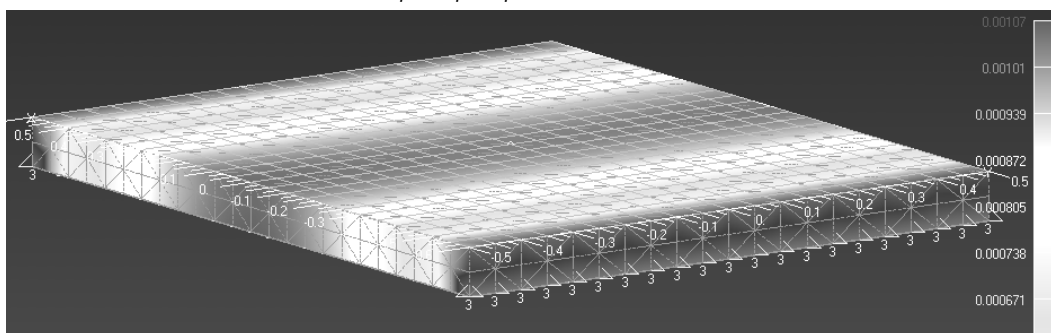


Рис. 2. Трехмерная расчетная модель панели с указанием прогибов

Основные результаты расчета конструкции с использованием трехмерной и плоской расчетных моделей сведены в таблицу 1.

Из таблицы 3 видно, что параметры напряженно-деформированного состояния панели, полученные при статическом расчете с использованием трехмерной и плоской расчетных моделей, отличаются не более чем на 4.5%.

Описание трехмерной модели значительно сложнее описания плоской модели, требует повышенного контроля при подготовке исходных данных и больших затрат времени. Ошибки, допущенные при описании трехмерной модели панели, вносят существенные изменения в результаты расчета, а их поиск, как правило, затруднен большим объемом контролируемой информации. Плоская расчетная модель лишена этих недостатков.

Учитывая сказанное выше, для статического расчета трехслойных панелей представляется целесообразным использовать плоскую расчетную модель.

**2. Проверка сходимости полученных аналитическим и численным методами результатов расчета панелей.** Для выполнения статических расчетов панелей металлических с утеплителем из минераловатных плит и пенопласта был разработан основанный на методе конечных элементов алгоритм решения задачи в плоской постановке.

Для проверки корректности получаемых по разработанной программе результатов были выполнены статические расчеты однопролетных, двухпролетных и трехпролетных панелей шириной 1000 мм с высотой поперечного сечения 100 мм со стальными плоскими обшивками толщиной 0.5 мм. Пролеты панелей приняты равными 3600 мм. Модуль сдвига материала среднего слоя  $G = 5$  МПа. Обшивки приняты плоскими для упрощения анализа результатов расчета.

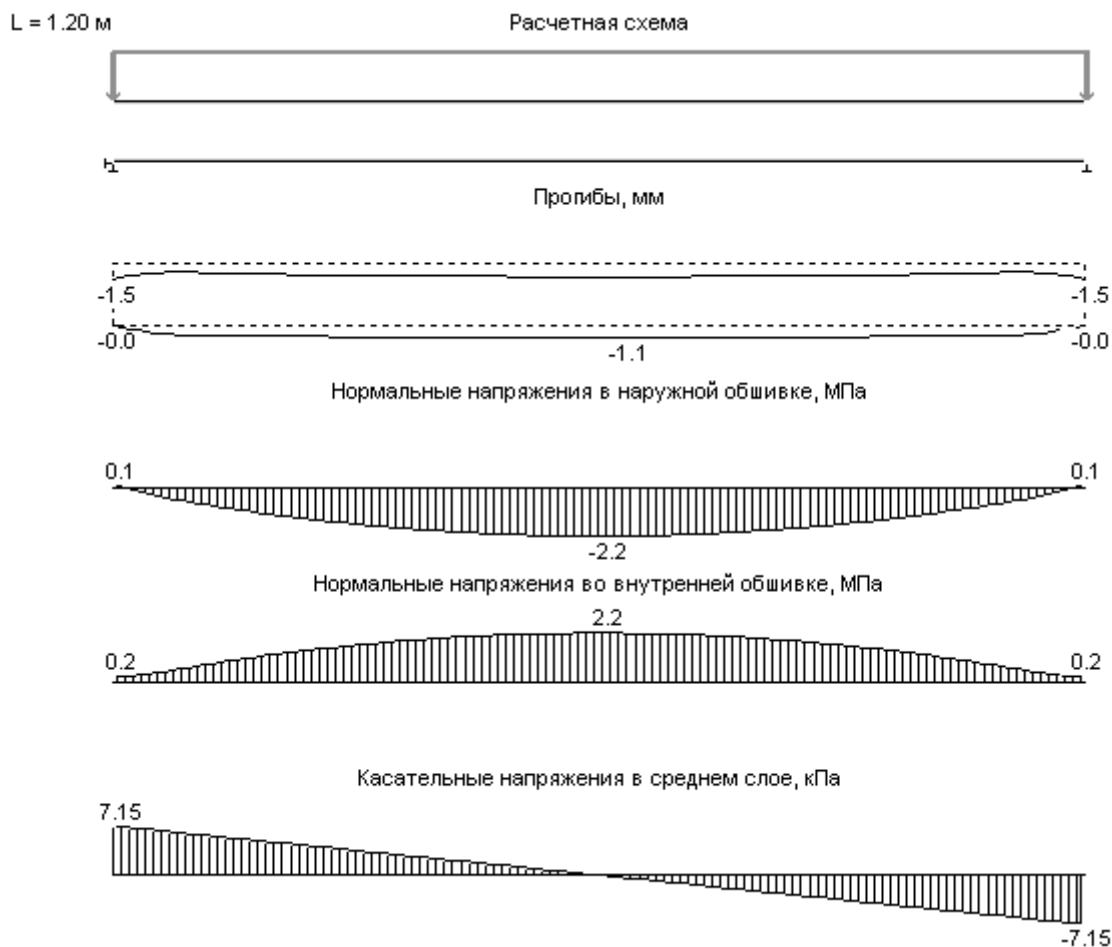


Рис. 3. Плоская расчетная модель и результаты расчета панели

Таблица 2. Расчетные схемы для тестовых расчетов

<p>Расчетная схема №1</p>	<p><math>q = -1.0 \text{ кН/м}</math></p>
<p>Расчетная схема №2</p>	<p><math>q = -1.0 \text{ кН/м}</math></p>
<p>Расчетная схема №3</p>	<p><math>q = -1.0 \text{ кН/м}</math></p>

- В каждом случае рассматривались два нагружения конструкций:
- нагружение 1 - равномерно распределенная по площади панели нагрузка величиной 1 кПа;
  - нагружение 2 - перепад температур на внутренней и наружной обшивках панели 100 °С.

При решении "стандартных" задач по расчетным схемам, указанным в таблице 2, получены параметры напряженно-деформированного состояния, практически совпадающие с результатами расчета панелей по существующим методикам [1, 2] (см. таблицу 3). Максимальные отличия результатов расчета при решении задач численным и аналитическими методами [1, 2] не превышают в деформациях - 5%, а в напряжениях - 1%. Следует

Таблица 3. Результаты расчета панелей по существующим методикам и численным методом

№ расчетной схемы	Загружение	Прогиб панели, мм	Максимальные нормальные напряжения в обшивках, МПа	Максимальные касательные напряжения в среднем слое, кПа
Результаты расчета по методике ЦНИИСК [2]				
1	1	-7.5	32.56	18.09
1	2	19.5	0	0
2	1	-5.4	26.29	21.76
2	2	7.7	149.90	20.82
3	1	-5.5	23.92	21.41
3	2	8.7	135.45	18.81
Результаты расчета по EN 14509 [1]				
1	1	-7.6	32.56	18.09
1	2	19.5	0	0
2	1	-5.5	26.29	21.74
2	2	8.1	149.70	20.79
3	1	-5.7	23.78	21.39
3	2	9.3	135.40	18.81
Результаты расчета методом конечных элементов				
1	1	-7.5	32.50	18.05
1	2	19.5	0	0
2	1	-5.5	26.30	21.57
2	2	8.1	149.90	20.86
3	1	-5.7	23.80	21.22
3	2	9.1	135.50	18.85

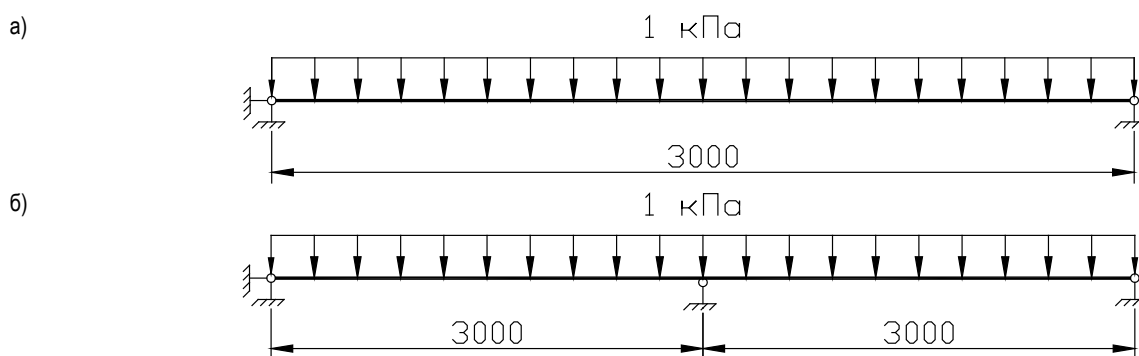


Рис. 4. Расчетные схемы панелей: а – однопролетная, б – двухпролетная

дополнительно отметить, что максимальное различие в деформациях (прогибах) трехпролетных панелей при их определении по [1] и [2] составляет 6.5%.

**3. Влияние ортотропности материала среднего слоя на напряженно-деформированное состояние панелей.** Для выявления зависимости напряженно-деформированного состояния панелей от величин упругих характеристик материала среднего слоя (модулей упругости  $E$  и сдвига  $G$ ), а также ортотропности среднего слоя (различия модулей упругости в направлениях по нормали к обшивкам  $E_z$  и вдоль пролета панели  $E_x$ ) были выполнены расчеты однопролетных и двухпролетных панелей (расчетные схемы приведены на рис. 4) с различными упругими характеристиками среднего слоя. Расчеты выполнялись при следующих исходных данных: высота поперечного сечения панелей 100 мм; пролеты панелей 3000 мм; обшивки панелей плоские стальные толщиной 0.5 мм.

Для определения величин упругих характеристик среднего слоя из анизотропного материала были проведены испытания минеральной ваты марки Рагос СЕС 50С при которых получены следующие результаты: модуль упругости в направлении по нормали к обшивкам  $E_z=3.07$  МПа; модуль упругости в направлении вдоль пролета панели  $E_x=1.49$  МПа; модуль упругости в направлении поперек пролета панели  $E_y=0.31$  МПа; модуль сдвига  $G=5.0$  МПа.

Упругие характеристики материала среднего слоя панелей варьировались в соответствии со значениями, приведенными в таблицах 4...7.

Расчет выполнялся с использованием плоской конечноэлементной модели трехслойной панели, учитывающей ортотропность мате-

риала среднего слоя. Направления модулей упругости в ортотропном конечном элементе, моделирующем средний слой панели, показаны на рис. 5.

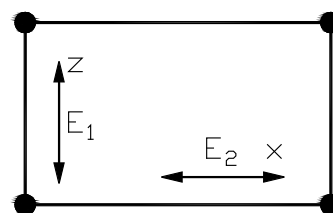


Рис. 5. Направления модулей упругости в ортотропном конечном элементе

Из таблиц 4 и 5 видно, что учет ортотропности и величин модулей упругости материала среднего слоя, в реальных пределах их изменений, практически не влияют на напряженно-деформированное состояние трехслойных панелей.

Из таблиц 6 и 7 видно, что величина модуля сдвига материала среднего слоя оказывает значительное влияние на деформированное состояние и менее значительное влияние на напряженное состояние панелей.

**Выводы**

1. При выполнении статических расчетов трехслойных панелей с легким конструкционным средним слоем численным методом рекомендуется использовать плоскую расчетную конечноэлементную модель.

**Таблица 4.** Влияние значений модулей упругости ( $E_1$ ,  $E_2$ ) на напряженно-деформированное состояние панели при однопролетной расчетной схеме (рис. 4а)

Модули упругости		Модуль сдвига G, МПа	Максимальный прогиб панели, мм	Максимальные нормальные напряжения в обшивке, МПа	Максимальные касательные напряжения в среднем слое, кПа
$E_1$ , МПа	$E_2$ , МПа				
0.3	0.3	5.0	4.3	22.6	15.03
3.0	3.0		4.3		
30	30.0		4.4		
3.0	0.3		4.3		
3.0	30.0		4.3		
0.3	3.0		4.3		
30.0	3.0		4.4		

**Таблица 5.** Влияние значений модулей упругости ( $E_1$ ,  $E_2$ ) на напряженно-деформированное состояние панели при двухпролетной расчетной схеме (рис. 4б)

Упругие характеристики среднего слоя			Максимальный прогиб панели, мм	Максимальные нормальные напряжения в обшивке в пролете, МПа	Нормальные напряжения в обшивке на средней опоре, МПа	Касательные напряжения в среднем слое на крайней опоре, кПа	Касательные напряжения в среднем слое на средней опоре, кПа
Модули упругости		Модуль сдвига G, МПа					
$E_1$ , МПа	$E_2$ , МПа						
0.3	0.3	5.0	3.4	15.0	16.8	12.22	17.71
3.0	3.0		3.4	15.0	16.8	12.22	17.71
30.0	30.0		3.4	14.9	17.0	12.22	17.71
3.0	0.3		3.4	15.0	16.8	12.22	17.71
3.0	30.0		3.4	15.0	16.8	12.22	17.71
0.3	3.0		3.4	15.0	16.8	12.22	17.71
30.0	3.0		3.4	14.9	17.0	12.22	17.71

**Таблица 6.** Влияние значения модуля сдвига (G) на напряженно-деформированное состояние панели при однопролетной расчетной схеме (рис. 4а)

Модули упругости		Модуль сдвига G, МПа	Максимальный прогиб панели, мм	Максимальные нормальные напряжения в обшивке, МПа	Максимальные касательные напряжения в среднем слое, кПа
$E_1$ , МПа	$E_2$ , МПа				
3.07	1.49	0.5	24.5	22.6	15.03
		0.6	20.8		
		0.7	18.1		
		0.8	16.1		
		0.9	14.6		
		1.0	13.3		
		1.2	11.4		
		1.5	9.6		
		1.7	8.7		
		2.0	7.7		
		2.5	6.6		
		3.0	5.8		
		3.5	5.3		
		4.0	4.9		
		4.5	4.6		
		5.0	4.3		
		7.0	3.7		
		9.0	3.3		
		11.0	3.1		
		15.0	2.8		
20.0	2.6				
25.0	2.5				
30.0	2.4				
40.0	2.3				
50.0	2.2				

Таблица 7. Влияние значения модуля сдвига (G) на напряженно-деформированное состояние панели при двухпролетной расчетной схеме (рис. 4б)

Модули упругости		Модуль сдвига G, МПа	Максимальный прогиб панели, мм	Максимальные нормальные напряжения в обшивке в пролете, МПа	Нормальные напряжения в обшивке на средней опоре, МПа	Касательные напряжения в среднем слое на крайней опоре, кПа	Касательные напряжения в среднем слое на средней опоре, кПа
E <sub>1</sub> , МПа	E <sub>2</sub> , МПа						
3.07	1.49	0.5	24.1	20.0	5.1	14.08	15.41
		0.6	20.4	19.7	5.8	13.97	15.57
		0.7	17.7	19.4	6.5	13.86	15.72
		0.8	15.7	19.1	7.2	13.76	15.85
		0.9	14.1	18.8	7.8	13.67	15.97
		1.0	12.8	18.6	8.3	13.58	16.07
		1.2	10.9	18.2	9.3	13.43	16.27
		1.5	9.0	17.6	10.5	13.23	16.51
		1.7	8.0	17.3	11.2	13.12	16.65
		2.0	7.0	16.9	12.2	12.97	16.82
		2.5	5.8	16.4	13.4	12.77	17.06
		3.0	5.0	16.0	14.4	12.61	17.24
		3.5	4.4	15.7	15.2	12.49	17.39
		4.0	4.0	15.4	15.8	12.38	17.52
		4.5	3.7	15.2	16.4	12.29	17.63
		5.0	3.4	15.0	16.8	12.22	17.71
		7.0	2.7	14.4	18.2	12.00	18.05
		9.0	2.3	14.1	19.0	11.87	18.71
		11.0	2.0	13.9	19.6	11.78	19.17
		15.0	1.7	13.6	20.3	11.66	19.76
20.0	1.5	13.4	20.8	11.57	20.19		
25.0	1.4	13.3	21.2	11.52	20.44		
30.0	1.3	13.2	21.4	11.48	20.59		
40.0	1.2	13.1	21.7	11.43	20.75		
50.0	1.1	13.0	21.8	11.40	20.82		

2. При выполнении статических расчетов металлических панелей с утеплителем из минеральной ваты и пенопласта не требуется учитывать анизотропные свойства утеплителя.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. EN 14509. Self-supporting double skin metal faced insulating panels - Factory made products - Specifications / CEN. – Brussels: 2006. – 145 p.

2. Рекомендации по расчету трехслойных панелей с металлическими обшивками и заполнителем из пенопласта. М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1976. -26 с.
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР.- М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.-35 с.
4. СТ СЭВ 5060-85. Надежность строительных конструкций и оснований. Конструкции пластмассовые. Основные положения по расчету.

Материал поступил в редакцию 10.01.08

**LEVCHUK A.A. Computation model of double skin metal faced panels**

Article contains comparison of various computation models of double skin metal faced panels. The results of computational investigations of double skin metal faced panels' anisotropic effects also added.

УДК 693

**Снежков Д.Ю., Леонович С.Н.**

**ПРОФИЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ НЕРАВНОПРОЧНОСТИ МАССИВА БЕТОНА НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ**

**Введение.** В предлагаемой статье рассматривается аспект практического использования неразрушающих средств контроля для оценки прочностных параметров монолитного бетона на строительстве спортивного комплекса «Минск-Арена» в г. Минске. Представлены данные испытаний, рассматриваются возможности повышения информативности и достоверности контроля бетона монолитных изделий.

Существующие неразрушающие методы контроля бетона не являются равнозначными по своим оценкам упругих и прочностных характеристик бетона, что обусловлено, в первую очередь, различием физических основ методов. Это обстоятельство позволяет говорить о селективной чувствительности того или иного неразрушающего метода к контролируемым физико-механическим параметрам

бетона и открывает возможность для повышения точности и достоверности контроля бетона, особенно в условиях монолитного строительства. Повышение надежности оценок характеристик бетона и, в первую очередь, его параметров упругости и прочности на основе комплексного, взаимодополняющего учета оценок нескольких методов контроля отмечается рядом исследователей [1], но степень методической проработки данного вопроса пока остается недостаточной для практического использования.

Основой конструкции объекта (рис. 1) является монолитный железобетонный каркас, основные элементы которого – несущие колонны, балки и плиты перекрытий из бетона классов С35/45 и С32/40 с суперпластификатором «Стахеппласт – М».

*Снежков Д.Ю., Белорусский национальный технический университет.*

*Леонович С.Н., доктор технических наук, профессор каф. технологии строительного производства Белорусского национального технического университета.*

*Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.*