

УДК 69.036.3

Л.В. Гапонова, О.А. Калмыков, С.С. Гребенчук

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Выполнена рационализация в условиях многовариантности нагружений. В рамках настоящего исследования построена конечноэлементная модель разработанной оболочки. По завершению теоретического анализа выполнены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния фрагментов новой строительной системы многокритериальной соответствия «Монофант» гидростатическим методом. Сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическими демонстрирует корректность расчетной модели оболочки, а также чистоту проведенного эксперимента. Конструктивные элементы системы «Монофант» обладают необходимыми прочностными атрибутами несущих элементов зданий и сооружений.

Ключевые слова: *напряженно-деформируемое состояние, цилиндрическая оболочка, система «Монофант».*

Введение

Потенциал принципов и приемов управления напряженно-деформированным состоянием строительных конструкций определяется возможностью сочетания теории конструкций, методов расчета, математическими методами оптимизации. Сочетание широкого спектра общестроительных технологий и конструктивных особенностей строительных систем задают основные подходы к проектированию. Учитывая проведенный анализ конструктивных систем для гражданских и общественных зданий [1] можно утверждать, что использование и внедрение новых облегченных типов железобетонных покрытий полностью оправдывается экономически. Использование оболочечных покрытий, внутренние полости которых заполнены вкладышами-пустотообразователями, позволяет существенно облегчить конструкцию, улучшить ее тепло- и звукоизоляционные свойства, обеспечить новые архитектурно-конструктивные планировочные решения.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами

Выполненная рационализация в условиях многовариантности нагружений, разработка методов управления и рационализации внешних параметров конструктивно-анизотропных систем при статическом воздействии. По завершению теоретического анализа выполнены экспериментальные исследования напряженно-

деформированного состояния фрагментов новой конструктивной строительной системы многокритериальной соответствия «Монофант» гидростатическим методом.

Анализ последних исследований и публикаций

Созданием статистических моделей, описывающих случайные максимальные нагрузки (в том числе снеговые), занимались В. В. Болотин, А. П. Бульчев, И.Д. Грудев, В.Л. Клепиков, К.С. Лосицкий, В.Н. Райзер, А.Г. Ржаницын, Ю.Д. Сухов, В.А. Отставнов [2]. Кроме этих работ, проблеме сноса снега и перераспределения его ветром по покрытию посвящены работы А.К. Дюнина, Н.К. Жуковой, Ю.М. Калужинской, А.А. Котова, В.А. Павлова, Л.С. Розенберга, С.Ф. Пичугина и других исследователей [3]. Характер перераспределения снега ветром по покрытию очень сложный. В современных нормативных документах нет методик учета снеговых нагрузок на железобетонные оболочки различной гауссовой кривизны. Как следствие, можно допустить, что разработка теории моделирования снеговых нагрузок на железобетонные облегченные оболочки произвольной кривизны представляет определенный интерес.

Согласно Европейских нормативных документов причиной различных конфигураций снеговых нагрузок на покрытие могут стать следующие факторы: форма покрытия; теплоизоляционные свойства покрытия; шероховатость поверхности покрытия; местные климатические условия (в виде дождя или снега) и др. Изучение влияния сообщения снеговых и

ветровых нагрузок на покрытия сложной геометрии возможно исследованием натуральных наблюдений и с помощью модельных исследований.

Определение цели и задачи исследования

Цель исследования - исследовать характер деформирования фрагмента цилиндрической оболочки покрытия системы «Монофант».

Объект исследования - фрагмент цилиндрической оболочки покрытия с размерами в плане 2200x2200 мм выполнен в виде внешней и

внутренней бетонной обшивки толщиной 50 мм, между которыми расположен вкладыш-пустотообразователь из экструдированного пенополистирола толщиной 160 мм. Армирование обшивок выполнено сеткой 200x200 мм, d = 6 мм. По диагональным направлениям оболочки расположены обеспечивающие совместную работу обшивок ребра шириной 50 мм, которые армированы плоским каркасом с d = 10 мм. Общая схема конструкции приведена на рис.1.

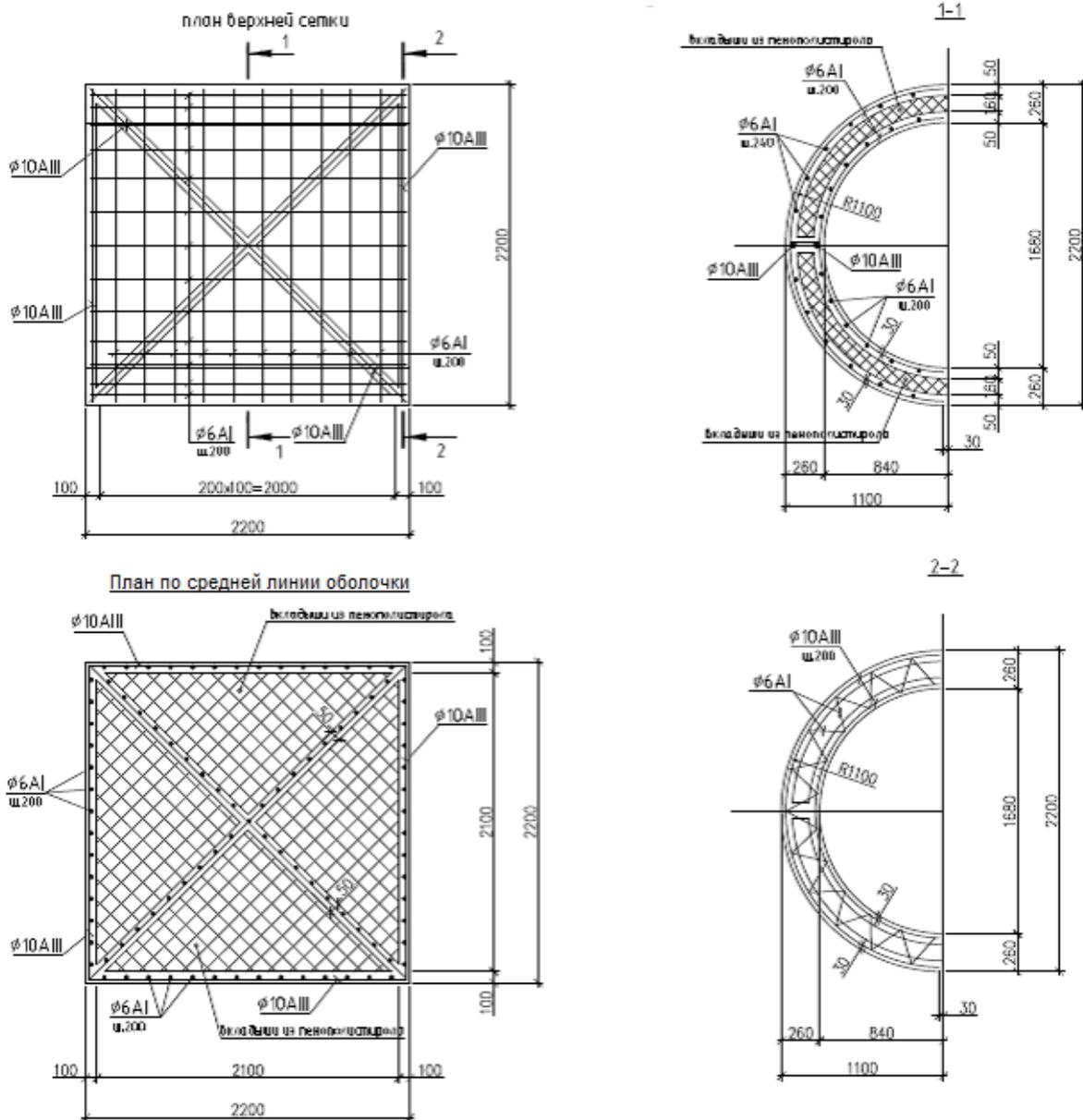
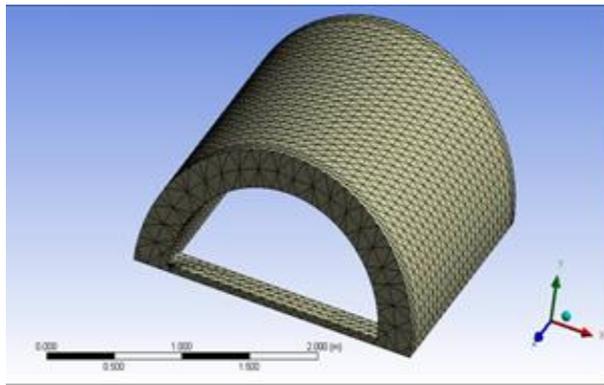


Рис.1. Геометрия и армирование цилиндрической оболочки

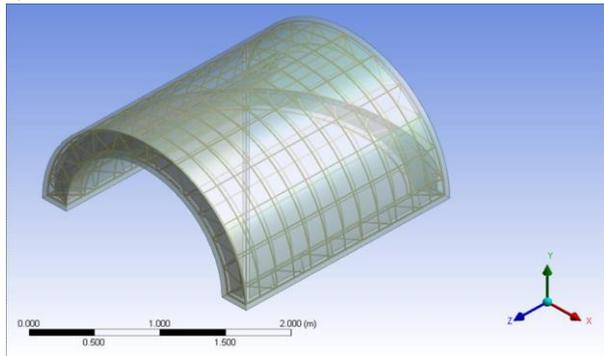
Основная часть исследования, полученные результаты исследования

В рамках настоящего исследования построена конечноэлементная модель разработанной оболочки в среде ПК «ANSYS» (рис. 2).

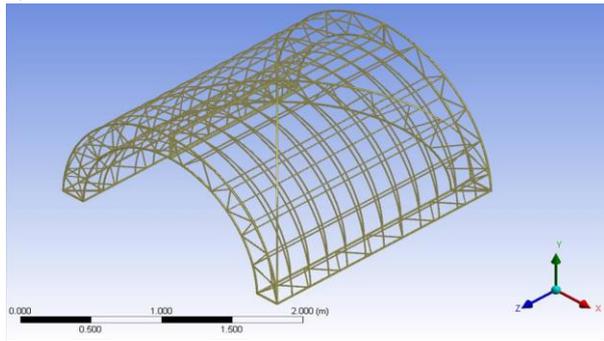
В построенной конечноэлементной модели арматура моделировалась отдельными стержнями из объемных конечных элементов, которым присваивались физические параметры стали в соответствии с [4] (рис. 2, в).



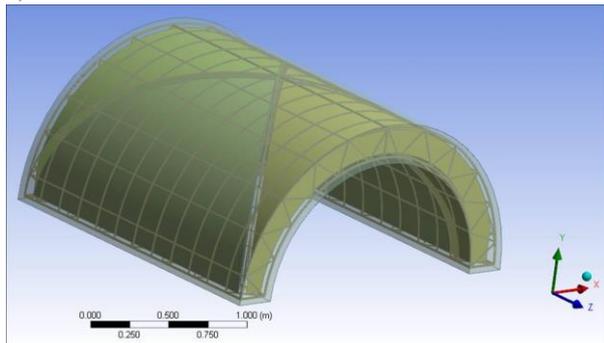
а)



б)



в)

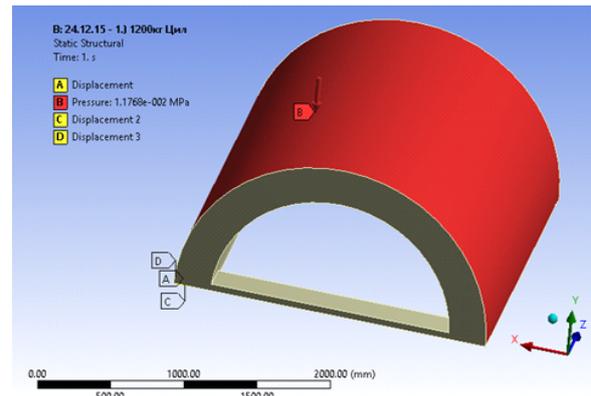


г)

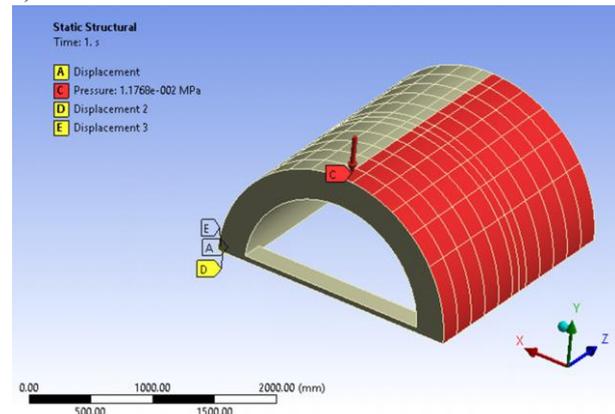
Рис.2. Моделирование геометрии цилиндрической оболочки: а- построение сетки конечных элементов; б- моделирование геометрии пенополистирольных вкладышей; в- моделирование арматурных стержней; г- фрагмент цилиндрической оболочки.

Инструментарий упомянутого расчетного комплекса позволяет производить автоматическую триангуляцию сложных форм на конечные объемные элементы путем автоматического импорта

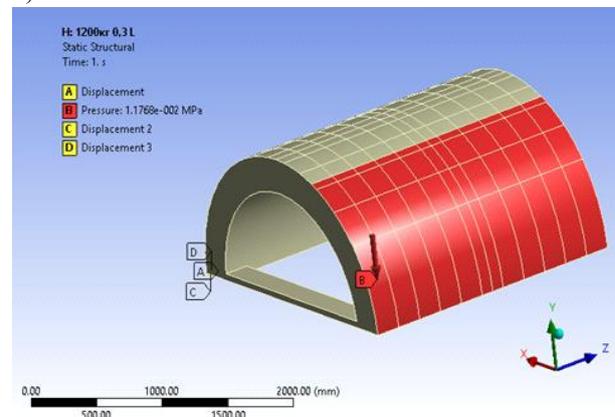
из вспомогательного программного комплекса трехмерного моделирования (в данном случае использовался ПК «Autodesk Inventor»). В построенной модели цилиндрической оболочки насчитывается - 209 319 узлов и 100 271 конечных элементов.. Опираие назначалось шарнирно неподвижным по четырем угловым точкам оболочки в плане. Нагрузка прикладывалась к поверхности оболочки по трем различным схемам, приведенным на рис. 3. Учитывая значительную жесткость конструкции величина прикладываемой равномерно распределенной нагрузки составляла 10 кН/м^2



а)



б)



в)

Рис.3 . Схемы нагружения:

а - полная ; б - 1/2 поверхности; в - 1/3 поверхности.

Учитывая тот факт, что исследуемая оболочка изготовлена методом мокрого торкретирования, возникла необходимость уточнения физических параметров бетона конструкции. В связи со сказанным на базе лаборатории кафедры строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, было проведено испытание 4-х бетонных призм, которые были отобраны в момент производства оболочки. Целью данного испытания являлось определение фактического модуля упругости (E_{ck}) и призмического значения предела прочности на сжатие (f_{ck}) бетона оболочки. Испытания проводились в соответствии с методологией, изложенной в [5]. Общий вид призматических образцов, а так же испытательной установки приведен на рис.4.



а)



б)

Рис.4. Испытание бетонных призм: а- общий вид образцов; б- образец в процессе испытания.

На основании усредненных данных, полученных в ходе испытания образцов, построена диаграмма « σ - ϵ » бетона оболочки (рис. 5), из которой получены требуемые характеристики материала ($E_{ck} = 16,5$ ГПа; $f_{ck} = 13$ МПа).

В результате проведенных исследований получен модуль упругости численно равный 16 МПа.

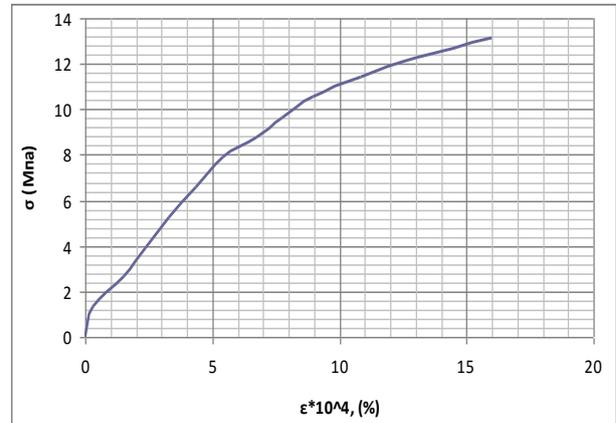
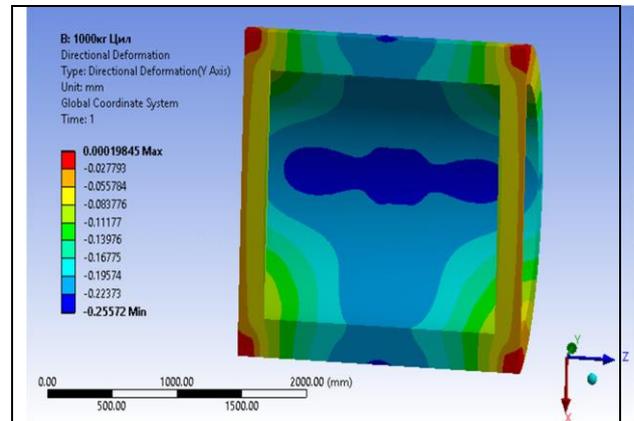
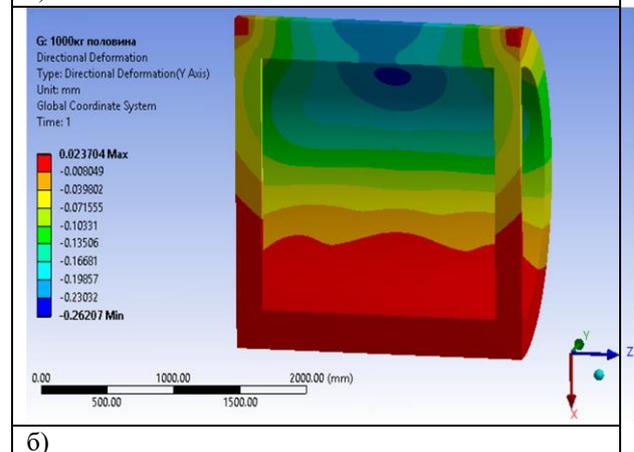


Рис.5. Диаграмма «напряжение – деформация» из монолитного железобетона.

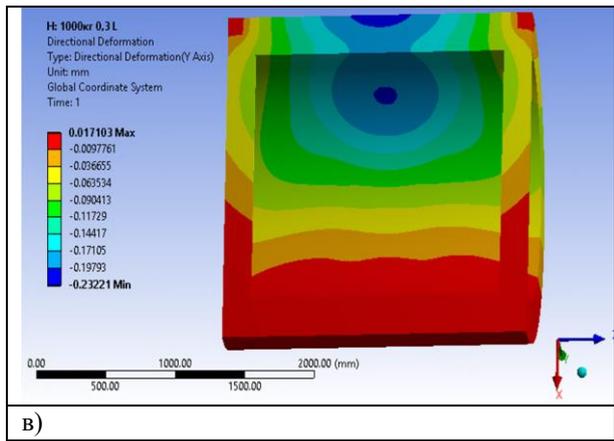
На рис. 6,7 приведены полученные в результате расчета поля перемещений нижней поверхности оболочки для каждой из 3-х схем загрузки по вертикальной оси «Y» и горизонтальной оси «X» соответственно.



а)

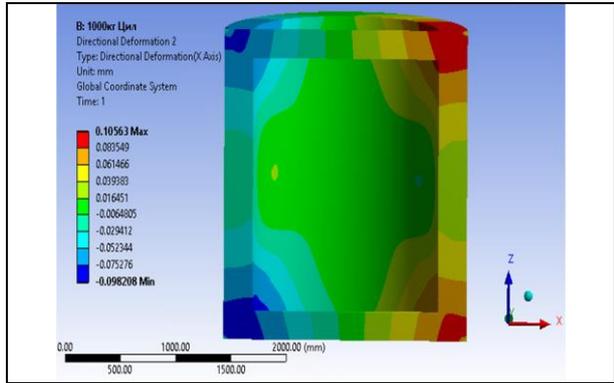


б)

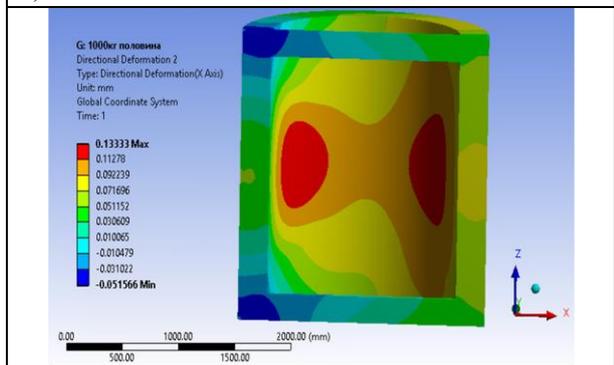


в)

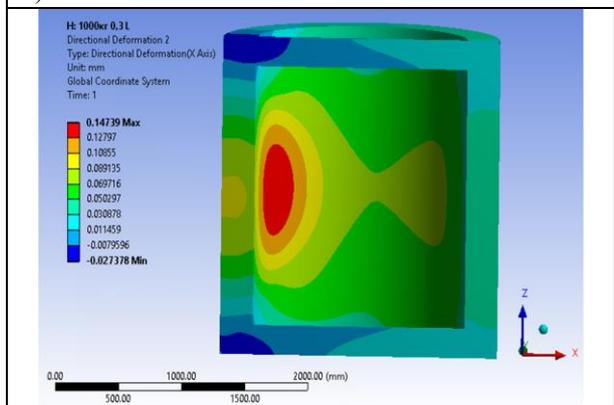
Рис.6. Поле вертикальных перемещений оболочки при различных загрузках: а- вся поверхность; б- 1/2 поверхности; в- 1/3 поверхности.



а)



б)



в)

Рис.7. Поле вертикальных перемещений оболочки при различных загрузках: а- вся поверхность; б- 1/2 поверхности; в- 1/3 поверхности.

Экспериментальные исследования анизотропной цилиндрической оболочки. Выполненный теоретический анализ подтвержден экспериментальными исследованиями деформированного состояния фрагментов новой конструктивной строительной системы многокритериальной соответствия «Монофант» гидростатическим методом.

Система нагружения. Для испытания использован метод исследования, основанный на гидростатическом нагружении, когда нагрузка задается весом воды, и ее величина регулируется высотой водяного столба [6]. Функциональная схема метода приведена на рис.8.



Рис.8. – Функциональная схема метода

Согласно выбранной программы эксперимента задавался режим нагружения. Уровень нагружения определяет высота столба воды в резервуаре. При этом, упомянутый необходимый уровень обеспечивается системой подачи и отвода воды в резервуар и из него. Для регистрации измеренных атрибутов к исследуемому объекту были подведены датчики, позволяющие установить характеристики напряженно – деформированного состояния объекта исследования. Основой для обозначенных испытаний явилось устройство для натурных испытаний плит и оболочек при действии вертикальных кратковременных и длительных нагрузок (рис.9.) [6].

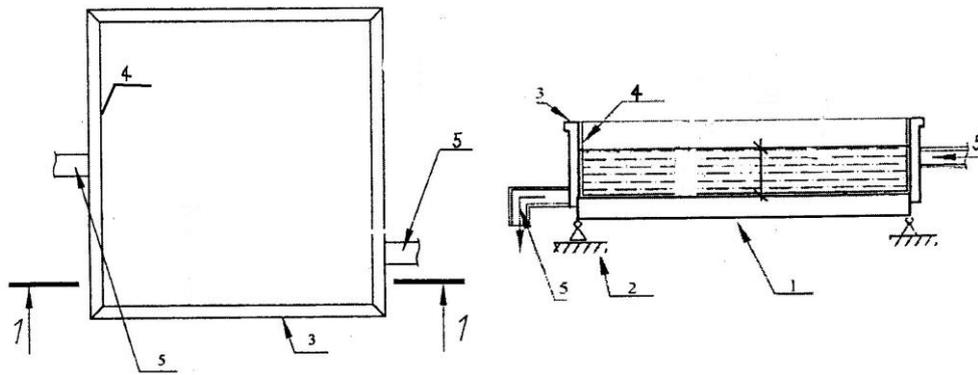


Рис. 9 - Устройство для натурального испытания.

Устройство содержит исследуемую конструкцию 1, установленную на опоры 2, щиты 3, создающие резервуар и установленные по контуру нагружаемой области, водонепроницаемую пленку 4 внутри резервуара, подводящие и отводящие шланги 5. Данная конструкция отличается простотой и небольшой стоимостью, она легко стыкуется с системой измерения.

Учитывая сложность конфигурации нагружаемой поверхности оболочки, для равномерного распределения давления от столба воды стало необходимым устройство дополнительных перегородок внутри бассейна в продольном направлении. Таким образом, построенный над оболочкой бассейн представлял собой ячеистую систему, состоящую из 11 ячеек размерами 200x2200 мм высотой 1200 мм. (рис.10, а)

Стенки бассейна и внутренние перегородки выполнялись из многослойной дощатоклееной фанеры толщиной 20 мм.

Внешние стенки бассейна опирались на испытуемый каркас, а внутренние перегородки жестко прикреплялись к внешним стенкам с помощью саморезов и клея. Между внутренними перегородками бассейна и оболочкой устанавливался промежуток 10 мм (рис.10, б), который заполнялся монтажной пеной, тем самым обеспечивая распределение собственного веса бассейна исключительно на каркас для испытаний.

В каждую из образованных ячеек устанавливались специально изготовленные полиэтиленовые футляры, что в целом обеспечивало герметичность бассейна.

Для проведения экспериментальных исследований описанная оболочка была установлена на специально изготовленный каркас (рис.10, в), выполненный из квадратной трубы 100x6 мм. Конструкция каркаса обеспечивала «условно» точное опирание оболочки по 4-м углам.



а)



б)



Рис. 10. Изготовление стенда для проведения испытаний: а- ячеистая система.; б- образующие резервуар щиты; в- каркас для испытаний

Система измерения. Для определения качественного и количественного характера

деформирования объекта исследования осуществлялись замеры перемещений оболочки в 25-ти точках. При этом, учитывая сложность конфигурации конструкции, что в свою очередь предопределило появления как вертикальных, так и горизонтальных перемещений исследуемой поверхности оболочки под действием вертикальной нагрузки, возникла необходимость измерения перемещений в двух направлениях (рис. 10). Также, учитывая значительную жесткость оболочки, которая, в свою очередь, предопределила малость величин ожидаемых перемещений, в настоящем эксперименте использовались индикаторы часового типа с ценой деления 2 мк и ходом штока 2 мм (рис.11,а). Датчики крепились в указанных точках при помощи специально изготовленных каркасов, выполненных из квадратной трубы 40х3 и металлического прута 10х10 мм (рис. 11,б), которые, в свою очередь, посредством сварки крепились к основному экспериментальному каркасу.

По каждой из 3-х схем осуществлялось 6 независимых циклов нагрузка/разгрузка. К анализу принимались усредненные данные по результатам проведения 6-ти загрузок, которые приведены в табл. 1.

Последовательность выполнения экспериментальных исследований иллюстрируется рис. 12.

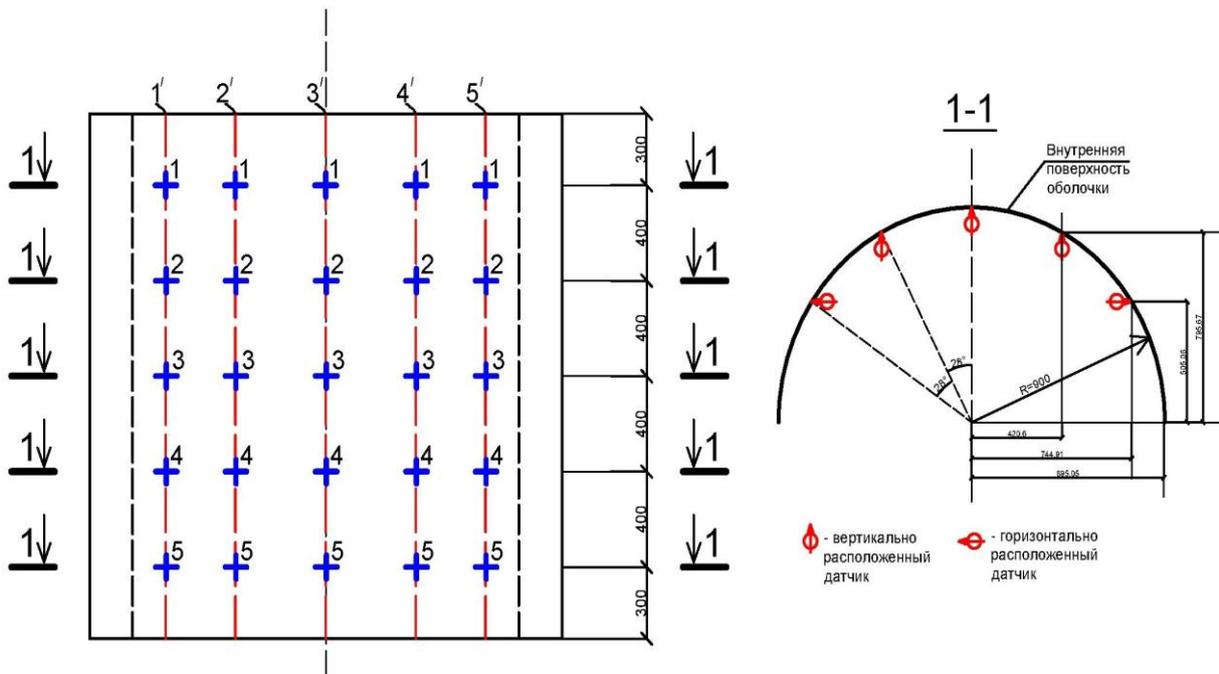


Рис.10. Схема расстановки датчиков



Рис. 11. Система вимірювання:
а- індикатор годинного типу; б- каркас кріплення приладів.

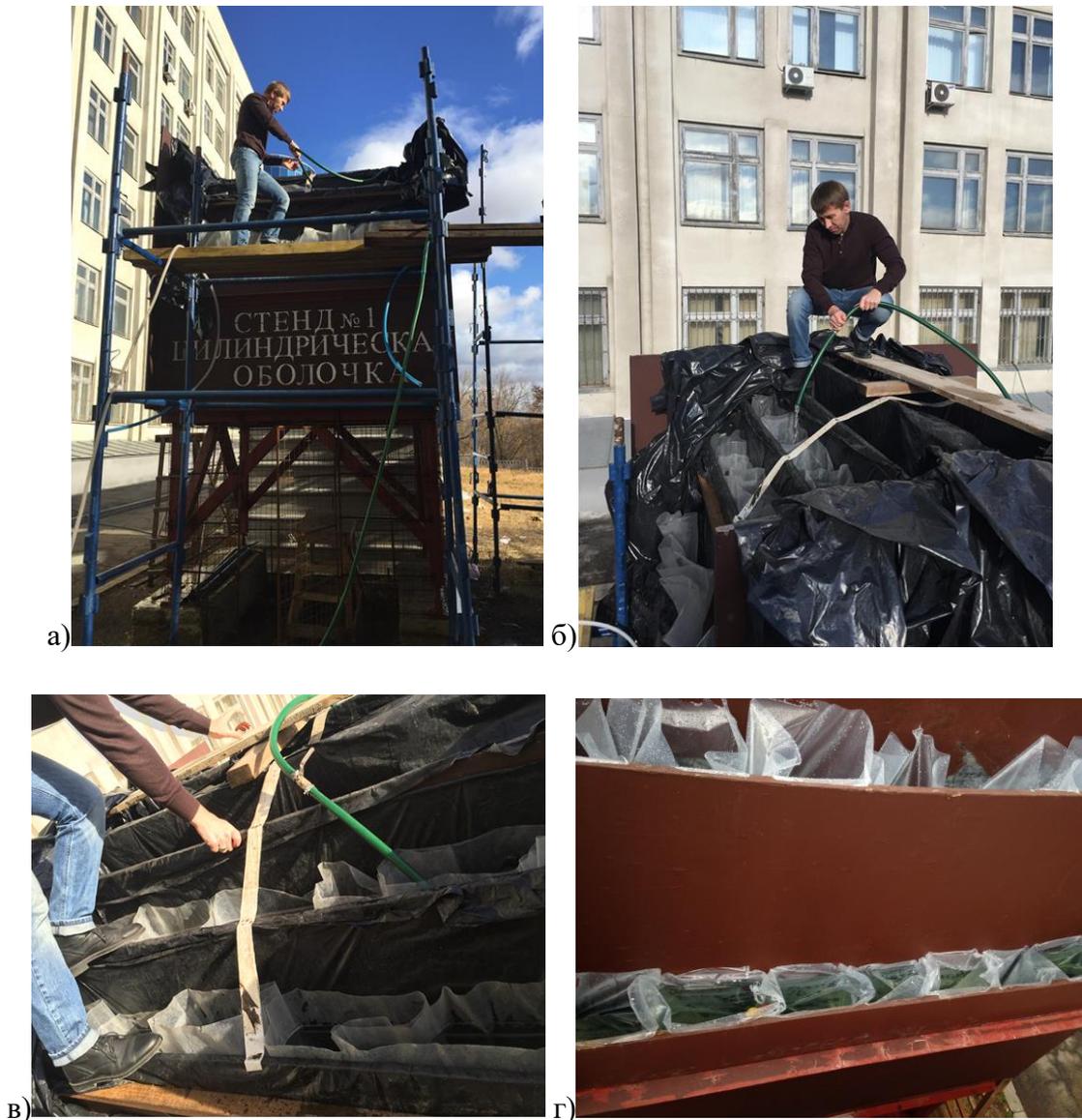


Рис. 12. Проведення експериментальних досліджень:
а- загальний вигляд; б, в- система подачі води; г- заповнені водою ячейки.

Таблиця 1. Усредненные показания датчиков.

№ датчик а	Вертикальные перемещения					
	Полная	Δ	1/2 поверхности	Δ	1/3 поверхности	Δ
1'1	0.041	-0.007	0.101	0.007	0.021	0.004
1'2	0.138	-0.006	0.116	-0.005	0.083	-0.007
1'3	0.228	-0.01	0.099	-0.003	0.077	-0.006
1'4	0.138	-0.006	0.033	-0.008	0.037	-0.001
1'5	0.041	-0.007	0.061	0.006	0.058	0
2'1	0.012	-0.004	0.114	0.006	0.097	0.005
2'2	0.194	-0.007	0.137	-0.009	0.119	-0.006
2'3	0.237	-0.004	0.093	-0.011	0.087	-0.005
2'4	0.194	-0.007	0.021	0	0.043	0
2'5	0.012	-0.004	0.088	0.005	0.064	0.005
3'1	0	-0.003	0.124	0.007	0.134	0.007
3'2	0.217	-0.004	0.142	-0.009	0.157	-0.008
3'3	0.242	-0.013	0.093	-0.01	0.075	0.004
3'4	0.217	-0.004	0.012	-0.004	0.043	-0.002
3'5	0	-0.003	0.98	-0.014	0.82	0.729
4'1	0.012	-0.004	0.114	0.006	0.097	0.005
4'2	0.194	-0.007	0.137	-0.009	0.119	-0.006
4'3	0.237	-0.004	0.093	-0.011	0.087	-0.005
4'4	0.194	-0.007	0.021	0	0.043	0
4'5	0.012	-0.004	0.088	0.005	0.064	0.005
4'1	0.041	-0.007	0.101	0.007	0.021	0.004
4'2	0.138	-0.006	0.116	-0.005	0.083	-0.007
4'3	0.228	-0.01	0.099	-0.003	0.077	-0.006
4'4	0.138	-0.006	0.033	-0.008	0.037	-0.001
4'5	0.041	-0.007	0.061	0.006	0.058	0

Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении

Сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическими наглядно демонстрирует корректность расчетной модели оболочки, а также чистоту проведенного эксперимента. Из проведенного исследования следует, что конструктивные элементы системы «Монофант» обладают всеми необходимыми прочностными и жесткостными атрибутами несущих элементов зданий и сооружений.

Литература

1. Шмуклер, В.С. Каркасные системы облегченного типа [Текст] / В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Бурак. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.
2. Отставнов В.А. Снігові навантаження на квадратні в плані оболонки двоякої кривизни. Москва, праці інституту ЦНІБК Розрахунок будівельних конструкцій. Вип.42, 1976. - С.81-90.
3. Пичугин С.Ф. Снеговые и гололедные нагрузки на строительные конструкции: монография / С.Ф. Пичугин, А.В. Махинько. – Полтава: ООО «АСМИ», 2012. – 460 с.

4. Патент на корисну модель №89464 Україна, Е 04В 1/В (2006.01) Каркасна будівля «Монофант» / В.С. Шмуклер, В.М. Бабаєв, С.О. Бугаєвський, К.В. Бережна, І.А. Карякін, В.І. Кондращенко, І.М. Сеїрські. – № и 2013 11919; заявка 10.10.2013; публікація 25.04.2014. Бюл. №8.

5. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона: Київ, Мінрегіонбуд України, 2010. -16с.

6. Патент України на корисну модель №44125, МПК G01M19/00, G01N3/00, G01M5/00. Пристрій для натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер, А.А. Чупринін, Р. Аббасі. - № и200901598; заявл. 24.02.09; опубл. 25.09.09, Бюл. №12.

References

1. Shmukler V.S., Klimov Y.A., Burak N.P., (2008). Frame lightweight type system, 336.
2. Otstavnov V.A., (1976). Snow load on the square in terms of double curvature shell: Proceedings of the Institute TSNIBK. Calculation of building structures. Is.42, 81-90.
3. Pichugin S.F., AV Mahinko (2012). Snow and ice load on building structures, 460.
4. Shmukler V.S., Babaev V.M., Buhayevskyy S.A., Berezhnaya K.V., Karjakin I.A., Kondraschenko V.I., Seirski I.M. (2006.01) .Patent №89464 Ukraine, E 04V 1 / V-Frame building "Monofant" - № и 2013 11919; 10/10/2013 application; Publication 25.04.2014. Bull. №8.

5. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. *Methods for determining the prism strength, elastic modulus and Poisson's ratio*, Kyiv, Ukraine Ministry of Regional Development, 16.

6. Shmukler V.S., Chuprinin A.A., Abbasi R. (2009). Patent №44125, IPC G01M19/00, G01N3/00, G01M5/00. *Device for field tests of plates and shells / - № u200901598; application. 24.02.09; Publication 25.09.09, Bull. №12.*

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Шмуклер
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, Харьков.

Автор: ГАПОНОВА Людмила Викторовна
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, Харьков.
кандидат технических наук, доцент.
E-mail: lvgaponova@rambler.ru.

Автор: КАЛМЫКОВ Олег Александрович
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, Харьков.
кандидат технических наук, ассистент.
E-mail: kalmikov88@mail.ru.

Автор: ГРЕБЕНЧУК Сергей Сергеевич
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, Харьков.
соискатель.
E-mail: moisei2529@mail.ru.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНЬКИ

Л.В. Гапонова, О.О. Калмиков, С.С. Гребенчук

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків

Виконана раціоналізація в умовах багатоваріантності навантажень. В рамках цього дослідження побудована кінцевоелементна модель розробленої оболонки. По завершенню теоретичного аналізу виконані експериментальні дослідження напружено-деформованого стану фрагментів нової будівельної системи багатокритеріальної відповідності «Монофант» гідростатичним методом. Зіставлення отриманих експериментальних даних з теоретичними демонструє коректність розрахункової моделі оболонки, а також чистоту проведеного експерименту. Конструктивні елементи системи «Монофант» володіють необхідними характеристиками міцності несучих елементів будівель і споруд.

Ключові слова: напружено-деформований стан, циліндрична оболонка, система «Монофант».

STRESS-DEFORMED STATE CYLINDRICAL SHELL

L. Gaponova, O. Kalmykov, S. Grebenchuk

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov

The paper contains the results of experimental and theoretical research of the stress-strain state of reinforced concrete roof structure which has complex internal and external geometries. By the complex external geometry refers the spherical surface of the shell shape and by complex internal - that it contains voids filled with insulation material. The paper assessed the technological aspects of the production of monolithic reinforced concrete structures specified form, fabricated by method of wet shotcrete. In turn, built finite element model of the structure allows analyzing the impact of qualitative and quantitative attributes describing the load applied to the surface of the shell to the nature of its deformation. Experimental verification of the theoretical data was obtained in the laboratory. Investigated shell model with plan dimensions was 2.2 x 2.2 meters. The loading was carried out by hydrostatic method (by the device over the surface of the shell a special "honeycomb" pool with filled water). Designed for the experimental measurement system has allowed building the package surface shell deformation under various schemes of loading. These findings determine more correct display of load considered shell by snow load.

Key words: stress-strain state, cylindrical shell, the system "Monofant".