

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Российская академия архитектуры и строительных наук

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

**Сборник материалов XXVI Международной
научно-технической конференции
(26-27 июня 2025 г.)**



Тула

Издательство ТулГУ

2025

УДК 69 (062)
ББК 38я431
А43

Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции / под общ. ред. В.Г. Теличко. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. 264 с.

ISBN 978-5-7679-5708-8

В настоящем сборнике опубликованы материалы, представленные участниками XXVI Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (ФГБОУ ВО «ТулГУ», 26-27 июня 2025 г., г. Тула).

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель: Кравченко О.А. - д.т.н., проф., ректор ТулГУ.

Зам. председателя: Трещёв А.А. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., зав. каф. ТулГУ.

Члены оргкомитета: Поздняков А.И. - директор ООО «Строительное проектирование» (г. Тула); Захарова И.А. - к.ф-м.н., доц. ТулГУ; Теличко В.Г. - д.т.н., проф. ТулГУ; секретариат – Кузнецова В.О. – к.т.н., доц. ТулГУ.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели:

Травуш В.И. - академик РААСН, д.т.н., проф., вице-президент РААСН (г. Москва);

Акимов П.А. - академик РААСН, д.т.н., проф., ректор МГСУ (г. Москва);

Колчунов В.И. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва);

Петров В.В. - академик РААСН, д.т.н., проф., СГТУ (г. Саратов);

Селяев В.П. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГУ (г. Саранск).

Члены программного комитета:

Анпилов С.М. - советник РААСН, д.т.н., проф., НГАСУ (г. Новосибирск);

Белов В.В. - советник РААСН, д.т.н., проф., ТверьГТУ (г. Тверь);

Белостокский А.М. - академик РААСН, д.т.н., проф., ООО «СтаДиО» (г. Москва);

Ерофеев В.Т. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва);

Монастырев П.В. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., ТГТУ (г. Тамбов);

Мондрус В.Л. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва);

Меркулов С.И. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., КГУ (г. Курск);

Зубчанинов В.Г. - д.т.н., проф., ТверьГТУ (г. Тверь);

Овчинников И.Г. - академик АТ, д.т.н., проф., СГТУ (г. Саратов);

Римшин В.И. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва);

Румянцева В.Е. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., ИГПУ (г. Иваново);

Сидоров В.Н. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва).

Соколова Ю.А. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва).

Федосов С.В. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва);

Черкасов В.Д. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., МГУ (г. Саранск);

Mueller W.H. - д.е.н., проф., Берлинский техн. ун-т (г. Берлин, Германия).

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
Federal State budget educational institution of higher Education
«Tula State University»

CONTEMPORARY ISSUES OF ENGINEERING AND BUILDING INDUSTRY

**Information package of XXVI International
scientific and technical conference
(June 26-27, 2025)**



Contemporary issues of engineering and building industry: a collection of materials of the XXVI International Scientific and Technical Conference / ed. V.G. Telichko. Tula: Publishing House of TulGU, 2025. 264 p.

ISBN 978-5-7679-5708-8

This package consists of articles submitted by participants of XXVI International scientific and technical conference «Contemporary issues of engineering and building industry» (Tula State University, June 26-27, 2025, Tula).

ORGANIZING COMMITTEE

Convener: Kravchenko O.A. - Doctor of Technical Sciences, professor, Rector of Tula State University.

Deputy convener: Treshev A.A. - corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the department, Tula State University.

Members of the committee: Pozdnyakov A.I. – Director of LLC 'Construction Design' (Tula); Zaharova I.A. - candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent, Tula State University; Telichko V.G. - doctor of Technical Sciences, professor, Tula State University; secretary - Kuznetsova V.O., candidate of Technical Sciences, docent, Tula State University.

PROGRAM COMMITTEE

Co-conveners:

Travush V.I. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., VP of RAACS (Moscow);
Akimov P.A. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., Rector of MGSU (Moscow);
Kolchunov V.I. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., MGSU (Moscow);
Petrov V.V. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., SSTU (Saratov);
Selyaev V.P. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., NR MSU (Saransk).

Members of program committee:

Anpilov S.M. - Adv. of the RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., NGASU (Novosibirsk);
Belov V.V. - Adv. of the RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., TSTU (Tver);
Belostotsky A.M. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., StaDiO LLC (Moscow);
Erofeev V.T. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., MGSU (Moscow);
Monastirev P.V. - Corr. M. of RAASN, D.Sc. (Technology), Prof., TSTU (Tambov);
Mondrus V.L. - Corr. M. of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., NRU MGSU (Moscow);
Merkulov S.I. - Corr. M. of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., KSU (Kursk);
Zubchaninov V.G. - D.Sc. (Technology), Prof., TSTU (Tver);
Ovchinnikov I.G. - Academician of AT, D.Sc. (Technology), Prof., SSTU (Saratov);
Rimshin V.I. - Corr. M. of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., NRU MGSU (Moscow);
Rumyantseva V.E. - Corr. M. of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., IGPU (Ivanovo);
Sidorov V.N. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., MGSU (Moscow).
Sokolova Yu.A. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., MGSU (Moscow).
Fedosov S.V. - Academician of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., NRU MGSU (Moscow);
Cherkasov V.D. - Corr. M. of RAACS, D.Sc. (Technology), Prof., NR MSU (Saransk);
Mueller W.H. - D.Sc. (Economics), Prof., Berlin Tech. University (Berlin, Germany).

ISBN 978-5-7679-5708-8

© Authors of package, 2025
© Tula State University, 2025

СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ»

УДК 624.072

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ТРУБЧАТОЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО ПЕРЕХОДА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Барченкова Н.А., Карак К.А.
ВГТУ, г. Воронеж, Россия

Настоящая работа посвящена вопросу рационального проектирования несущей системы воздушного перехода большого пролета для магистрального трубопровода через препятствие в виде реки, канала, оврага и т. п. В качестве такой конструкции, как наиболее часто используемой в большепролетных конструкциях, принята ферма с размещением трубопровода по нижнему поясу. В связи с этим, была поставлена задача оптимизации ее топологии на основе наибольшей экономии по расходу материала и, вместе с тем, наименьших деформаций в виде прогибов средней части фермы.

Отметим, что совершенствование методов расчета ферм с целью рационального расположения их элементов является достаточно сложным разделом оптимизации стержневых систем. Это объясняется тем, что изменение топологии фермы меняет структуру физико-математической модели дискретным образом, в связи с чем неприменимы классические методы математической теории оптимизации. Исследования часто сосредотачиваются на анализе значений целевой функции для принятых к сравнению вариантов топологии решетки фермы. При этом ферма, как и любая строительная конструкция, должна соответствовать требованиям прочности, жесткости и устойчивости.

В ряде работ, основанных на подходе профессора А.Г. Юрьева [1-5], опирающихся на вариационный принцип Кастильяно минимума потенциальной энергии деформирования дискретных стержневых систем из линейно-упругого материала с модулем упругости E , принимаемого в качестве критерия оптимальности, вводится следующая целевая функция

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{2E\varphi_i^2 A_i} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где n – число стержней фермы с длинами l_i , площадями сечений A_i и продольными усилиями N_i , φ_i – коэффициент продольного изгиба.

В силу того, что $A_i = \frac{N_i}{\varphi_i}$ и $U = \frac{R_i^2}{2E} \sum_{i=1}^n A_i \cdot l_i$, задача (1) формально равносильна задаче минимума объема

$$V = \sum_{i=1}^n A_i \cdot l_i \rightarrow \min. \quad (2)$$

Однако, на практике назначение размеров сечений стержней выполняется для стандартных профилей и тождественность соотношений (1) и (2) нарушается.

Этот факт наряду с такой важной характеристикой как жесткость системы является основанием для предлагаемой здесь оптимизации топологии ферм на основе многокритериальной целевой функции

$$\Phi = k_1 \cdot U + k_2 \cdot V + k_3 \cdot \Delta \rightarrow \min, \quad (3)$$

где U - потенциальная энергия, V - объем материала, Δ - максимальный прогиб в середине пролета, определяемый по формуле Максвелла-Мора, весовые коэффициенты связаны соотношением

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1. \quad (4)$$

В процессе исследований рассматривались 7 различных вариантов балочной трубчатой фермы (с параллельными поясами, пролетом 50 метров и высотой 3 метра), предназначенных для воздушного перехода в одном направлении магистрального водовода, выполненного из стальной трубы наружного диаметра 820 мм толщиной стенки 8 мм, сталь С255. Варианты ферм представлены на рис.1, ширина панелей для первых трех вариантов 2,5 м, в остальных вариантах ширина панелей сгущается в центральной и опорных частях фермы как наиболее напряженных. Нагрузки, действующие на нижний пояс фермы, определены по стандартной схеме сбора нагрузок с учетом собственного веса фермы и трубопровода с теплоизоляцией, полностью заполненного водой. Их значения для каждого из 7 вариантов указаны на рис. 1.

Поперечные сечения стержней ферм в виде труб квадратной формы назначались в соответствии с [6] при условиях обеспечения для всех стержней системы (из равнопрочного материала $R^+ = R$):

прочности: $|\sigma_i| \leq R \quad (5)$

$$\text{устойчивости:} \quad \frac{N_i}{\varphi_i A_i} \leq R, \quad (6)$$

где $\varphi_i = 1$ для растянутых стержней, φ_i для сжатых стержней принимается с учетом их гибкости по рекомендациям [7]. Результаты расчетов, выполненных в ПКВ ЛИРА-САПР, для 7 принятых вариантов топологии решетки фермы сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Варианты топологии решетки фермы

№	Масса, т	N+, т	N-, т	Перемещение, мм	U, Дж	V, м ³
	3,85	93,34	-94,10	451,74	48020	0,490
	3,45	78,39	-79,15	316,98	31360	0,439
	3,50	79,21	-78,39	318,42	31556	0,446
	5,38	87,44	-86,89	179,27	17542	0,685
	4,15	81,13	-79,73	287,09	28126	0,529
	4,16	80,52	-79,65	263,41	25578	0,530
	5,09	82,31	-83,14	197,22	19012	0,648

Для четырех различных вариантов значений весовых коэффициентов: $\kappa_1=\kappa_2=\kappa_3=0,33$; $\kappa_1=\kappa_2=0,25$; $\kappa_3=0,5$; $\kappa_1=\kappa_3=0,25$; $\kappa_2=0,5$; $\kappa_2=\kappa_3=0,25$; $\kappa_1=0,5$ были определены значения целевой функции Φ . Они представлены в таблице 2. Их анализ в соответствии с критерием (3) позволяет выбрать из 7 рассмотренных вариантов решетки ферму № 4 с неравномерной шириной панелей как ферму с оптимальной топологией.

Таблица 2. Значения целевой функции

№	$\Phi 1$ ($\kappa_1=\kappa_2=\kappa_3=0,33$)	$\Phi 2$ ($\kappa_1=\kappa_2=0,25$; $\kappa_3=0,5$)	$\Phi 3$ ($\kappa_1=\kappa_3=0,25$; $\kappa_2=0,5$)	$\Phi 4$ ($\kappa_2=\kappa_3=0,25$; $\kappa_1=0,5$)
1	165,083	237,998	125,185	137,068
2	115,097	166,440	87,305	95,035
3	115,639	167,210	87,717	95,494
4	63,854	92,192	48,546	52,760
5	104,196	150,709	79,068	85,968
6	95,541	138,232	72,512	78,774
7	71,571	103,525	54,382	58,973



Рис. 1. Варианты ферм

Библиографический список

1. Юрьев А. Г. Естественный фактор оптимизации топологии конструкций / А. Г. Юрьев // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2013. – № 5. – С. 46–48.
2. Юрьев А. Г. Энергетическое начало в теории синтеза конструкций / А. Г. Юрьев, Л. А. Панченко // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2023. – № 10. – С. 35–39.
3. Юрьев А. Г. Оптимизация структуры металлических ферм / А. Г. Юрьев, В. А. Зинькова, Н. А. Смоляго, О. А. Яковлев // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 7. – С. 41–44.
4. Зинькова В. А. Вариационная постановка оптимизационной задачи для плоских ферм / В. А. Зинькова, А. Г. Юрьев, А. А. Толбатов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1, № 4. – С. 1–10.
5. Зинькова В. А. Оптимизация топологии металлических ферм / В. А. Зинькова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2015. – № 2. – С. 37–40.
6. ГОСТ 30245-2012. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2014. – IV, 27 с.
7. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции : свод правил / Мин-регион России. – Москва : ОАО «ЦПП», 2011. – 171 с.

УДК 539.375.5, 539.4.014, 539.422.23

ОБ УЧЁТЕ ТРЕТЬЕГО ИНВАРИАНТА ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА В ЗАДАЧАХ ПРОБИВАНИЯ ПЛАСТИНЫ ЖЁСТКИМ ТЕЛОМ

Вершинин В.В., Мондрус В.Л.
НИУ МГСУ, г. Москва, Россия

В общем случае прочностные свойства металлов и сплавов при прочих равных (температуре, скорости деформирования и других переменных поля) зависят от всех трёх инвариантов тензора напряжений [1, 2]. Формальным образом это обычно представляется в виде функции предельных накопленных (эквивалентных) деформаций $\bar{\varepsilon}_{pl,f} \equiv \bar{\varepsilon}_{pl,f}(\eta, \bar{\theta})$, или $\bar{\varepsilon}_{pl,f} \equiv \bar{\varepsilon}_{pl,f}(\eta, L)$, которая зависит от двух параметров, однозначно

характеризующих напряжённое состояние тела в точке, – трёхосности напряжённого состояния η и нормированного угла Лоде $\bar{\theta}$, или параметра Лоде-Надаи L .

Функция $\bar{\varepsilon}_{pl,f} \equiv \bar{\varepsilon}_{pl,f}(\eta, \bar{\theta})$, или $\bar{\varepsilon}_{pl,f} \equiv \bar{\varepsilon}_{pl,f}(\eta, L)$, описывает некоторую поверхность двойной кривизны в смешанном пространстве $(\eta, \bar{\theta}, \bar{\varepsilon}_{pl,f})$, или $(\eta, L, \bar{\varepsilon}_{pl,f})$, и её определение (построение) сопряжено с гораздо большими трудозатратами, чем определение (построение) функции $\bar{\varepsilon}_{pl,f} \equiv \bar{\varepsilon}_{pl,f}(\eta)$, обычно используемой при решении рассматриваемых задач.

Для исследования необходимости учёта третьего инварианта тензора напряжений при формализации прочностных свойств материала в задачах пробивания пластины жёстким телом были рассмотрены [3-6] задачи пробивания круглых пластин из алюминиевого сплава Д16Т/2024-Т351 [3, 5, 6] или стали Weldox 700 E [4] различной толщины H , свободных [3] или закреплённых по контуру [4-6], по центру которых происходит нормальный удар жёстким сферическим [3] или цилиндрическим (с плоской, полусферической или оживальной головной частями) [4-6] телом диаметром D со скоростью V_0 .

Рассматриваемые задачи решались численно в программном комплексе SIMULIA Abaqus с использованием метода конечных элементов в лагранжевой постановке для пространственной дискретизации задачи и явной центрально-разностной схемой с автоматическим контролем за соблюдением условия устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви для её дискретизации по времени. Характерный размер конечных элементов принимался таким, что по толщине мишени располагалось от нескольких десятков до нескольких сотен конечных элементов (в зависимости от значения отношения H/D , которое в рассматриваемых задачах изменялось от 0.1 до 2.0).

Ударник моделировался либо как изотропное упругое тело [3], либо как абсолютно жёсткое тело [4-6], что позволило не рассматривать материал ударника с точки зрения его неупругих свойств и существенно упростить задачу.

Неупругое деформирование материала мишени описывалось с помощью критерия текучести Максвелла-Мизеса

$$F = \sqrt{3J_2} - \sigma_y = 0 \quad (1)$$

с параметром $\sigma_y \equiv \sigma_y(\bar{\varepsilon}_{pl}, \dot{\varepsilon}, T)$ в форме Джонсона-Кука [7] и ассоциированного закона пластического течения.

Нагрев материала мишени вследствие выделения тепла при его неупругой работе предполагался адиабатическим вследствие высоких скоростей его деформирования ($\dot{\varepsilon} \sim 10^4 \dots 10^6 \text{ с}^{-1}$) при начальных скоростях ударника $V_0 \sim 10^2 \dots 10^3 \text{ м/с}$.

Прочностные свойства материала мишени задавались с помощью двух- или трёхинвариантных критериев разрушения. В качестве двухинвариантного критерия разрушения использовался критерий Джонсона-Кука [8]:

$$\bar{\varepsilon}_{pl,f} = \left[D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0} \right)^{D_6} \right], \quad (2)$$

где $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ – параметры материала, T_{melt} – температура плавления материала, T_0 – температура в экспериментах, на основании которых определяются параметры $D_1, D_2, D_3, \dot{\varepsilon}_0$ – скорость эквивалентных деформаций в экспериментах, на основании которых определяются параметры D_1, D_2, D_3 . В качестве трёхинвариантных критериев рассматривались модифицированный критерий Мора-Кулона [9]:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{pl,f} = & \left[\frac{K}{c_2} \left\{ c_s + \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} (c_{ax} - c_s) \left(\sec \left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6} \right) - 1 \right) \right\} \right]^{-1/n} \times \\ & \left\{ \sqrt{\frac{1 + c_1^2}{3}} \cos \left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6} \right) + c_1 \left[\eta + \frac{1}{3} \sin \left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6} \right) \right] \right\}^{-1/n} \times, \quad (3) \\ & \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0} \right)^{D_6} \right] \end{aligned}$$

где

$$c_{ax} = \begin{cases} 1 & \text{при } \bar{\theta} \geq 0 \\ c_c & \text{при } \bar{\theta} < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

c_c, c_s, K, n, c_1, c_2 – параметры материала, и критерий Лу-Юна-Ха [10]:

$$\bar{\varepsilon}_{pl,f} = C_3 \left(\frac{2}{\sqrt{L^2 + 3}} \right)^{-C_1} \left(\left\langle \frac{1}{1 + C_0} \left[\eta + \frac{3 - L}{3\sqrt{L^2 + 3}} + C_0 \right] \right\rangle \right)^{-C_2}, \quad (5)$$

где $\langle \rangle$ – скобки Маколея, $C_0, C_1 > 0, C_2 > 0, C_3 > 0$ – параметры материала. Состояние материала в точке (интегрирования) определялось скалярным параметром повреждённости микроструктуры материала D , изменяющегося по следующему закону:

$$\dot{D} = \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_{pl}}{\bar{\varepsilon}_{pl,f}}. \quad (6)$$

Значение $D = 1$ соответствует разрушению материала на макроуровне. Конечный элемент, в котором значение D достигает единицы, удаляется из расчётной схемы. Узлы конечно-элементной сетки, у которых были удалены все прилежащие к ним элементы, сохранялись в расчётной схеме в виде свободных точечных масс.

Калибровка параметров критерия текучести и критериев разрушения материалов мишени (алюминиевого сплава Д16Т/2024-T351 и стали Weldox 700 E) производилась как с использованием данных из литературы [3, 5, 6], так и на основании собственных экспериментов с образцами различной формы, в которых при нагружении реализуются различные напряжённые состояния, испытываемых при разной температуре и разной скорости нагружения [4, 6].

Существенное различие между прочностными свойствами материала, характеризующимися двухинвариантным и трёхинвариантным критериями разрушения, видно на Рис. 1, на котором показаны поверхности разрушения стали Weldox 700 E в смешанном пространстве $(\eta, \bar{\theta}, \bar{\varepsilon}_{pl,f})$. Наибольшая разница между двумя критериями имеет место при чистом сдвиге, а также при растяжении или сжатии в условиях плоского деформированного состояния.

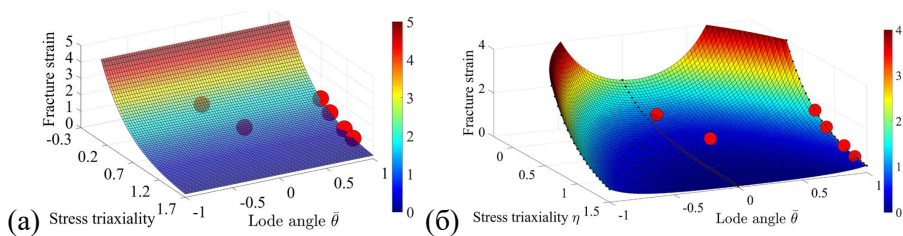


Рис. 1. Поверхность разрушения для стали Weldox 700 E в смешанном пространстве $(\eta, \bar{\theta}, \bar{\varepsilon}_{pl,f})$, определяемая [4]: (а) двухинвариантным критерием Джонсона-Кука (2); (б) трёхинвариантным модифицированным критерием Мора-Кулона (3)-(4)

В каждом расчётном случае единственным различием в математической модели материала мишени был используемый критерий разрушения, двухинвариантный или трёхинвариантный, что позволило напрямую оценить влияние учёта третьего инварианта тензора напряжений при формализации прочностных свойств материала мишени на точность численного решения рассматриваемых задач.

Результаты численного решения сравнивались с экспериментальными данными, полученными с использованием легкогазовых пушек и высокоскоростных камер, как по качественным, так и по количественным параметрам. В качестве количественных характеристик ударного взаимодействия рассматривались баллистический предел V_{bl} и зависимость $V_r(V_0)$ остаточной скорости ударника (при $V_0 > V_{bl}$) от его начальной скорости. Качественной характеристикой ударного взаимодействия двух тел выступал механизм (форма) разрушения мишени.

При сравнении результатов расчётов с экспериментальными данными было выявлено, что во всех рассмотренных задачах [3-6] точность численного решения при использовании трёхинвариантного критерия разрушения оказывается выше как по количественным (см. рис. 2), так и по качественным (см., например, рис. 3) параметрам задачи, чем при использовании двухинвариантного критерия разрушения. Напряжённое состояние конечных элементов мишени в зоне удара, которые претерпевали разрушение в процессе соударения двух тел, представляло собой либо чистый сдвиг, либо растяжение в условиях плоского деформированного состояния (см. рис. 4). Именно при таких напряжённых состояниях разница между прочностными свойствами материала мишени, формально выражаемыми с помощью двух- и трёхинвариантных критериев разрушения, оказывается наибольшей, что и обуславливает полученные численные результаты.

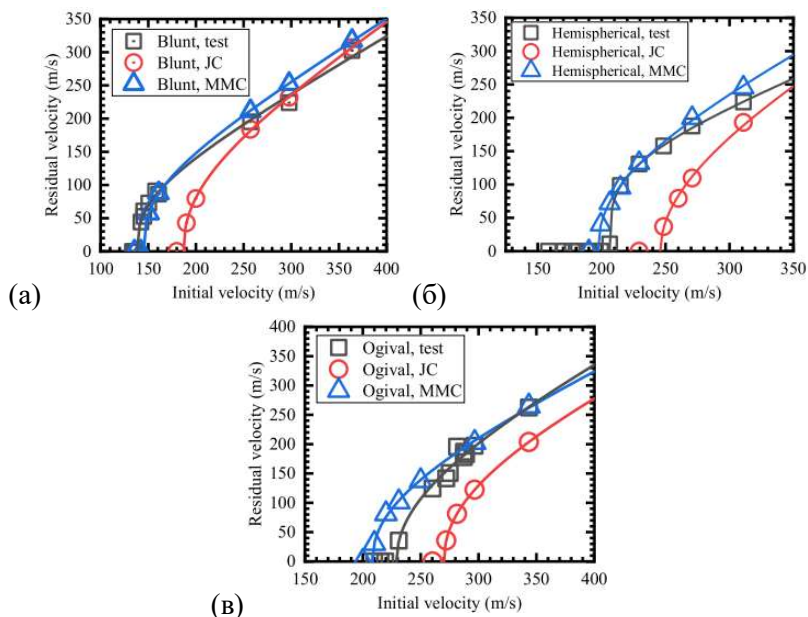


Рис. 2. Сравнение результатов численного решения задачи пробивания круглых защемлённых пластин из алюминиевого сплава 2024-T351 жёстким цилиндрическим ударником с различной формой головной части с экспериментальными данными [5]:

(а) плоская; (б) полусферическая; (в) оживальная

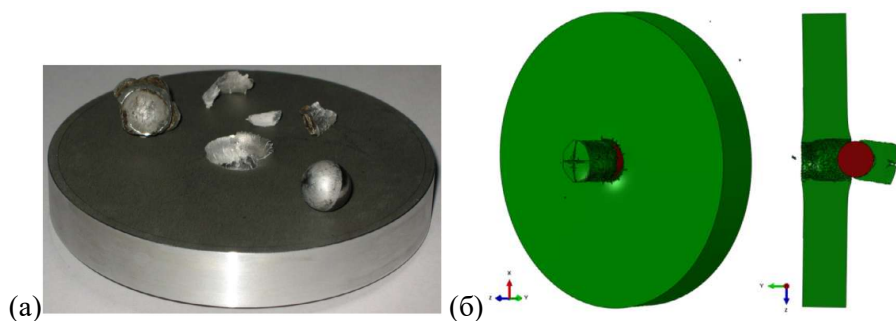


Рис. 3. Разрушение круглой свободной пластины из алюминиевого сплава Д16Т при нормальном ударе по её центру жёсткого сферического ударника [3]: (а) результаты эксперимента: $H/D = 1.22$, $V_0 = 681.2$ м/с; (б) численное решение: $H/D = 1.2$, $V_0 = 640.0$ м/с

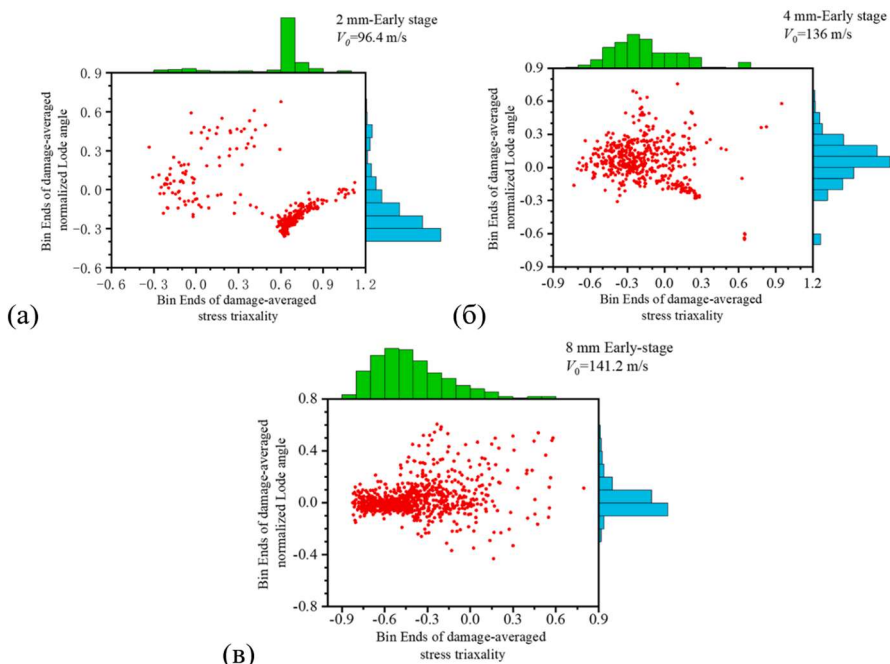


Рис. 4. Осреднённые по повреждённости D материала значения параметров напряжённого состояния η и $\bar{\theta}$ в конечных элементах круглой защемлённой мишени из алюминиевого сплава 2024-T351, разрушающихся в результате нормального удара по центру мишени жёсткого цилиндрического ударника с плоским торцом в начальной фазе ударного взаимодействия [6]: (а) $H/D = 0.16$, $V_0 = 96.4$ м/с; (б) $H/D = 0.32$, $V_0 = 136.0$ м/с; (в) $H/D = 0.63$, $V_0 = 141.2$ м/с

Стоит отдельно отметить, что учёт в критерии разрушения материала мишени третьего инварианта тензора напряжений в случае мишени из стали Weldox 700 E [4] оказывает меньший (положительный) эффект на точность решения, чем в случае мишени из алюминиевого сплава Д16Т/2024-T351 [3, 5, 6]. Это обусловлено гораздо большей пластичностью стали в сравнении с алюминиевым сплавом, так что материал стальной мишени в зоне удара до достижения им деформаций разрушения претерпевает нагрев (вследствие выделения тепла при неупругой работе материала) до температур, близких к его температуре плавления. В таком состоянии материал мишени делает незначительный вклад в свою общую работу по восприятию начальной кинетической энергии

ударника, что уменьшает разницу в результатах численных расчётов с использованием двух- и трёхинвариантных критериев разрушения материала мишени, которая могла бы иметь место, если бы адиабатический нагрев материала мишени при его неупругой работе не учитывался.

На основании полученных результатов [3-6] можно сделать заключение, что при решении задач пробивания пластины жёстким телом необходимо учитывать все три инварианта тензора напряжений при формализации прочностных свойств материала мишени.

Библиографический список

1. Bao Y. Prediction of ductile crack formation in uncracked bodies : дис. ... PhD : Department of Ocean Engineering / Y. Bao. – Cambridge, MA : Massachusetts Institute of Technology, 2003. – 253 p.
2. Bai Y. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence / Y. Bai, T. Wierzbicki // International Journal of Plasticity. – 2008. – Vol. 24. – Iss. 6. – P. 1071–1096.
3. Vershinin V. V. Validation of metal plasticity and fracture models through numerical simulation of high velocity perforation / V. V. Vershinin // International Journal of Solids and Structures. – 2015. – Vol. 67–68. – P. 127–138.
4. Xiao X. Effect of Lode angle in predicting the ballistic resistance of Weldox 700 E steel plates struck by blunt projectiles / X. Xiao, Y. Wang, V. V. Vershinin, L. Chen, Y. Lou // International Journal of Impact Engineering. – 2019. – Vol. 128. – P. 46–71.
5. Wang Y. Effect of Lode angle incorporation into a fracture criterion in predicting the ballistic resistance of 2024-T351 aluminum alloy plates struck by cylindrical projectiles with different nose shapes / Y. Wang, X. Chen, X. Xiao, V. V. Vershinin, R. Ge, D.-s. Li // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – Vol. 139. – Art. 103498. – 18 p.
6. Han J. Experimental and numerical investigation on the ballistic resistance of 2024-T351 aluminum alloy plates with various thicknesses struck by blunt projectiles / J. Han, Y. Shi, Q. Ma, V. V. Vershinin, X. Chen, X. Xiao, B. Jia // International Journal of Impact Engineering. – 2022. – Vol. 163. – Art. 104182. – 17 p.
7. Johnson G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. – The Hague : American Defense Preparedness Association : Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 1983. – P. 541–547.

8. Johnson G. R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Engineering Fracture Mechanics. – 1985. – Vol. 21. – Iss. 1. – P. 31–48.

9. Bai Y. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture / Y. Bai, T. Wierzbicki // International Journal of Fracture. – 2010. – Vol. 161. – Iss. 1. – P. 1–20.

10. Lou Y. Modeling of shear ductile fracture considering a changeable cutoff value for stress triaxiality / Y. Lou, J. W. Yoon, H. Huh // International Journal of Plasticity. – 2014. – Vol. 54. – P. 56–80.

УДК 624.19.034.5

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБДЕЛКИ ПОДВОДНОГО ТОННЕЛЯ

Воронина И.Ю.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Интенсивное развитие транспортной инфраструктуры крупных городов, мегаполисов и отдельных регионов приводит к увеличению объемов строительства подводных тоннельных переходов, что позволяет разгрузить существующие наземные маршруты. При проектировании таких уникальных сооружений, как подводные тоннели, необходимо учитывать глубину и ширину водной преграды, интенсивность судоходства, местные условия береговой планировки и застройки, а также инженерно-геологические и гидрологические условия. Такой подход позволяет выбрать оптимальный способ возведения подземных конструкций, который будет соответствовать требованиям безопасности.

В Тульском государственном университете ведется научная работа, связанная с изучением влияния инженерно-геологических условий в месте строительства на напряженное состояние обделок подводных тоннелей. С этой целью разработан аналитический метод расчета, основанный на математическом моделировании взаимодействия обделки кругового подводного тоннеля и окружающего массива пород как элементов единой деформируемой системы «подземная конструкция - массив» [1]. Для реализации модели рассматривается плоская задача теории упругости, расчетная схема которой представлена на рис. 1.

Здесь среда S_0 , ограниченная отверстием L_0 и границей полуплоскости L'_0 , моделирует массив пород дна водоема. Кольцо S_1 моделирует обделку тоннеля и деформируются совместно со средой. Действие давления

воды на дно пересекаемого водоема моделируется равномерно распределенной по всей границе полуплоскости нагрузкой интенсивностью $P = -\gamma_w H_w$ (γ_w - удельный вес воды, H_w - глубина водоема). Внутренний контур колец свободен от действия внешних сил.

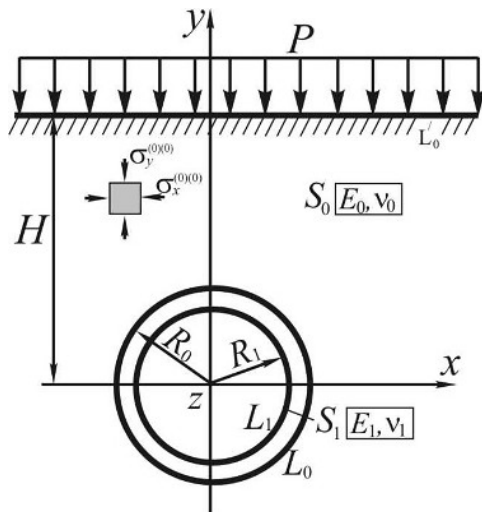


Рис. 1. Расчетная схема

Как показано в работе [1], совместное действие собственного веса пород и давления воды на дно водоема моделируется наличием в среде S_0 начальных напряжений, определяемых по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_x^{(0)(0)} &= -[\lambda^* \gamma^* (H - y) + \gamma_w H_w], \\ \sigma_y^{(0)(0)} &= -[\gamma^* (H - y) + \gamma_w H_w], \quad \tau_{xy}^{(0)(0)} = 0,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\gamma^* = \gamma$, $\lambda^* = \lambda$ - в водонепроницаемых породах; $\gamma^* = \tilde{\gamma} + \gamma_w$, $\lambda^* = \lambda + (1 - \lambda)\gamma_w / \gamma^*$ - в обводненных породах; γ - удельный вес пород, МН/м³; $\tilde{\gamma}$ - удельный вес обводненных пород с учетом взвешивающего действия воды, МН/м³; λ - коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве; H - расстояние от прямолинейной границы до начала декартовой системы координат, м.

Необходимо отметить, что в результаты расчета обделки подводного тоннеля вводится корректирующий множитель α^* , определяемый по методике расчета, предложенной Н.С. Булычевым в работе [2].

Полные напряжения $\sigma_x^{(0)*}$, $\sigma_y^{(0)*}$, $\tau_{xy}^{(0)*}$ в среде S_0 представляются в виде сумм:

$$\sigma_x^{(0)*} = \sigma_x^{(0)(0)} + \sigma_x^{(0)}; \quad \sigma_y^{(0)*} = \sigma_y^{(0)(0)} + \sigma_y^{(0)}; \quad \tau_{xy}^{(0)*} = \tau_{xy}^{(0)(0)} + \tau_{xy}^{(0)}, \quad (2)$$

где $\sigma_x^{(0)}$, $\sigma_y^{(0)}$, $\tau_{xy}^{(0)}$ - дополнительные напряжения в области S_0 , обусловленные наличием отверстий. Смещения рассматриваются только дополнительные.

Начальные напряжения в кольце S_1 полагаются равными нулю.

Граничные условия задачи для определения дополнительных напряжений и смещений имеют вид:

- на границе L'_0

$$\sigma_y^{(0)} = 0, \quad \tau_{xy}^{(0)} = 0; \quad (3)$$

- на контуре L_0

$$\begin{cases} \sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(0)} + \sigma_r^{(0)(0)}, & \tau_{r\theta}^{(1)} = \tau_{r\theta}^{(0)} + \tau_{r\theta}^{(0)(0)}, \\ u_x^{(1)} = u_x^{(0)}, & u_y^{(1)} = u_y^{(0)}, \end{cases} \quad (4)$$

- на контуре L_1

$$\sigma_r^{(1)} = 0, \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = 0. \quad (5)$$

В условиях (3)-(5) введены следующие обозначения: $\sigma_y^{(0)}$, $\tau_{xy}^{(0)}$ - дополнительные нормальные и касательные напряжения на прямолинейной границе L'_0 в декартовой системе координат, $u_x^{(l)}$, $u_y^{(l)}$ ($l=0,1$) - дополнительные горизонтальные и вертикальные смещения точек контура L_0 ; $\sigma_r^{(0)}$, $\tau_{r\theta}^{(0)}$ - дополнительные радиальные и касательные напряжения в точках контура L_0 в среде S_0 в полярной системе координат; $\sigma_r^{(1)}$, $\tau_{r\theta}^{(1)}$ - дополнительные радиальные и касательные напряжения в кольце S_1 в полярной системе координат; $\sigma_r^{(0)(0)}$, $\tau_{r\theta}^{(0)(0)}$ - радиальные и касательные начальные напряжения после перехода к полярной системе координат в формулах (1).

Сформулированная задача теории упругости решается с использованием теории аналитических функций комплексного переменного [3], аналитического продолжения комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили через границу полуплоскости [4] и комплексных рядов.

В качестве примера приведены результаты расчета монолитной бетонной обделки тоннеля, сооружаемого щитовым способом под дном водоема. Тоннель пройден в обводненных породах с модулем деформации $E_0 = 1250$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu_0 = 0,24$. Глубина водоема в расчетном сечении $H_w = 9,5$ м (удельный вес воды $\gamma_w = 0,01$ МН/м³). В расчетах принимались следующие исходные данные: удельный вес пород $\gamma = 0,027$ МН/м³, глубина заложения тоннеля $H = 9$ м, наружный и внутренний радиусы обделки равны $R_0 = 4,4$ м и $R_1 = 4,0$ м, коэффициент бокового давления грунта в ненарушенном массиве $\lambda = 0,32$. Для бетона обделки тоннеля приняты деформационные характеристики $E_1 = 30000$ МПа, $\nu_1 = 0,2$ (расчетные сопротивления бетона на сжатие и растяжение - $R_b = 14,5$ МПа и $R_{bt} = 1,05$ МПа). Для учета влияния отставания возведения подземной конструкции от забоя выработки расчетные напряжения в обделке тоннеля умножаются на корректирующий коэффициент $\alpha^* = 0,6$.

На рис. 2 приведены результаты расчета - эпюры нормальных тангенциальных напряжений на внешних $\sigma_\theta^{(ex)}$ (в МПа) и внутренних $\sigma_\theta^{(in)}$ (в МПа) контурах поперечного сечения обделки (рис. 2 а), изгибающих моментов M (в кНм) и продольных сил N (в МН) (рис. 2 б).

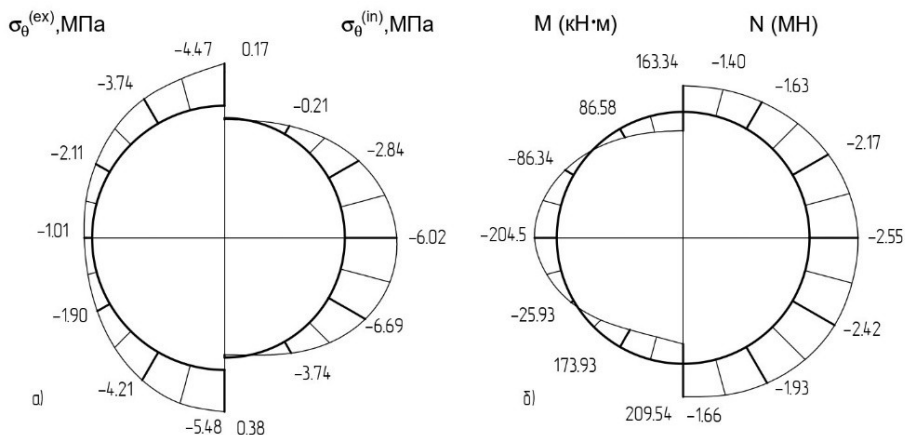


Рис. 2. Эпюры нормальных тангенциальных напряжений (а) и усилий (б) в обделке тоннеля

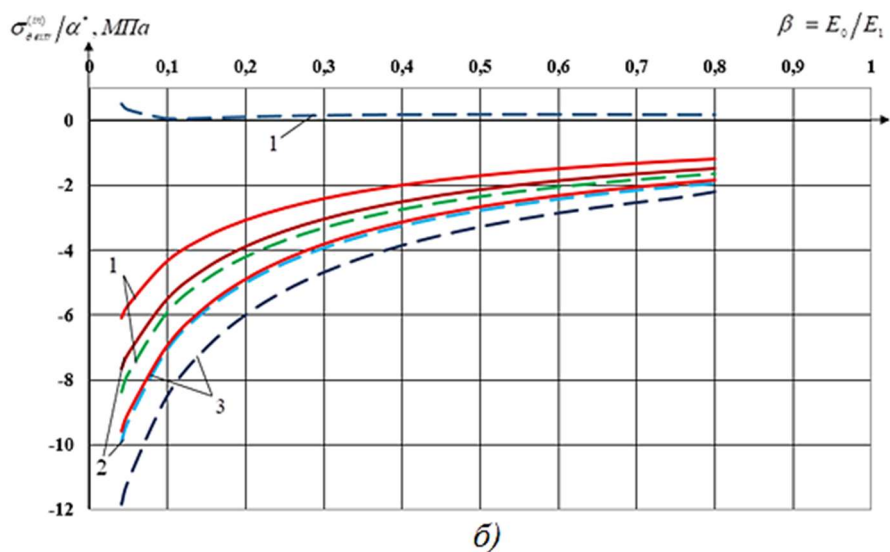
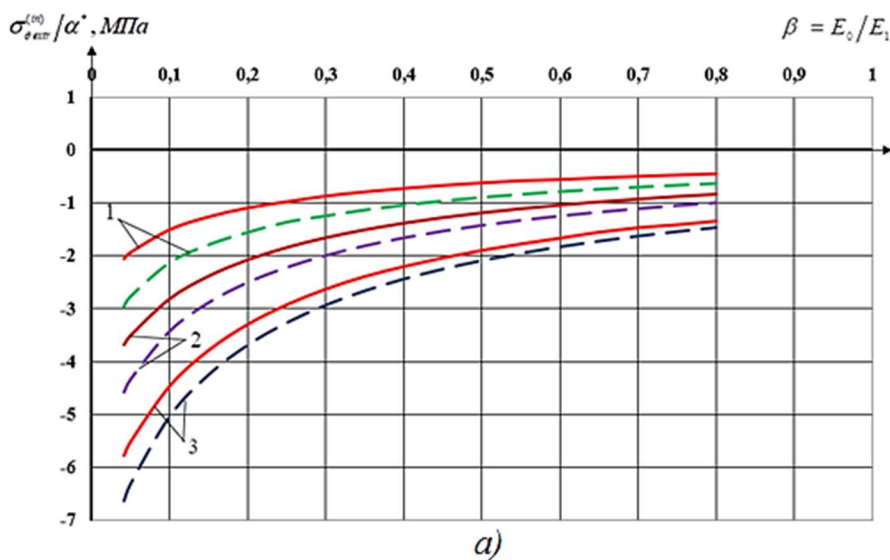


Рис. 3. Зависимости экстремальных напряжений $\sigma_{\theta \text{ extr}}^{(in)} / \alpha^*$ в обделке подводного тоннеля от отношения β при относительной высоте налегающей толщи $H'/R_0 = 1$ и $H'/R_0 = 5$

Как видно из рис. 2 сжимающие напряжения $\sigma_{\theta}^{(in)}$ принимают максимальные значения в точках внутреннего контура обделки при $\theta = 210^{\circ}$ и $\theta = 330^{\circ}$. Растягивающие напряжения возникают в точках вертикального диаметра контура (при $\theta = 90^{\circ}$ и $\theta = 270^{\circ}$). При этом экстремальные (максимальные сжимающие и максимальные растягивающие) напряжения в обделке тоннеля не превышают значения расчетных сопротивлений сжатию и растяжению, следовательно, прочность подземной конструкции обеспечена.

Для исследования влияния отношения модулей деформации массива пород и материала обделки $\beta = E_0/E_1$ на экстремальные нормальные тангенциальные напряжения $\sigma_{\theta \text{ extr}}^{(in)}/\alpha^*$ выполнялись многовариантные расчеты при разной относительной высоте налегающей толщи H'/R_0 .

Зависимости $\sigma_{\theta \text{ extr}}^{(in)}/\alpha^*$ от отношения β рассмотренной подземной конструкции при $H'/R_0 = 1$ и $H'/R_0 = 5$ приводятся на рис. 3 а и б соответственно. Кривые 1, 2, 3 соответствуют случаям относительной глубины пересекемого водоема $H_w/R_0 = 1; 5; 10$ (сплошными линиями даны зависимости, полученные в предположении водонепроницаемости пород, пунктирными линиями – с учетом фильтрации воды вглубь массива).

Из представленных на рис. 3 зависимостей видно, что в рассмотренных случаях максимальные сжимающие напряжения с увеличением отношения β снижаются, причем, чем больше относительная глубина водоема H_w/R_0 , тем это снижение сильнее. Например, в случае $H_w/R_0 = 1$ максимальные сжимающие напряжения с увеличением отношения β снижаются в 4,5 раза, как в предположении водонепроницаемости пород, так и с учетом фильтрации воды вглубь массива, а при $H'/R_0 = 5$ – в 5 раз в обоих случаях. Следует отметить, что растягивающие напряжения в обделке тоннеля возникают только при относительной глубине заложения $H'/R_0 = 5$ в обводненном массиве пород.

Библиографический список

1. Fotieva N. N. Study of parallel undersea or under-river tunnel linings stress state / N. N. Fotieva, I. Yu. Voronina // Proceeding of the VII-th Regional Rock Mechanics Symposium, 21-22 October 2004. – Sivas, Turkey, 2004. – P. 389–393.

2. Булычев Н. С. О расчете обделок тоннелей в очень слабых грунтах / Н. С. Булычев // Проблемы подземного строительства в XXI веке : сборник научных трудов международной конференции, 25–26 апреля 2002 г. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2002. – С. 35–37.

3. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили. – Москва: Наука, 1966. – 707 с.

4. Араманович И. Г. Распределение напряжений в упругой полуплоскости, ослабленной подкрепленным круговым отверстием / И. Г. Араманович // Доклады Академии наук СССР. – 1955. – Т. 104, № 3. – С. 372–375.

УДК 624.04

РАСЧЕТ ГИБКОЙ ПЛАСТИНЫ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ НАГРУЖЕНИЙ

Горбачева О.А.

СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

В настоящее время имеется большое количество исследований по решению нелинейных задач строительной механики различными аналитическими [1] и численными методами [2,3]. Однако методы расчета позволяющие учитывать историю нагружений конструкции с получением решения в аналитическом виде требуют больших трудозатрат, в том числе машинного времени. Итерационные методы весьма чувствительны к выбору нулевого приближения, особенно при учете геометрической нелинейности.

В работе [4] Петров В.В. предложил модифицированный метод последовательных нагружений (ММПН), который объединяет возможности метода последовательных нагружений (МПН) и метода Ньютона-Канторовича (МНК). Если нулевое приближение выходит за радиус сходимости решения, то даже при большом количестве итераций решение будет иметь большую погрешность. Суть ММПН заключается в том, что нулевое приближение метода Ньютона-Канторовича для всего диапазона изменения нагрузки строится методом последовательных нагружений, что позволяет построить кривую «нагрузка-прогиб» с достаточной инженерной точностью не разделяя нагрузку на большое количество слоев, а на каждом этапе нагружений нулевое приближение уточняется методом Ньютона-Канторовича, обладающим высокой сходимостью.

Исследуем некоторые особенности модифицированного метода последовательных нагружений к геометрически нелинейным задачам. В

качестве примера рассмотрим задачу изгиба гибкой шарнирно опертой по контуру пластины нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q_0 . (рис. 1). Для этого нам необходимо иметь систему уравнений Кармана в инкрементальной форме в безразмерном виде [1]:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^4 \Delta \psi_n + L(u_{n-1}, \Delta u_n) &= 0, \\ \nabla^4 \Delta u_n - 12(1 - \mu^2) [L(\psi_{n-1}, \Delta u_n) + L(u_{n-1}, \Delta \psi_n) + \Delta p_n(\xi, \eta)] &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots).$$

и систему уравнений метода Ньютона-Канторовича для гибкой пластины в инкрементальной форме в безразмерном виде [1]

$$\left. \begin{aligned} \nabla^4 \Delta \psi_r + L(u_{r-1}, \Delta u_r) &= -\nabla^4 \psi_{r-1} - \frac{1}{2} L(u_{r-1}, u_{r-1}), \\ \nabla^4 \Delta u_r - 12(1 - \mu^2) [L(\psi_{r-1}, \Delta u_r) + L(u_{r-1}, \Delta \psi_r)] &= \\ = -\nabla^4 u_{r-1} + 12(1 - \mu^2) [L(\psi_{r-1}, u_{r-1}) + p(\xi, \eta)], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$(r = 1, 2, 3, \dots).$$

здесь n – номер этапа нагружения МПН, r – номер итерации МНК $\Delta u_n(\xi, \eta) = \Delta W(x, y) / h$ – приращение безразмерного прогиба МПН, $u_{n-1}(\xi, \eta) = W(x, y) / h$ – безразмерный прогиб, накопленный на предыдущем нагружении, $\Delta \psi_n(\xi, \eta) = \Delta \varphi(x, y) / Eh^3$ – приращение безразмерной функции усилий МПН, $\psi_{n-1}(\xi, \eta) = \varphi(x, y) / Eh^3$ – безразмерная функция усилий, накопленная на предыдущем нагружении, u_{r-1}, ψ_{r-1} – безразмерный прогиб и функция усилий накопленные на предыдущей итерации, $\Delta u_r, \Delta \psi_r$ – приращение безразмерного прогиба и функции усилий, $\Delta p_n(\xi, \eta) = \Delta q(x, y) a^2 b^2 / Eh^4$ – приращение безразмерной равномерно распределенной поперечной нагрузки $p(\xi, \eta)$, L – дифференциальный оператор вида

$$L = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} - 2 \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} \quad (3)$$

Для решения линеаризованных уравнений (1) и (2) применим метод внутренней коллокаций (МК). Координатные функции ищем в виде произведения главной части решения на корректирующую функцию, которая в случае прогиба симметричного относительно осей ξ и η будет иметь вид неполного полинома с четными степенями:

$$\begin{aligned} u_n^*(\xi, \eta) &= \omega(\xi, \eta) \sum K_N \xi^{2N} \eta^{2N}, \quad \Delta u_n^*(\xi, \eta) = \omega(\xi, \eta) \sum \Delta K_N \xi^{2N} \eta^{2N}, \\ \psi_n^*(\xi, \eta) &= \phi(\xi, \eta) \sum T_N \xi^{2N} \eta^{2N}, \quad \Delta \psi_n^*(\xi, \eta) = \phi(\xi, \eta) \sum \Delta T_N \xi^{2N} \eta^{2N}, \\ u_r^*(\xi, \eta) &= \omega(\xi, \eta) \sum M_N \xi^{2N} \eta^{2N}, \quad \Delta u_r^*(\xi, \eta) = \omega(\xi, \eta) \sum \Delta M_N \xi^{2N} \eta^{2N}, \\ \psi_r^*(\xi, \eta) &= \phi(\xi, \eta) \sum P_N \xi^{2N} \eta^{2N}, \quad \Delta \psi_r^*(\xi, \eta) = \phi(\xi, \eta) \sum \Delta P_N \xi^{2N} \eta^{2N}, \\ &\quad (N = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_N, \Delta K_N, T_N, \Delta T_N, M_N, \Delta M_N, P_N, \Delta P_N$ – обобщенные координаты и приращения обобщенных координат, N – номер узла коллокации, $*$ – обозначение приближенного решения. Учитывая граничные условия шарнирного опирания пластины по контуру, базисные функции $\omega(\xi, \eta)$ и $\phi(\xi, \eta)$ выбираем в следующем виде [1]:

$$\omega(\xi, \eta) = \cos \pi \xi \cdot \cos \pi \eta, \quad \phi(\xi, \eta) = \cos \pi \xi \cdot \cos \pi \eta. \quad (5)$$

Подставляя (4) в системы уравнений ММППН (1) и (2), получим невязки решений

$$\left. \begin{aligned} F_1(\xi, \eta, \Delta K_N, \Delta T_N) &= \nabla^4 \Delta \psi_n^* + L(u_{n-1}, \Delta u_n^*), \\ F_2(\xi, \eta, \Delta K_N, \Delta T_N) &= \nabla^4 \Delta u_n^* - 12(1 - \mu^2) \left[L(\psi_{n-1}, \Delta u_n^*) + \right. \\ &\quad \left. + L(u_{n-1}, \Delta \psi_n^*) + \Delta p(\xi, \eta) \right]; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} F_3(\xi, \eta, \Delta M_N, \Delta P_N) &= \nabla^4 \Delta \psi_r^* + L(u_{r-1}, \Delta u_r^*) + \nabla^4 \psi_{r-1} + \frac{1}{2} L(u_{r-1}, u_{r-1}), \\ F_4(\xi, \eta, \Delta M_N, \Delta P_N) &= \nabla^4 \Delta u_r^* - 12(1 - \mu^2) \left[L(\psi_{r-1}, \Delta u_r^*) + L(u_{r-1}, \Delta \psi_r^*) + \right. \\ &\quad \left. + p(\xi, \eta) + L(\psi_{r-1}, u_{r-1}) \right] + \nabla^4 u_{r-1}. \end{aligned} \right\}$$

Метод коллокации является одним из простых методов для решения линейных дифференциальных уравнений, однако для получения решения с достаточной точностью необходимо использовать большое коли-

чество узлов коллокаций. Для уменьшения количества узлов и упрощения расчета без потерь точности решения автором предложена методика выбора системы узлов коллокаций на основе пропорции «золотого сечения», которая показала быструю сходимость решения при расчете линейных и физически нелинейных задач [5,6].

Выбранная система узлов представлена на рис.1. Так как нагрузка и условия закрепления симметричны в обоих направлениях осей координат, рассмотрена одна четверть пластины. Для получения первого узла коллокации А, отрезок от центра до края пластины делится пропорцией золотого сечения, где первый отрезок к центру берется коротким. Далее полученный длинный отрезок снова делится пропорцией золотого сечения, в результате получаем узел коллокации В. Таким же образом получаем точки С и D.

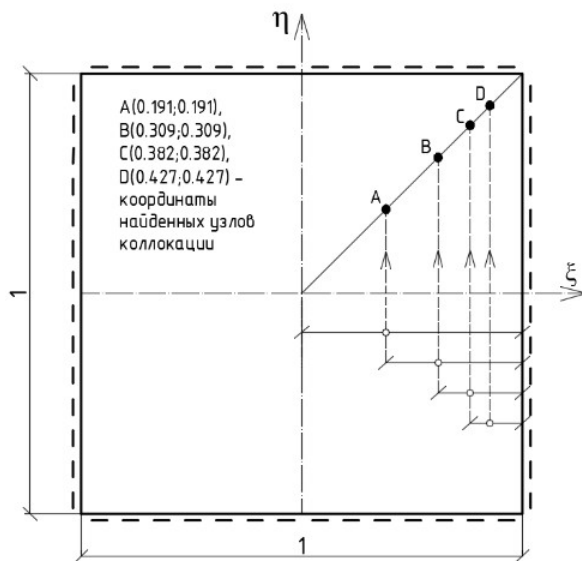


Рис. 1. Расчетная схема гибкой пластины

Приравняв невязки решения (6) нулю в определенных узлах коллокации (Рис. 1), получаем системы линейных алгебраических уравнений для расчета этапов МПН

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1(\xi_s, \eta_s, \Delta K_N, \Delta T_N) = 0 \\ F_2(\xi_s, \eta_s, \Delta K_N, \Delta T_N) = 0 \end{array} \right\}_{s=A,B,C,D} \quad (7)$$

и системы линейных алгебраических уравнений для расчета МНК

$$\left\{ \begin{array}{l} F_3(\xi_s, \eta_s, \Delta M_N, \Delta P_N) = 0 \\ F_4(\xi_s, \eta_s, \Delta M_N, \Delta P_N) = 0 \end{array} \right\}_{s=A,B,C,D} \quad (8)$$

здесь ξ_s, η_s - координаты конкретных узлов коллокаций (узел А – первое приближение МК; узлы А, В – второе приближение МК; узлы А, В, С – третье приближение МК; узлы А, В, С, D – четвертое приближение МК). Решая эти системы уравнений, найдем коэффициенты $\Delta K_N, \Delta T_N, \Delta M_N, \Delta P_N$ и, подставляя их в (4), получим искомые функции приращения прогиба гибкой пластинки. Далее по известным формулам определяем необходимые характеристики НДС пластины.

В таблице 1 приведены значения прогиба в центре пластины полученные ММПН методом коллокаций в первом, втором, третьем и четвертом приближениях.

Таблица 1. Значения прогиба в центре пластины

	Номер итерации ММПН	Первое приближе ние МК	Второе приближе ние МК	Третье приближе ние МК	Четвертое приближе ние МК
u(0,0)	1 этап МПН	1.017	1.158	1.096	1.136
	1 этап МНК	0.793	1.004	0.903	0.967
	2 этап МНК	0.813	1.019	0.915	0.967
	3 этап МНК	0.813	1.019	0.915	0.967
	2 этап МПН	1.391	1.854	1.606	1.747
	1 этап МНК	1.267	1.722	1.475	1.625
	2 этап МНК	1.264	1.72	1.473	1.623
	3 этап МНК	1.264	1.72	1.473	1.623
	3 этап МПН	1.623	2.311	1.936	2.179
	1 этап МНК	1.572	2.235	1.889	2.128
	2 этап МНК	1.571	2.235	1.888	2.127
	3 этап МНК	1.571	2.235	1.888	2.127
	4 этап МПН	1.837	2.685	2.274	2.592
	1 этап МНК	1.809	2.639	2.282	2.567
	2 этап МНК	1.809	2.639	2.285	2.567
	3 этап МНК	1.809	2.639	2.285	2.567

Результаты, приведенные в таблице 1, показывают высокую сходимость ММПН. Использование методики построения узлов коллокаций с

применением «пропорций золотого сечения» позволяет существенно уменьшить их число. Если использовать в качестве нулевого приближения результаты, полученные МПН, то достаточно одной итерации МНК (разница между 1 и 2 итерациями на всех этапах нагружений менее 1,5%). На рис. 2 изображены зависимости «нагрузка-прогиб» в центре пластины полученные при расчете ММПН с применением МК в первом, втором, третьем и четвертом приближениях, решение полученное А.С. Вольмиром [7] и область экспериментальных значений для искривляющихся кромок [7].

При анализе зависимостей «нагрузка-прогиб» в центре пластины на рис. 2, наблюдается знакопеременная сходимости метода коллокаций. Точное решение находится в диапазоне между третьим и четвертым приближением. Для расчетов с инженерной точностью достаточно получить решение ММПН с методом коллокаций в первом приближении (разница прогиба в центре при $P=100$ составляет 5% с решением Вольмира). Для получения решения с более высокой точностью нужно использовать ММПН с МК в третьем приближении, так как разница между третьим и четвертым приближением при $P=100$ меньше 10% и третье приближение лежит в области, полученной по экспериментальным данным.

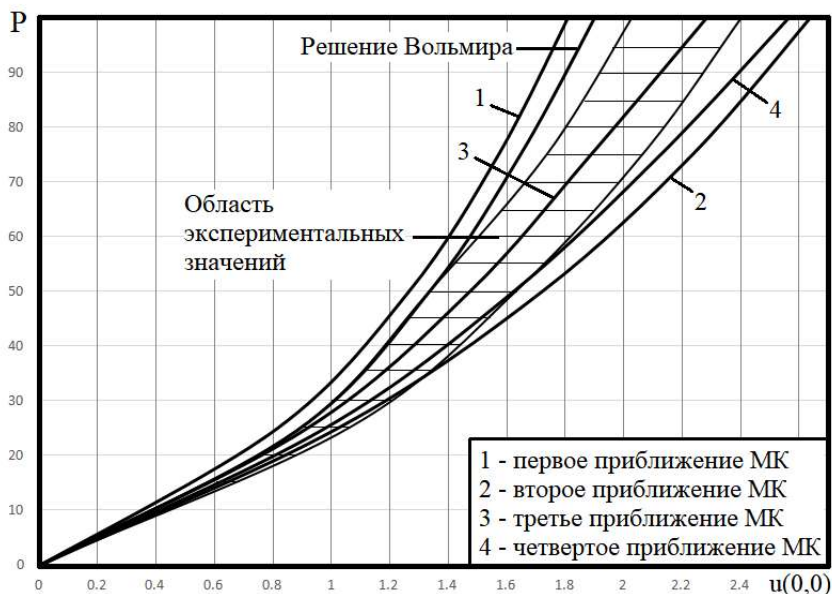


Рис. 2. Зависимости «нагрузка-прогиб» в центре пластины

При подстановке координат заданной точки пластины в (6), получим значение, которое показывает отличие приближенного решения от точного решения. Совокупность таких значений отложенных перпендикулярно нулевой плоскости называется поверхностью невязки решения. На рис. 3-6 изображены поверхности невязок решения полученные при решении ММПН при нагрузке $P=100$ с применением метода коллокаций в первом и третьем приближениях.

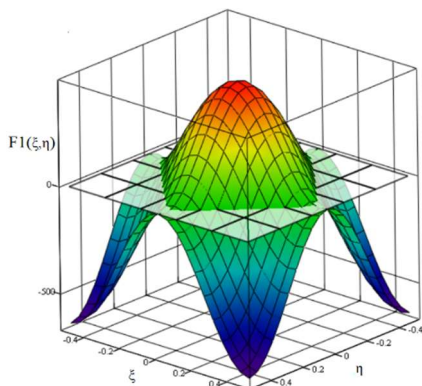


Рис. 3. Поверхность невязки решения F1 (1 приближение МК)

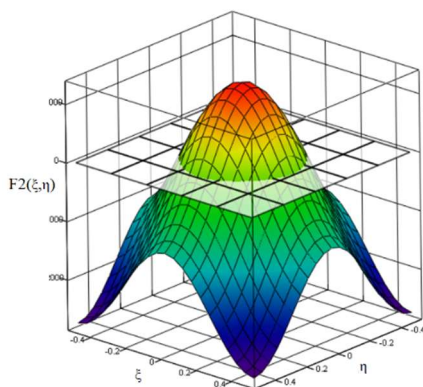


Рис. 4. Поверхность невязки решения F2 (1 приближение МК)

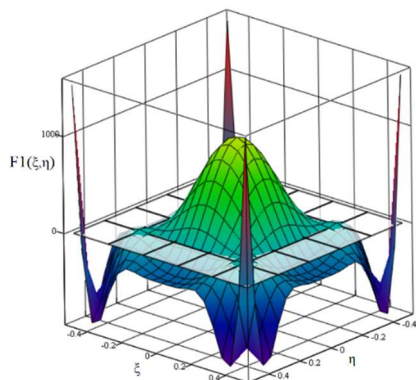


Рис. 5. Поверхность невязки решения F1 (3 приближение МК)

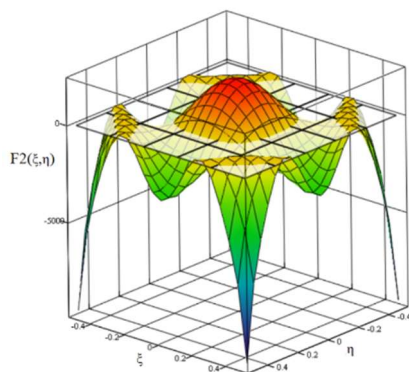


Рис. 6. Поверхность невязки решения F2 (3 приближение МК)

На рис. 3-5 видно, что максимальные значения невязок решения наблюдаются в малой окрестности углов пластины, в окрестностях, примыкающих к контуру, и в центральной области пластины. С увеличением числа узлов коллокаций значения невязок решения заметно уменьшаются в окрестностях центра пластины и в областях пластины, примыкающих к контуру. Следует также отметить, что угловые точки пластины следует рассматривать как «особые точки», в малой окрестности которых возникает объемное напряженное состояние, наличие которого не соответствует уравнению С. Жермен. Поэтому эти зоны необходимо исключить из рассмотрения.

Можно сделать вывод, что при проектировании конструкций с учетом геометрической нелинейности получить решение с инженерной точностью можно модифицированным методом последовательных нагружений с применением метода коллокаций в первом приближении, если использовать выбранную систему узлов коллокаций построенную на основе пропорции золотого сечения. При этом возникает возможность представить решение в виде формул удобных для вычислений.

Библиографический список

1. Петров В. В. Нелинейная строительная механика : учебник / В. В. Петров. – Москва : Изд-во АСВ, 2019. – 432 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – Москва : Мир, 1975. – 541 с.
3. Ильин В. П. Численные методы решения задач строительной механики / В. П. Ильин, В. В. Карпов, А. М. Масленников. – Москва : Изд-во АСВ, 2005. – 425 с.
4. Petrov V. V. Nonlinear Structural Analysis Based on the Modified Sequential Load Method / V. V. Petrov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Vol. 17, No. 4. – P. 146–152.
5. Горбачева О. А. К расчету пластин методом коллокаций / О. А. Горбачева // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 1(20). – С. 69–72.
6. Петров В. В. Расчет пластины из нелинейно-упругого материала методом коллокаций / В. В. Петров, О. А. Горбачева // Вестник Приволжского территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук : сборник научных трудов. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 124–128.
7. Вольмир А. С. Гибкие пластинки и оболочки / А. С. Вольмир. – Москва : Гостехиздат, 1956. – 419 с.

УДК 691

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНОЙ СТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РФ И ЕВРОКОДОВ

Долгих Н.Г., Судакова И.А.

ТулГУ, г. Тула, Россия

На сегодняшний день вопрос о взаимодействии европейской (EN) и российской систем (СП) нормирования в строительстве может быть рассмотрен в контексте повышения эффективности проектирования стальных конструкций (использования лучших практик), а также сохранения сотрудничества с рядом стран, в которых используются иные нормативные документы, в основу нормирования которых положен Еврокод (например, республики Беларусь и Казахстан). В связи с различием расчетов по отечественным нормативным документам и по европейским нормам (включая предельные состояния, терминологию, буквенные обозначения величин и т.д.) появляется необходимость в оценке результатов, полученных по разным нормам.

Сопоставление прочностных и деформационных расчётов стальных стропильных ферм, выполненных с учётом норм проектирования Российской Федерации и Еврокодов, представляет собой малоисследованную область, которая недостаточно освещена в научной литературе. При этом использование современного программного комплекса «ЛИРА-САПР» позволяет провести численные оценки для рассматриваемых моделей в составе сложной конструкции здания.

Национальные объединения строителей и проектировщиков уже начали проводить работу по техническому анализу большинства частей Еврокодов.

Результаты говорят о том, что по большому счету, между Еврокодами и СП гораздо больше сходства, чем различий.

Рассмотрим некоторые результаты сопоставительных расчетов:

1. Согласно [7] при сопоставительном расчете металлоконструкций многопролетного одноэтажного здания выяснилось, что по расходу стали на прогоны, балки и колонны разница варьируется от 12 % до 16 % с перерасходом по Еврокоду. При проведении сопоставительного расчета стальных конструкций каркаса двухпролетного одноэтажного здания с мостовыми кранами показатели перерасхода стали составили 13–30 % по сравнению с расчетами по российским нормам. Это объясняется

тем, что снеговые и ветровые нагрузки по Еврокоду значительно превышают нагрузки, рассчитанные по нормам СП. По снегу превышение составляет почти двукратное, по ветру – более 30 %

2. При сопоставительном расчете стальных вертикальных цилиндрических резервуаров объемом 50 000 м³ со стальной стационарной сферической крышей выяснилось, что в списке возможных национально определяемых параметров EN 1991–1-3 [5] отсутствует снеговая нагрузка на сферические купольные покрытия. При этом в Еврокодах запрещается менять (дополнять, изменять) список национально определяемых параметров. Следовательно, проектирование резервуаров с применением Еврокода невозможно.

3. В СП [1] единственный раздел, где прослеживается разница в расчете элементов с сечениями разных классов – это расчет изгибаемых элементов. Фундаментальный подход один и тот же, вытекающий из сопротивления материалов – необходимо найти максимальное напряжение в сечении и сравнить его с пределом текучести.

Однако, прослеживаются некоторые различия в деталях:

- в проверке по напряжениям при сложном напряженном состоянии СП [1] допускает 15 % превышение R_y , а Еврокод 3 [5] нет.

- в Еврокод 3 [5] есть указания по расчету на кручение, в частности, о возможности пренебречь свободным кручением при расчете сечений открытого профиля.

- относительно пластичности все наоборот. Методики расчета абсолютно различные, но в Еврокод 3 [5] она значительно проще, охватывает больше сечений и, кроме того, учитывает еще и кручение:

- при проверке в пластике используется пластический момент сопротивления W_{pl} , который соответствует образованию пластического шарнира, т. е. исчерпанию несущей способности сечения.

- в российских нормах же используется коэффициент «с», соответствующий максимальной остаточной деформации после разгрузки $3R_y/E$. Если W_{pl} можно для любого профиля взять из набора его геометрических характеристик (он равен удвоенному статическому моменту, который фигурирует в формуле Журавского), то алгоритм получения «с» требует длительных операций, интерполяции и прочего. При этом добавочная величина от $3R_y/E$ по сравнению с W_{pl} составляет последнее слагаемое в числителе. Максимальное различие составляет около 2%, поэтому все сложности математических раскладок теряют актуальность и расчет по Еврокод 3 [1] более оптимален при расчете на изгиб.

- помимо этого, среди различий, в СП [6] в отличие от Еврокода учитывается бимомент. В Еврокод 3 [5] упоминание о нем есть и даже в разделе «Обозначения» есть символы для него и напряжений от него. Есть также указание, что нормальные напряжения от бимомента существуют, и что в пластической стадии нужно учитывать составляющую от бимомента, полученную из упругого расчета, но без упоминания конкретных формул. В СП [1] для сечений 1-го класса формула содержит бимомент, а для 2-го и 3-го – нет. Что не совсем логично, так как только одна часть сечений, и соответственно, элементов, рассчитывается с учетом бимомента. Поэтому влияние бимомента на прочность элементов ставиться под вопрос, как и необходимость его расчета.

Таким образом, расчет по СП 16.13330.2017 Стальные конструкции и Еврокоду 3 EN 1993–1–1–2009 обладает как различиями, так и сходствами, и для дальнейшего согласования требует доработки на уровне разработчиков норм как с одной, так и с другой стороны.

Результаты говорят о том, что по большому счету, между Еврокодами и СП гораздо больше сходства, чем различий.

В качестве объекта для сравнительного анализа было взято промышленное здание в металлическом каркасе. Стальной каркас представляет собой прямоугольное в плане здание с габаритными размерами в осях 30,0×49,5 м. Этажность здания: – одноэтажное в осях 1-10/А-В. Высота здания в коньке составляет ≈12,1 м.

Фундаменты производственного модуля выполнены на искусственном свайном основании. Фундаменты представляют собой монолитные свайные ростверки. Все сваи – буровые диаметром 450 мм.

Колонны основного каркаса приняты стальными из прокатных профилей постоянного по высоте сечения, без крановых консолей. Шаг колонн в продольном направлении составляет 5,5 м. Колонны отличаются между собой длиной, конструкцией и отметкой базы. Базы колонн приняты жесткими в поперечном направлении, плита базы имеет толщину 30 мм. Базы подкреплены траверсами и ребрами жесткости из стальных листов толщиной 12 мм.

Несущими элементами покрытия здания являются стропильные фермы. Пролет ферм составляет 15.0 м. Очертание ферм – трапециевидное, высота ферм с низкой стороны 1028 мм (в осях), с высокой стороны 2836 мм (в осях). Фермы имеют раскосную решетку с нисходящими опорными раскосами, шаг узлов по верхнему и нижнему поясам составляет 2.1 м.

Таблица 1. Сравнительный анализ результатов расчёта для металлического каркаса

№	Параметр	Расчет в ПК «ЛИРА- САПР» по СП	Расчет в ПК «ЛИРА- САПР» по ЕН	Расхождение, %
Сравнение результатов расчета стального каркаса в целом				
1	Вертикальные перемещения, мм (РСН)	–29,6	–29,6	0%
Сравнение результатов расчета ферм				
2	Коэффициенты использо- вания (нижний пояс) по 1 ПС, макс.зн.	59,6	65	9,1%
3	Коэффициенты использо- вания (нижний пояс) по 2 ПС, макс.зн.	91,7	93	1,4%
4	Коэффициенты использо- вания (верхний пояс) по 1 ПС, макс.зн.	17,7	19	7,3%
5	Коэффициенты использо- вания (верхний пояс) по 2 ПС, макс.зн.	30,9	31	0,3%
6	Коэффициенты использо- вания (раскосы) по 1 ПС, макс.зн.	48,9	53,6	8,8%
7	Коэффициенты использо- вания (раскосы) по 2 ПС, макс.зн.	52,3	53	1,3%
8	Коэффициенты использо- вания (центральная стойка) по 1 ПС, макс.зн.	23,2	21,3	8,2%
9	Коэффициенты использо- вания (центральная стойка) по 2 ПС, макс.зн.	48,7	49	0,6%
10	Вертикальные перемещения, мм (РСН)	–4,02	–4,02	0%

Все элементы ферм выполнены из гнутых замкнутых сварных профилей квадратного сечения: пояса 120×7 мм, раскосы 80×6 мм. Узлы ферм выполнены бесфасоночными на сварке, разница ширины сечения поясов и раскосов в 40 мм позволяет качественно наложить сварные швы. По верхним поясам ферм уложены прогоны из прокатных двутавров 30Б1. Шаг прогонов $1.8 \div 2.26$ м, пролет 5.5 м.

Все металлоконструкции запроектированы (за исключением фланцев в соединении нижних поясов ферм на высокопрочных болтах) из стали марки С255.

Кровельное ограждение выполнено из 3-х слойных сэндвич-панелей толщиной 150 мм. Шаг опирания панелей на прогоны составляет 2,1 м в горизонтальной проекции, что в соответствии с графиком несущей способности обеспечивает восприятие снеговой нагрузки для III снегового района.

Стеновое ограждение выполнено навесным из 3-х слойных сэндвич-панелей толщиной 120 мм с минераловатным утеплителем группы НГ.

Расчет выполнен с применением ПК ЛИРА-САПР.

В таблице 1 (выше) приведен сравнительный анализ результатов расчётов.

Результаты расчетов стальных конструкций, выполненных в ПК «ЛИРА-САПР» по СП 16.13330.2017 и Еврокод 3 EN 1993-1-1:AC 2009 показывают в целом хорошее соответствие (расхождение основных параметров составляет не более 20%) и, как следствие, получившиеся расхождения являются приемлемыми для инженерных расчетов.

В данной работе выполнен анализ и сравнительное исследование подходов к проектированию стальных стропильных ферм в рамках российских норм СП и европейских Еврокодов. Проведенное исследование позволило выявить различия в методиках расчета, оценить потенциал гармонизации нормативных документов и перспективы практического применения.

В работе достигнуты следующие основные результаты:

1. Проведен анализ норм СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» и Eurocode 3 EN 1993-1-1:AC 2009, что позволило выявить их основные сходства и различия.

2. Сформулированы потенциальные барьеры для внедрения Еврокодов в практику проектирования в России. Это включает терминологические, методологические и метрологические различия, а также отсутствие полной адаптации Еврокодов к климатическим и эксплуатационным условиям РФ.

3. Разработана математическая модель, позволяющая оценить деформативность и прочность стропильных ферм с учетом требований обоих стандартов. Это позволило получить обоснованные результаты, подтвержденные расчетами в программном комплексе ЛИРА-САПР.

4. Выполнен сравнительный расчет стропильной фермы, проектируемой по нормам СП и Еврокодов, в составе каркаса производственного здания. Установлено, что конструктивный расчёт по Еврокоду, даёт большие значения коэффициентов использования, чем расчёт по СП.

На основании проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Гармонизация российских норм с Еврокодами является перспективным направлением, способным повысить конкурентоспособность российской строительной отрасли на международном уровне. Для этого требуется дальнейшее развитие программ перевода и адаптации Еврокодов с учетом национальных особенностей.

2. Результаты сравнительных расчетов могут быть использованы для разработки новых методических рекомендаций, способствующих оптимизации конструктивных решений.

3. Применение современных расчетных программ, таких как ЛИРА-САПР, является неотъемлемой частью процесса проектирования. При этом необходимо продолжать развивать и адаптировать данного класса программы для обеспечения их совместимости с различными нормативными базами.

Перспектива дальнейших исследований заключаются в продолжении гармонизации нормативных баз, создании дополнительных инструментов для расчетов сложных конструкций, а также развитии информационного пространства для взаимодействия проектировщиков разных стран.

Библиографический список

1. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции : актуализированная редакция СНиП II-23-81* : свод правил / Минстрой России. – Введ. 2017-08-28. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 151 с.

2. Стебаков Е. И. NormCAD: руководство, примеры расчета / Е. И. Стебаков. – Реутов : ООО ЦРСАП «САПРОТОН», 2016. – 196 с. : ил.

3. Алмазов В. О. Гармонизация строительных норм: необходимость и возможности / В. О. Алмазов // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 1. – С. 51–54.

4. Божилина М. Д. Сравнительный анализ Еврокодов и Российских норм на проектирование строительных конструкций / М. Д. Божилина. – Москва, 2016. – 13 с.

5. Выдержки из строительных Еврокодов : пособие для студентов строительных специальностей / перевод с английского ; под редакцией В. О. Алмазова. – Москва : МГСУ, 2011. – 718 с.

6. Гульванесян Х. Руководство для проектировщиков к Еврокоду EN 1990 / Х. Гульванесян, Ж.-А. Калгаро, М. Голицки ; перевод с английского. – Москва : НИУ МГСУ, 2012. – 264 с.

7. Пугачев С. В. Применение Еврокодов в строительстве / С. В. Пугачев // СтройПРОФИ. – 2014. – № 21. – С. 16–21.

УДК 624.131.551.4:539.3

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ЖИЛЫЕ ЗДАНИЯ

Дятлов В.В.¹, Гриднев С.Ю.^{1,2}, Скалько Ю.И.²

¹*ВГТУ, г. Воронеж, Россия*

²*МФТИ, г. Долгопрудный, Россия*

Введение. Большинство зданий и сооружений возводится и эксплуатируется на грунтовом основании. При воздействии совокупности нагрузок на строительную конструкцию основание включается в совместную работу с сооружением. Самым распространенным методом расчета строительных конструкций в настоящее время является численный метод конечных элементов. Современные программные комплексы на его базе позволяют строить расчетные модели зданий и сооружений совместно с грунтовым основанием для выполнения расчетов. Задачей инженера-проектировщика является выбор модели основания и назначение ее оптимальных параметров для достоверности получаемых результатов. Программные комплексы, реализующие данный метод, позволяют учитывать грунтовое основание двумя способами.

Первый способ – заменой грунтового массива ограниченным числом параметров (коэффициентов постели), отражающих его свойства.

Второй способ – построение совместной модели основания и сооружения с использованием плоских или объемных конечных элементов грунта. При этом размеры законтурной области грунта в плане принимают на 1 м больше зоны контакта основания с сооружением. Алгоритм

определения коэффициентов постели связан с определением осадки основания, вычисляемой по схеме линейно деформируемого полупространства с условным ограничением глубины сжимаемой толщи, определяемой по СП 22.13330 [1].

Поскольку в нашем исследовании динамическое воздействие передается через грунтовый массив на жилое здание и решается динамическая задача, то эти подходы не применимы. При этом критически важным условием корректности модели выступает выбор достаточных размеров расчетной области, минимизирующих влияние граничных условий на формирование напряженно-деформированного состояния системы в целом. В этом случае возникает вопрос о размерах расчетной области грунтового основания. Появляется необходимость определения глубины и ширины расчетной области, при которых не будет происходить искажение характера распространения упругих волн в грунте.

В рамках выполняемых научных исследований по изучению условий образования стоячих волн в элементах конструкций рамно-связевых систем при динамическом воздействии транспортных потоков, постановка и этапы выполнения которых подробно доложены на IX Международном симпозиуме Российской академии архитектуры и строительных наук «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», проходившем в мае этого года в г. Пензе [2], выполнено численное исследование для оптимизации размеров плоского грунтового массива в программном комплексе ЛИРА САПР. Рассмотрено 2 типа грунта: глина и супесь, как наиболее часто встречающиеся инженерно-геологические условия городской застройки.

Также были использованы специальные конечные элементы для моделирования плоского безграничного грунтового массива, расположенного за пределами расчетной схемы, с целью уменьшения трудоемкости численных расчетов.

Постановка задачи при оптимизации грунтового основания.

На этом этапе используется упрощенная модель передачи возмущения, имитирующего воздействие транспортного потока, через грунтовое основание на точку поверхности вблизи здания (Рис. 1). Источник возмущения расположен на расстоянии 10 м от здания, что соответствует минимальному допустимому расстоянию от жилого дома до края проезжей части с учетом возможности парковки автомобилей, согласно Сан-Пин 2.2.1/2.1.1.1200-03 [3]. В качестве простейшей модели динамической нагрузки от транспортного потока принята переменная сила $P(t)$,

изменяющаяся по гармоническому закону с амплитудой 1 т и частотой, соответствующей доминирующей частоте транспортных источников, равной 15 Гц [4].

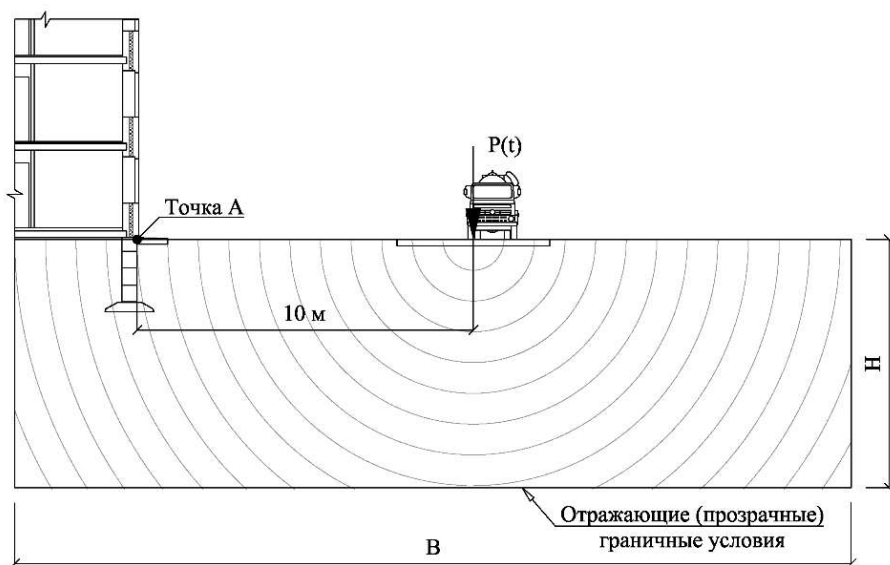


Рис. 1. Схема этапа исследования при оптимизации размеров однородного грунтового основания

Определение оптимальных размеров грунтового основания. Согласно [4], основная часть энергии динамических техногенных нагрузок переносится к сооружениям поверхностными волнами Рэлея, которые распространяются преимущественно в верхней части грунтовой толщи до глубин 10 - 15 м. Исходя из этого, принимаем первоначальную глубину расчетной области $H = 15$ м и варьируем ширину грунтового массива B с шагом 5 м. В качестве критерия сходимости принимаем далее горизонтальное и вертикальное перемещения точки A поверхности.

Полученные результаты расчетов сведены в таблицу (табл. 1). Ниже представлены графики горизонтальных (Рис.2) и вертикальных (Рис.3) перемещений точки A при заданной глубине расчетной области $H = 15$ м для различных значений ширины B .

При увеличении ширины расчетной области наблюдается сходимость линейных перемещений точки A . Подбор ширины завершаем на значении $B = 60$ м.

Затем выполняем подбор глубины расчетной области H шагом 5 м, при заданном значении ширины $B = 60$ м.

Полученные результаты расчетов сводим в таблицу (Табл.2). Ниже представлены графики горизонтальных (Рис.4) и вертикальных (Рис.5) перемещений точки А при заданной ширине расчетной области $B = 60$ м для различных значений глубины H .

Таблица 1. Перемещения точки А при $H = 15$ м.

$H=15$ м	Глина		Супесь	
B , м	x , мм	z , мм	x , мм	z , мм
25	0,000687478	0,001682169	0,001663865	0,001579182
30	0,001025486	0,001688157	0,001990868	0,001915434
35	0,001295435	0,001481231	0,002000861	0,002037475
40	0,001465346	0,001335698	0,001913991	0,002148804
45	0,001555889	0,001260134	0,001827329	0,002214136
50	0,001599423	0,001225247	0,001770034	0,002252314
55	0,001619028	0,001210049	0,001739024	0,002276055
60	0,00162748	0,001203647	0,001724169	0,002291347

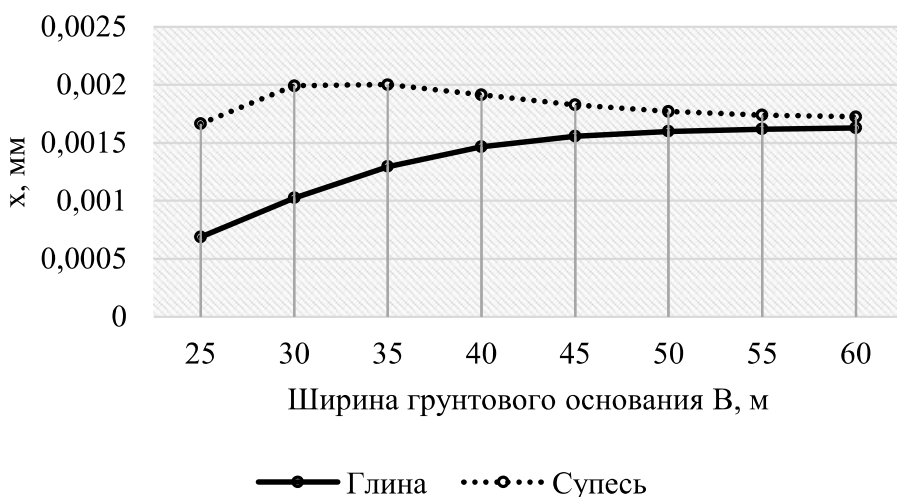


Рис. 2. Горизонтальные перемещения точки А при $H = 15$ м

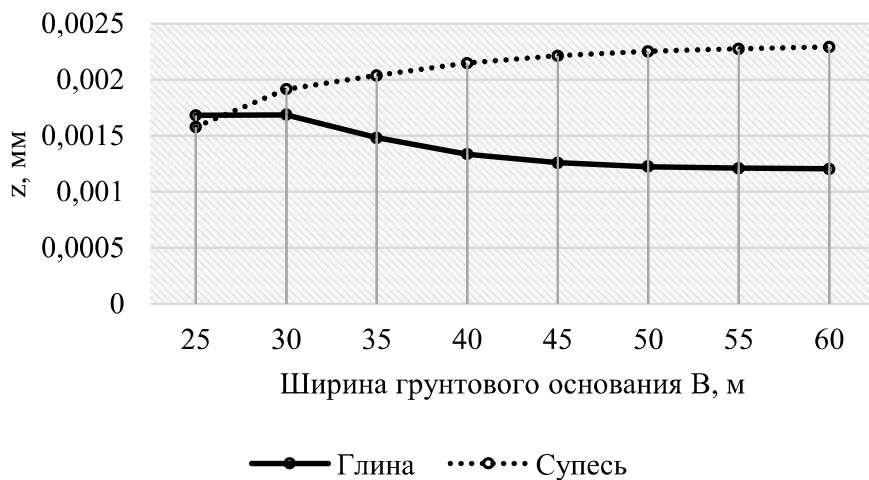


Рис. 3. Вертикальные перемещения точки А при Н = 15 м

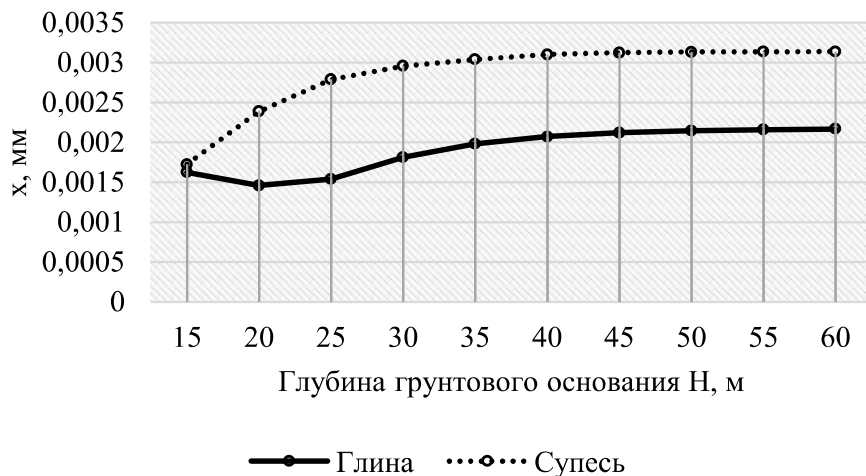


Рис. 4. Горизонтальные перемещения точки А при В = 60 м

Поскольку сходимость результатов начинает наблюдаться при значениях глубины Н = 30 м и более, можно сделать вывод, что оптимальным соотношением глубины Н к ширине В расчетной области является отношение 1 к 2.

Дальнейший расчет проводим с целью определения оптимальных размеров основания в соотношении $H \times B = 1 \times 2$.

Полученные результаты расчетов приведены в таблице (табл. 3). Ниже показаны графики горизонтальных (рис. 6) и вертикальных (Рис.7) перемещений точки А при заданном соотношении глубины расчетной области к ширине $H \times B = 1 \times 2$.

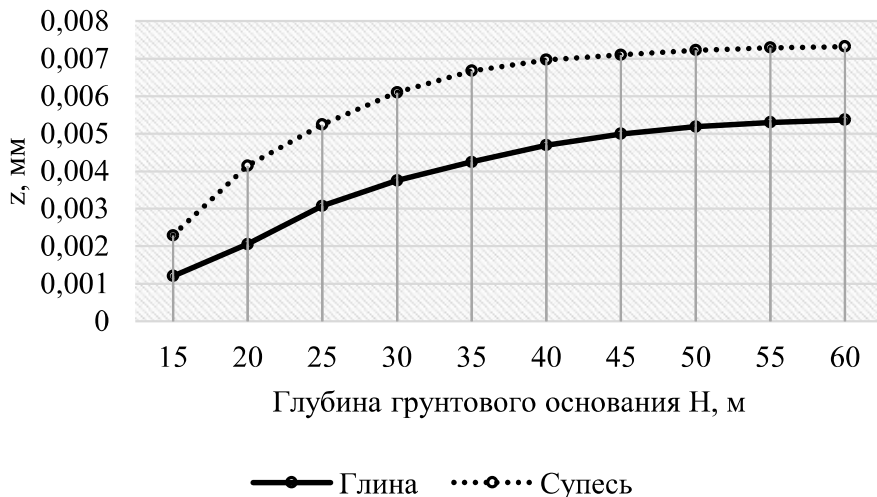


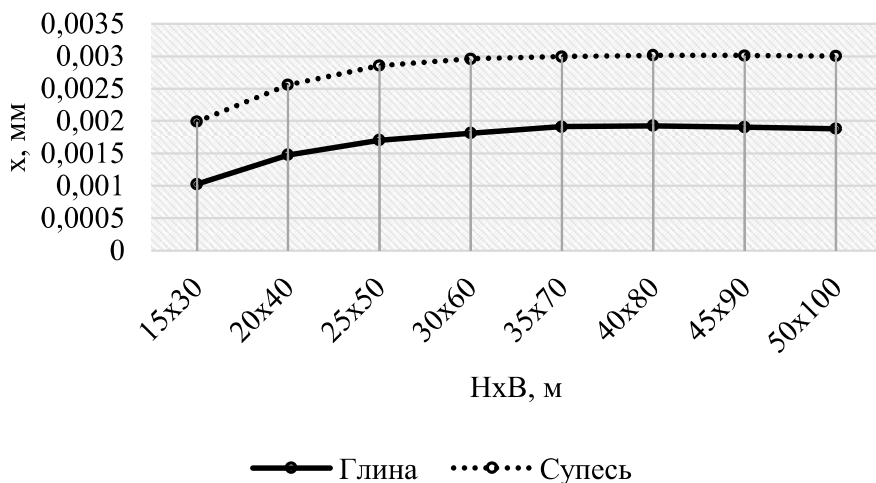
Рис. 5. Вертикальные перемещения точки А при $B = 60$ м

Таблица 2. Перемещения точки А при $B = 60$ м

В=60м	Глина		Супесь	
	х, мм	z, мм	х, мм	z, мм
15	0,00162748	0,001203647	0,001724169	0,002291347
20	0,001460084	0,002052613	0,0023873	0,004145194
25	0,001539682	0,003076167	0,002788608	0,00524694
30	0,001814252	0,003750593	0,002959208	0,006101427
35	0,001981517	0,004245837	0,003041014	0,006676423
40	0,00207166	0,004697437	0,003101376	0,006966287
45	0,002120282	0,004996911	0,003124843	0,007100429
50	0,002146686	0,005185953	0,003133429	0,00722336
55	0,002160989	0,005300103	0,003136391	0,007292333
60	0,002168633	0,005366215	0,003137351	0,007323766

Таблица 3. Перемещения точки А при $H \times B = 1 \times 2$.

HxB, м	Глина		Супесь	
	x, мм	z, мм	x, мм	z, мм
15x30	0,001025486	0,001688157	0,001990868	0,001915434
20x40	0,001477383	0,001321469	0,002558201	0,003854717
25x50	0,001705765	0,00273531	0,002855538	0,005146362
30x60	0,001814252	0,003750593	0,002959208	0,006101427
35x70	0,001912627	0,00454428	0,002994447	0,006778791
40x80	0,001926223	0,005192351	0,003013942	0,007122469
45x90	0,001905558	0,005603918	0,003009743	0,007386544
50x100	0,001880712	0,005852134	0,003003139	0,007557194


Рис. 6. Горизонтальные перемещения точки А при $H \times B = 1 \times 2$

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод, что при размерах расчетной области основания $H \times B = 35 \times 70$ м результаты демонстрируют достаточную сходимость.

Поскольку сходимость результатов расчетов грунтового массива наблюдается при размерах основания 35×70 м и более, встает вопрос о возможном снижении трудоемкости моделирования основания путем использования конечных элементов для моделирования безграничного грунтового массива.

Использование специальных конечных элементов безграничного грунтового массива. Сравнение результатов.

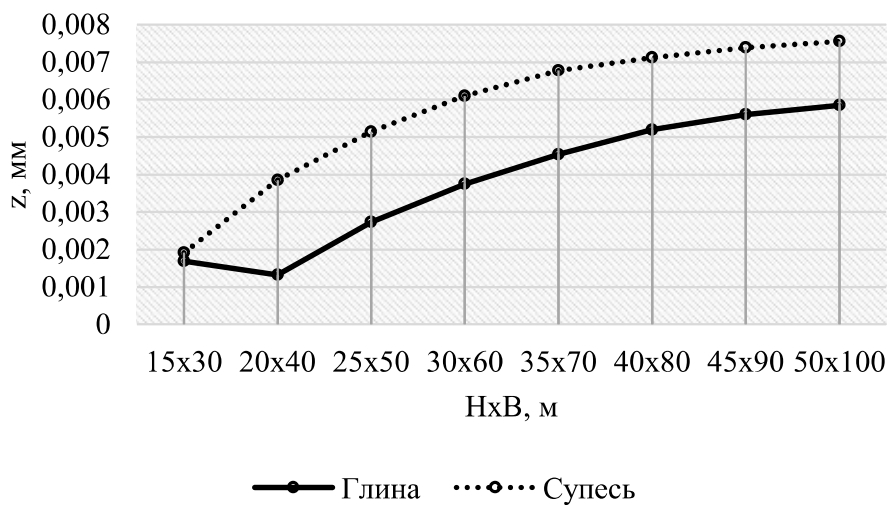


Рис. 7. Вертикальные перемещения точки А при $H \times B = 1 \times 2$

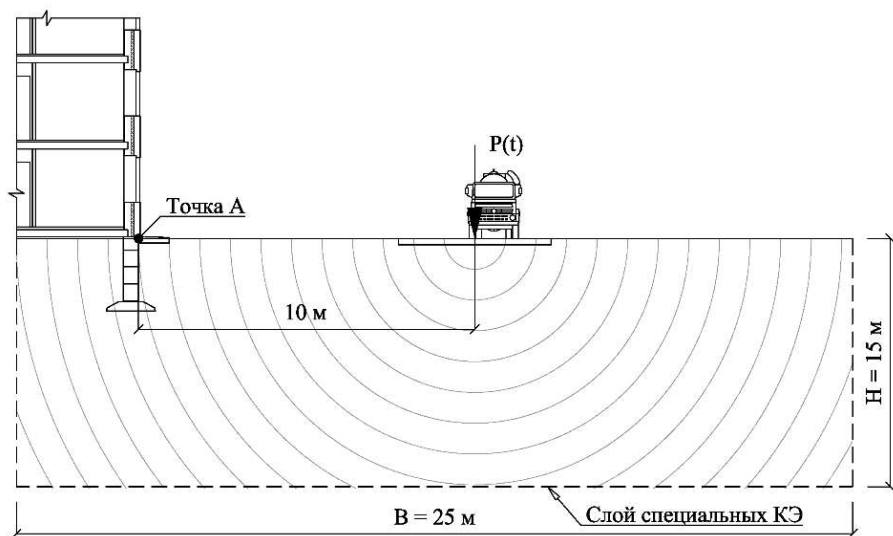


Рис. 8. Схема с использованием специальных конечных элементов

В качестве альтернативы для оптимизированной расчетной схемы, полученной опытным путем, рассмотрена схема с наименьшими из заданных ранее размерами $H=15$ м и $B=25$ м (рис.8). По контуру данной схемы заданы прозрачные граничные условия с использованием конечных элементов для моделирования безграничного грунтового массива, расположенного за пределами расчетной области.

Результаты расчета двух схем сведены в таблицу (табл.4) и по ним построены графики сравнения горизонтальных (рис. 8) и вертикальных (рис. 9) перемещений узла в точке А.

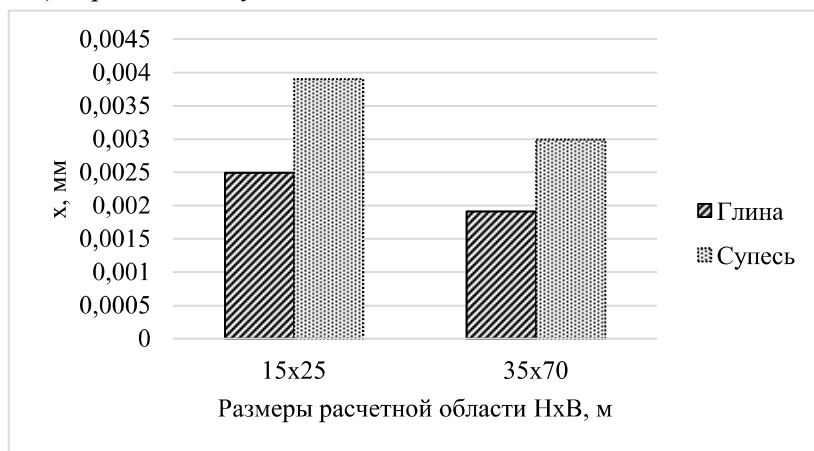


Рис. 9. Горизонтальные перемещения точки А

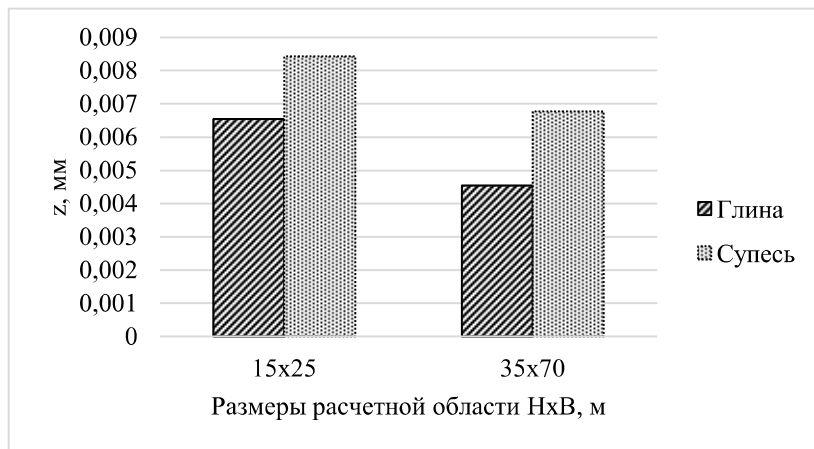


Рис. 10. Вертикальные перемещения точки А

Таблица. 4. Перемещения точки А

Н х В, м	Глина		Супесь	
	х, мм	z, мм	х, мм	z, мм
15х25	0,002488418	0,006543064	0,003903154	0,008427188
35х70	0,001912627	0,00454428	0,002994447	0,006778791

По результатам проведенной работы можно следующие выводы:

1. При решении рассматриваемых задач необходимо подбирать оптимальные размеры грунтового основания для каждой конкретной задачи.
2. Сходимость результатов мало зависит от типа грунта основания. Влияние динамической нагрузки на основание, сложенное из песчаных грунтов, более значительно. Перемещения точек поверхности песчаного основания при воздействии динамических нагрузок превышают аналогичные для глиняного грунта при прочих равных.
3. Использование специальных конечных элементов, моделирующих безграничный грунтовой массив, решает вопрос оптимизации грунтового основания и позволяет получать достоверные результаты, избегая необходимости рассматривать несколько расчетных схем с целью поиска их оптимальных размеров. Таким образом, применение специальных конечных элементов безграничного грунтового основания позволяет существенно снизить размерность задачи и трудоемкость расчета без потери точности результатов.

Библиографический список

1. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений : актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* : свод правил / Минстрой России. - Москва : Стандартинформ, 2016. - 163 с.
2. Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов IX Международного симпозиума / ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет архитектуры и строительства". - Пенза : Изд-во ПГУАС, 2025. - С. 187-188.
3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов : санитарные правила и нормы. - Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2003. - 47 с.
4. Вознесенский Е. А. Поведение грунтов при динамических нагрузках : учебное пособие / Е. А. Вознесенский. - Москва : Изд-во МГУ, 1997. - 288 с.

УДК 624.131.551.4:539.3

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЛНОВОДА В ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ НА ХАРАКТЕР РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ НАГРУКИ ОТ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Дятлов В.В.¹, Гриднев С.Ю.^{1,2}, Скалько Ю.И.²

¹*ВГТУ, г. Воронеж, Россия*

²*МФТИ, г. Долгопрудный, Россия*

Движущийся транспорт является одним из основных источников техногенного вибрационного воздействия на близлежащие здания и сооружения. Исследования такого влияния, передаваемого через грунтовое основание, на фундаменты зданий и далее конструкции проводятся уже достаточно давно. При формировании общих расчетных моделей строительных конструкций совместно с основаниями, находящимися под динамическими нагрузками, модели грунта авторами принимаются очень упрощенно. Это в ряде случаев не позволяет учесть ни особенности самого основания, ни особенности возникающих в основании распространения волн от источников возмущения.

Значительная часть работ по изучению воздействия вибраций на строительные конструкции при их передаче через грунтовый массив, относится к исследованиям железнодорожного транспорта и метро, однако исследование динамических воздействий от транспортных потоков в условиях городской застройки требует дополнительного рассмотрения из-за многообразия расчетных ситуаций.

Исследования этой проблемы проводятся по нескольким направлениям. В основе подавляющего числа исследований лежат анализ результатов натурных испытаний и расчеты с использованием конечноэлементных программных комплексов, а также верификация результатов. Большинство авторов приходят к мнению, что универсального метода определения динамических воздействий, передающихся через грунтовый массив, невозможно добиться и каждая отдельная задача требует индивидуального подхода.

Научные исследования на тему «Оценка влияния автомобильных транспортных потоков на НДС зданий рамно-связевых систем» можно разделить на следующие этапы (рис. 1):

1) анализ современных исследований динамического воздействия транспортных потоков в условиях городской застройки и выделение регулярных составляющих с максимальными по величине значениями;

2) моделирование прохождения волн возмущения по грунтовому основанию с учетом изменения их параметров при образовании естественных и искусственно созданных в результате хозяйственной деятельности волноводов;

3) моделирование распространения волн возмущения по строительной конструкции с возможностью образования стоячих волн между их элементами;

4) оценка сохранности конструкций рамно-связевых систем при увеличении амплитуд стоячих волн из-за подкачки энергии со стороны регулярной составляющей возмущения от транспортного потока.

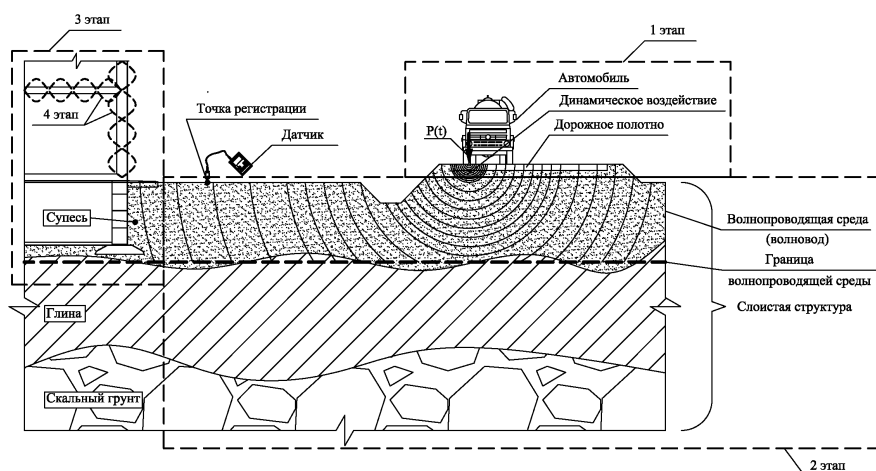


Рис. 1. Схема этапов выполнения исследований

В работе [1] подробно была изложена принципиальная схема исследования по оценке влияния автомобильных транспортных потоков на НДС зданий рамно-связевых систем. В рамках настоящей статьи выполнены исследования по изучению изменения характера воздействия динамического возмущения на точку вблизи здания при наличии волноводов. Чаще всего на практике в условиях городской застройки грунтовый массив представляет из себя слоистую неоднородную структуру. Некоторые элементы массива и инженерные сети, могут формировать горизонтальный волновод, имеющий различные граничные условия. Волноводы 1 типа могут быть образованы границами слоев грунта основания с существенно разными свойствами,

волноводы 2 типа границами слоев и свободной поверхностью, волноводы 3 типа свободной поверхностью и коробами инженерных коммуникаций, волноводы 4 типа коробами инженерных коммуникаций в нижней части и асфальтобетонным покрытием тротуаров между проезжей частью и зданиями в верхней.

В инженерной практике используются разнообразные программные комплексы, позволяющих выполнить моделирование вибрационного воздействия от различных источников на основания и фундаменты зданий. Разнообразие программных комплексов, а также, отсутствие подробного описания процесса создания моделей в существующих работах вызывает необходимость более детального исследования вопросов формирования расчетных схем оснований с назначением их геометрических размеров.

Современные программные комплексы позволяют решать задачи различной сложности, при этом возможности каждой отдельной программы могут отличаться, а попытки разобраться в интерфейсе нового комплекса занимают много времени. При условии, что заранее неизвестна степень оптимизации программы для решения конкретной задачи, главным критерием выбора программного обеспечения является его доступность. В России наиболее популярными локализованными комплексами являются LIRA и SCAD. Настоящее исследование проводилось в ПК ЛИРА-САПР, поскольку данное программное обеспечение наиболее активно используется проектными организациями на территории РФ и имеет достаточное количество инструкций в открытом доступе.

Для выполнения исследований построена совместная расчетная КЭ модель с использованием библиотеки конечных элементов программного комплекса ЛИРА САПР, которая содержит специальные плоские и объемные элементы для моделирования грунтового основания в линейной и нелинейной постановках. Решается плоская задача в линейной постановке. Конечно-элементная сетка грунта получена при помощи встроенной в программный комплекс команды Создание плоских КЭ грунтового массива. При формировании схемы в линейной постановке программный комплекс выводит расчетную область с использованием КЭ плоской задачи (грунт). Нижняя граница волновода моделируется слоем плоских КЭ, жесткостные характеристики которых соответствуют железобетону.

Расчетная область, созданная инструментами ПК ЛИРА САПР. По двум направлениям расчетная область разбивалась на конечные элементы шагом 0,5 м. Верхняя граница грунта имеет свободные граничные условия, а взаимодействие отсеченной части грунта с остальным массивом моделируется специальными конечными элементами. Рассмотрены две схемы – без волновода и с ним.

Параметры жесткости конечных элементов грунта были получены при создании плоской расчетной схемы грунтового массива в среде системы ГРУНТ, и соответствуют глиняному грунту.

Схема расчета представлена на рисунке (рис. 2). Согласно СНиП 2.07.01-89*, расстояние от края проезда до стены здания, как правило, следует принимать 5-8 м для зданий до 10 этажей включительно и 8-10 м для зданий свыше 10 этажей. Поэтому при расчетах определялись перемещения узла в точке А на расстоянии 10 м от точки приложения нагрузки $P(t)$. На данном этапе расчетов по контуру основания устанавливались связи, ограничивающие любые перемещения, что соответствует отражающим граничным условиям.

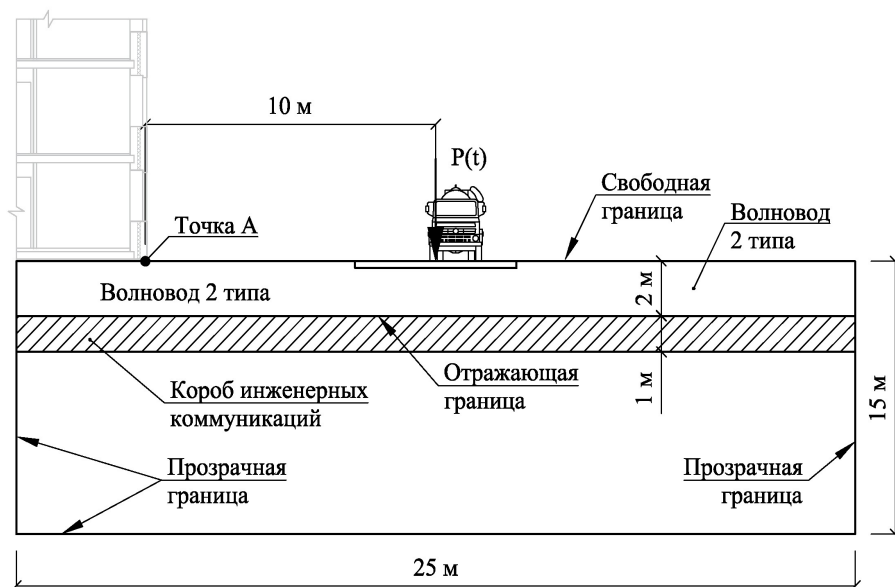


Рис. 2. Схема для выполнения расчета

В качестве нагрузки $P(t)$ принята синусоидальная динамическая нагрузка амплитудой 1 т и частотой, соответствующей доминирующей частоте транспортных источников, которая имеет среднее значение:

$$15 \text{ Гц} \times 2\pi = 94 \text{ рад/с.}$$

Время действия нагрузки принято равным $t = 1 \text{ с}$, что соответствует времени проезда грузового автомобиля с колесной базой 5 м со скоростью 18 км/ч.

Результаты расчетов – перемещений узла в точке А от наличия волноводов в табл. 1. Графики горизонтальных и вертикальных перемещений показаны на рисунке 3.

Таблица 1. Значения перемещений узла А

Тип схемы	Перемещения	
	х, мм	z, мм
Без волновода	0,0024884	0,00654306
С волноводом 2 типа	0,0022306	0,00834957

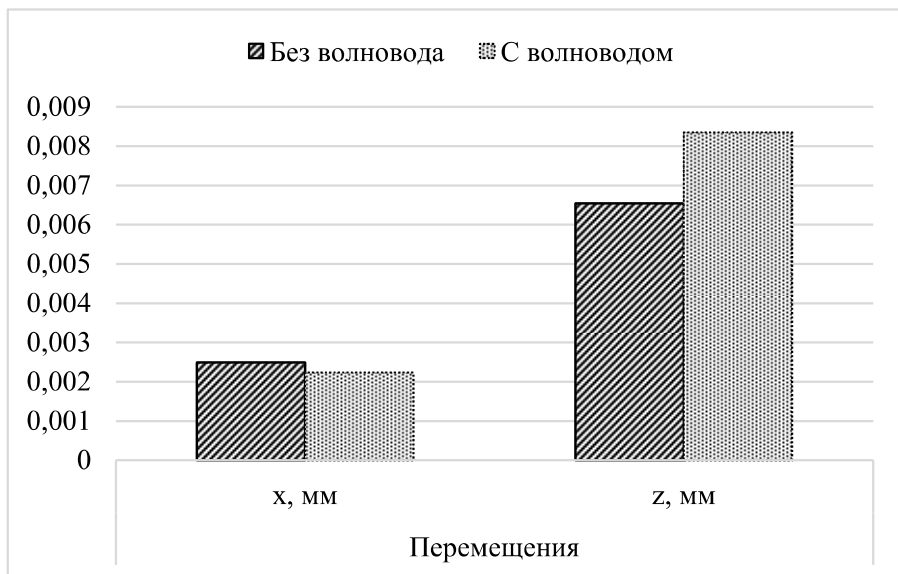


Рис. 3. Горизонтальные х и вертикальные z перемещения узла А

Выводы. Наличие подземных коммуникаций приводит к образованию волноводов, в которых существенно меняются параметры волны от

источника возмущения. Это в свою очередь вызывает увеличение перемещений точек поверхности грунта под воздействием автомобильной динамической нагрузки.

Библиографический список

1. Дятлов В. В. Моделирование условий возникновения стоячих волн в элементах сооружения при воздействии транспортных потоков / В. В. Дятлов, С. Ю. Гриднев // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов IX Международного симпозиума / ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства». – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2025. – С. 187–188.

УДК 624.07.147

ОЦЕНКА ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОТНОГО ОБЪЕКТА НА ДЕФОРМИРУЕМОМ ОСНОВАНИИ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Иноземцев В.К., Редков В.И.

СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

При проектировании зданий и сооружений в нормативной литературе есть различные ограничения. В соответствии с [1], размеры подошвы фундаментов колонн зданий с мостовыми кранами грузоподъемностью 75 т и выше, а также для фундаментов колонн открытых крановых эстакад при кранах грузоподъемностью свыше 15 т, для сооружений башенного типа (труб, домен и других), а также для всех видов сооружений при расчетном сопротивлении грунта основания $R < 150$ кПа, рекомендуется назначать такими, чтобы эпюра давлений была трапецевидной, с отношением краевых давлений $p_{min}/p_{max} \geq 0,25$.

Для остальных случаев допускается треугольная эпюра с относительным эксцентриситетом равнодействующей, равным $1/6$. Для фундаментов бескрановых зданий с подвесным транспортным оборудованием допускается треугольная эпюра давлений с нулевой ординатой на расстоянии не более $1/4$ длины подошвы фундамента, что соответствует относительному эксцентриситету равнодействующей не более $1/4$.

Для высотных сооружений ограничивается величина деформаций крена, которая не должна превышать $1/500$ высоты объекта. Ограничение на коэффициент запаса устойчивости сооружений качественно отличается. Его теоретическая оценка с учетом деформируемости грунтового основания приводит к необходимости решения нелинейной задачи [2, 3].

Расчетная схема данной задачи была предложена Г. Крамером и Н.П. Павлюком [6, 7], а несколько позже и Я.Б. Львиным [4, 5]. В их работах была предложена расчетная схема общей устойчивости жесткой колонны на упругом основании. В качестве модели упругого основания была принята модель Э. Винклера, согласно которой реакция основания в каждой точке по плану фундамента пропорциональна осадке подошвы фундамента (рис. 1а, 2а). Полученное при этом значение силы тяжести колонны P является критической нагрузкой, при которой колонна теряет устойчивость исходного строго вертикального положения равновесия. Г. Крамер и Н.П. Павлюк [6, 7] предложили принимать в качестве коэффициента устойчивости отношение:

$$k = \frac{P_{kp}}{P} = \frac{cJ}{Pl} , \quad (1)$$

где

c – коэффициент пропорциональности, характеризующий жесткость основания;

l – высота центра тяжести колонны;

J – момент инерции площади подошвы фундамента.

Полученное решение задачи устойчивости колонны в отсутствии горизонтальных сил можно использовать для случая, когда на колонну действует горизонтальная сила Q . Для этого необходимо рассмотреть последовательность возможных состояний равновесия при постепенном увеличении горизонтальной силы и угла ϕ [2].

Действительно, чтобы определить устойчивость против опрокидывания необходимо проследить изменение равновесных состояний высотного объекта до момента опрокидывания. Однако в окрестности предельных значений ветровой нагрузки подошва фундаментной плиты сооружения частично отрывается от несущего слоя основания. В этом случае при увеличении ветровой нагрузки площадь контакта фундаментной плиты и основания становится переменной (рис. 1).

Очевидно, что известная модель Винклера здесь не работает, так как грунт на растяжение практически не работает (рис. 1а). Учет частичного отрыва подошвы фундамента от основания качественно изменяет конструктивную схему системы «высотный объект – грунтовое основание», а связь возрастающей ветровой нагрузки с углом наклона оси высотного объекта становится нелинейной. Таким образом, появляется отдельный вид нелинейности – конструктивная нелинейность.

Одним из методов решения нелинейных задач является метод прослеживания равновесных состояний. Проследим за возникновением и развитием конструктивной нелинейности при возрастании ветровой нагрузки на жесткое сооружение с высоко расположенным центром тяжести.

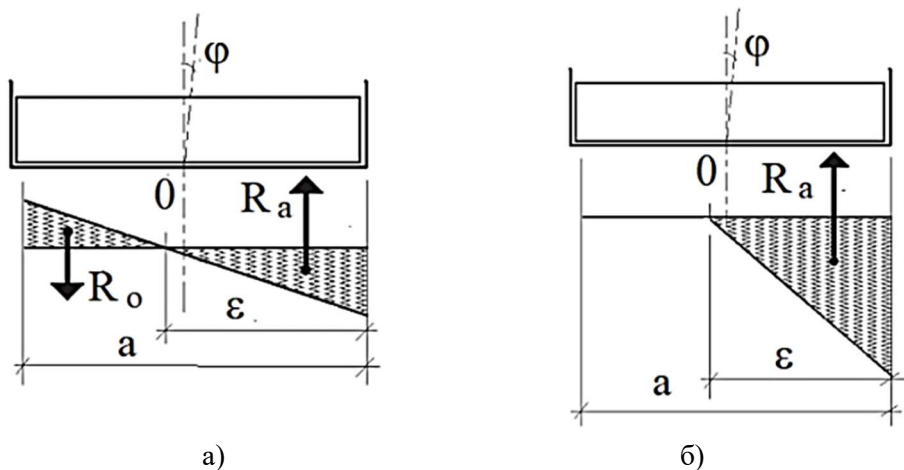


Рис. 1. Модель Э. Винклера

При этом можно выделить следующие этапы:

- начальный этап нагружения характеризующейся прямоугольной эпюрой «отпора» основания;
- этап нагружения, характеризующейся трапециевидной эпюрой «отпора» основания;
- этап нагружения с треугольной эпюрой и нулевой ординатой по краю фундамента (рис. 2);
- этап нагружения с треугольной эпюрой и нулевой ординатой на расстоянии a - ϵ от края фундамента, характеризующейся частичным отрывом фундамента от основания (рис. 3).

Расчетная схема с учетом действия ветровой нагрузки на сооружение без отрыва плиты фундамента от основания приведена на рис. 2. В определенном диапазоне изменения горизонтальной силы Q в условиях трапециевидной или треугольной эпюры «отпора» без отрыва фундаментной плиты от основания зависимость между ветровой нагрузкой и углом поворота здания линейная:

$$Q = \frac{cJ - Pl}{h} \phi. \quad (2)$$

Здесь:

h – расстояние от подошвы фундамента до точки приложения равнодействующей ветрового давления;

l – расстояние от подошвы до центра тяжести высотного объекта;

ϕ – угол отклонения оси сооружения (здесь и в дальнейшем не учитываются различия между углом ϕ и его функциями $\sin \phi$ и $\tg \phi$, так как рассматриваются конечные, но малые углы ϕ [2, 3].

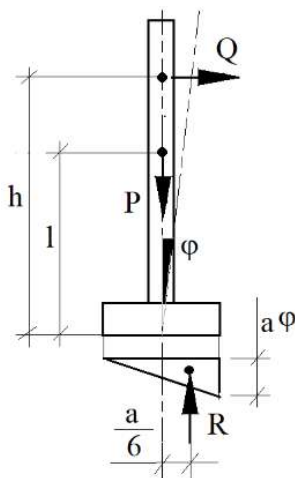


Рис. 2

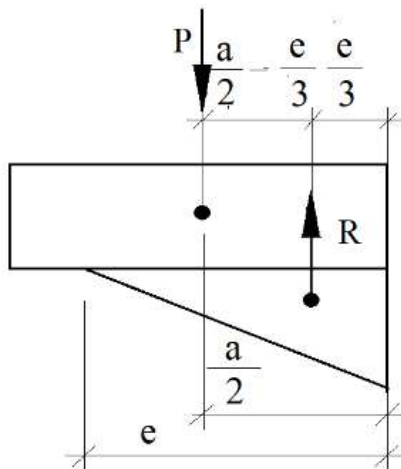


Рис. 3

Для прямоугольной в плане фундаментной плиты со сторонами a и b угол ϕ_1 и соответствующее значение горизонтальной силы Q_1 при которых трапецевидная эпюра переходит в треугольную (рис. 2), определяется из соотношений [2, 3]:

$$\phi_1 = \frac{2P}{ca^2b} ; \quad Q_1 = \frac{Pa}{6h} \left(1 - \frac{Pl}{cJ} \right). \quad (3)$$

Получим решение для равнодействующей ветровой нагрузки, при которой трапецевидная эпюра «отпора» основания переходит в треугольную с нулевой ординатой на расстоянии $a-e$ от края фундамента (рис. 3).

Площадь эпюры отпора S и ее объем V равны:

$$S = \frac{\phi e^2}{2} , \quad V = \frac{\phi e^2 b}{2} . \quad (4)$$

Вес сооружения и равнодействующая отпора основания равны

$$R = c \frac{\phi e^2 b}{2} = P . \quad (5)$$

Участок подошвы фундаментной плиты, контактирующий с грунтовым основанием имеет ширину

$$e = \sqrt{\frac{2P}{\phi b c}} . \quad (6)$$

Из условия равновесия суммы моментов:

$$-Qh - Pl\phi + P \left(\frac{a}{2} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2P}{\phi b c}} \right) = 0 . \quad (7)$$

получим нелинейную зависимость горизонтальной силы Q от угла поворота сооружения ϕ .

$$Q = \frac{P}{h} \left(\frac{a}{2} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2P}{\phi b c}} - l\phi \right) . \quad (8)$$

Таким образом, вся последовательность возможных состояний равновесия сооружения при постепенном увеличении горизонтальной силы и угла ϕ , образует график, представленный линейной зависимостью (3) и нелинейной зависимостью (8). Граница между линейной частью решения и нелинейной определяется углом поворота оси сооружения ϕ_l и соответствующей ему величиной равнодействующей силы ветрового давления Q_l , определяемых по формулам (3).

Нелинейный характер части кривой зависимости горизонтальной силы Q от угла поворота ϕ отражает изменение физических условий взаимодействия фундамента с основанием. При отрыве подошвы фундамента от основания момент распределения сил реакции перестает быть пропорциональным углу наклона колонны ϕ .

Критическое значение равнодействующей ветровой нагрузки Q_{kp} в этом случае определяет коэффициент запаса устойчивости против опрокидывания:

$$k = Q_{kp} / Q . \quad (9)$$

Рассмотрим задачу опрокидывания жесткого высотного объекта на деформируемом основании. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные модели

Размеры фундаментной плиты (a, b)	36 м
Вес конструкций сооружения P	117500 кН
Центр сил тяжести конструкций сооружения l	93 м
Коэффициент постели основания c	10000 кН/м ³
Минимальный момент инерции J	139968 м ⁴
Бифуркационная критическая нагрузка P_{kp}	15050322 кН
Коэффициент бифуркационной устойчивости	128
Равнодействующая ветрового давления Q	6630 кН
Центр тяжести эпюры ветрового давления h	192 м
Угол поворота оси сооружения ϕ	0.000504
Ветровая нагрузка Q_l	3643 кН

Результаты расчета показаны на рис. 4.

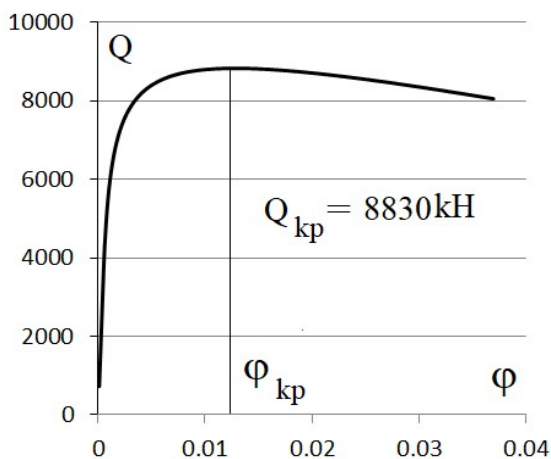


Рис. 4. Результаты расчета

Максимум кривой на рис. 4 определяет наибольшее значение горизонтальной силы $Q_{кр}$, при котором еще возможно равновесие высотного сооружения. Предельная (критическая) ветровая нагрузка $Q_{кр}$, при превышении которой, теряется какое-либо состояние равновесие и происходит опрокидывание высотного объекта, равна 8830 кН.

Коэффициент запаса устойчивости против опрокидывания: $k = 8830/6630 = 1,33$. Этот же коэффициент при использовании предположения о недеформируемом основании равен $k = M_{уд}/M_{опр} = 1,66$, что превышает более точное значение коэффициента запаса на 25%. Такое превышение для различных исходных данных для расчета может быть до 50% [2].

Библиографический список

1. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений : актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* : свод правил / Минстрой России. – Москва : АО "Кодекс", 2021. – 202 с.

2. Иноземцев В. К. Общая устойчивость жесткого сооружения с высоко расположенным центром сил тяжести / В. К. Иноземцев // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии : сборник материалов XXII Международной научно-технической конференции, 28-29 июня 2021 г. – Тула : ТулГУ, 2021. – С. 40-45.

3. Иноземцев В. К. Высотные здания и сооружения. Проблемы геомеханики, общей устойчивости и динамической неустойчивости : учебное пособие / В. К. Иноземцев, В. И. Редков. – Саратов : Саратовский гос. техн. ун-т, 2022. – 300 с.

4. Львин Я. Б. Устойчивость жестких стен и колонн на упругом и упруго-пластическом основании / Я. Б. Львин // Инженерный сборник. – 1950. – Т. VII.

5. Львин Я. Б. Об устойчивости жестких стен и массивов на упругом основании при действии произвольно направленных, в том числе поворачивающихся сил / Я. Б. Львин // Труды Воронежского инженерно-строительного института. – 1950. – Вып. 2.

6. Павлюк Н. П. К вопросу о проверке устойчивости стенки на опрокидывание / Н. П. Павлюк // Проект и стандарт. – 1934. – № 8.

7. Павлюк Н. П. Устойчивость жестких стен и колонн / Н. П. Павлюк // Труды Ленинградского института инженеров коммунального строительства. – 1935. – Вып. II.

УДК 539.3

ОЦЕНКА РАЗРУШАЮЩЕГО УСИЛИЯ НА ПОРИСТЫЙ БРУС

Кривулина Э.Ф., Шляхова А.С.

СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние бруса круглого поперечного сечения пористой структуры под действием продольной силы Q . Переменную по радиусу пористость $P(\rho)$ (рис. 1) аппроксимируем квадратной параболой

$$P = P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right), \quad (1)$$

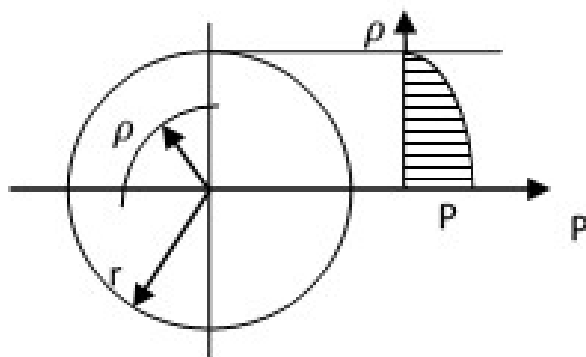


Рис. 1. График зависимости пористости по радиусу

Материал бруса – пористое железо. На основании экспериментальных данных [1], [2], представленных в таблице 1, модуль Юнга $E(P)$ и предел текучести $\sigma_T(P)$ аппроксимируем полиномами

$$\begin{aligned} E(P) &= a_1 + a_2 P + a_3 P^2, \\ \sigma_T(P) &= b_1 + b_2 P + b_3 P^2 \end{aligned} \quad (2)$$

со следующими значениями коэффициентов $a_1 = 2,0929 \cdot 10^5$ МПа, $a_2 = -5,35 \cdot 10^5$ МПа, $a_3 = 3,2143 \cdot 10^5$ МПа, $b_1 = 196,13$ МПа, $b_2 = -651,67$ МПа, $b_3 = 649,9$ МПа.

Таблица. 1. Зависимость механических характеристик от пористости

P	σ_T , МПа
0	200
0,12	116
0,21	95
0,31	59
0,37	43
0,48	32

P	E, МПа
0	$2,1 \cdot 10^5$
0,1	$1,6 \cdot 10^5$
0,2	$1,1 \cdot 10^5$
0,3	$0,8 \cdot 10^5$
0,4	$0,5 \cdot 10^5$
0,5	$0,2 \cdot 10^5$

Согласно (1) и (2) модуль Юнга и предел текучести изменяются по радиусу сечения по законам

$$E(\rho) = a_1 + a_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right) + a_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right)^2, \quad (3)$$

$$\sigma_T(\rho) = b_1 + b_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right) + b_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right)^2.$$

По гипотезе плоских сечений полагаем $\varepsilon = const$.

Примем за основу диаграмму деформирования Прандтля и найдем закон изменения деформации начала текучести ε_T по сечению бруса из условия

$$\varepsilon_T(\rho) = \frac{\sigma_T(\rho)}{E(\rho)}, \quad (4)$$

После подстановки (3) в (4) получим функцию

$$\varepsilon = \frac{b_1 + b_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right) + b_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right)^2}{a_1 + a_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right) + a_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right)^2}. \quad (5)$$

Минимальное значение $\varepsilon_T(\min)$ функции (5) определит точки сечения, с которых начинается текучесть и позволит найти соответствующее значение усилия $Q = Q_T$:

$$Q_T = 2\pi \varepsilon_{T \min} \int_0^r E(\rho) \rho d\rho. \quad (6)$$

Найденное усилие Q_T начала текучести допустимо, так как не приводит к потере несущей способности бруса.

Для определения разрушающего (предельного) усилия $Q_{пред}$ следует достичь текучести по всему сечению, что соответствует значению $\varepsilon_T = \varepsilon_T(max)$. Тогда предельную нагрузку найдем по формуле

$$Q_{пред} = 2\pi \int_0^r \sigma_T(\rho) \rho d\rho. \quad (7)$$

Подстановка (3) в (7) дает значение $Q_{пред}$

$$Q_{пред} = r^2 \pi \left(b_1 + \frac{b_2 P_0}{2} + \frac{b_3 P_0^2}{3} \right). \quad (8)$$

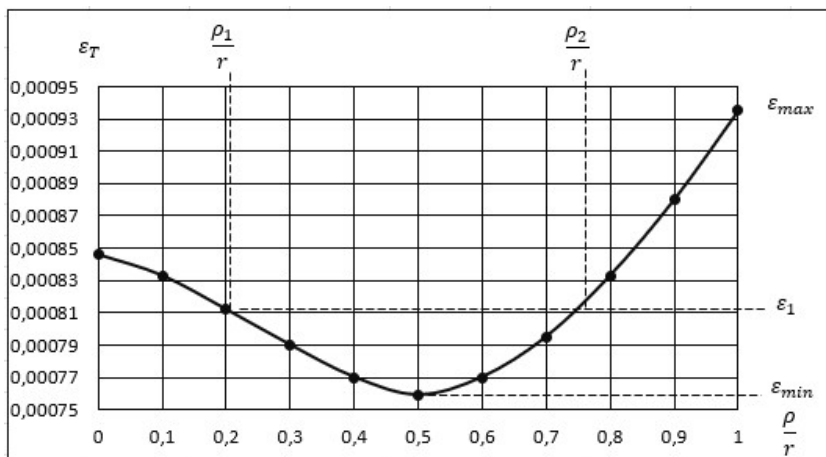


Рис. 2. Диаграмма распределения продольной деформации ε по сечению относительного радиуса

Для промежуточного значения деформации $\varepsilon_{min} < \varepsilon_T < \varepsilon_{max}$ в поперечном сечении возникнет пластическое ядро $\rho_1 \div \rho_2$ и зона упругой деформации (рис. 2). Растягивающее усилие, соответствующее $\varepsilon = \varepsilon_1$ определится по формуле

$$Q_1 = 2\pi \left(\varepsilon_1 \int_0^{\rho_1} E(\rho) \rho d\rho + \int_{\rho_1}^{\rho_2} \sigma_T(\rho) \rho d\rho + \varepsilon_1 \int_{\rho_2}^r E(\rho) \rho d\rho \right). \quad (9)$$

Границы пластического ядра находим из решения уравнения

$$\varepsilon_1 - \frac{b_1 + b_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right) + b_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right)^2}{a_1 + a_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right) + a_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right)^2} = 0 \quad (10)$$

или из графика функции $\varepsilon_T \left(\frac{\rho}{r}\right)$.

В качестве примера рассмотрим брус со следующими параметрами $P_0 = 0,4$, $r = 5 \cdot 10^{-2}$ м.

Расчеты показывают $\varepsilon_{T \min} = 0,7607 \cdot 10^{-3}$, что соответствует отношению $\frac{\rho}{r} = 0,5$, $Q_{пред} = 0,7886$ МН.

Как следует из расчетов, учет распределения пористости по сечению вносит существенную поправку к оценке разрушающего усилия.

Библиографический список

1. Кашталян Ю. А. Характеристики упругости материалов при высоких температурах / Ю. А. Кашталян. – Киев : Наукова думка, 1970. – 112 с.
2. Беляев С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Беляев. – Москва : Машиностроение, 1981. – 247 с.

УДК 622.016, 624.19.03

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ПОРОД ВОКРУГ НАПОРНОЙ ВЫРАБОТКИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ ВБЛИЗИ ГОРНОГО СКЛОНА

Кудрявцев М.А., Анциферов С.В.

ТулГУ, г. Тула, ТулГУ

В ТулГУ накоплен определенный опыт использования аналитических подходов к разработке методов расчета конструкций подземных сооружений различного назначения, предоставляющих, в том числе, возможность определения напряженно-деформированного состояния окружающих их пород (грунтов). Данные подходы предполагают использование строгих решений соответствующих плоских задач теории упругости; получаемые результаты обладают достаточно высокой степенью адекватности для протяженных тоннелей [1, 2].

В данной работе предлагается математическая модель формирования напряженного состояния пород горного склона, содержащего выработку круглого поперечного сечения, пройденную закрытым способом вблизи наклонной земной поверхности, при действии внутреннего равномерного давления. Данная геомеханическая ситуация характерна для напорных гидротехнических тоннелей, сооружаемых на территориях со сложным рельефом земной поверхности.

Используемая математическая модель базируется на гипотезах и теоретических концепциях геомеханики и механики подземных сооружений о взаимодействии горного склона и выработки как элементов единой деформируемой системы [3] и позволяет учитывать следующие факторы, существенно влияющие на напряженное состояние массива пород при действии внутреннего напора: угол наклона земной поверхности относительно горизонтали; относительное расстояние от продольной оси выработки до наклонной земной поверхности; диаметр поперечного сечения выработки; деформационные характеристики пород при оценке смещений поверхности и др.

Учитывая, что в основу предлагаемой модели положено решение соответствующей задачи теории упругости для невесомой среды, применение принципа суперпозиции решений позволяет получить результирующее напряженное состояние для весомой полуплоскости, ослабленной вблизи границы круговым отверстием, т.е. выполнить учет действия гравитационных сил (собственного веса пород).

На рис. 1 приведена принципиальная расчетная схема задачи геомеханики об определении напряженного состояния массива пород вокруг участка тоннеля достаточно большой протяженности, продольная ось которого расположена горизонтально и параллельно плоскости земной поверхности при действии внутреннего напора. Выработка не испытывает влияния других близко расположенных наземных или подземных сооружений.

Невесомая линейно-деформируемая полубесконечная область S_0 из материала с модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 . Из теории упругости известно, что в рассматриваемом случае деформационные характеристики среды необходимы при оценке смещений точек полуплоскости, они не влияют на ее напряженное состояние [4].

На расстоянии H от наклонной прямолинейной границы L_0 расположено круговое отверстие с контуром L_1 радиуса R . Контур отверстия испытывает равномерно распределенное нормальное давление p .

Начала прямоугольных систем координат xOy и $x'Oy'$ совмещены с центром отверстия (рис. 1).

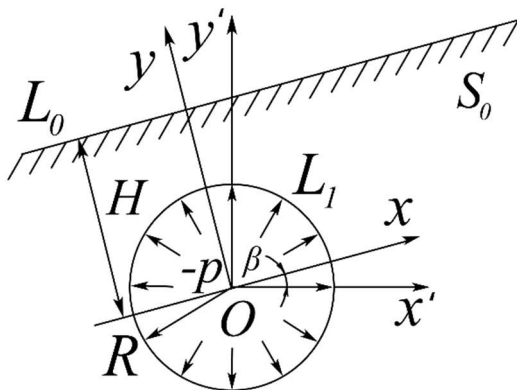


Рис. 1. Расчетная схема

Граница L_0 среды S_0 свободна от действия внешних сил, поэтому в точках этой линии нормальные $\sigma_y^{(0)}$ и касательные $\tau_{xy}^{(0)}$ напряжения отсутствуют:

$$\sigma_y^{(0)}\big|_{L_0} = 0, \quad \tau_{xy}^{(0)}\big|_{L_0} = 0; \quad (1)$$

на контуре L_1 отверстия действуют радиальные напряжения $\sigma_r^{(0)}$, касательные напряжения $\tau_{r\theta}^{(0)}$ в силу симметрии отсутствуют:

$$\sigma_r^{(0)}\big|_{L_1} = -p, \quad \tau_{r\theta}^{(0)}\big|_{L_1} = 0. \quad (2)$$

Для получения аналитического решения задачи теории упругости после перехода к соответствующей краевой задаче теории функций комплексного переменного (ТФКП), применяется математический аппарат, основанный на использовании потенциалов Колосова-Мусхелишвили и основных положений ТФКП, включая свойства интегралов типа Коши и рядов Лорана, свойств теоремы Сохоцкого-Племеля, необходимых при

выполнении аналитического продолжения комплексных потенциалов через границу полуплоскости [5].

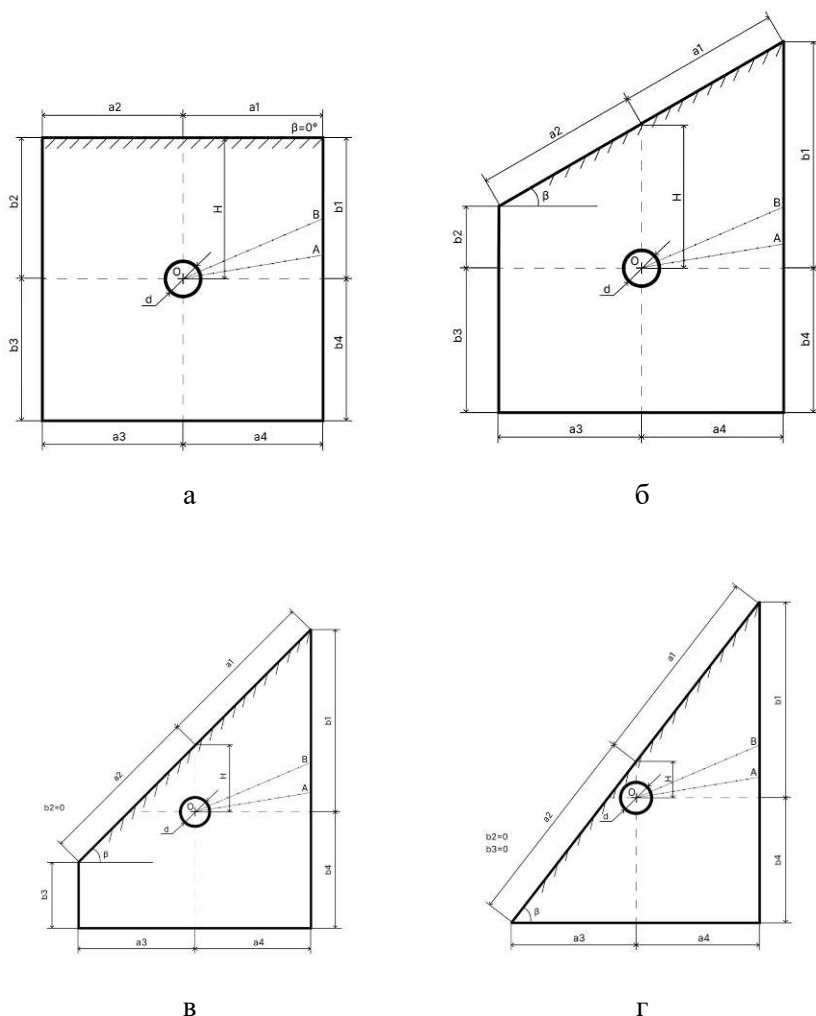


Рис. 2. Возможные формы областей среды вокруг отверстия
а – горизонтальная граница; б, в, г – наклонные границы

Полученное решение получило компьютерную реализацию в виде программы определения необходимых компонент напряжений в массиве пород вокруг контура сечения выработки, включая свободную поверхность. Результаты подтвердили полное выполнение граничных

условий поставленной задачи. Программа включает подпрограмму, позволяющую визуализировать результаты расчетов в виде изообластей (изополей) компонент напряженного состояния.

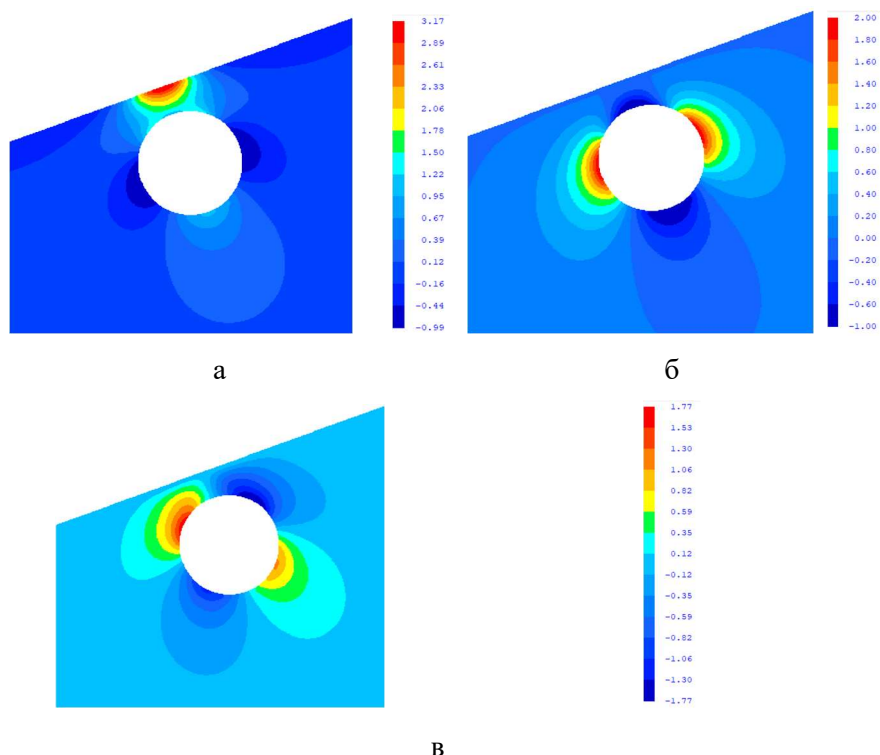


Рис. 3. Изообласти относительных напряжений при $\beta = 20^\circ$, $H/R=1,5$: а - σ_x / p ; б - σ_y / p ; в - τ_{xy} / p

Относительная автономность составленной подпрограммы обеспечивает возможность графического представления результатов определения напряженного состояния массива пород склона в окрестности не только незакрепленной, но подкрепленной выработки (тоннеля).

Подпрограмма написана на алгоритмическом языке FORTRAN в среде WIN32 для персональных компьютеров стандарта IBM PC.

Параметры (размеры) области, для которой выполняется визуализация расчетных полей напряжений, выбираются пользователем на основе предварительных расчетов, и в дальнейшем являются частью исходных данных.

Ниже приведены четыре возможных варианта взаимного размещения наклонной, боковых и нижней границ относительно отверстия, моделирующего сечение выработки, схемы которых представлены на рис. 2. Отличительной особенностью используемых схем является обязательное присутствие вертикальной правой и горизонтальной нижней границ. К примеру, схема, представленная на рис. 2 а, соответствует горизонтальной земной поверхности, а на рис. 2 б, в, г – наклонной поверхности.

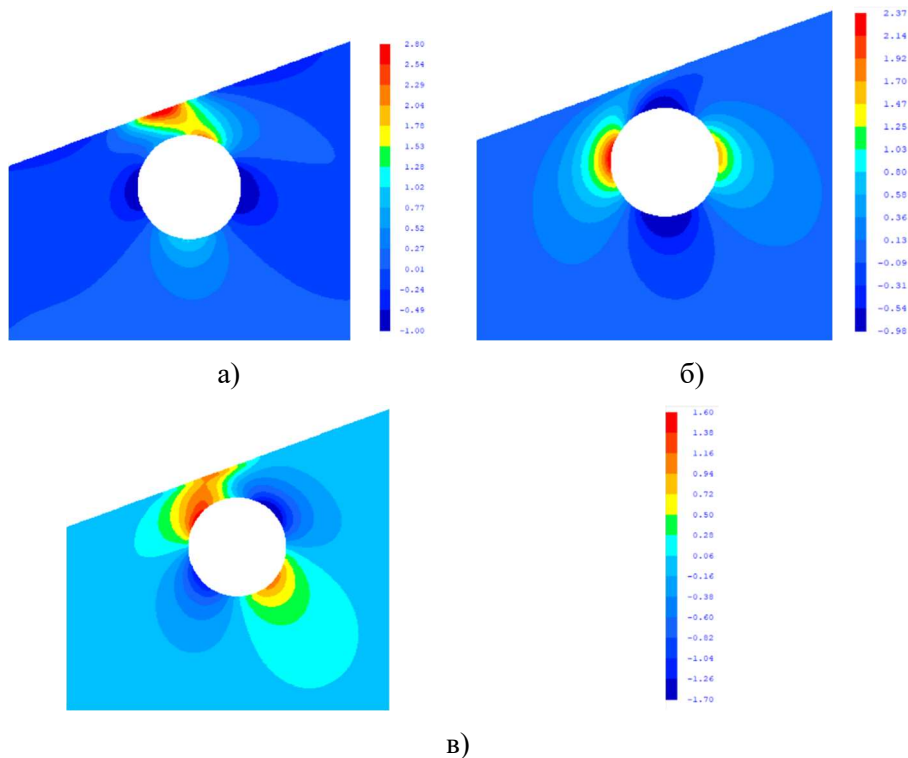


Рис. 4. Изополя относительных напряжений при $\beta = 20^\circ$,

$$H/R=1,5: \text{ а - } \sigma_x / p; \text{ б - } \sigma_y / p; \text{ в - } \tau_{x'y'} / p$$

При выполнении расчетов предусмотрена возможность изменения шага полярного угла для лучей (отрезков), связывающих центр отверстия и точку пересечения данной линии с границами рассматриваемых областей, а также количества точек на данных отрезках, первая из которых располагается на контуре отверстия, а последняя - на границе области.

Программа обеспечивает построение изополей радиальных, нормальных тангенциальных и касательных напряжений в полярной, нормальных и касательных напряжений в декартовых (наклонной и «горизонтальной») системах координат, а также главных и максимальных касательных напряжений в точках среды и углов наклона главных площадок.

Ниже представлены результаты расчетов в виде изополей соответствующих напряжений, демонстрирующие возможности созданной компьютерной программы для определения напряженного состояния полубесконечной среды с наклонной границей, ослабленной круговым отверстием, внутренний контур которого нагружен равномерно распределенным давлением.

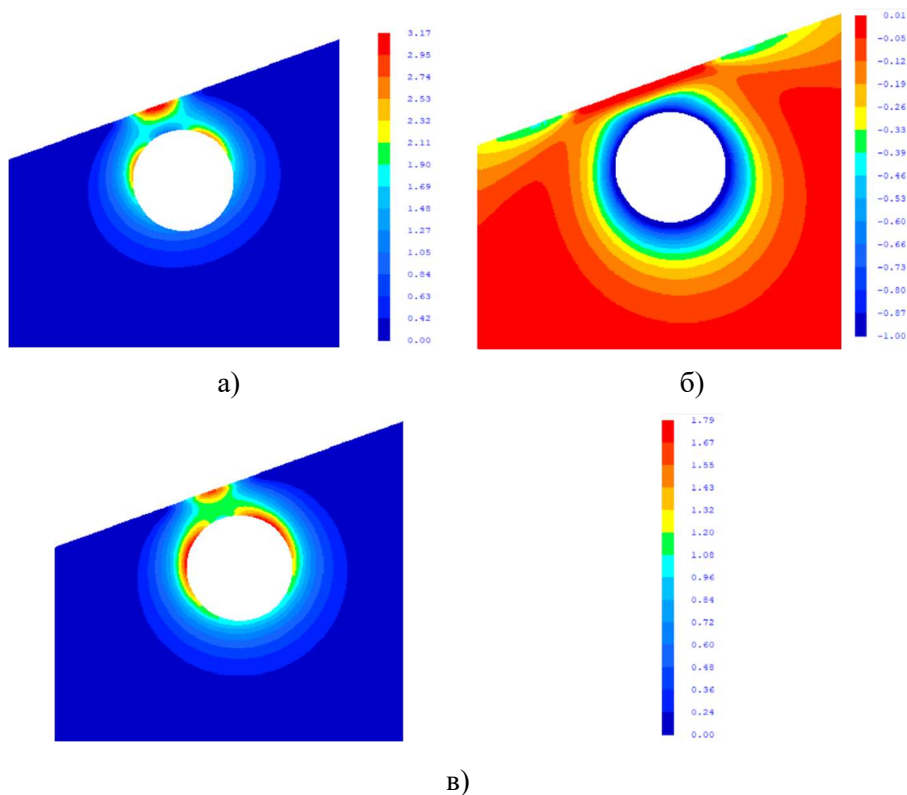


Рис. 5. Изополя относительных главных и максимальных касательных напряжений при $\beta = 20^\circ$, $H/R = 1,5$: а - σ_1 / p ; б - σ_3 / p ; в - $\tau_{\max} / p$

В силу очевидных особенностей интерпретации ожидаемых результатов формирования напряженного состояния полубесконечной среды, ослабленной круговым отверстием, контур которого испытывает внутреннее равномерно распределенное давление, в дальнейшем разработанная модель будет использована при разработке и отладке блока программ, позволяющего визуализировать данные расчетов в виде изообластей соответствующих напряжений как в полярной, так и в декартовых (наклонной и «горизонтальной») системах координат, а также главных и максимальных касательных напряжений для более сложного случая – при наличии в среде начального поля неравнокомпонентных напряжений, обусловленных гравитационными силами.

Библиографический список

1. Анциферов С. В. Математическое моделирование взаимодействия обделок параллельных тоннелей, сооруженных вблизи склона, с массивом грунта / С. В. Анциферов, А. В. Фомин // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2017. – № 4. – С. 255-262.
2. Анциферов С. В. Определение напряженного состояния обделок тоннелей, сооружаемых с применением укрепительной цементации вблизи склона / С. В. Анциферов, А. А. Феклин, М. А. Кудрявцев, А. В. Фомин // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2022. – № 4. – С. 392-407.
3. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений / Н. С. Булычев. – Москва : Недра, 1994. – 382 с.
4. Рекач В. Г. Руководство к решению задач по теории упругости / В. Г. Рекач. – Москва : URSS, 2020. – 218 с.
5. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – Москва : Наука, 1966. – 707 с.

УДК 539.375

ЗАРОЖДЕНИЕ ТРЕЩИН В СТРИНГЕРНОЙ ПЛАСТИНЕ, ОСЛАБЛЕННОЙ КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ

Мир-Салим-заде М.В.
ИМиМ, г. Баку, Азербайджан

Как известно, в различных конструкциях используются тонкостенные листовые элементы (тонкие пластины) с технологическими отверстиями, в том числе круговыми. Подкрепить пластину и сдержать в ней зарождение трещин можно с помощью ребер жесткости.

Рассмотрим бесконечную изотропную упругую пластину, ослабленную круговым отверстием. К пластине приклепаны поперечные ребра

жесткости в точках $z = \pm(2m + 1)L \pm iny_0$ ($m = 0, 1, 2, \dots$; $n = 1, 2, \dots$) из другого упругого материала. На бесконечности пластина подвергается однородному растяжению вдоль стрингера напряжением $\sigma_y^\infty = \sigma_0$. Контур кругового отверстия свободен от внешних усилий. Принято, что при деформации толщина стрингера считается неизменяемой, а напряженное состояние – одноосным. Стрингеры изгибу не сопротивляются и работают лишь на растяжение. Принимаются следующие допущения: а) в пластине реализуется плоское напряженное состояние; б) подкрепляющая система стрингеров ферменного типа, ослабление их за счет постановки точек крепления не учитывается; в) пластина и подкрепляющие элементы взаимодействуют друг с другом в одной плоскости и только в точках крепления; г) все точки крепления одинаковы, их радиус (площадка сцепления) мал по сравнению с их шагом и другими характерными размерами; д) точки крепления стрингеров расположены с постоянным шагом по всей длине стрингера, симметрично относительно поверхности пластины.

Действие точки крепления моделируем: в стрингере – действием в сплошном ребре сосредоточенной силы, приложенной в точке, соответствующей центру точки крепления, в пластине – действием сосредоточенной силы. Действие приклепанных стрингеров в расчетной схеме заменяется неизвестными эквивалентными сосредоточенными силами, приложенными в местах расположения точек крепления. По мере нагружения стрингерной пластины с круговым отверстием силовой нагрузкой в пластине будут возникать зоны предразрушения, которые моделируем как области ослабленных межчастичных связей материала. Принято, что полосы предразрушения ориентированы в направлении максимальных растягивающих напряжений, возникающих в стрингерной пластине. Взаимодействие берегов каждой зоны предразрушения моделируется путем введения между берегами полосы предразрушения связей, имеющих заданную диаграмму деформирования. Физическая природа таких связей и размеры области предразрушения зависят от вида материала. Считается, что закон деформирования связей задан. В общем случае он представляет собой нелинейный закон деформирования.

Зарождение трещин рассматривается как процесс перехода областей предразрушения в области разорванных связей между поверхностями материала. Так как зоны предразрушения малы по сравнению с остальной частью подкрепленной пластины, их можно мысленно удалить, заменив разрезами, поверхности которых взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала.

Рассмотрим полосы предразрушения длины l , исходящие из поверхности кругового отверстия и расположенные на отрезке оси абсцисс $y = 0$, $R \leq |x| \leq R + l$, где R – радиус отверстия. Берега полос предразрушения взаимодействуют и это взаимодействие (связи между берегами) сдерживает зарождение трещин. Для математического описания взаимодействия берегов полос предразрушения считаем, что между берегами имеются связи (силы сцепления), закон деформирования которых задан. При действии внешних нагрузок на пластину в связях, соединяющих берега полосы предразрушения, будут возникать усилия $p(x)$, имеющие, из-за симметрии задачи относительно оси абсцисс, только нормальную составляющую. Следовательно, к берегам полос предразрушения будут приложены нормальные напряжения, численно равные $p(x)$. Величина этих напряжений $p(x)$ и размер l зон предразрушения заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения задачи механики разрушения.

Граничные условия в рассматриваемой задаче имеют следующий вид

$$\sigma_r - i\tau_{r\theta} = 0 \quad \text{при } |z| = R \quad \text{на контуре отверстия,} \quad (1)$$

$$\sigma_y - i\tau_{xy} = p(x) \quad \text{при } y = 0, \quad R \leq |x| \leq R + l. \quad (2)$$

Основные соотношения поставленной задачи должны быть дополнены уравнением, связывающим перемещения раскрытия берегов полосы предразрушения и усилия в связях. Это уравнение, без потери общности, можно представить в виде

$$v^+(x, 0) - v^-(x, 0) = C(x, p(x))p(x), \quad (3)$$

где $(v^+ - v^-)$ – раскрытие берегов полосы предразрушения, x – аффикс точек берегов полосы предразрушения; функцию $C(x, p)$ можно рассматривать как эффективную податливость связей, зависящую от натяжения связей. При постоянных значениях $C(x, p)$ имеем в (3) линейный закон деформирования.

На основании формул Колосова-Мусхелишвили [1] и краевых условий на контуре кругового отверстия и берегах полос предразрушения задача сводится к определению двух аналитических функций $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$ комплексного переменного $z = x + iy$ из граничных условий

$$\Phi(\tau) + \overline{\Phi(\tau)} - [\overline{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} = 0, \quad (4)$$

$$\Phi(t) + \overline{\Phi(t)} + \overline{t}\Phi'(t) + \Psi(t) = p(x) \quad \text{при} \quad R \leq |x| \leq R + l, \quad (5)$$

где $\tau = Re^{i\theta}$, t – аффикс точек берегов полос предразрушения.

Решение краевой задачи (4)-(5) ищем в виде

$$\Phi(z) = \Phi_0(z) + \Phi_1(z) + \Phi_2(z), \quad \Psi(z) = \Psi_0(z) + \Psi_1(z) + \Psi_2(z). \quad (6)$$

Здесь потенциалы $\Phi_0(z)$ и $\Psi_0(z)$ определяют поле напряжений и деформаций в сплошной бездефектной подкрепленной пластине под действием системы сосредоточенных сил P_{mn} и σ_0 и определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} \Phi_0(z) &= \frac{1}{4}\sigma_0 - \frac{i}{2\pi h(1+\kappa)} \sum_{m,n} 'P_{mn} \left[\frac{1}{z - mL + iny_0} - \frac{1}{z - mL - iny_0} \right], \\ \Psi_0(z) &= \frac{1}{2}\sigma_0 - \frac{i\kappa}{2\pi h(1+\kappa)} \sum_{m,n} 'P_{mn} \left[\frac{1}{z - mL + iny_0} - \frac{1}{z - mL - iny_0} \right] + \\ &+ \frac{i}{2\pi h(1+\kappa)} \sum_{m,n} 'P_{mn} \left[\frac{Lm - iny_0}{(z - mL - iny_0)^2} - \frac{mL + iny_0}{(z - mL + iny_0)^2} \right], \end{aligned}$$

где h – толщина пластины; $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$; ν – коэффициент Пуассона материала пластины, штрих у знака суммы указывает на то, что при суммировании исключается индекс $m = n = 0$.

Функции $\Phi_1(z)$ и $\Psi_1(z)$ ищем в виде

$$\begin{aligned} \Phi_1(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{L_1} \frac{g(t)}{t - z} dt, \quad L_1 = [-d, -R] + [R, d], \quad d = R + l; \\ \Psi_1(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{L_1} \left[\frac{g(t)}{t - z} - \frac{tg(t)}{(t - z)^2} \right] dt, \end{aligned}$$

где $g(t)$ – искомая функция

$$g(x) = \frac{2\mu}{1+\kappa} \cdot \frac{d}{dx} [v^+(x, 0) - v^-(x, 0)] \text{ на участке } R \leq |x| \leq d; \quad (7)$$

μ – модуль сдвига материала пластины.

Неизвестная функция $g(x)$ и комплексные потенциалы $\Phi_2(z)$ и $\Psi_2(z)$ должны быть определены из краевых условий (4)-(5). Для определения функций $\Phi_2(z)$ и $\Psi_2(z)$ граничное условие (4) представим в виде

$$\begin{aligned} \Phi_2(\tau) + \overline{\Phi_2(\tau)} - [\overline{\Phi_2'(\tau)} + \Psi_2(\tau)] e^{2i\theta} = \\ = -\Phi_*(\tau) - \overline{\Phi_*(\tau)} + e^{2i\theta} [\overline{\Phi_*(\tau)} + \Psi_*(\tau)], \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Phi_*(\tau) = \Phi_0(\tau) + \Phi_1(\tau)$; $\Psi_*(\tau) = \Psi_0(\tau) + \Psi_1(\tau)$.

Для решения граничной задачи (8) используем метод Н.И. Мусхелишвили [1]. В результате находим $\Phi_2(z)$ и $\Psi_2(z)$.

Требуя, чтобы функции (6) удовлетворяли краевому условию (5) на полосах предразрушения, получаем сингулярное интегральное уравнение относительно $g(x)$. Это сингулярное интегральное уравнение содержит неизвестные величины сосредоточенных сил P_{mn} и усилия $p(x)$, возникающие в связях между берегами полос предразрушения.

Согласно закону Гука, величина сосредоточенной силы P_{mn} , действующей на каждую точку крепления со стороны m -го стрингера, равна

$$P_{mn} = \frac{E_S A_S}{2ny_0} \Delta v_{mn} \quad (m = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots). \quad (9)$$

Здесь E_S – модуль Юнга материалы стрингера; A_S – площадь поперечного сечения стрингера; $2ny_0$ – расстояние между рассматриваемыми точками крепления; Δv_{mn} – взаимное смещение рассматриваемых точек крепления, равное удлинению соответствующего участка стрингера.

Обозначим через a радиус точки крепления (площадки сцепления). Примем [2] естественное допущение о том, что взаимное упругое смещение точек $z = mL + i(ny_0 - a)$ и $z = mL - i(ny_0 - a)$ в рассматриваемой задаче равно отмеченному выше взаимному смещению точек крепления Δv_{mn} . Это дополнительное условие совместности перемещений позволяет отыскать решение поставленной задачи. С помощью комплексных потенциалов (6) и формул Колосова-Мусхелишвили [1] находим взаимное смещение Δv_{mn} указанных точек. Таким образом, искомые величины сосредоточенных сил определяются из решения бесконечной системы уравнений (9).

Для построения решения сингулярного интегрального уравнения используем методом прямого решения интегральных уравнений [3].

Учитывая, что $g(x) = -g(-x)$ и применяя замену переменных, сингулярное интегральное уравнение с помощью процедуры алгебраизации [4] сводится к системе алгебраических уравнений для M неизвестных $g^0(\tau_m)$ ($m = 1, 2, \dots, M$). В полученную систему уравнений входят неизвестные значения напряжений $p(x)$ в узловых точках, принадлежащих полосе предразрушения.

На основании соотношений (3) и (7) имеем

$$\frac{1 + \kappa}{2\mu} g(x) = \frac{d}{dx} (C(x, p(x)) p(x)). \quad (10)$$

Уравнение (10) представим в следующем виде

$$-\frac{1+\kappa}{2\mu} \int_l^x g(x) dx = C(x, p(x)) p(x). \quad (11)$$

Для построения недостающих уравнений потребуем выполнения условия (11) в узловых точках, содержащихся в каждой полосе предразрушения (R, d) . В результате получаем алгебраическую систему из M уравнений для определения приближенных значений $p(\eta_m)$ ($m = 1, 2, \dots, M$).

Полученные алгебраические системы оказались связанными и должны решаться совместно, однако для их замкнутости не хватает одного уравнения, определяющего размер полос предразрушения. Условием, служащим для определения размера полос предразрушения, является условие конечности напряжений в вершине полосы предразрушения ($x = \pm d$). Это условие можно записать в следующем виде

$$\sum_{k=1}^M (-1)^k g_k^0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2} = 0. \quad (12)$$

Из-за неизвестного размера l полученная алгебраическая система даже при линейных связях оказалась нелинейной. Для решения полученной системы в случае линейных связей использовался метод последовательных приближений. Принято, что процесс последовательных приближений заканчивается, как только усилия вдоль полосы предразрушения, полученные на двух последовательных итерациях, мало отличаются друг от друга. В случае нелинейного закона деформирования связей для определения усилий в связях использовался также алгоритм, подобный методу упругих решений [5]. Полагали, что закон деформирования межчастичных связей (сил сцепления) является линейным при $(v^+ - v^-) \leq v_*$.

Для определения предельно-равновесного состояния вершины полосы предразрушения необходимо введение дополнительного критического условия. В качестве такого условия принимаем условие предельного раскрытия берегов полосы предразрушения. Будем полагать, что разрыв связей на краю полосы предразрушения $x = \pm R$ происходит при выполнении условия

$$v^+(R, 0) - v^-(R, 0) = \delta_c, \quad (13)$$

где δ_c – предельная длина (вытяжка) связи.

Совместное решение полученной системы уравнений и условия (13) дает возможность при заданных характеристиках связей найти критическую внешнюю нагрузку, при которой происходит появление трещин.

Таким образом, проведенный анализ позволил определить предельный размер полос предразрушения и допустимую внешнюю нагрузку.

Библиографический список

1. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили. – Москва : Наука, 1966. – 707 с.
2. Мирсалимов В. М. Некоторые задачи конструкционного торможения трещины / В. М. Мирсалимов // ФХММ. – 1986. – Т. 22, № 1. – С. 84-88.
3. Каландия А. И. Математические методы двумерной упругости / А. И. Каландия. – Москва : Наука, 1973. – 304 с.
4. Мирсалимов В. М. Неоднородные упругопластические задачи / В. М. Мирсалимов. – Москва : Наука, 1987. – 256 с.
5. Ильющин А. А. Пластичность / А. А. Ильющин. – Москва : Логос, 2004. – 388 с.

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЕРФОРИРОВАННОГО РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВИБРОИЗОЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PUTHON

Мондрус В.Л.¹, Сизов Д.К.², Квасников Т.М.¹

¹ НИУ МГСУ, г. Москва, Россия

² ООО «Вибросейсмозащита», г. Москва, Россия.

Введение. С развитием городской инфраструктуры вибрации от транспортных систем (метрополитен, железные дороги) становятся одной из главных причин снижения долговечности зданий и ухудшения качества жизни. Особенно опасны низкочастотные колебания (2–10 Гц), характерные для метрополитена мелкого заложения, которые могут вызывать резонанс в конструкциях и повреждения фундаментов. Традиционные методы виброзащиты, такие как упругие опоры или инерционные массы, часто требуют значительных пространственных и финансовых затрат, что делает актуальным поиск компактных решений с высокой эффективностью.

Согласно санитарным нормам Российской Федерации, уровень вибраций в помещениях должен строго регулироваться, что требует разработки эффективных систем виброзащиты. Одним из перспективных решений являются резинометаллические виброизоляторы. Эта технология, основанная на использовании многослойных элементов, позволяет не только минимизировать передачу вибраций, но и обеспечивать гибкость монтажа (Технология отложенного монтажа), так как виброизоляторы устанавливаются после возведения основных конструкций здания. Однако традиционные модели виброизоляторов, несмотря на их прочность и долговечность, имеют высокую жесткость, что ограничивает их

эффективность при низкочастотных воздействиях, характерных для метрополитена [1-4].

Для преодоления этого ограничения предложена модификация конструкции виброизоляторов, а именно перфорация виброизоляторов. Перфорация, представляющая собой создание отверстий в теле виброизолятора, позволяет снизить массу системы, перераспределить внутренние напряжения и увеличить демпфирование за счет дополнительной деформации материала. Как показали предыдущие исследования, проведенные с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программных комплексах ANSYS и FEMAP, даже единичное центральное отверстие в виброisolаторе может снижать первую собственную частоту системы на 15–20%, что критически важно для противодействия резонансным явлениям. Однако введение перфорации сопряжено с риском снижения грузоподъемности: однослойные виброизоляторы с отверстиями демонстрируют до 30% уменьшение несущей способности, а многослойные – до 50% при аналогичных габаритах. Это требует тонкой балансировки между виброизолирующими свойствами и прочностными характеристиками [5-6].

Актуальность темы подтверждается и практическими задачами современного строительства. Например, в Москве, где уже реализовано более 20 объектов с виброзащитой по технологии Дашевского (административные здания на Волхонке, 6 и др.), возникает потребность в адаптации решений для зданий с ограниченной несущей способностью фундаментов или повышенными требованиями к снижению вибраций (например, лаборатории, медицинские учреждения). Кроме того, рост числа подземных транспортных систем в условиях плотной городской застройки усиливает необходимость инновационных подходов к защите сооружений.

Целью настоящей работы является исследование влияния перфорации резиновых слоев виброизоляторов на динамические характеристики системы виброзащиты зданий, расположенных вблизи метрополитена. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

1. Разработка конечно-элементных моделей виброизоляторов с различными конфигурациями перфорации (от одного до пяти отверстий).
2. Сравнительный анализ собственных частот, напряженно-деформированного состояния и демпфирующих свойств моделей.

Новизна исследования заключается в систематическом изучении эффекта перфорации на поведение многослойных виброизоляторов при динамических нагрузках, а также в предложении алгоритма автоматизированного расчета параметров перфорации с использованием Python. Работа опирается на методологию, разработанную в предыдущих работах

авторов (Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Квасников Т.М.), где метод конечных элементов применялся для анализа традиционных виброизоляторов. Однако в отличие от них, в данной статье акцент сделан на модификации геометрии резиновых слоев и их влиянии на резонансные характеристики системы [7-8].

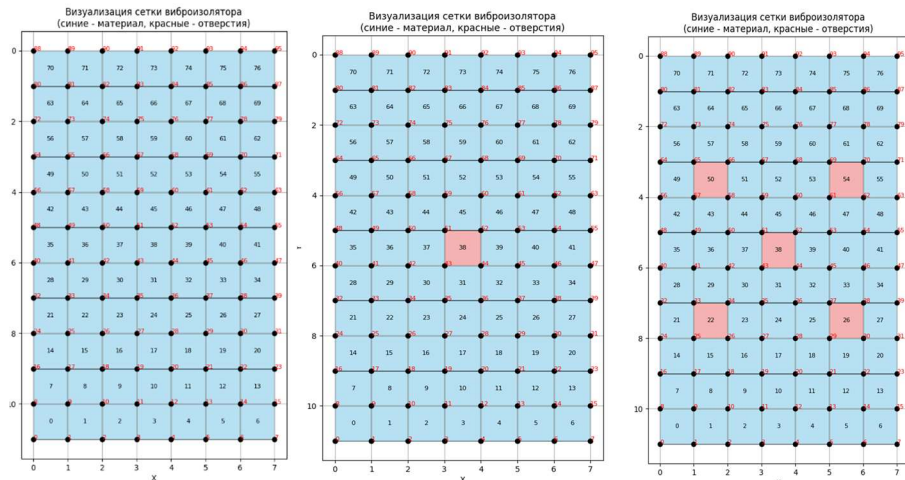


Рис. 1. Визуализация сетки МКЭ резинометаллического виброизолятора

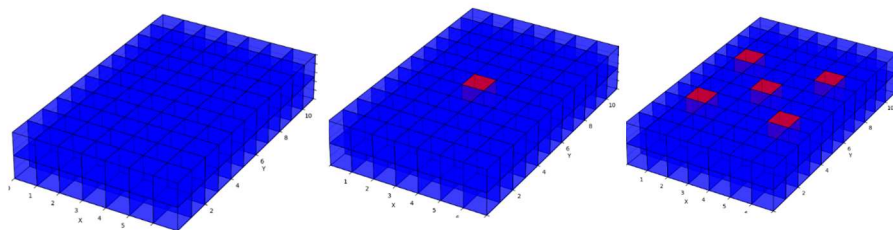


Рис. 2. 3D-Визуализация сетки МКЭ резинометаллического виброизолятора

Практическая значимость работы состоит в возможности расширения сферы применения резинометаллических виброизоляторов за счет их адаптации к сложным инженерным условиям. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании зданий вблизи метрополитена, железных дорог и других источников техногенных вибраций.

Методология. Методология исследования основана на численном моделировании поведения перфорированного резинометаллического виб-

роизолатора с применением метода конечных элементов (МКЭ) и программной реализации на языке Python. Подход включает этапы подготовки данных, генерации 3D-сетки, определения материальных свойств, сборки глобальной матрицы жесткости, применения граничных условий, решения системы уравнений и визуализации результатов. Все этапы реализованы с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib, что обеспечивает гибкость и возможность автоматизации.

Геометрия виброизолатора задается в виде 2D-матрицы, где синим обозначают тело резинометаллического виброизолатора, а красным – сквозные перфорации. На рисунках также пронумерованы узлы и конечные элементы.

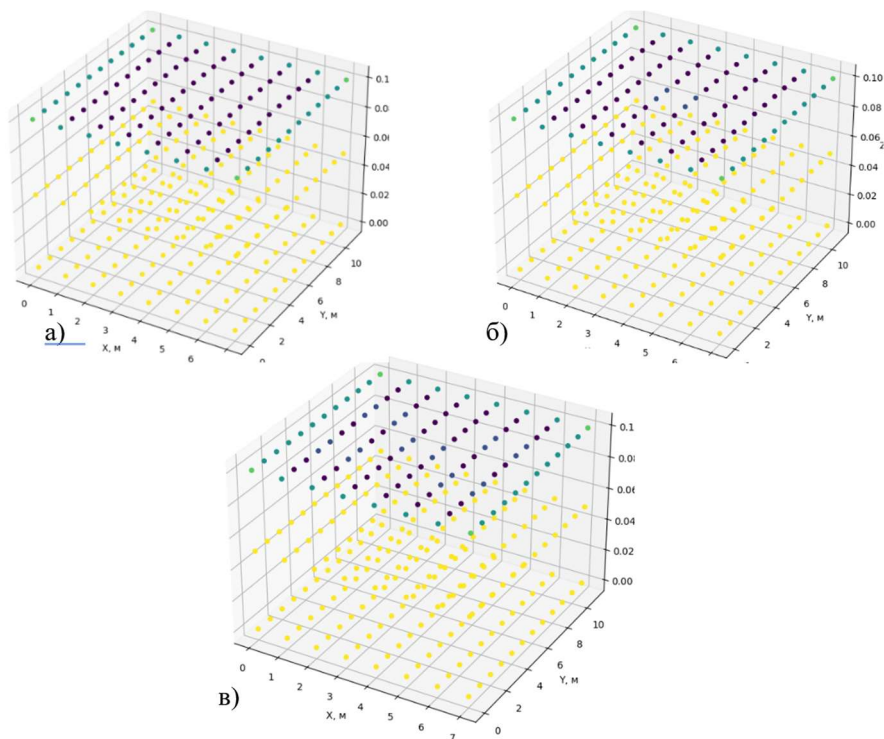


Рис. 3. Визуализация результатов расчета осадки резинометаллического виброизолатора под действием нагрузки: а) без отверстий; б) с одним отверстием; в) с пятью отверстиями

Такой подход позволяет легко задавать сложные конфигурации перфорации (например, центральное отверстие диаметром 50 мм или несколько отверстий) и автоматически обрабатывать их в коде.

Использование программных комплексов (FEMAP, ANSYS) позволяет точно прогнозировать поведение систем виброизоляции. Однако реализация на Python дает возможность гибко изменять параметры перфорации (размер, расположение) и автоматизировать сравнительный анализ эффективности различных конфигураций. [9]

МКЭ позволяет моделировать поведение резиновой опоры как ряд взаимосвязанных элементов с известными жесткостью и коэффициентом демпфирования. В коде реализованы эти принципы, что соответствует современным подходам к анализу виброизоляторов.

Разработаны три типа виброизоляторов:

- без перфорации (традиционная конструкция).
- с центральным отверстием (диаметр 50 мм).
- с пятью отверстиями (центральное диаметром 50 мм и четыре радиальных по 20 мм).

Геометрические параметры: 300×400×100 мм. Материалы: резина ($E = 1 \text{ МПа}$, $\nu = 0.49$), сталь ($E = 3 \cdot 10^{12} \text{ Па}$, $\nu = 0.25$).



Рис. 4. Таблица сравнения грузоподъемности резинометаллических виброизоляторов

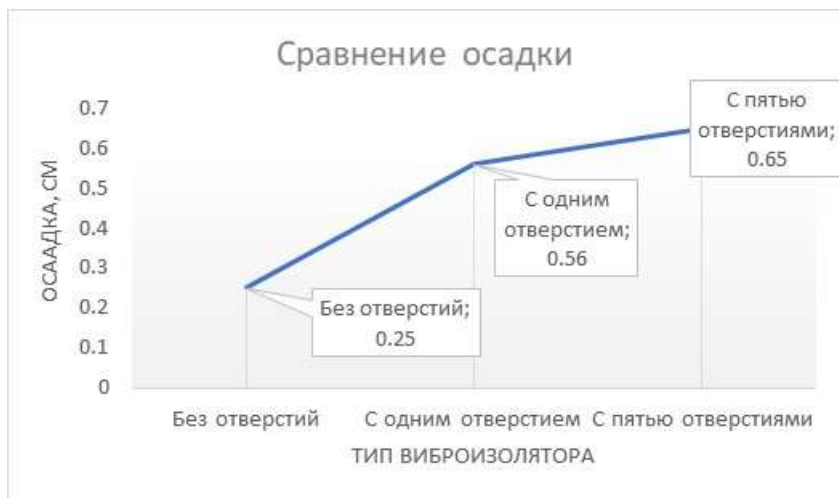


Рис. 5. Таблица сравнения осадки резинометаллических виброизоляторов



Рис. 6. Таблица сравнения собственной частоты резинометаллических виброизоляторов.

Результаты выполнения исследования:

1. Динамические характеристики

- виброизоляторы с перфорацией показали снижение первой собственной частоты на 18–25% по сравнению с традиционными моделями.

- модель с пятью отверстиями обеспечила наибольшее демпфирование за счет увеличенной боковой деформации резины.

2. Напряженно-деформированное состояние

- перфорация привела к локализации напряжений вблизи отверстий, но не превысила предельно допустимые значения.

- уменьшение зоны всестороннего сжатия способствует равномерному распределению нагрузки.

3. Практические рекомендации

- перфорированные виброизоляторы целесообразно применять в системах с заменяемыми элементами для тонкой настройки виброзащиты.

- оптимальный диаметр отверстий (20–50 мм) зависит от интенсивности вибраций и требований к грузоподъемности виброизоляторов.

По результатам выполнения исследования можно сделать следующие выводы:

1. Перфорация резиновых слоев виброизоляторов снижает жесткость системы на 20–30%, что позволяет эффективно противостоять низкочастотным вибрациям.

2. Модели с пятью отверстиями обеспечивают баланс между демпфированием и несущей способностью вкуче с применением вместе с традиционными виброизоляторами для точной настройки.

3. Использование МКЭ позволило оптимизировать параметры перфорации и подтвердить эффективность предложенных решений.

Библиографический список

1. Yuan J. Advances in Frontier Research on Engineering Structures II / J. Yuan // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2023. – Vol. 535. – DOI: 10.1007/978-981-97-6238-5_2.

2. Мондрус В. Л. Воздействие движения поездов метрополитена неглубокого заложения на городскую застройку / В. Л. Мондрус, В. А. Митрошин // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 9. – С. 14-20. – DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.14-20.

3. Yao J. Vibration isolation effect study of in-filled trench barriers to train-induced environmental vibrations / J. Yao, R. Zhao, N. Zhang, D. Yang // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2019. – Vol. 125. – P. 105-119.

4. Griffin M. J. Handbook of Human Vibration / M. J. Griffin. – Southampton, UK : Academic Press, 1990. – 987 p.

5. Мондрус В. Л. Резинометаллические виброизоляторы с отверстиями в системе виброзащиты зданий / В. Л. Мондрус, Д. К. Сизов, Т. М. Квасников // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 8. – С. 70-75. – DOI: 10.33622/0869-7019.2023.08.70-75.

6. Mondrus V. Application of the steel-rubber vibration isolators with perforation for vibration isolation of buildings / V. Mondrus, D. Sizov, T. Kvasnikov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2025. – Vol. 21, No. 1. – P. 121-135. – DOI: 10.22337/2587-9618-2025-21-1-121-135.

7. Мондрус В. Л. Расчет резинометаллических виброизоляторов с отверстиями в системе виброзащиты зданий с помощью программного комплекса, реализующего метод конечных элементов / В. Л. Мондрус, Д. К. Сизов, Т. М. Квасников // Железобетонные конструкции. – 2023. – Т. 4, № 4. – С. 43-51. – DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.43-51.

8. Мондрус В. Л. Перфорированные резинометаллические виброизоляторы в системе виброизоляции здания / В. Л. Мондрус, Д. К. Сизов, Т. М. Квасников // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 10. – С. 38-43. – DOI: 10.33622/0869-7019.2024.10.38-43.

9. Сизов Д. К. Вариационно-разностный метод расчета слоистых резинометаллических виброизоляторов, применяемых для защиты железобетонных зданий от техногенной вибрации / Д. К. Сизов // Железобетонные конструкции. – 2024. – Т. 5, № 1. – С. 68-78.

УДК 624.012.45:624.07:691.328

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНО-ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИ РАСЧЕТЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВЫСОКОПРОЧНЫМ БЕТОНОМ В СЖАТОЙ ЗОНЕ

Соколов О.О., Шагинян Г.В., Боловикова Ю.А., Левченко А.В.
ВГТУ, г. Воронеж, Россия

В современном строительстве двухслойные железобетонные конструкции приобретают всё большее распространение благодаря рациональному сочетанию различных материалов по высоте сечения. Особый интерес представляет использование высокопрочного бетона в сжатой зоне таких элементов, что существенно повышает их несущую способность и позволяет экономить материалы без потери эффективности. Однако расчёт двухслойных элементов – задача непростая, требующая учёта целого комплекса факторов, таких как нелинейность поведения бетона и арматуры, особенности совместной работы слоёв и процессы разрушения, возникающие на границе раздела различных по прочности материалов.

Существенное влияние на работу двухслойных элементов оказывает положение нейтральной оси сечения, а также характер распределения деформаций по высоте. Важным является условие, согласно которому вся сжатая

зона должна располагаться в слое с высокопрочным бетоном, что позволяет в полной мере реализовать преимущества его высокой прочности и жёсткости. Это подтверждается результатами исследований Рогатнева Ю.Ф., Соколова О.О. и Минани Ж., которые выявили оптимальные значения относительной высоты слоя высокопрочного бетона в диапазоне от 20 до 40 % общей высоты сечения [1]. При этом важно отметить, что превышение этих значений не только экономически неоправданно, но и может привести к снижению общей эффективности работы конструкции, так как нижний слой с обычным бетоном перестаёт эффективно выполнять свою функцию обеспечения совместной работы с арматурой.

Анализ существующих методик расчёта показывает, что наибольшее распространение получил деформационный подход, учитывающий нелинейную работу бетона и арматуры. Одним из эффективных решений является применение диаграммных методов, описанных, в частности, в трудах Карпенко Н.И., Травуша В.И. и Ерышева В.А. [2]. Согласно данным методам, бетон и арматура рассматриваются в виде материалов с нелинейными зависимостями между напряжениями и деформациями, что позволяет более точно описывать фактическое состояние конструкции под нагрузкой. Например, широко применяется криволинейная диаграмма деформирования бетона, рекомендованная СП 63.13330.2018, позволяющая учитывать постепенный рост пластических деформаций и развитие повреждений структуры бетона на различных стадиях нагружения.

В практике расчёта двухслойных конструкций также активно используется метод конечных элементов (МКЭ), реализация которого возможна в специализированных программных комплексах, таких как ANSYS. Исследования Васильева А.А. подтверждают высокую эффективность этого подхода, особенно при моделировании сложных процессов развития деформаций и разрушения в бетоне и арматуре [3]. МКЭ позволяет не только определять предельные состояния элементов, но и проследивать процесс возникновения и развития трещин, а также выявлять зоны концентрации напряжений и деформаций.

В то же время, несмотря на развитие численных методов, остаётся востребованным и классический подход, основанный на методе предельного равновесия. Его актуальность подтверждается в методических пособиях, таких как работа Карпенко Н.И. и Травуша В.И., где отмечается, что данный подход позволяет эффективно решать задачи проектирования на ранних этапах, когда необходимо оперативно оценить несущую способность конструкции без проведения трудоёмких численных расчётов [2].

Особенности расчёта двухслойных изгибаемых элементов заключаются также в необходимости учёта взаимодействия слоёв, которое реализуется через специальные конструктивные решения, например, использование поперечной арматуры, заходящей в оба слоя и выполняющей функцию нагелей. Эксперименты, проведённые на балках с высокопрочным бетоном в полке и обычным бетоном в ребре, показали, что надёжное соединение слоёв обеспечивает значительное увеличение общей несущей способности и деформационной устойчивости элемента. Особенно это важно на поздних стадиях нагружения, когда начинаются интенсивные процессы пластического деформирования и образования трещин.

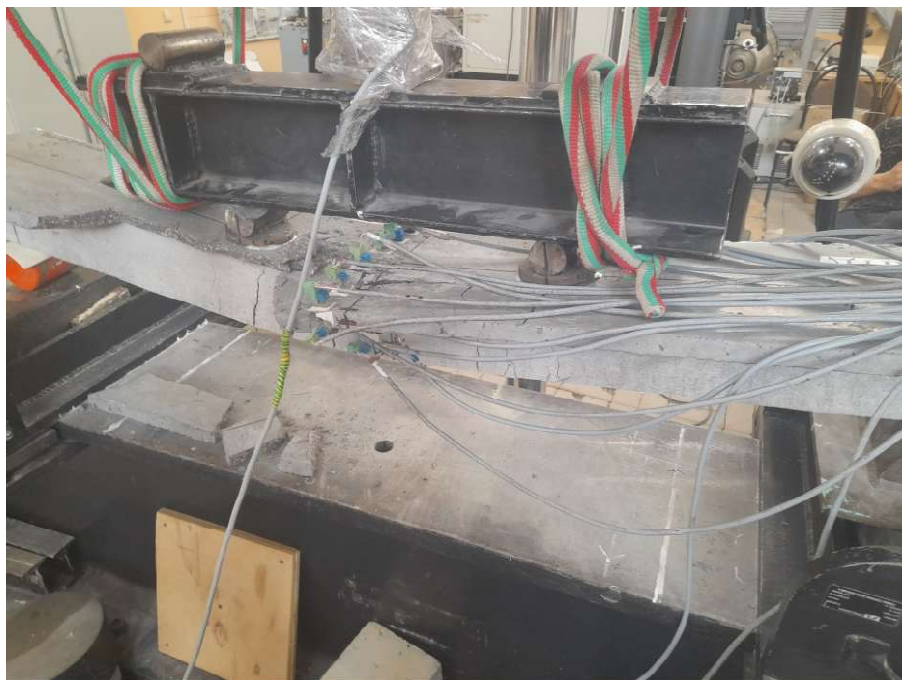


Рис.1. Разрушение балки с развитием нормальных и наклонных трещин

В ходе испытаний балок таврового профиля, которые были выполнены Рогатневым Ю.Ф. и его коллегами, удалось установить характерные особенности разрушения таких элементов [4]. Разрушение сопровождалось появлением и развитием нормальных и наклонных трещин, при этом особое внимание привлекали горизонтальные сдвиговые трещины в зоне контакта слоёв, которые образовывались только при достижении арматурой предела текучести. Полученные данные позволили

сделать вывод о необходимости особого внимания к расчёту зоны контакта слоёв, а также о целесообразности введения специальных расчётных коэффициентов для оценки прочности межслоевого соединения.

Таким образом, проведённый анализ показывает, что двухслойные изгибаемые железобетонные элементы с высокопрочным бетоном представляют собой перспективное направление в современном строительстве. Рациональный расчёт таких конструкций требует применения современных численных и аналитических методик с обязательным учётом особенностей работы материалов и взаимодействия слоёв. Рекомендуется продолжить исследования в этом направлении, уделяя особое внимание экспериментальной проверке и уточнению существующих моделей, а также совершенствованию методов расчёта с использованием современных вычислительных технологий.

Библиографический список

1. Рогатнев Ю. Ф. Оптимизация параметров поперечного сечения двухслойных изгибаемых железобетонных элементов с высокопрочным бетоном класса В90 в сжатой зоне / Ю. Ф. Рогатнев, Ж. Минани, О. О. Соколов, А. Ю. Рогатнев // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2022. – № 3(22). – С. 17–27.
2. Карпенко Н. И. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования : методическое пособие / Н. И. Карпенко, В. И. Травуш, С. Н. Карпенко [и др.]. – Москва : [б. и.], 2017. – 197 с.
3. Васильев А. А. Соотношение прочностных параметров в расчетах железобетонных изгибаемых стержневых конструкций по нелинейной деформационной модели и методу предельных усилий : дис. кандидата технических наук / А. А. Васильев. – Тольятти : [б. и.], 2020. – 73 с.
4. Rogatnev Yu. F. Bearing Capacity of T-Beams with a Flange Made of High-Strength Concrete and Longitudinal Reinforcement of Class A500C / Yu. F. Rogatnev, O. O. Sokolov, O. Perekalskiy, M. M. Jawid Hasani // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2024. – Vol. 20, No. 1. – P. 98–108.

УДК 624.04

К ВОПРОСУ ОБ УСТОЙЧИВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Овчинников И.И.¹, Овчинников И.Г.²¹*ТИУ, г. Тюмень, СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия*²*УрГУПС, г. Екатеринбург, ТИУ, г. Тюмень, Россия*

В настоящее время устойчивое развитие рассматривается как способ удовлетворения реальных потребностей общества без ущерба для способности будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности.

Рассматриваемая в таком виде проблема устойчивого развития привлекает все большее внимание исследователей и инженеров и потому предпринимаются большие усилия для понимания и оценки воздействия продуктов деятельности человечества на три измерения устойчивости: общество, экономику и окружающую среду.

Для того, чтобы способствовать устойчивому развитию транспортной инфраструктуры и, в частности, мостостроения, уменьшению влияния на окружающую среду и нарушения мобильности, мостостроительным компаниям необходимо анализировать свою деятельность не только в рамках строительства мостовых сооружений на сегодняшний день, но и на перспективу. Инженеры-мостостроители отвечают за улучшение жизни населения за счет инфраструктуры. Они несут ответственность за выполнение этого действенным и рентабельным способом, кроме того, все это должно осуществляться экологически рациональным способом или, как говорят за рубежом, «зеленым».

Мостостроение относится к строительной отрасли, которая в последнее время стала одним из основных факторов экологического стресса в нашем обществе, поскольку на нее приходится 30% мирового потребления энергии, 30% выбросов парниковых газов и 40% добычи сырья. На рисунках 1 и 2 приведена информация о количестве дорожных сооружений на дорогах России и динамика изменения состояния мостовых сооружений.

Предполагается, что мировое производство цемента в 2030 году будет в 1,4 раза выше, чем в 2013 году. В то же время транспортная инфраструктура регионов, включая мостовые сооружения, является важнейшим фактором экономического развития регионов. По оценкам Международного валютного фонда, инвестирование дополнительного 1% валового внутреннего продукта (ВВП) в инфраструктуру приведет к увеличению мирового ВВП на 1,5% в течение четырех лет.



Рис. 1. Общее количество дорожных сооружений на федеральных дорогах



Рис. 2. Общее количество дорожных сооружений на региональных дорогах и динамика изменения их состояния

Принимая во внимание огромные экономические, экологические и социальные последствия, связанные с развитием строительного сектора, в последние годы особое внимание начинает уделяться проблеме обеспечения устойчивости инфраструктуры. Компоненты инфраструктуры, включая мостовые сооружения, предназначены для обслуживания значительной группы людей в течение длительного периода времени, и потому создание устойчивых и отказоустойчивых элементов инфраструктуры является ключевым фактором для достижения устойчивого будущего.

В этом контексте особого внимания требуют те компоненты инфраструктуры, которые подвержены воздействию агрессивных эксплуатационных сред, которые инициируют деградиационные процессы, ставящие под угрозу их функциональность, безопасность и вызывающие значительные потребности в техническом обслуживании на протяжении всего срока их службы.

Общее количество транспортных сооружений, выполненных из обычного, предварительно напряженного и сталежелезобетона составляет 93%, то есть подавляющее количество мостовых сооружений выполнено с применением бетона. Так как бетон является наиболее используемым строительным материалом в мире и вторым по потреблению материалом в мире после воды, то дегградация бетонных конструкций и управление соответствующими стратегиями их обслуживания оказались одними из самых сложных задач, стоящих перед строительной отраслью в последнее время. Например, только в Европе ежегодные затраты на ремонт бетонных конструкций превышают 15×10^9 евро, что составляет более 50% годового бюджета строительства Европы.

Техническое обслуживание, связанное с коррозией, влечет за собой значительные выбросы в окружающую среду, обусловленные растущими потребностями в производстве бетона и цемента. Только на производство цемента для бетона уходит около 8% углекислого газа, ежегодно выбрасываемого во всем мире, причем в Европе примерно 20% производимого цемента в среднем расходуется на ремонтно-восстановительные работы.

Очевидно, что проектирование и эксплуатация мостовых сооружений, изготавливаемых с применением бетона, является весьма важным вопросом, требующим применения особых технологий проектирования, учитывающих не только стоимость сооружения на этапе создания, но и расходы на эксплуатацию.

То есть проблему устойчивого развития мостовых сооружений надо решать и при проектировании, и при строительстве, и при эксплуатации и даже при утилизации отслуживших свой срок мостовых сооружений, то есть на протяжении всего жизненного цикла. Расчетный срок службы автомобильных мостов, закладываемый при их проектировании, составляет величину порядка 100 лет, однако железобетонные мосты 1960-1970-х годов постройки и в России и в других странах начали демонстрировать признаки ухудшения их эксплуатационного состояния через 40, а некоторые и через 20 лет. Задача проектировщиков состоит в том, чтобы добиться минимального общего потребления энергии в тече-

ние расчетного срока службы мостового сооружения и убедить заказчиков в том, что экологически рациональный подход предпочтительнее проектирования с минимальными начальными затратами.

Экологически рациональное проектирование максимально использует ресурсы, которые дает природа и как можно меньше использует те, которые требуют переработки, затрат нефти, газа и других не возобновляемых источников энергии. Применяя принцип Парето к рассмотрению жизненного цикла мостового сооружения, можно отметить, что только 20% стоимости приходится на проектирование и строительство, а 80% – это затраты на стадии эксплуатации. Следовательно, инвестиции, вкладываемые на этапе проектирования, окупаются за счет эффективной эксплуатации.

Экологически рациональное проектирование это проектирование, которое не только решает сегодняшние задачи, но и способствует эффективному удовлетворению потребностей будущих поколений. Большинство целей экологически рационального проектирования направлено на снижение затрат, так что можно сказать, что поле деятельности современной инженерии – это устойчивое развитие и применение инноваций, а цели деятельности инженеров – создание инновационных, эффективных, материалосберегающих и энергосберегающих конструкций.

Одним из направлений экологически рационального проектирования мостовых сооружений новых конструктивных форм является бионический подход, опирающийся на концепцию применения идей природы для решения проблем мостостроения.

С точки зрения экологически рационального проектирования также весьма интересной представляется концепция «идеального моста», согласно которой мостовое сооружение должно состоять из элементов, имеющих одинаковую долговечность и одинаковую скорость деградации. В этом случае не потребуется организовывать ремонт элементов сооружения до выработки ими жизненного цикла.

Можно предложить и другую концепцию «идеального моста», у которого долговечность вышерасположенных элементов меньше, чем долговечность нижерасположенных. Согласно такому подходу, долговечность дорожной одежды и деформационных швов может быть меньше долговечности пролетных строений, а вот долговечность опорных частей должна быть не меньше долговечности пролетных строений, в противном случае при замене опорных частей, отработавших свой ресурс, придется поднимать пролетное строение, не выработавшее свой временной ресурс, что может привести к его повреждениям или даже разрушению.

Не менее важен с точки зрения экологически рационального проектирования и вопрос антикоррозионной защиты мостовых сооружений с применением лакокрасочных материалов. В этой области также действует своеобразная форма принципа Парето: стоимость систем антикоррозионной защиты составляет примерно 20%, а вот стоимость работ по подготовке поверхностей к защите, устройству сложных вспомогательных сооружений и других видов работ, обеспечивающих выполнение антикоррозионной защиты с соблюдением экологических требований, составляет порядка 80%. А это значит, при выборе систем антикоррозионной защиты предпочтение следует отдавать пусть и дорогим, но долговечным системам защиты, так как в этом случае процедура повторной окраски мостовых конструкций будет требоваться значительно реже, экономия средств будет выше, а экологическое загрязнение значительно ниже.

Поэтому еще одним из примеров (направлений) экологически-рационального проектирования является применения атмосферостойких сталей и алюминиевых сплавов для изготовления мостовых конструкций, не требующих нанесения вторичной защиты (защитного лакокрасочного покрытия), загрязняющего окружающую среду.

Отметим еще одно эффективное направление экологически рационального проектирования мостовых сооружений, связанное с применением трубобетонных конструкций особенно при создании малых мостовых сооружений.

Более подробная информация по рассмотренной проблеме приведена в публикациях [1-5].

Библиографический список

1. Овчинников И. Г. Современные и, возможно, будущие тенденции мостостроения – от чего они зависят? / И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников // Мостовые сооружения. XXI век. – 2024. – № 2(61). – С. 36–41.
2. Овчинников И. Г. Бионический дизайн и аддитивные технологии в мостостроении / И. Г. Овчинников, И. О. Разов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 4(61). – С. 104–115.
3. Астанков К. Ю. Современные подходы к проектированию и строительству арочных мостов с использованием трубобетона / К. Ю. Астанков, И. Г. Овчинников // Мостовые сооружения. XXI век. – 2024. – № 1(60). Спецвыпуск. – С. 66–75.
4. Овчинников И. Г. Экологически рациональное проектирование мостовых сооружений в России / И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников // Мостовые сооружения. XXI век. – 2024. – № 1(60). Спецвыпуск. – С. 60–65.

5. Ovchinnikov I. G. Sustainable bridge design in Russia / I. G. Ovchinnikov, I. I. Ovchinnikov // International Scientific and Practical Conference «Railway Transport and Technologies» : AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2624. – Art. 030021. – P. 030021-1–030021-8. – DOI: 10.1063/5.0133764.

УДК 624.191

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА МНОГОСЛОЙНОЙ
ОБДЕЛКИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ,
СООРУЖАЕМОГО ПОД ЗАЩИТОЙ СЛОЯ ПОРОД С БОЛЕЕ
ВЫСОКИМИ ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Саммаль А.С., Юдин С.С., Афанаскина П.М.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Интенсивное освоение подземного пространства связано с существенным усложнением условий проходки и поддержания горных выработок различного назначения. При этом особую актуальность приобретают вопросы обеспечения безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений в массивах, сложенных породами различных типов, в том числе, гидротехнического назначения.

К особенностям функционирования гидротехнических туннелей, которые должны учитываться при проектировании, относятся переменные режимы статической работы их обделок. При этом подземные конструкции должны обладать достаточной несущей способностью и прочностью при действии не только сжимающих напряжений, формирующихся в процессе взаимодействия с вмещающим весом горным массивом, но также значительных растягивающих усилий в поперечных сечениях, обусловленных внутренним давлением, которые в период водосброса могут быть весьма значительными. В это связи обделки туннелей, как правило, представляют собой многослойные системы, каждый из слоев которых имеет определенное назначение, например, укрепление заобделочного пространства, гидроизоляцию, препятствующую фильтрации воды из сооружения, внутреннюю металлическую облицовку и пр.

Данные наблюдений, а также результаты экспериментальных исследований [1,2], выполненных на объектах, расположенных вблизи границы раздела слоев пород с различными физическими и механическими характеристиками, свидетельствуют о существенном влиянии слоя ослабленных или, наоборот, более крепких грунтов на напряженно-деформированное состояние подземных конструкций и устойчивость вмещающих грунтов.

В настоящее время в практике проектирования конструкций гидротехнических подземных сооружений широкое применение получило компьютерное моделирование на базе специализированных программных комплексов, реализующих численные методы, основным из которых является метод конечных элементов (МКЭ). При этом практическая реализация плоских и пространственных численных моделей, несмотря на высокий уровень современного развития компьютерных технологий, сопряжена с рядом сложностей контроля получаемых результатов, в основном, связанных с отсутствием необходимых критериев, которые должны быть удовлетворены в каждом конкретном случае. Так, неудачное формирование расчетной области или неточности при задании граничных условий могут приводить к значительным погрешностям расчета, и, как следствие, к неверным проектным решениям. В связи с этим действующими нормативно-техническими документами [3] расчет напорных гидростатических туннелей рекомендуется производить с применением аналитических методов, основанных на строгих решениях соответствующих задач механики сплошной среды.

В основу предлагаемого метода расчета многослойной обделки напорного гидротехнического туннеля, сооружаемого под защитой слоя более крепких пород, положено аналитическое решение задачи теории упругости, расчетная схема которой приведена на рис. 1.

Рассматривается напряженно-деформированное состояние бесконечной кусочно – однородной среды, составленной из двух полубесконечных областей $S_{0,m}$ ($m = 0, 1$), моделирующих горный массив, сложенный двумя типами грунтов, которые имеют различные деформационные характеристики – модули деформации $E_{0,m}$ и коэффициенты Пуассона $\nu_{0,m}$. Прямолинейная граница L раздела рассматриваемых областей может быть наклонена относительно горизонтали (оси x^*). Нижняя область $S_{0,0}$ ослаблена круговым отверстием, подкрепленным многослой-

ным кольцом $S = \sum_{j=1}^N S_j$ (N -число слоев в кольце), моделирующим подземную конструкцию. Концентрические слои S_j ($j = 1, \dots, N$) различной толщины, контуры которых имеют радиусы R_j ($j = 1, \dots, N$), выполнены из различных материалов, деформационные свойства которых характеризуются соответствующими величинами E_j, ν_j ($j = 1, \dots, N$).

Внутренний контур кольца L_N подвержен нормальному давлению - p , линейно изменяющемуся по высоте (координате y^*):

$$p = p_0 + \gamma_w(R_N - y^*), \quad (1)$$

здесь первое слагаемое характеризует величину внутреннего напора, а второе - вес воды, заполняющей тоннель без напора, γ_w - удельный вес воды.

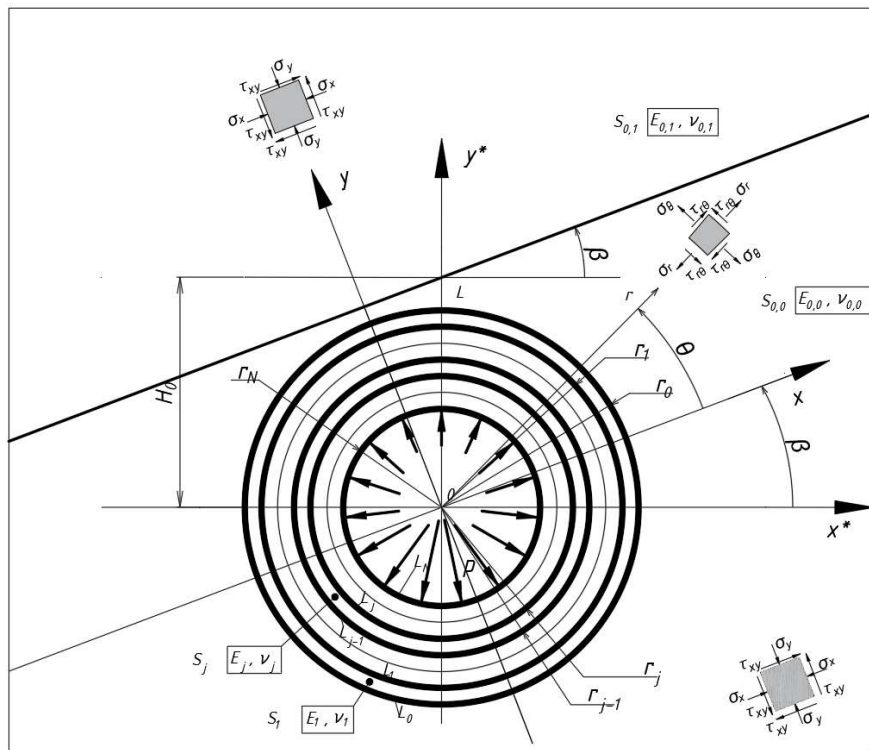


Рис. 1. Расчетная схема многослойной обделки гидротехнического туннеля, работающего в напорном режиме (в период водосброса)

Слои кольца и вмещающая кусочно-однородная среда деформируется совместно, то есть граничные условия поставленной задачи отражают непрерывность векторов напряжений и перемещений контактирующих областей.

С целью упрощения решения поставленной задачи (рис.1) вводятся новые декартова система и полярная системы координат, с общим началом, совмещенным с центром многослойного кольца, действительная

ось Ox которых направляется параллельно границе раздела областей $S_{0,m}$ ($m=0,1$)

Далее, применяя математический аппарат теории функций комплексного переменного воспользуемся представлением точек t_j , расположенных на круговых контурах L_j ($j=0,...,N$) в виде

$$t_j = x_j + iy_j = r_j \sigma, \quad (2)$$

где x_j, y_j - координаты точек j - того контура в декартовой системе координат xOy , $\sigma = \cos \theta + i \sin \theta = e^{i\theta}$ - точка единичной окружности.

Решение поставленной задачи строится на основе метода Колосова – Мухелишвили [4]. С этой целью вводятся в рассмотрение комплексные потенциалы $\varphi_{0,m}(z)$, $\psi_{0,m}(z)$ ($m=0,1$), определяющие напряженно-деформированное состояние указанных областей $S_{0,m}$ ($m=0,1$). В свою очередь, применительно к кольцам S_j ($j=1,...,N$) вводятся соответствующие потенциалы $\varphi_j(z)$, $\psi_j(z)$ ($j=1,...,N$).

Введенные потенциалы связаны с напряжениями и смещениями известными соотношениями [4].

Далее применяется прием, предложенный в работе [4], согласно которому в качестве искомых принимаются новые функции $\Phi_{0,m}(z)$, $\Psi_{0,m}(z)$ ($m=0,1$), $\Phi_j(z)$, $\Psi_j(z)$ ($j=1,...,N$), которые выражаются через потенциалы $\varphi_{0,m}(z)$, $\psi_{0,m}(z)$ ($m=0,1$), $\varphi_j(z)$, $\psi_j(z)$ ($j=1,...,N$) следующим образом

$$\begin{aligned} \Phi_{0,m}(z) &= \varphi'_{0,m}(z), \quad \Psi_{0,m}(z) = \psi'_{0,m}(z) \quad (m=0,1), \\ \Phi_j(z) &= \varphi'_j(z), \quad \Psi_j(z) = \psi'_j(z) \quad (j=1,...,N). \end{aligned} \quad (3)$$

При этом граничные условия, отражающие непрерывность смещений контактирующих областей на прямолинейной границе L записывается в виде

$$u_x^{(0,0)} + iu_y^{(0,0)} = u_x^{(0,1)} + iu_y^{(0,1)} \quad (4)$$

где

$$u_x^{(0,m)} = \frac{\partial u_x^{(0,m)}}{\partial x}; \quad u_y^{(0,m)} = \frac{\partial u_y^{(0,m)}}{\partial x} \quad (m = 0, 1). \quad (5)$$

Аналогичным образом преобразуются соответствующие условия в полярной системе координат применительно к введенным новым функциям (3).

Таким образом, поставленная задача сводится к определению $2N + 4$ (N – количество слоев в многослойном кольце) комплексных потенциалов, которые, следуя [5], представляются в виде рядов по степеням переменной z . В результате, применив прием аналитического продолжения функций, регулярных в нижней полуплоскости $S_{0,0}$, через бесконечную прямолинейную границу L в верхнюю полуплоскость $S_{0,1}$, раскрывая граничные условия поставленной задачи, приходим к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений, ограничив которую соответствующим образом, удастся прийти к определению искомых коэффициентов разложений введенных потенциалов, а далее – напряжений и смещений в рассматриваемых областях по формулам Колосова – Мухелишвили.

Полученное решение реализовано в виде компьютерной программы, которые производить эффективные многовариантные расчеты многослойных обделок напорных туннелей, сооружаемых вблизи границы налегающего слоя грунта с другими деформационными свойствами.

Библиографический список

1. Фотиева Н. Н. Расчет круговой крепи подземных сооружений в неоднородном массиве на действие собственного веса пород / Н. Н. Фотиева, О. В. Афанасова // Подземное и шахтное строительство. – 1991. – № 2. – С. 7–15.
2. Юфин С. А. Некоторые актуальные вопросы проектирования и строительства туннелей в комплексах сооружений электростанций / С. А. Юфин, О. К. Постольская // Энергетическое строительство за рубежом. – 1988. – № 5. – С. 23–29.
3. Руководство по проектированию гидротехнических туннелей. – Москва : Стройиздат, 1982. – 287 с.
4. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – Москва : Наука, 1966. – 707 с.
5. Саммаль А. С. Аналитические методы расчета подземных сооружений / А. С. Саммаль, С. В. Анциферов, П. В. Деев. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2013. – 115 с.

УДК 624.04

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД В УПРУГОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧЕК

Синева Н. Ф., Селиванов Ф.С.

*СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия**Вавиловский университет, г. Саратов, Россия*

Энергетический подход удобен для привлечения методов теории катастроф, где анализируется полная потенциальная энергии системы для изучения качественного поведения внутренних параметров деформируемой системы от внешних. По виду выражения для потенциальной энергии предсказывается поведение упругой системы на основе образов элементарных катастроф [1]. Полная потенциальная энергия упругой системы $\mathcal{E}$ (с точностью до постоянного слагаемого) - сумма потенциальной энергии деформации системы U и потенциала внешних сил Π : $\mathcal{E}=U+\Pi$.

Известны формы энергетического критерия С.П. Тимошенко, когда $\Delta\mathcal{E}$ выражается прямо через внешние нагрузки, и форма Дж. Брайана, когда $\Delta\mathcal{E}$ выражается через внутренние усилия исходного состояния.

Алгоритм исследования устойчивости, как правило, состоит в следующем:

- постановка и решение нелинейной краевой задачи для определения возможных форм равновесия, среди решений краевой задачи выделяются действительные состояния равновесия;
- нахождение внешних (управляющих) параметров (нагрузка, температура, агрессивное воздействие), при которых возможна бифуркация равновесных форм, исследуется форма ответвляющихся решений;
- изучение характера начального закритического поведения.

Краевые задачи нелинейны и не имеют аналитических решений, применяются численные процедуры, которые сводят решение краевых задач к нелинейным алгебраическим системам. Они могут быть исследованы качественно и позволяют прогнозировать поведение деформируемой системы в зависимости от ее ведущих внешних параметров.

Рассмотрение потенциальной энергии деформируемой системы, ее алгебраизация, затем ее качественное исследование методами теории катастроф представляется перспективным для прогнозирования поведения конструкций.

Анализируя результаты, полученные в теории катастроф, например [1], нужно получить зависимость потенциальной функции от внешнего управляющего параметра процесса деформирования P вида:

$$V(P, A, C_i) = C_1 A + C_2 A^2 + C_3 A^3 + C_4 A^4 + \dots$$

где A – внутренний параметр деформирования, C_i – коэффициенты, зависящие от входных параметров процесса деформирования конструкции, включая параметры материала, способов закрепления и пр. По коэффициентам C_i затем может быть предсказан характер критического поведения конструкции, ее чувствительность к несовершенствам, соотношение между критической и предельной нагрузками для рассматриваемой конструкции. Первые типы классических элементарных катастроф (из семи) выглядят так:

Катастрофа «Складка»	$V = A^3 + C_1 A$
Катастрофа «Сборка»	$V = A^4 + C_2 A^2 + C_1 A$

О наличии катастрофы в семействе потенциальных функций, которыми описывается поведение системы, можно судить по основным признакам катастроф, или «флагам катастроф». Требуется выявить соответствие параметров, выражений, уравнений, описывающих поведение конкретной деформируемой системы с какой-то катастрофой из списка, после чего поведение системы может быть предсказано на основе теории катастроф. Это «наследник» теории бифуркаций дифференциальных уравнений и теории особенностей гладких отображений, теперь раздел математики, который является дальнейшим развитием теории устойчивости и бифуркаций.

Проиллюстрируем такой анализ на примере нелинейного поведения пологой, прямоугольной в плане, оболочки при действии поперечной нагрузки q . Обозначения: h – толщина, a, b – размеры сторон в плане, условие пологости: $f/a < 0,2$. Перемещения точек срединной поверхности отсчитывают вдоль линий кривизны x, y ; перемещения W – по нормали к срединной поверхности. Главные кривизны: $k_x = 1/R_x$, $k_y = 1/R_y$, R_x, R_y – радиусы кривизны, модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν .

Введя функцию усилий F и обозначения для групп дифференциальных операторов краевой задачи:

$$L(W, F) = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x},$$

$$\nabla_k^2(W) = \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} k_y + k_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2},$$

таким образом система нелинейных уравнений равновесия пологих оболочек в смешанной форме имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} D\nabla^4 W &= L(W, F) + \nabla_k^2 F + q; \\ \frac{1}{Eh} \nabla^4 F &= -\frac{1}{2} L(W, W) - \nabla_k^2 W. \end{aligned} \right\}$$

Здесь D цилиндрическая жесткость, q поперечная нагрузка. Невязки этих двух уравнений обозначим X и Y

$$X \equiv D\nabla^4 W - L(W, F) - \nabla_k^2 F - q,$$

$$Y \equiv \frac{1}{Eh} \nabla^4 F + \frac{1}{2} L(W, W) + \nabla_k^2 W.$$

Проведем алгебраизацию краевой задачи, для этого вводим аппроксимирующие функции для W и F : $W(x, y) = AW_x(x)W_y(y)$, $F(x, y) = BF_x(x)F_y(y)$, аппроксимирующие функции, как обычно, должны удовлетворять физическому смыслу, граничным условиям, быть ортогональными, представлять полную систему. Запишем условие ортогональности невязки X и Y системе введенных функций.

$$\iint_0^{ab} Y F_x(x) F_y(y) dx dy = 0 \quad \iint_0^{ab} X W_x(x) W_y(y) dx dy = 0$$

Выполнив интегрирование, запишем решение дифференциальной краевой задачи в виде алгебраического уравнения относительно A с коэффициентами k_1, k_2, k_3 , которые содержат внутренние параметры геометрии и материала оболочки:

$$k_1 A - k_2 A^2 + k_3 A^3 = q.$$

Конкретизируем W_x, W_y :

$$W(x, y) = \sin(\pi x / a) \sin(\pi y / b),$$

тогда для Θ и q :

$$\Theta = \frac{2\pi^2 Eh}{9a} A^4 - \frac{\pi^2 Eh}{6Ra^2} A^3 + \frac{D\pi^6}{8a^4} A^2 + \frac{\pi^2 Eh}{32R^2} A - qA$$

$$q = \frac{8\pi^2 Eh}{9a} A^3 - \frac{\pi^2 Eh}{2Ra^2} A^2 + \left(\frac{D\pi^6}{4a^4} + \frac{\pi^2 Eh}{16R^2} \right) A.$$

На рис.1 представлен график $q(A)$, где k_1, k_2, k_3 (например, разные кривизны):

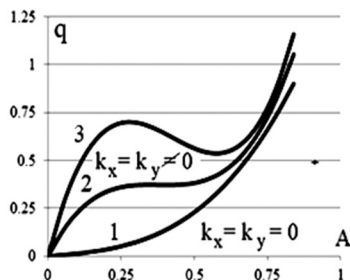


Рис. 1. Диаграмма $q(A)$

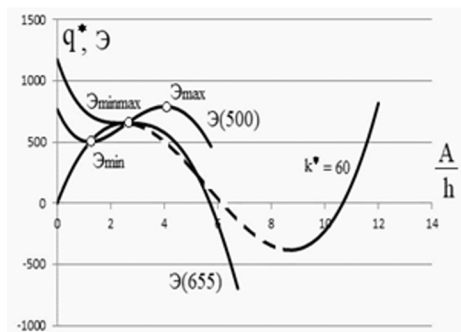


Рис. 2. График $\mathcal{E}$ для двух уровней $q^* = 500$ и $q^* = 655$

На рис.1 для графика 1: $k_1 = 0.12$; $k_2 = 0$; $k_3 = 1.35$; для графика 2: $k_1 = 3$; $k_2 = 8$; $k_3 = 7.05$; для графика 3: $k_1 = 6$; $k_2 = 16$; $k_3 = 12.5$.

$$q^* = \frac{\pi^2}{16h} k^{*2} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{-}\right)^2} + \frac{\pi^4}{192h} \frac{\left(1 + \frac{1}{-}\right)^2}{\left(1 - \frac{1}{-}\right)} A - k^* \frac{\pi^2}{h^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{-}\right)^2} A^2 + \frac{32\pi^2}{9h^3} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{-}\right)^2} A^3,$$

$$, \nu=0,3 \quad k_x^* = \frac{k_x}{h} a^2; \quad k_y^* = \frac{k_y}{h} b^2; \quad = \frac{a}{b} k^* k_x^* = k_y^* =$$

$$\text{При } a = b: \quad q^* = \left(0.154k^{*2} + 22\right) \frac{A}{h} - 2,46k^* \frac{A^2}{h^2} + 8,77 \frac{A^3}{h^3}.$$

Можно привести уравнение к каноническому виду (без A^2) через подстановку и замену переменных.

Для иллюстрации построим диаграмму $\mathcal{E}(q)$ при двух значениях q^* . Численный результат оценки устойчивости состояний равновесия для оболочки с кривизной $k^* = 60$ для двух уровней нагружения $q^* = 500$ и $q^* = 655$ представлен на рис. 2. Звездочкой обозначены безразмерные кривизны и параметр нагружения. Для этих уровней:

$$\mathcal{E}(q^*) = (0.154k^{*2} + 22) \frac{A^2}{2h} - 2,46k^* \frac{A^3}{3h^2} + 8,77 \frac{A^4}{4h^3} - Aq^* + 1175,$$

$$\mathcal{E}(q^*) = (0.154k^{*2} + 22) \frac{A^2}{2h} - 2,46k^* \frac{A^3}{3h^2} + 8,77 \frac{A^4}{4h^3} - Aq^* + 768.$$

Минимум $\mathcal{E}$ соответствует устойчивому состоянию равновесия, максимум $\mathcal{E}$ - неустойчивому состоянию равновесия. При $q^* = 655$ график $\mathcal{E}$ имеет точку перегиба ($\mathcal{E}_{\min\max}$), начало сборки. Предельная точка графика нагружения оболочки является точкой перехода устойчивого состояния равновесия в неустойчивое состояние (показано пунктиром).

Интерес представляют и другие параметры, например сдвиговая жесткость. Например, построив сдвиговую модель, можно при постоянной кривизне, снижая сдвиговую жесткость, строить энергетические уровни и выявлять потерю устойчивости решения при тех параметрах кривизны, при которых классические уравнения не дают потери устойчивости до предельной точки.

Библиографический список

1. Постон Т. Теория катастроф и ее приложения / Т. Постон, И. Стюарт ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1980. – 607 с.

УДК 624.04

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАЛЬНОЙ И КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ В ANSYS

Теличко В.Г., Ковалев Г.Р.

ТулГУ, г. Тула, Россия

В статье представлен сравнительный анализ поведения железобетонных плит перекрытия, армированных стальной и композитной арматурой, с использованием численного моделирования в ANSYS. Рассмотрены основные механические характеристики, особенности работы конструкций под нагрузкой, а также эксплуатационные и экономические аспекты применения различных видов арматуры.

Современное строительство активно внедряет композитные материалы, включая стеклопластиковую арматуру, как альтернативу традиционной стальной. Композитная арматура отличается высокой коррозионной стойкостью, малым весом и простотой транспортировки, однако уступает стали по жёсткости и ряду эксплуатационных характеристик.

Цель работы - провести сравнительный анализ плит перекрытия с разными типами армирования, выявить преимущества и ограничения каждого материала, а также оценить их поведение под нагрузками с помощью ANSYS.

Стальная арматура традиционно применяется в ответственных конструкциях благодаря высокой прочности и пластичности. Композитная арматура (стеклопластик, базальтопластик) устойчива к коррозии, легче по массе, но имеет меньшую жёсткость и иной характер работы на изгиб.

В ANSYS Discovery были созданы две модели плиты перекрытия - с армированием стальными и композитными стержнями.

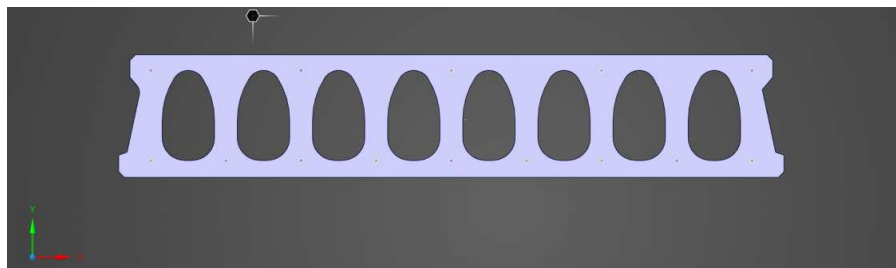


Рис. 1. Общий вид

Материалы: для стали использованы стандартные параметры [1, 2] (модуль упругости ~ 200 ГПа, предел текучести ~ 250 МПа). Для композита - модуль упругости 73 ГПа, предел прочности на растяжение 800 МПа.

Граничные условия: плита опирается по двум или сторонам, к верхней поверхности приложена равномерно распределённая нагрузка.

Для численного описания поведения бетона под нагрузкой важно выбрать нужную расчетную модель, отражающую особенности материала. Для моделирования бетонной части плит использовалась модель Друкера-Прагера [3], реализованная в ANSYS. Этот подход позволяет более точно учитывать особенности пластического течения и трещинообразования бетона, а также его различную прочность при сжатии и растяжении. Применение данной модели обеспечило реалистичное воспроизведение напряжённо-деформированного состояния плит с разными типами арматуры и повысило достоверность сравнительного анализа результатов. Использование данной модели подтверждено в ряде научных работ и практических исследований по численному анализу железобетонных элементов [4, 5].

Анализ: оценивались максимальные прогибы, распределение напряжений, зоны трещинообразования.

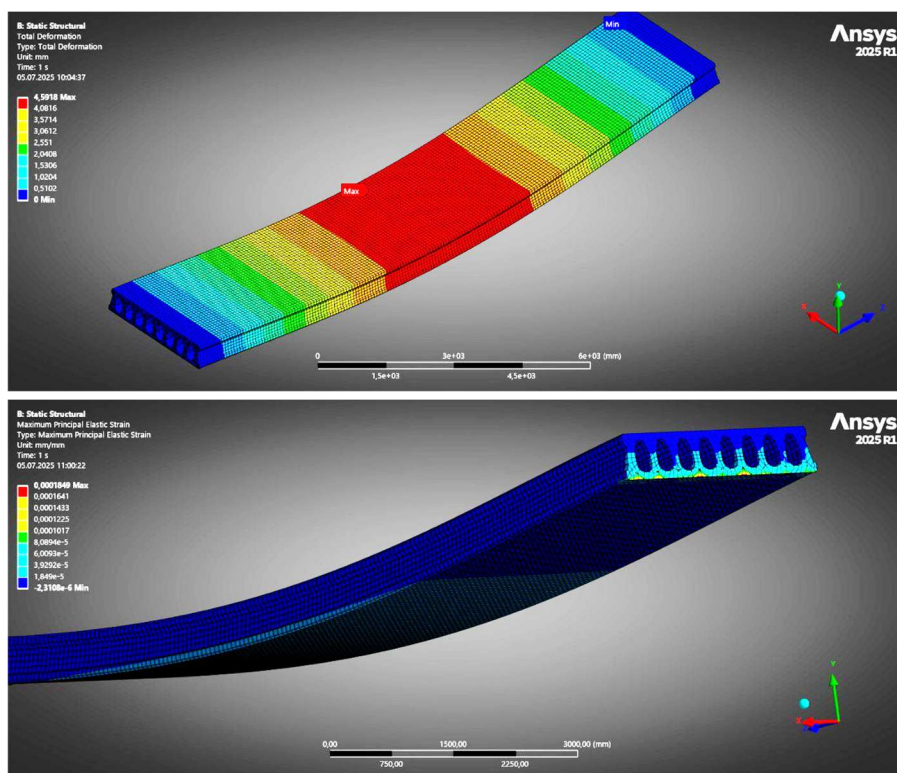


Рис. 2. Результаты расчета со стальной арматурой

Таблица 1. Анализ полученных результатов

Параметры	Стальная арматура	Композитная арматура
Максимальный прогиб	Меньше	Больше на 5%
Максимальное напряжение	Ниже	Выше
Напряженные области	Более обширные	Более сконцентрированные
Жесткость	Выше	Меньше
Вес конструкции	Выше	Меньше на 27%
Стоимость	Дороже	Дешевле

Подводя итоги расчетов (табл. 1, рис. 2, 3), можно понять, что стальная арматура обеспечивает меньшие прогибы и более равномерное распределение напряжений, что важно для плит с большими пролётами и высокими эксплуатационными нагрузками. Данные свойства дают заметные преимущества перед композитной арматурой. Однако композитная арматура не

подвержена коррозии, что особенно важно для влажных и химически агрессивных условий эксплуатации.

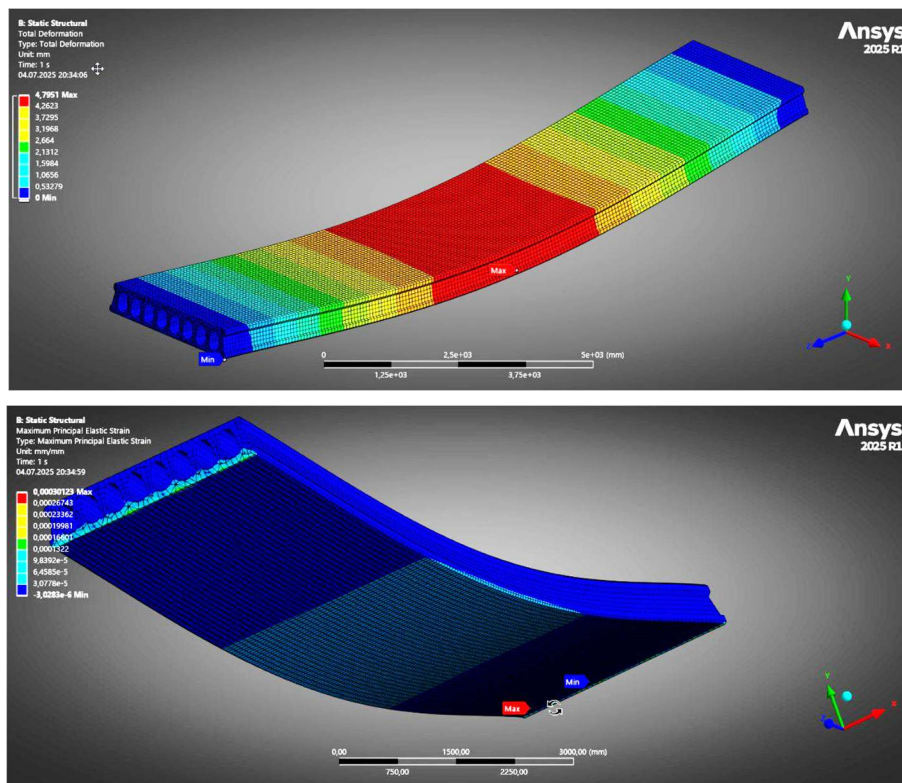


Рис. 3. Результаты расчета с композитной арматурой

Монтаж и транспортировка: композит гораздо легче стали, что снижает общий вес плиты перекрытия, следовательно, упрощает транспортировку до объекта. В монтаже, рассматриваемые виды арматуры идентичны, за исключением того, что в отличие от стальной композитную арматуру [4] иногда скрепляют пластиковыми клипсами или стяжками.

Ограничения: меньшая жёсткость композита может привести к увеличению прогибов, а значит последует необходимость увеличения сечения или частоты армирования конструкции. Следовательно, из-за нестабильных цен на металл это приведет к возможной переплате и неоправданному выбору.

Закключение. Сравнительный анализ показал, что выбор типа арматуры должен определяться условиями эксплуатации, требованиями к

долговечности и жёсткости конструкции, а также экономическими соображениями. Стальная арматура остаётся оптимальной для плит с высокими нагрузками и требованиями к минимальным прогибам. Композитная арматура перспективна для объектов, где важны коррозионная стойкость и снижение веса. Численное моделирование в ANSYS позволяет объективно оценить поведение конструкции и принять обоснованное решение на этапе проектирования.

Библиографический список

1. Тест стали на пластичность [Электронный ресурс]. – URL: <https://vega-stk.ru/spravka/test-stal-plastik>
2. Черник, В. И. Численная модель сжатого бетонного элемента, усиленного углекомпозитной обоймой / В. И. Черник, С. Э. Самарина // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 1(87). – С. 40-53. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-87-1-40-53.
3. Бударин, А. М. Численное моделирование изгибаемых железобетонных элементов с использованием критерия прочности Друкера - Прагера / А. М. Бударин, М. В. Плетнев, В. Н. Алехин // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2018. – № 3(38). – С. 74-77.
4. Кузнецов, А. Д. Сравнение металлической и композитной арматуры при армировании бетона / А. Д. Кузнецов, М. С. Лаврентьев // Молодой ученый. – 2016. – № 18(122). – С. 87-89. – EDN WMGYZF.
5. Строительная индустрия : справочное руководство по гражданскому и промышленному строительству : в 17 т. / под ред. проф. Н. И. Безухова ; при участии инж. М. С. Рудоминера. – Москва : Гл. ред. строит. лит., 1934. – Т. : Строительная механика и конструкции (основы). – 782 с. : ил., черт., граф. + 3 л. черт.

УДК 539.3: 624.07

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПЛАСТИНЫ ЗА ПРЕДЕЛАМИ УПРУГОСТИ ДИЛАТИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

Трещев А.А.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Экспериментальные исследования по упругопластическому деформированию современных композитов различной структуры, выполненных с использованием графитов, полимерных структур типа поликарбоната, фенопласта, полиметилметакрилата, нанотрубок, да и ряда традиционных конструктивных материалов, таких как чугун, бетон, указывают на зависимость деформационных характеристик от вида напряженного состояния.

Учет зависимости деформационных параметров от вида напряженного состояния, в основном, приобретает актуальность при достаточно высоком уровне напряжений в области пластических деформаций. Подобного рода материалы, кроме того, проявляют склонность к дилатации. Учет подобных свойств при пластическом деформировании дает наиболее точное описание работы конструкций из таких материалов.

Для определения пластических свойств начально изотропных дилатирующий композиций был предложен ряд феноменологических условий [1 – 5], а специально для определения предельных состояний современных композитов Ломакиным Е.В. был разработан достаточно простой вариант критерия пластичности [6]:

$$F(\sigma_{ij}) = f(\xi^*)\sigma_i = k_{\sigma_i}, \quad (1)$$

где $\sigma_i = \sqrt{3S_{ij}S_{ij}/2}$ – интенсивность напряжений; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$ – девиатор напряжений; δ_{ij} – единичный тензор; $\sigma = \delta_{ij}\sigma_{ij}/3$ – среднее напряжение; $f(\xi^*)$ – функция определяющая изменения пределов текучести от вида напряженного состояния; $\xi^* = \sigma/\sigma_i$ – параметр вида напряженного состояния; $k_{\sigma_i} = \sqrt{3}\tau_S$; τ_S – предел текучести при сдвиге.

Очевидно, что принятый в условии (1) параметр $\xi^* = \sigma/\sigma_i$, определяющий вид напряженного состояния не ограничен, его существование очерчено бесконечными границами $\pm\infty$. Это обстоятельство свидетельствует о том, что в экспериментах невозможно провести испытания в этом диапазоне, а в теоретических расчетах однозначно приводит к возникновению математических неопределенностей. На подобные недостатки неоднократно указывалось в работах [7 – 9].

В свете вышеизложенного в свое время было предложено условие пластичности, свободное от подобных недостатков и глубоко апробированное на экспериментальных данных по пластическому деформированию композитов и не только [7 – 9]:

$$F(\sigma_{ij}) = f(\xi)\tau = k_\tau, \quad (2)$$

где $\xi = \sigma/S_0$ – нормированное нормальное напряжение в пространстве девиаторной плоскости с интервалом изменения ± 1 ; $\tau = \sqrt{S_{ij}S_{ij}/3}$ – касательное напряжение на октаэдрической площадке ($\tau = \sigma_i\sqrt{2}/3$); $S_0 = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$ – норма пространства; $k_\tau = \sqrt{2/3}\tau_S$.

При получении разрешающих уравнений изгиба тонких пластин, выполненных из пластически дилатирующих материалов, в упругой стадии деформирования использовался линейный закон упругости Гука, а при переходе в пластические области – привлекались условия (1), (2) и традиционная теория Губера–Мизеса–Генки (ГМГ). Рассмотрены малые прогибы токих прямоугольных пластин. Построение общих дифференциальных уравнений при деформировании пластин в стадиях появления и развития пластических деформаций вплоть до разрушения использовался традиционный подход для подобных конструкций с учетом смещения нейтральной поверхности от срединной плоскости [10]. Во всех случаях расчета толщина пластины принималась равной 4 см. Геометрические размеры в плане для квадратной пластины составляли 80×80 см, а для прямоугольной пластины – 160×80 см.

Таблица 1. Интенсивности поперечной нагрузки на квадратную пластину при развитии пластичности

Вариант расчета с использованием различных условий пластичности	Нагрузка при появлении пластических на поверхностях, МПа		Нагрузка, вызывающая образование сквозной пластичности на всю толщину пластины, МПа
	верхней	нижней	
(1)	0,77	0,76	1,10
(2)	0,88	0,61	1,06
ГМГ	1,14	1,14	1,87

Таблица 2. Интенсивности поперечной нагрузки на прямоугольную пластину при развитии пластичности

Вариант расчета	Нагрузка при появлении пластических зон, МПа		Нагрузка при образовании пластического шарнира, МПа
	верхней	нижней	
Тр	0.51	1.02	1.55
Л	0.47	0.91	1.82
ГМГ	0.79	0.79	2.21

Решались полученные уравнения численно конечно-разностным методом покрытием поверхностей квадратной пластины сеткой 20×20 ячеек, а прямоугольной – 40×20 ячеек. В силу симметрии рассчитывалась четвертая часть пластины. Рассматривалось равномерное нагружение по верхней поверхности квадратной шарнирно опертой и прямоугольной жестко защемленной пластин из полиметилметакрилата, пластические характеристики, которого приведены в работах [7 – 9], модуль

упругости принят $E=3300 \times 10^6$ Па, а коэффициент поперечных деформаций $\nu=0,3$. В решении привлекалась итерационная процедура. Результаты расчета квадратной пластины приведены в табл. 1, а прямоугольной – в табл. 2.

Данные таблиц подтверждают тот факт, что изгиб пластин из дилатирующих композитов за пределом упругости не может быть исследован в рамках классической теории пластичности типа Губера–Мизеса–Генки, а результаты расчета с учетом моделей (1) и (2), не смотря на грубые недостатки теории (1) для рассмотренной задачи близки.

Библиографический список

1. Гольденблат И. И. Критерии прочности конструкционных материалов / И. И. Гольденблат, В. А. Копнов. – Москва : Машиностроение, 1968. – 192 с.
2. Ягн Ю. И. Прочность и пластичность модифицированного чугуна при различных напряженных состояниях / Ю. И. Ягн, В. В. Евстратов // Доклады АН СССР. – 1957. – Т. 113, № 3. – С. 573–575.
3. Лукша Л. К. К теории прочности / Л. К. Лукша // Доклады АН БССР. – 1963. – Т. 7, № 5. – С. 301–304.
4. Писаренко Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – Киев : Наукова думка, 1976. – 416 с.
5. Толоконников Л. А. О форме предельной поверхности изотропного тела / Л. А. Толоконников // Прикладная механика. – 1969. – Т. 5, вып. 10. – С. 123–126.
6. Ломакин Е. В. Зависимость предельного состояния композитных и полимерных материалов от вида напряженного состояния / Е. В. Ломакин // Механика композитных материалов. – 1988. – № 1. – С. 3–9.
7. Трещев А. А. Теория деформирования и прочности разнсопротивляющихся материалов / А. А. Трещев. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2020. – 359 с.
8. Трещев А. А. Зависимость предельных состояний конструкционных материалов от вида напряженного состояния / А. А. Трещев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1999. – № 10. – С. 9–18.
9. Трещев А. А. К теории пластичности дилатирующих разнсопротивляющихся материалов / А. А. Трещев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2003. – № 2. – С. 58–62.
10. Трещев А. А. Прикладные задачи теории деформирования и прочности разнсопротивляющихся материалов / А. А. Трещев. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2021. – 200 с.

УДК 539.3

К ОЦЕНКЕ НДС ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИ НАГРУЖЕННОЙ ОРТОТРОПНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ОТВЕРСТИЕМ

Трещев А.А., Дорошенко Д.И.

ТулГУ, г. Тула, Россия

В контексте термомеханических задач, касающихся деформационно-прочностных расчетов конструкций, рассматриваются как независимые, так и зависимые формулировки. Тем не менее, анализ влияния взаимосвязи термических и механических полей при расчете элементов из деформационно-анизотропных материалов показал, что эта взаимосвязь проявляется лишь на начальных стадиях температурных колебаний, а временной интервал ее действия довольно короток и завершается после достижения равновесного температурного перепада [1, 2]. В данном исследовании была разработана математическая модель термомеханического деформирования тонкой сферической оболочки с центральным отверстием, выполненной из ортотропного композита, чувствительного к типу напряженного состояния, в независимой формулировке. Основой для создания этой модели стал обобщенный подход к формированию потенциала деформаций для ортотропных материалов, проявляющих нелинейную деформационную анизотропию [3].

Расчетная схема сферической оболочки представлена на рис. 1, где приведены основные геометрические и равновесные температурные параметры для исследуемой задачи.

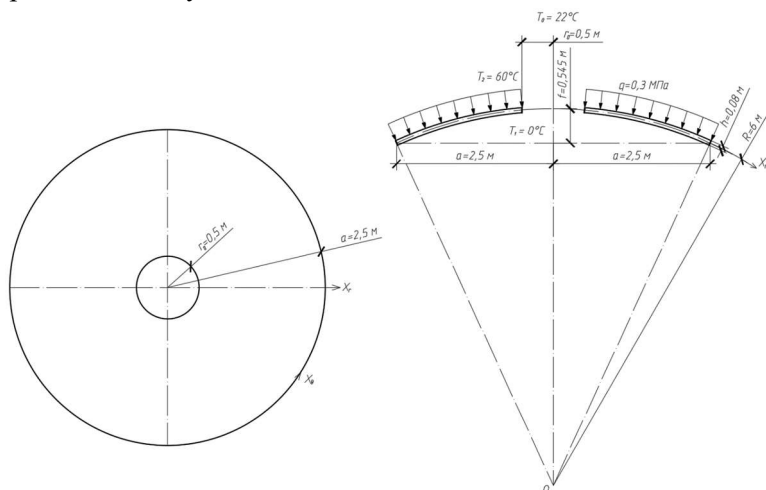


Рис. 1. Расчетная схема полой сферической оболочки

Учитывая осе симметричность задачи, связи деформационных параметров ее срединной поверхности с перемещениями можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= u_{,r} - kw + 0,5(w_{,r})^2; & \varepsilon_\theta &= u/r - kw; \\ e_r &= \varepsilon_r + z\chi_r; & e_\theta &= \varepsilon_\theta + z\chi_\theta; & \chi_r &= -w_{,rr}; & \chi_\theta &= -w_{,r}/r, \end{aligned} \quad (1)$$

где r, θ – горизонтальная радиальная и окружная координаты; u, w – радиальные перемещения срединной поверхности и ее прогибы; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ – относительные деформации в срединной поверхности.

Учитывая, что главные материальные оси ортотропии строго направлены вдоль координат цилиндрической системы, к которой привязана сферическая оболочка, физические уравнения (1) можно упростить, добавляя температурные составляющие, приводя к виду:

$$e_r = K_{11}\sigma_r + K_{12}\sigma_\theta + \omega_{1T}\theta^\circ; \quad e_\theta = K_{21}\sigma_r + K_{22}\sigma_\theta + \omega_{2T}\theta^\circ, \quad (2)$$

где $K_{11} = A_{1111} + B_{1111}\alpha_r + 0,5[B_{1111}\alpha_r(1-\alpha_r^2) - B_{2222}\alpha_\theta^3] + B_{1122}\alpha_\theta(1-\alpha_r^2 - \alpha_r\alpha_\theta); \quad K_{12} = K_{21} = A_{1122} + B_{1122}(\alpha_r + \alpha_\theta);$
 где $A_{kkkk}, B_{kkkk}, A_{ijij}, B_{ijij}$ – константы потенциала, зависящие от модулей упругости ($E_k^\pm$) и коэффициентов поперечной деформации ($\nu_{ij}^\pm$) материала при растяжении и сжатии; $\alpha_r = \sigma_r / S, \alpha_\theta = \sigma_\theta / S$ – нормированные напряжения; ω_{1T}, ω_{2T} – коэффициенты линейного температурного расширения в направлениях радиальной и окружной координат.

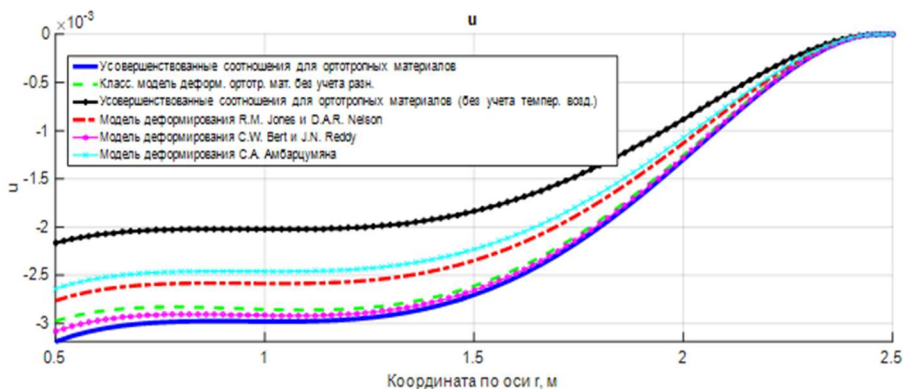


Рис. 2. Горизонтальные перемещения срединной поверхности в радиальном направлении, м

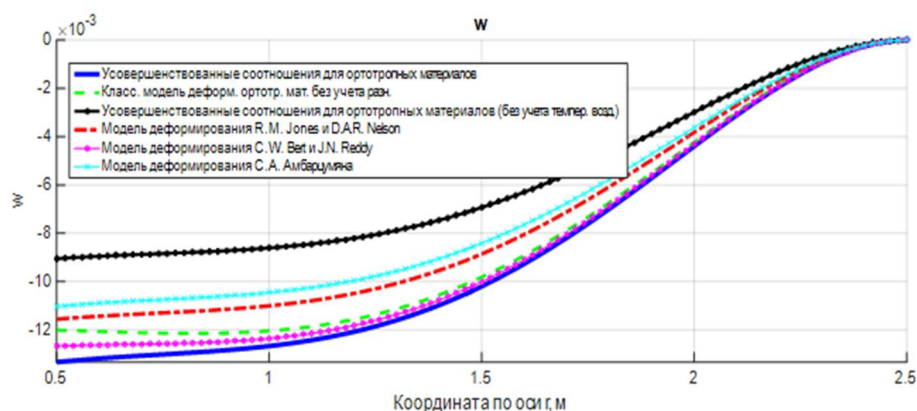


Рис. 3. Прогобы срединной поверхности, м

В представленном исследовании осуществлено сравнение результатов решения краевой задачи, полученных в рамках разработанной модели, с расчетными параметрами, соответствующими уравнениям состояния, сформулированным другими авторами в работах [4–9].

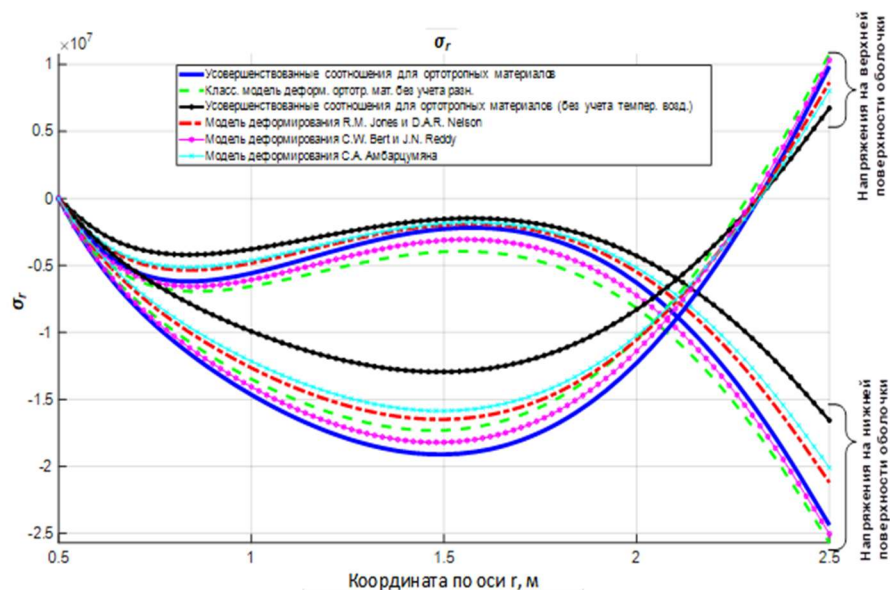


Рис. 4. Осевые напряжения, Па

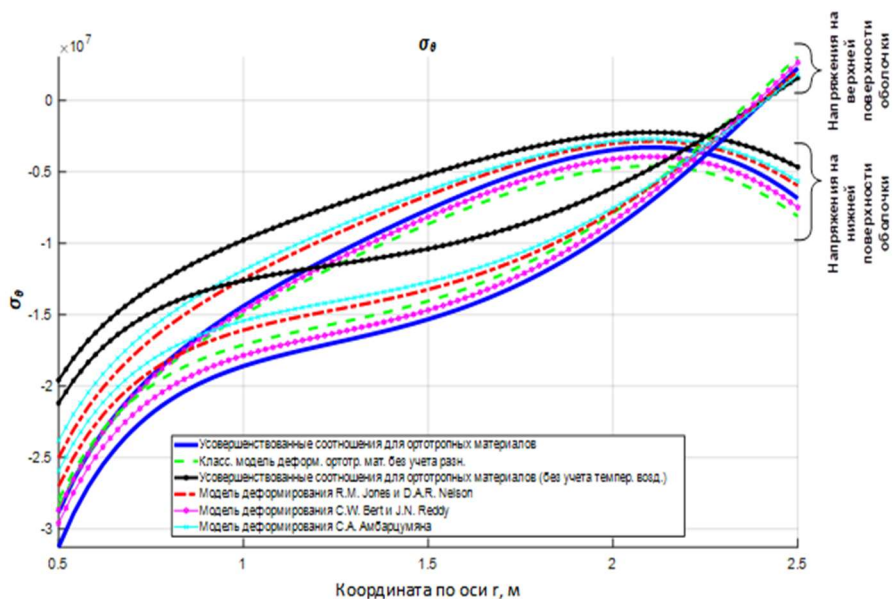


Рис. 5. Окружные напряжения, Па

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета радиальных перемещений и прогибов срединной поверхности рассмотренной оболочки, полученные с использованием различных уравнений состояния структурно ортотропных материалов, проявляющих в процессе нагружения деформационную неоднородность (разносопротивляемость). Рис. 4, 5 иллюстрируют аналогичные результаты по распределению нормальных напряжений вдоль радиальной координаты для крайних волокон, а на рис. 6, 7 представлены характерные распределения напряжений по толщине оболочки в контурном опорном сечении.

Анализ результатов численного моделирования термомеханического деформирования ортотропной сферической оболочки, выполненной из стеклопластиков, позволил обнаружить ряд особенностей:

1. Для перемещений в срединной поверхности: величины отклонений от классического подхода, не учитывающего деформационную анизотропию материалов и с учетом их усредненных механических характеристик, достигают 8,5%, при игнорировании температурного воздействия – 18%, а при всех равных условиях термомеханического нагружения – 21% по сравнению с расчетами на основе уравнений С.А. Амбарцумяна [7, 8], 3% по сравнению с теорией С.В.Берт – J.N.Reddy [4, 5] и 16% при применении соотношений R.M.Jones–D.A.R.Nelson [6, 9];

2. Для прогибов срединной поверхности: расхождение достигло 12,5% относительно расчетов по традиционной теории ортотропных оболочек с применением усредненных характеристик материала, 22% без учета температурного перепада, 23% по сравнению с теорией С. А. Амбарцумяна [7, 8], 6,5% по сравнению с моделью С.W.Bert – J.N.Reddy [4, 5] и 17,5% по отношению варианта расчета R.M.Jones – D.A.R.Nelson [6, 9];

3. Для радиальных напряжений: различия достигали 8% относительно классических расчетов с усредненными характеристиками, 20% по сравнению с теорией С. А. Амбарцумяна [7, 8], 24% в расчетах без учета температурного воздействия, 4% по отношению к теории С.W.Bert – J.N.Reddy [4, 5] и 11,5% при использовании соотношений R.M.Jones – D.A.R.Nelson [6, 9];

4. Для окружных напряжений: расхождения были наиболее выраженными, достигая 23% по сравнению с классическими расчетами, полученными с использованием усредненных свойств материала, 47% при игнорировании температурного фактора, 15% по сравнению с соотношениями С.А.Амбарцумяна [7, 8], 13% – по отношению к теории С.W.Bert – J.N.Reddy [4, 5] и 10% в случае использования соотношений R.M.Jones – D.A.R.Nelson [6, 9].

Проведенные численные исследования позволяют утверждать следующее:

1. Использование разработанного подхода обеспечивает надежные и более точные результаты расчета пространственных конструкций по сравнению с известными теориями других авторов;

2. Результаты численных экспериментов убедительно показывают, что учет деформационной анизотропии в расчетных моделях раскрывает серьезные недостатки классических подходов к определению НДС оболочечных конструкций. Недооценка этого фактора может приводить к заметным погрешностям в прогнозировании поведения пространственных конструкций.

Библиографический список

1. Трещев А. А. Моделирование оболочки из изотропного разнородного графита с помощью объемных конечных элементов с учетом связанности напряжений и температур / А. А. Трещев, М. Ю. Делягин // *Materials Physics and Mechanics*. – 2013. – № 17. – Р. 59–70.

2. Трещев А. А. Математическая модель связанной термоупругости существенно нелинейных материалов, чувствительных к виду напряженного

состояния / А. А. Трещев, М. Ю. Делягин, Д. С. Астахов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2013. – № 3(17). – С. 72–79.

3. Трещев А. А. Потенциальная зависимость между деформациями и напряжениями для ортотропных физически нелинейных материалов / А. А. Трещев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 4–1(324). – С. 71–74.

4. Bert C. W. Bending of Thick Rectangular Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / C. W. Bert, J. N. Reddy, W. C. Chao // AIAA Journal. – 1981. – Vol. 19, No. 10. – P. 1342–1349.

5. Bert C. W. Deflection of Thick Beams of Multimodular Materials / C. W. Bert, F. Gordaninejad // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1984. – Vol. 20. – P. 479–503.

6. Jones R. M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Materials / R. M. Jones // AIAA Journal. – 1980. – Vol. 18, No. 8. – P. 995–1001.

7. Амбарцумян С. А. Осесимметричная задача круговой цилиндрической оболочки, изготовленной из материала, разносопротивляющегося растяжению и сжатию / С. А. Амбарцумян // Известия АН СССР. Сер. Механика. – 1965. – № 4. – С. 77–85.

8. Амбарцумян С. А. Основные уравнения и соотношения разномодульной теории упругости анизотропного тела / С. А. Амбарцумян // Известия АН СССР. МТТ. – 1969. – № 3. – С. 51–61.

9. Jones R. M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression / R. M. Jones // AIAA Journal. – 1977. – Vol. 15, No. 1. – P. 16–25.

УДК 539.3

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОРТОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Трещев А.А., Селезнев И.Р.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Конструкции из тонких пластин широко применяются в инженерной практике, особенно в условиях, когда необходимо обеспечить прочность и устойчивость при минимальном весе. При этом важным фактором становится точный учет механических свойств материала и взаимодействия конструкции с основанием. В данной работе рассматривается тонкая прямоугольная ортотропная пластина, покоящаяся на упругом основании, моделируемом по типу Винклера [11]. Используется геометрически

линейная постановка задачи с допущениями классической теории тонких пластин Кирхгофа–Лява [5]. Основное внимание уделено описанию материала с учётом деформационной анизотропии и построению системы разрешающих уравнений в перемещениях.

Расчетная схема пластинки изображена на рисунке 1.

Исходная геометрия конструкции: квадратная пластинка со стороной $a = 3$ м, толщиной $h = 0,04$ м. Пластинка загружена ортогональным к срединной поверхности давлением $p = 0,5$ МПа. Взаимодействие с основанием характеризуется коэффициентом постели $\xi = 50$ МН/м³.

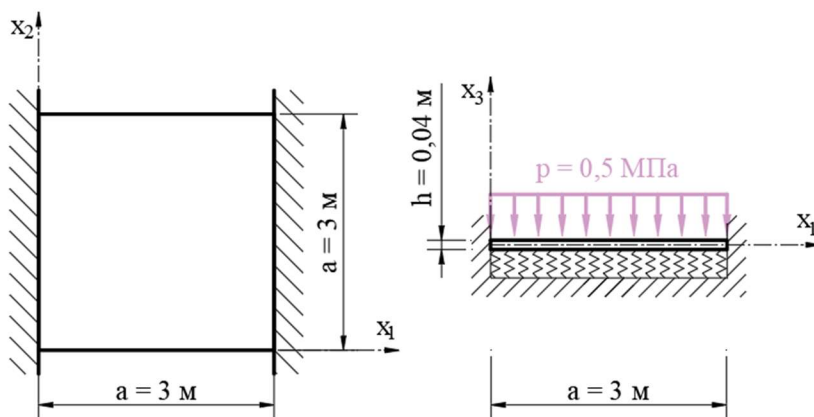


Рис.1. Схема пластинки

Граничные условия для решения задачи выбраны следующим образом: две противоположные стороны пластины жёстко защемлены, две оставшиеся – совершенно свободны.

Для описания материала применена ортотропная модель с использованием нормированных тензорных соотношений [8]. Материал – конструкционный графит 16K9-27/АТJ-S, обладающий выраженной двойной анизотропией. Значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона принимались в двух направлениях главных осей в соответствии с данными из работы [9]: $E_1^+ = 16,56$ МПа, $E_1^- = 12,42$ МПа, $E_2^+ = 10,35$ МПа, $E_2^- = 8,28$ МПа, $E_{12}^+ = 11,04$ МПа, $E_{12}^- = 9,315$ МПа, $\nu_{12}^+ = 0,14$, $\nu_{12}^- = 0,095$.

На основе уравнений равновесия, геометрических и физических зависимостей была сформирована система дифференциальных уравнений в перемещениях, отражающая влияние анизотропных свойств материала и реакции основания. Для численного решения использован метод конечных разностей, позволяющий с высокой точностью

аппроксимировать производные и переходить к решению системы линейных алгебраических уравнений [4]. Расчёты проводились в среде MATLAB. Учитывая симметрию задачи, в расчёт включалась четверть площади пластины.

В работе проведено сравнение двух расчетных моделей:

1. С применением усовершенствованных определяющих соотношений [8], учитывающих двойную анизотропию материала.

2. С использованием усреднённого модуля упругости $\bar{E} = E_1^+ = 16,56 \text{ МПа}$.

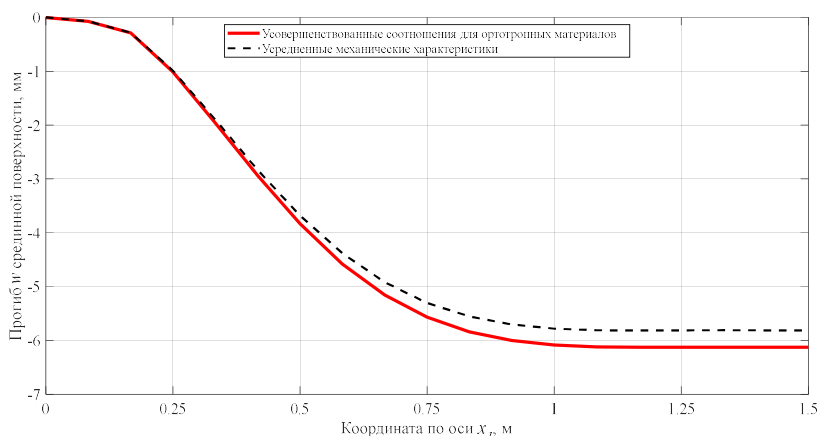


Рис. 2. Прогибы по сечению вдоль оси x_1

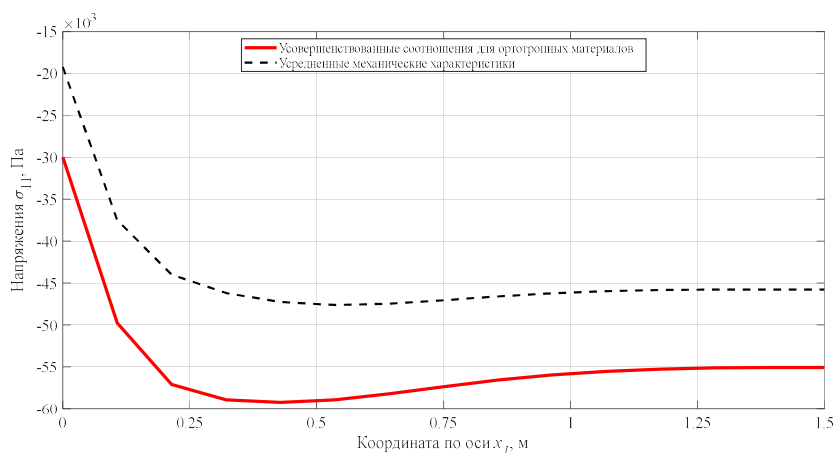


Рис. 3. Нормальные напряжения по сечению вдоль оси x_1

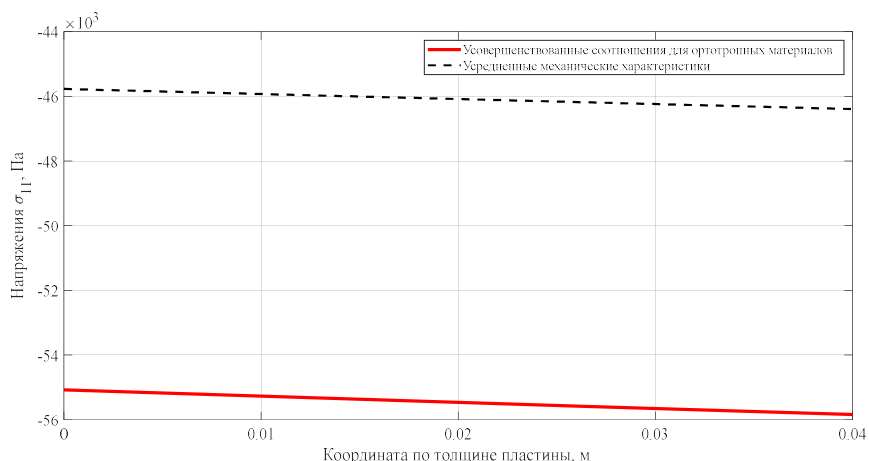


Рис. 4. Нормальные напряжения по толщине в середине пластины

Результаты расчётов показали следующие расхождения: прогибы — до 12,5% по сравнению с упрощённой моделью; нормальные напряжения σ_{11} — до 8% при использовании полной анизотропной модели;

Локальные значения напряжений и деформаций существенно отличаются вблизи краевых участков и зон с максимальными прогибами.

Проведённый численный анализ подтвердил важность учёта деформационной анизотропии при расчёте тонких ортотропных пластин на упругом основании. Применение нормированных тензорных зависимостей [8] позволило повысить точность модели и достоверность полученных результатов. Реализованная модель может быть использована в практике расчёта конструкций из графитсодержащих и композитных материалов.

Библиографический список

1. Амелина Е. В. О нелинейном деформировании углепластиков: эксперимент, модель, расчет / Е. В. Амелина [и др.] // Вычислительные технологии. — 2015. — Т. 20, № 5. — С. 27–52.
2. Каюмов Р. А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов / Р. А. Каюмов, С. А. Луканкин, В. Н. Паймушин, С. А. Холмогоров // Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки. — 2015. — Т. 157, кн. 4. — С. 112–132.
3. Treschev A. A. Constitutive relations for isotropic materials allowing quasilinear approximation of the deformation law / A. A. Treschev, A. A. Bobrishev, L. N. Shafigullin // IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. – 2019. – Vol. 481. – Art. 012014. – P. 1–7. – DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012014.

4. Варвак П. М. Метод сеток в задачах расчета строительных конструкций / П. М. Варвак, Л. П. Варвак. – Москва : Стройиздат, 1977. – 154 с.

5. Доннелл Л. Г. Балки, пластины и оболочки / Л. Г. Доннелл. – Москва : Наука, 1984. – 440 с.

6. Трещев А. А. Определяющие соотношения для нелинейных анизотропных материалов, чувствительных к виду напряженного состояния / А. А. Трещев, Д. А. Ромашин // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4, ч. 4. – С. 1740–1742.

7. Трещев А. А. Потенциальная зависимость между деформациями и напряжениями для ортотропных физически нелинейных материалов / А. А. Трещев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 4-1 (324). – С. 71–74.

8. Трещев А. А. Математические определяющие уравнения деформирования материалов с двойной анизотропией / А. А. Трещев, Ю. А. Завьялова, М. А. Лапшина, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева, Е. С. Крупицын // Чебышевский сборник. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 370–384.

9. Трещев А. А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов / А. А. Трещев. – Москва : НИИСФ РААСН ; Тула : ТулГУ, 2007. – 160 с.

10. Трещев А. А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения / А. А. Трещев. – Москва : РААСН ; Тула : ТулГУ, 2016. – 328 с.

11. Черкасов И. И. Механические свойства грунтовых оснований / И. И. Черкасов. – Москва : Научно-техническое изд-во Автотрансиздат, 1958. – 156 с.

УДК 639.3

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ НЕТОНКОЙ ОРТОТРОПНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ НАВЕДЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Трещев А.А., Теличко В.Г., Бесстрашнов Д.О.

ТулГУ, г.Тула, Россия

В современной технике и строительстве широко применяются новые конструкционные материалы, среди которых широкое распространение получили современные композиты. Особенность их механической работы часто заключается в наличии не только структурной ортотропии,

но и в проявлении деформационной анизотропии, что проявляется, например, в зависимости деформационных и прочностных свойств от параметров напряжённого состояния. Эти материалы используются при изготовлении пространственных конструкций, элементы которых никак нельзя отнести к тонкостенным. В частности, это относится к сферическим оболочкам (куполам) различных конфигураций и другим криволинейным конструкциям.

Расчеты прочности и деформируемости подобных конструкций должны основываться на достоверных расчетных моделях, учитывающих специфику механических свойств этих композитов и адекватных реальной картине процессов нагружения и геометрии конструкций. Очевидно, что точность используемых расчетных методов зависит от достоверности определяющих соотношений, которые не противоречат признанным экспериментальным данным по механическому деформированию исследуемых композитов. Очевидно, что зависимости между компонентами тензоров деформаций и напряжений, вытекающие из предложенного в работах потенциала, могут служить наиболее надёжными уравнениями состояния [1 – 3]. В этих же работах, а также в монографиях [4, 5] представлен подробный анализ серьёзных недостатков широко известных моделей, многократно публиковавшиеся многими авторами [6 – 13], поэтому их оценка здесь не приводится.

Ввиду указанных особенностей объекта исследования для разработки расчетной модели были приняты изопараметрические конечные элементы (КЭ) тетраэдрической формы с промежуточными узлами, узлы которых имели три линейных степени свободы. Для учета жесткостных свойств ортотропных композитов, проявляющих наведенную неоднородность, основой определяющих соотношений для них был принят потенциал деформаций, сформулированный в нормированном тензорном пространстве напряжений, связанном с главными осями ортотропии материалов [2, 3].

Таблица 1. Механические характеристики материала оболочки

№ п/п	Модули упругости в МПа , коэффициенты поперечной деформации							
1	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	E_{12}^+	E_{12}^-
	16,56	12,42	16,56	12,42	10,35	8,28	11,04	9,315
	E_{13}^+	E_{13}^-	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-
	11,04	9,315	0,14	0,095	0,14	0,095	0,14	0,095

Модель толстой разомкнутой сферической оболочки (купола) диаметром в плане 0,6 м, подъемом 0,3 м и толщиной 0,08 м, показана на рисунках

1 и 2. Данный сферический купол жестко закреплен по кромкам. Механические характеристики материала для графита АТJ-S и приведены в таблице 1. Величина распределенной нагрузки q на сферическую оболочку принята равной 17,2 МПа.

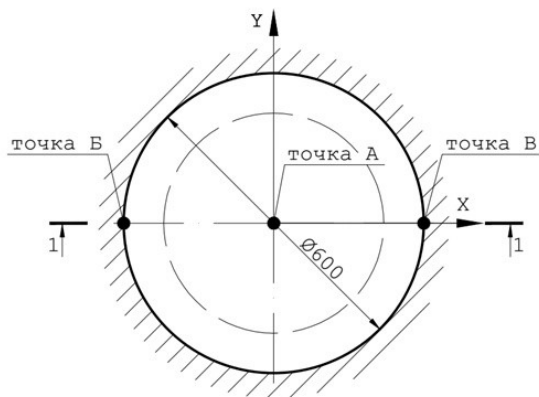


Рис. 1. Расчетная схема сферической толстостенной оболочки

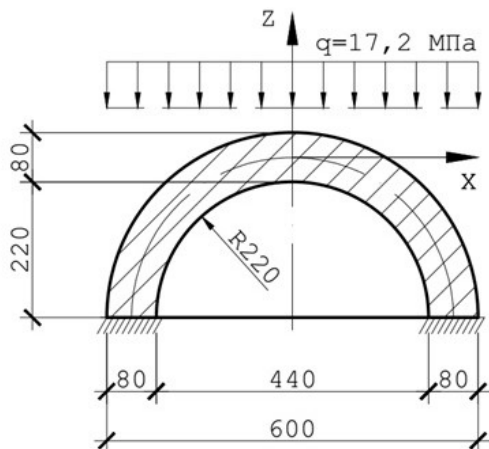


Рис. 2. Разрез 1-1 сферической оболочки

Численная реализация предложенной модели, учитывающая нелинейный характер уравнений состояния, выполнялась итерационно с применением метода переменных параметров упругости. Используемый вычислительный алгоритм в целом соответствует процедуре, представленной в работе [2], где применялись линейные КЭ. На рис. 3 показан

10-узловой элемент в форме тетраэдра, используемый в настоящем исследовании.

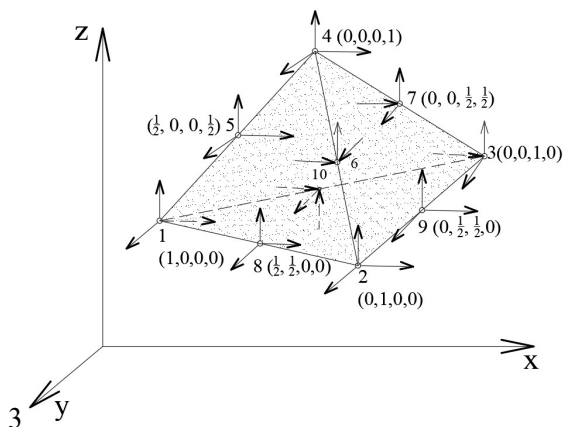


Рис. 3. Конечный элемент в виде тетраэдра второго порядка

Таким образом, была сформулирована математическая модель сферической оболочки под воздействием на неё распределенной нагрузки. При этом слои образованы ортотропными структурами, чувствительными к виду напряженного состояния. Расчеты были проведены с использованием 5-и различных моделей: 1) модель на основе определяющих соотношений [4]; 2) классическая теория анизотропии; 3) С.А. Амбарцумяна; 4) Р.М. Джонса-Д.А.Р. Нельсона; 5) на основе усовершенствованных соотношений [2]. Часть полученных результатов приведены на рис. 4 – 8.

При расчете толстостенной сферической оболочки с применением усовершенствованных соотношений разница для рассчитанных характеристик напряженно-деформированного состояния составила:

- для перемещений U_y вдоль линии Б-В: до 7% к определяющим соотношениям [1], до 25%-30% к теориям С.А. Амбарцумяна и Р.М. Джонса-Д.А.Р. Нельсона и до 45% при использовании классической теории анизотропии.

- для нормальных напряжений σ_y вдоль линии Б-В: до 8% к определяющим соотношениям [1], до 20%-25% к теориям С.А. Амбарцумяна и Р.М. Джонса-Д.А.Р. Нельсона и до 48% при использовании классической теории анизотропии.

- для напряжений σ_x , σ_y , σ_z по толщине в точке А: до 6 % к определяющим соотношениям [1], до 15%-20% к теориям С.А. Амбарцумяна

и Р.М. Джонса-Д.А.Р. Нельсона и до 40% при использовании классической теории анизотропии.

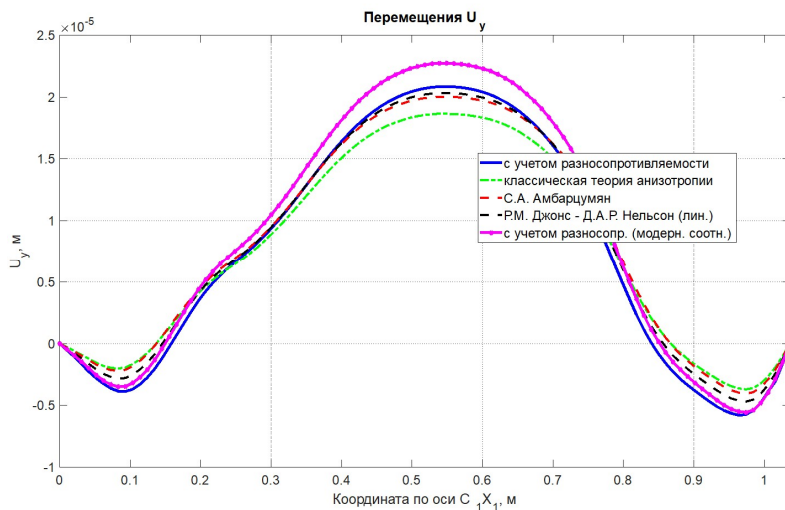


Рис. 4. Распределение перемещений U_y вдоль линии Б-В в верхних волокнах оболочки, Па

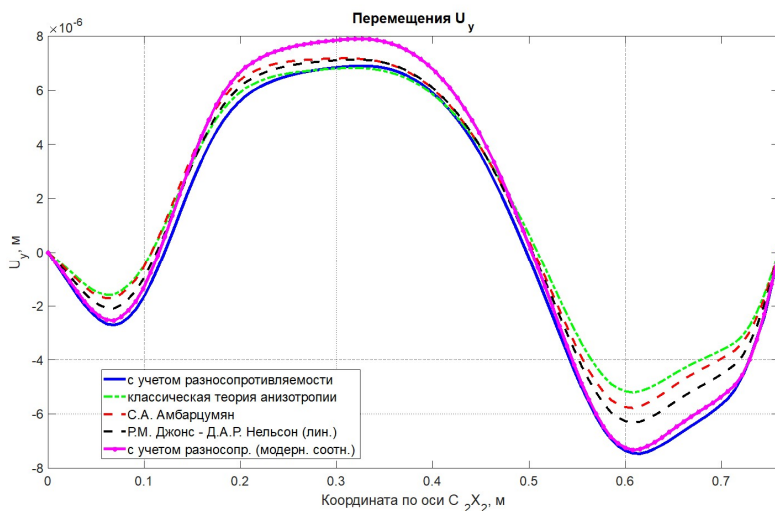


Рис. 5. Распределение перемещений U_y вдоль линии Б-В в нижних волокнах оболочки, Па

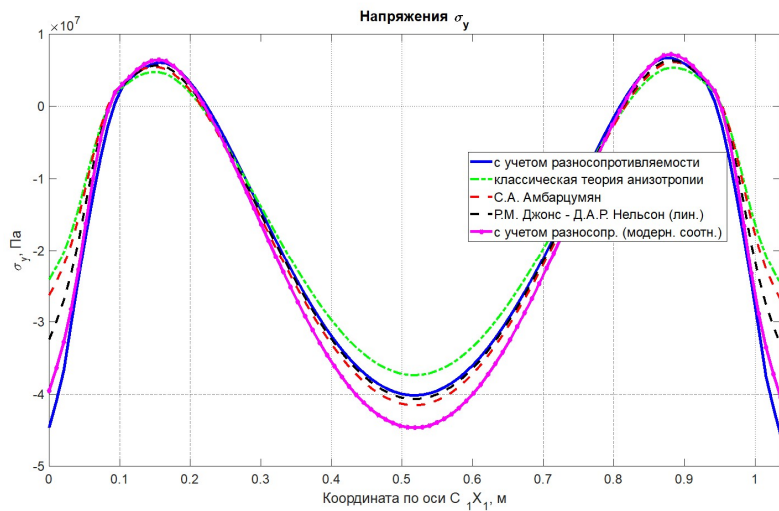


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений σ_y вдоль линии Б-В в верхних волокнах оболочки, Па

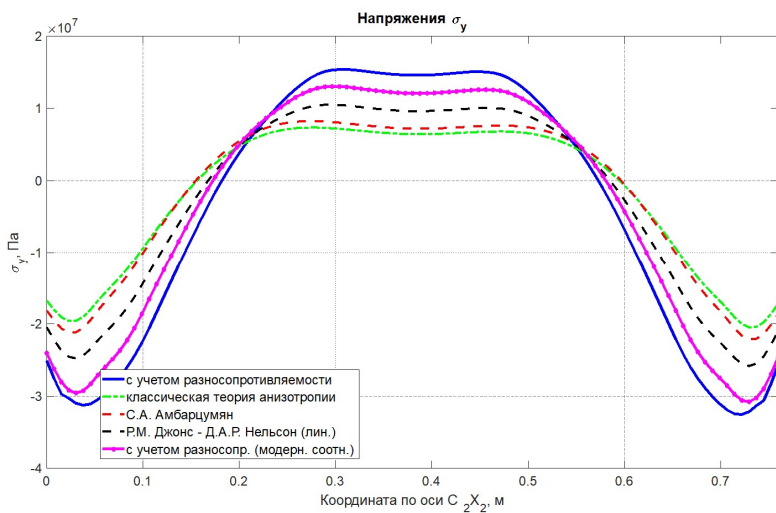


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений σ_y вдоль линии Б-В в нижних волокнах оболочки, Па

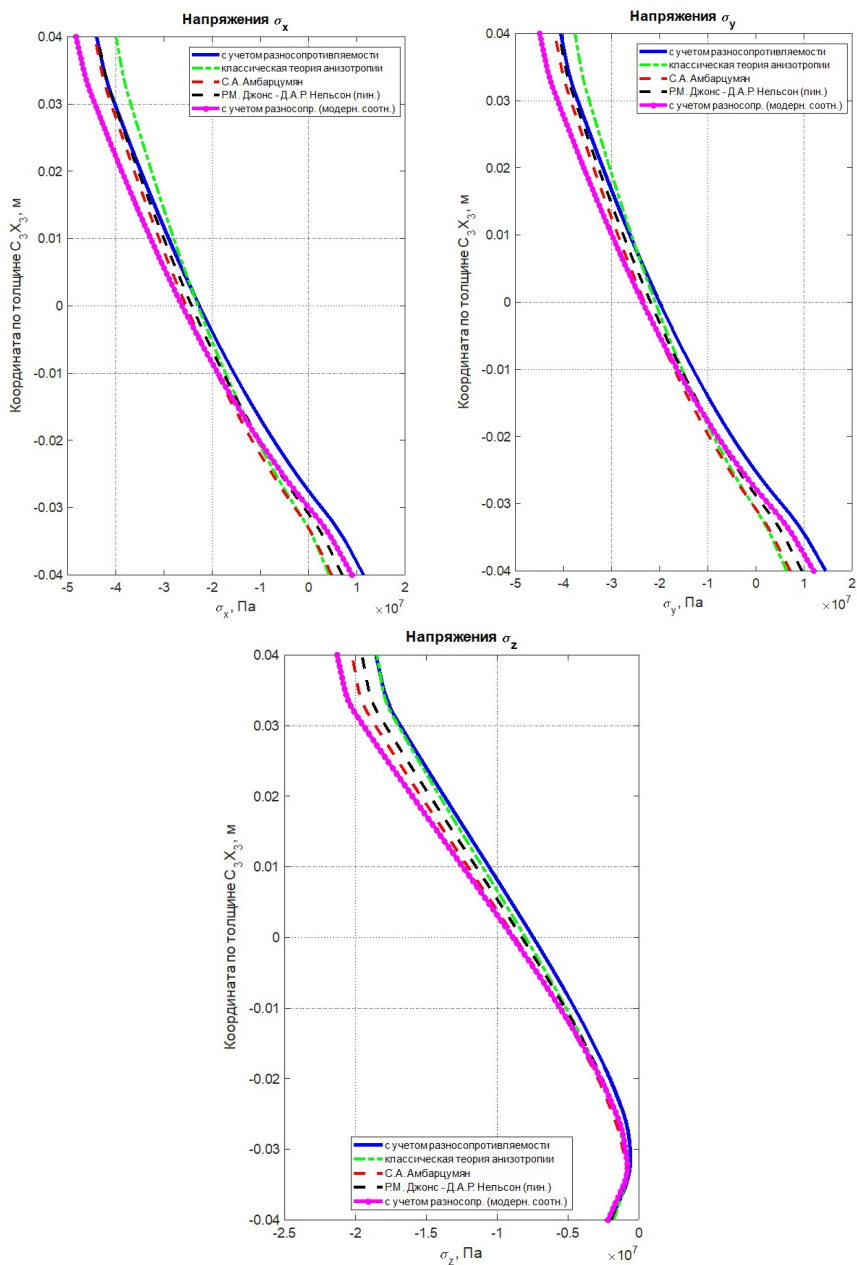


Рис. 8. Распределение напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ по толщине в точке А, Па

Проведённый анализ напряжённо-деформированного состояния толстостенной сферической оболочки показал, что методика, основанная на трёхмерной теории упругости с использованием криволинейных 10-узловых конечных элементов и модифицированных определяющих соотношений [2], обеспечивает высокую точность моделирования. Из сравнительного анализа результатов видно, что данная методика превосходит традиционную теорию и другие наиболее известные, как по точности, так и по удобству применения.

Библиографический список

1. Трещев А. А. Потенциальная зависимость между деформациями и напряжениями для ортотропных физически нелинейных материалов / А. А. Трещев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 4-1 (324). – С. 71–74.
2. Трещев А. А. Вариант модели деформирования ортотропных композитных материалов / А. А. Трещев, Ю. А. Завьялова, М. А. Лапшина // Эксперт: теория и практика. – 2020. – № 3(6). – С. 62–68.
3. Treschev A. A. Defining equations of deformation of materials with double anisotropy / A. A. Treschev, Yu. A. Zavyalova, M. A. Lapshina, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva, E. S. Krupitsyn // Chebyshevskii sbornik. – 2021. – Vol. 22, no. 4. – P. 369–383.
4. Трещев А. А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения : монография / А. А. Трещев. – Москва ; Тула : РААСН ; ТулГУ, 2016. – 326 с.
5. Трещев А. А. Теория деформирования и прочности материалов / А. А. Трещев. – Тула : ТулГУ, 2020. – 359 с.
6. Schmueser D. W. Nonlinear Stress-Strain and Strength Response of Axisymmetric Bimodulus Composite Material Shells / D. W. Schmueser // AIAA Journal. – 1983. – Vol. 21, no. 12. – P. 1742–1747.
7. Reddy L. N. On the Behavior of Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / L. N. Reddy, C. W. Bert // ZAMM. – 1982. – Vol. 62, no. 6. – P. 213–219.
8. Jones R. M. A Nonsymmetric Compliance Matrix Approach to Nonlinear Multimodulus Ortotropic Materials / R. M. Jones // AIAA Journal. – 1977. – Vol. 15, no. 10. – P. 1436–1443.
9. Jones R. M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Material / R. M. Jones // AIAA Journal. – 1980. – Vol. 18, no. 10. – P. 995–1001.

10. Jones R. M. Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite / R. M. Jones, D. A. R. Nelson // AIAA Journal. – 1976. – Vol. 14, no. 10. – P. 1427–1435.

11. Jones R. M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression / R. M. Jones // AIAA Journal. – 1977. – Vol. 15, no. 1. – P. 16–25.

12. Золочевский А. А. Расчет анизотропных оболочек из разномодульных материалов при неосесимметричном нагружении / А. А. Золочевский, В. Н. Кузнецов // Динамика и прочность тяжелых машин. – 1989. – № 4. – С. 84–92.

13. Амбарцумян С. А. Основные уравнения и соотношения разномодульной теории упругости анизотропного тела / С. А. Амбарцумян // Известия АН СССР. МТТ. – 1969. – № 3. – С. 51–61.

УДК 639.3

ВЛИЯНИЕ ПОЛЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ОРТОТРОПНОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Трещев А.А., Теличко В.Г., Бесстрашнов Д.О.

ТулГУ, г.Тула, Россия

Анализ существующих научных работ по численному моделированию слоистых деформируемых грунтовых оснований (полупространств) показал, что большинство существующих работ в значительной степени не отражают фактическую механическую работу, а также переполнены избыточными гипотезами и допущениями. Наиболее близкими к данным эксперимента и реальной практике являются модели, основанные на применении аппарата трехмерной теории упругости и использовании метода конечных элементов (МКЭ) в сочетании с учетом существенно нелинейного характера работы грунтов [1–3], что делает их более привлекательными по сравнению с моделями линейно-деформируемого основания (ЛДО) и подобными им [4, 5].

Особенности механической работы многослойного деформируемого основания при расчете и проектировании комбинированных пространственных систем зданий и сооружений можно эффективно учесть только с использованием общей трехмерной теории упругости, используя весь спектр компонентов тензоров напряжения и деформации [3, 4]. Поэтому для решения этой задачи необходим новый комплексный обобщенный подход [2, 4]. Вычислительные эксперименты, проведенные исследователями [1, 2, 4], явно указывают на то, что для решения рассматриваемой задачи (моделирование деформируемого основания, состоящего из отдельных ортотропных слоев)

лучше всего подходит 10-узловой конечный элемент (КЭ) в форме тетраэдра с тремя линейными степенями свободы в каждом узле и квадратичной аппроксимацией перемещений [5–7]. Исходя из этого, авторы разработали новую улучшенную версию КЭ, учитывающую существенно нелинейную работу грунтов и наведенную анизотропию (наведенную неоднородность, деформационную анизотропию) [8, 9].

Для постулирования уравнений состояния ортотропной деформационно-неоднородной среды слоев принята модель, сформулированная в рамках подхода нормированных пространств напряжений [8], связанного с главными осями ортотропии и полученная на основе потенциала деформаций [10, 11]:

$$\begin{aligned}
 W_1 = & 0,5(A_{1111} + B_{1111}\alpha_{11})\sigma_{11}^2 + 0,5(A_{2222} + B_{2222}\alpha_{22})\sigma_{22}^2 + \\
 & + 0,5(A_{3333} + B_{3333}\alpha_{33})\sigma_{33}^2 + [A_{1122} + B_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11}\sigma_{22} + \\
 & [A_{2233} + B_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22}\sigma_{33} + \\
 & + [A_{3311} + B_{3311}(\alpha_{33} + \alpha_{11})]\sigma_{33}\sigma_{11} + A_{1212}\tau_{12}^2 + A_{2323}\tau_{23}^2 + A_{3131}\tau_{31}^2 \\
 e_{ii} = & C_{iii}\sigma_{ii} + C_{ijj}\sigma_{jj} + C_{ikk}\sigma_{kk}; \quad \gamma_{ij} = C_{ijj}\tau_{ij} \quad \text{при } i \neq j
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 C_{iii} = & A_{iii} + B_{iii}\alpha_{ii} + 0,5[B_{iii}\alpha_{ii}(1 - \alpha_{ii}^2) - B_{jjj}\alpha_{jj}^3 - \\
 & - B_{kkk}\alpha_{kk}^3 - B_{ijj}\alpha_{ij}^3 - B_{jjk}\alpha_{jk}^3 - B_{ikk}\alpha_{ik}^3] + \\
 & + B_{ijj}\alpha_{jj}(1 - \alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{jj}) + B_{ijj}\alpha_{kk}(1 - \alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{kk}) - B_{jjk}\alpha_{jj}\alpha_{kk}(\alpha_{jj} + \alpha_{kk}); \\
 C_{ijj} = & A_{ijj} + B_{ijj}(\alpha_{ii} + \alpha_{jj}); \quad C_{ikk} = A_{ikk} + B_{ikk}(\alpha_{ii} + \alpha_{kk}); \\
 C_{ijj} = & A_{ijj} - (B_{iii}\alpha_{ii}^3 + B_{jjj}\alpha_{jj}^3 + B_{kkk}\alpha_{kk}^3) - \\
 & - 2[B_{ijj}\alpha_{ii}\alpha_{jj}(\alpha_{ii} + \alpha_{jj}) + B_{jjk}\alpha_{jj}\alpha_{kk}(\alpha_{jj} + \alpha_{kk}) + B_{ikk}\alpha_{ii}\alpha_{kk}(\alpha_{ii} + \alpha_{kk})]; \\
 C_{ijk} = & C_{kmj}; \quad (i \rightarrow j \rightarrow k = 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3); \quad \alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S.
 \end{aligned}$$

Здесь: α_{ij} – нормированные напряжения в пространстве главных осей ортотропии; σ_{ij} – компоненты напряжений в этих же осях; $S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}}$ – норма тензорного пространства; $\alpha_{ij}\alpha_{ij} = 1$ – условие нормировки пространства; A_{ijk}, B_{ijk} – параметры, вычисляемые по результатам обработки механических испытаний ортотропного материала, которые определяют тензор податливостей четвертого ранга.

Механические характеристики материалов заимствованы из работы Трещева А.А. и Теличко В.Г. [1] и приведены в таблице 1. Модель полупространства состоит из семи ортотропных слоев с существенно отличающимися свойствами и содержит включения в слоях и на границе между ними, приведена на рисунках 1, 2. Также здесь показан жесткий штамп с величиной приложенной нагрузки, нагрузка принята в виде равномерного давления на штамп. Размеры области в плане 20х5 м, по высоте 7 слоев по 2 м, размер зоны давления 2х0,5 м. Размеры расчетной области приняты из условия, чтобы граничные условия не влияли на результаты расчетов и определение характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС). Величина давления q принята равной 700 кПа.

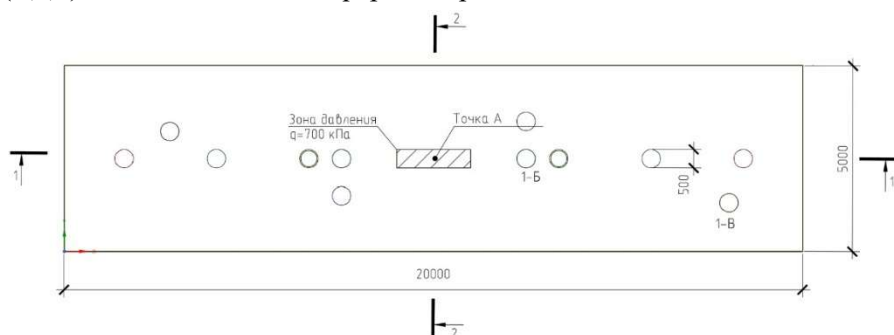


Рис.1. Вид сверху на полупространство

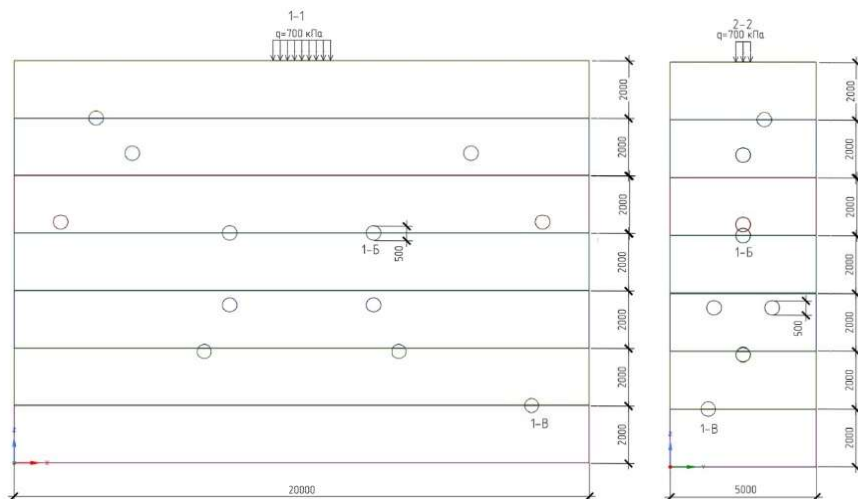


Рис. 2. Разрезы 1-1 и 2-2 полупространства

Таблица 1. Механические характеристики слоев полупространства

№ п/п слоя	Модули упругости в МПа, коэффициенты поперечной деформации								
	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
1	16,00	32,00	10,70	29,00	8,50	25,00	8,72	7,95	7,15
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,20	0,28	0,22	0,31	0,25	0,32	—	—	—
2	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	13,55	40,65	14,05	42,15	8,55	25,65	10,90	8,43	8,80
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,32	0,28	0,25	0,22	0,27	0,24	—	—	—
3	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	26,67	80,00	23,65	70,95	20,15	60,45	19,32	17,90	16,66
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,31	0,26	0,33	0,30	0,29	0,32	—	—	—
4	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	5,95	17,85	4,15	12,45	3,45	10,35	3,80	3,56	2,96
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,28	0,32	0,29	0,34	0,26	0,23	—	—	—
5	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	40,15	120,30	30,40	91,30	22,10	66,55	27,57	23,68	20,82
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,26	0,30	0,30	0,21	0,25	0,23	—	—	—
6	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	20,35	60,65	16,85	50,95	16,40	49,20	14,31	13,88	12,85
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,32	0,30	0,31	0,25	0,35	0,28	—	—	—
7	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{13}
	9,65	28,55	8,85	26,75	6,75	20,95	6,91	6,19	5,95
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,31	0,35	0,32	0,36	0,29	0,31	—	—	—

Реализация данной модели, учитывая нелинейность уравнений состояния, осуществлялась итерационно методом переменных параметров упругости. В целом, используется аналогичная численная процедура предложенной в работах [1, 2], где использовались элементы первого порядка. На рисунке 3 показан 10-узловой элемент в форме тетраэдра, используемый в настоящем исследовании.

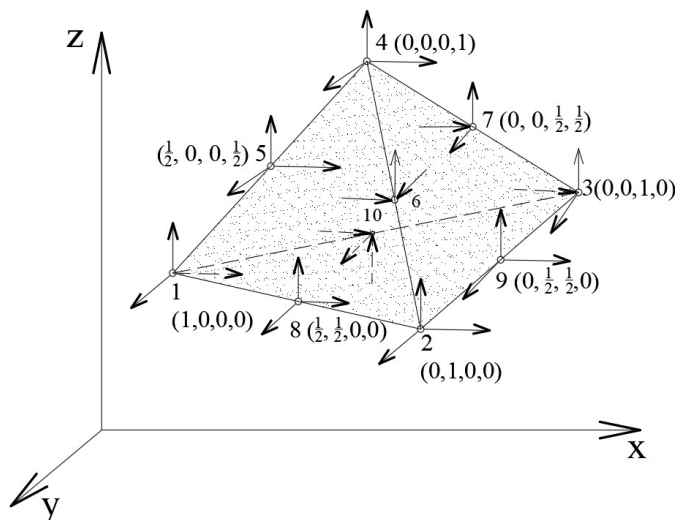


Рис. 3. Конечный элемент в виде тетраэдра второго порядка

Таким образом, была сформулирована математическая модель многослойного полупространства с включениями с воздействием на него жестким штампом. При этом слои образованы ортотропными структурами, чувствительными к виду напряженного состояния.

На рис. 4-6 показаны избранные результаты демонстрирующие возможности разработанной модели.

При расчете слоистого деформируемого полупространства с включениями и с применением усовершенствованных соотношений [9] разница составила: а) для вертикальных перемещений: до 5% к определяющим соотношениям [1], и до 25% при использовании усредненных механических характеристик материала; б) для нормальных напряжений: до 5% к определяющим соотношениям [1], и до 45% при использовании усредненных механических характеристик материала; в) для нормальных напряжений σ_z через включение 1-Б: до 5% к определяющим соотношениям [1], и до 45% при использовании усредненных механических ха-

рактических характеристик материала; г) для нормальных напряжений σ_z через включение 1-В: до 5% к определяющим соотношениям [1], и до 45% при использовании усредненных механических характеристик материала.

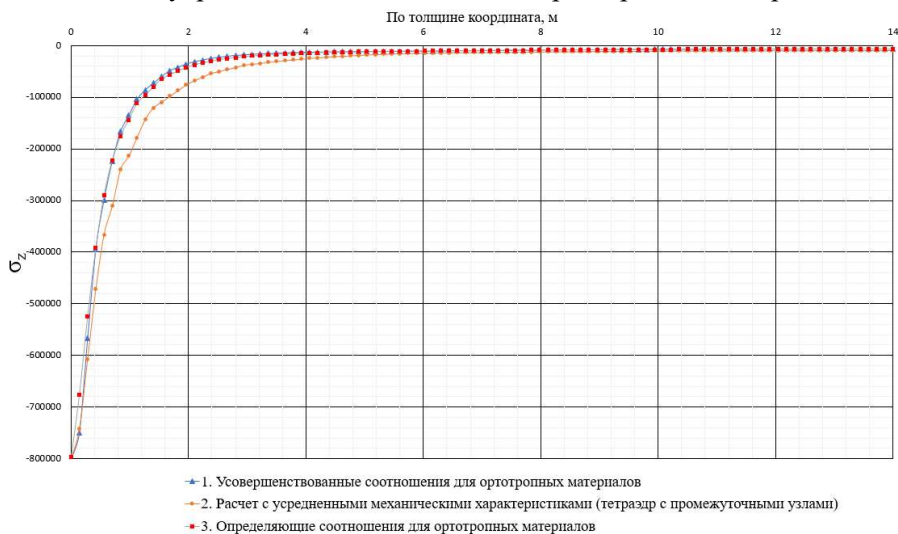


Рис. 4. Изменение напряжений σ_z по толщине в точке А

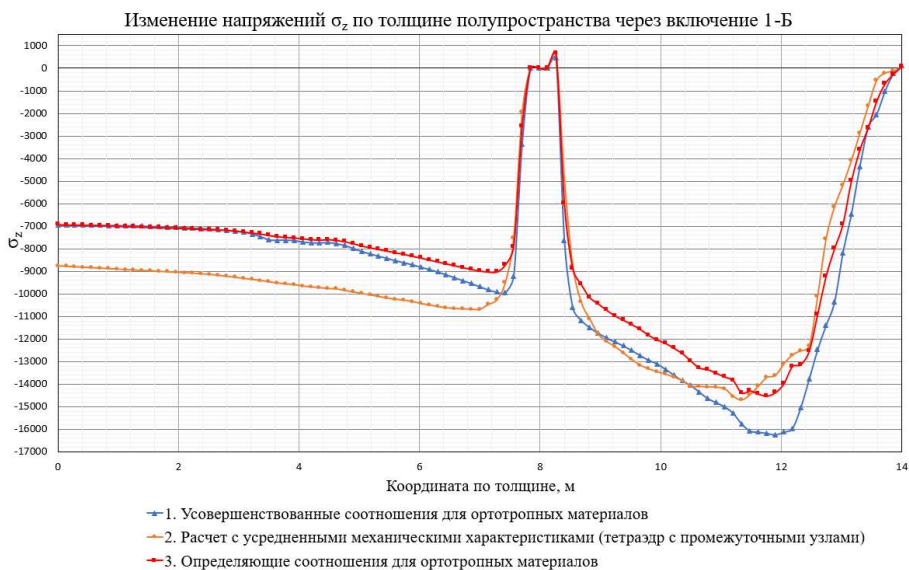


Рис. 5. Изменение напряжений σ_z по толщине через включение 1-Б

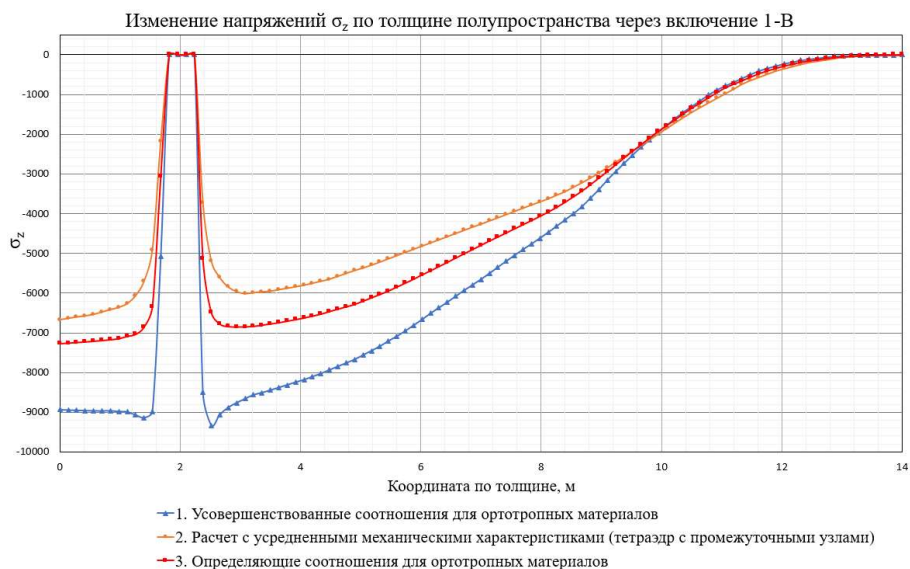


Рис. 6. Изменение напряжений σ_z по толщине через включение 1-В

Проведённый анализ напряжённо-деформированного состояния многослойного ортотропного полупространства с двойной анизотропией подтвердил эффективность предложенного подхода. Разработанная методика, основанная на трёхмерной теории упругости с использованием криволинейных 10-узловых конечных элементов и модифицированных определяющих соотношений [11], обеспечивает высокую точность моделирования. Сравнительный анализ [1] показал, что данный метод превосходит традиционные подходы как по точности, так и по удобству практического применения.

Библиографический список

1. Трещев А. А., Теличко В. Г., Ходорович П. Ю. К задаче о давлении на грунтовое основание // Вестник отделения строительных наук РААСН. – М.: РААСН-МГСУ, 2014. – Вып. 18. – С. 95–99.
2. Теличко В. Г., Ходорович П. Ю. К расчету оснований методом конечных элементов // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – Ч. 1. – С. 341–347.
3. Семенов В. А. Выбор расчетных моделей пространственных комбинированных систем МКЭ // Пространственные конструкции зданий и сооружений: сб. статей / под ред. В. В. Шугаева [и др.]. – М., 2004. – Вып. 9. – С. 54–64.

4. Трещев А. А., Теличко В. Г., Царев А. Н., Ходорович П. Ю. Конечно-элементная модель расчета пространственных конструкций из материалов с усложненными свойствами // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – Вып. 10. – С. 106–115.

5. Клованич С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / С. Ф. Клованич. – Запорожье: Изд-во журн. «Світгеотехніки», 2009. – 400 с.: ил. – (Библиотека журнала «Світгеотехніки»; вып. 9). – Библиогр. в конце кн. – ISBN 978-966-7732-72-2.

6. Постнов В. А., Хархурим И. Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций / В. А. Постнов, И. Я. Хархурим. – Л.: Судостроение, 1974. – 344 с.

7. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals: 7th Edition. – Butterworth-Heinemann, 2013. – 756 p.

8. Трещев А. А. Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения: монография / А. А. Трещев. – М.: Изд-во ТулГУ, 2008. – 264 с.

9. Трещев А. А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения: монография / А. А. Трещев. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 326 с.

10. Трещев А. А., Завьялова Ю. А., Лапшина М. А. Вариант модели деформирования ортотропных композитных материалов // Эксперт: Теория и практика. – 2020. – № 3(6). – С. 62–68.

11. Treschev A. A., Zavyalova Yu. A., Lapshina M. A., Gvozdev A. E., Kuzovleva O. V., Krupitsyn E. S. Defining equations of deformation of materials with double anisotropy // Chebyshevskii sbornik. – 2021. – Vol. 22, no. 4. – P. 369–383.

УДК 624.971

КОМПЛЕКСНЫЙ РАСЧЁТ ДЫМОВЫХ ТРУБ КАК СИСТЕМЫ «СТВОЛ-РОСТВЕРК-СВАИ-ГРУНТ» В ПК ЛИРА-САПФИР

Чигинская И. А., Теличко В. Г., Чигинский Д. С.

ТулГУ; ООО «Строительное Проектирование», г. Тула, Россия

Современная практика проектирования промышленных дымовых труб характеризуется значительным разбросом нормативных документов, а учитывая сложность и многогранность решаемых задач [1, 2, 3, 4], возникает потребность в описании комплексного подхода, позволяющего взаимно увязать требования современных нормативных документов.

Настоящая статья посвящена реализации элементов такого подхода к расчёту дымовых труб, который позволяет учитывать взаимодействие между всеми компонентами системы «ствол-ростверк-свай-грунт» и обеспечить соблюдение нормативных требований. Рассматриваемый подход реализован в программном комплексе ЛИРА-САПФИР (ЛИРА-САПР) и включает использование специализированных модулей для моделирования грунтового основания, определения динамических характеристик и задания температурных воздействий. Полученные результаты расчёта подтверждают эффективность предлагаемого метода и демонстрируют возможность достижения высокой точности прогнозирования поведения конструкции при различных сочетаниях нагрузок и воздействий.

Проектирование промышленных дымовых труб представляет собой сложную инженерную задачу, требующую учета множества факторов, таких как механические свойства материала, климатические условия, геологические характеристики площадки и эксплуатационные факторы. Современные нормы проектирования (СП 16.13330, СП 63.13330, СП 24.13330, СП 375.1325800) предъявляют строгие требования к обеспечению безопасности и долговечности указанных сооружений [5]. Однако существующие подходы часто основаны на изолированном рассмотрении отдельных компонентов конструкции, что приводит к недостаточной точности расчетов и необходимости дополнительных мер по усилению конструкций. Поэтому разработка методик комплексного расчёта, позволяющего учесть взаимное влияние всех элементов системы, приобретает особую значимость.

Целью настоящей работы является разработка и апробация методики комплексного расчёта дымовых труб как единой системы, включающей стальной ствол, железобетонный ростверк, свайное основание и грунт, с помощью программного комплекса ЛИРА-САПФИР. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи [6]:

- Разработка конечно-элементной модели системы «ствол-ростверк-свай-грунт» с учётом специфических особенностей каждого элемента конструкции.
- Реализация алгоритмов расчёта статических и динамических нагрузок, включая собственные частоты и формы колебаний.
- Оценка прочностных и деформационных характеристик конструкции при различных комбинациях нагрузок и воздействий.
- Проверка соответствия полученных результатов действующим нормативным документам.

Исследование проводилось методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ЛИРА-САПФИР. Основные этапы реализации работы включали:

1. Создание конечно-элементной модели – модель была построена с использованием специализированных конечных элементов, соответствующих каждому типу конструкции: ствол трубы – стержневыми элементами (Тип 10), ростверк – пластинчатыми элементами (Тип 42 и 44), сваи – стержневыми (Тип 10) и специализированными конечными элементами (Тип 57) для описания взаимодействия с грунтом.

2. Сбор и формирование расчётных нагрузок и их сочетаний – учтены постоянные, длительные и кратковременные нагрузки, в том числе собственный вес металлических и железобетонных конструкций, ветровые нагрузки (средняя составляющая, пульсация, выполнен контроль резонансного вихревого возбуждения), температурное воздействие отводимых газов и односторонний нагрев солнца.

3. Использовались модули ЛИРА-САПФИР для выполнения статического и динамического расчётов, включая расчёт коэффициентов жёсткости специальных конечных элементов на основе модели грунта, оценку собственных частот и форм колебаний, проверку прочности и деформативности конструкции.

4. Анализ результатов – полученные результаты сравнивались с нормативными требованиями, такими как ограничения по перемещению, раскрытию трещин, собственным частотам колебаний и другим параметрам.

Объектом исследования принято промышленное сооружение – стальная дымовая труба (самонесущая цилиндрическая оболочка) высотой 17 метров с внутренним диаметром 1400 мм и толщиной стенки 10 мм, сварной из стального листа по ГОСТ 19903-2015 или трубы электро-сварной прямошовной по ГОСТ 10704-91, выполненная из стали марки Ст3сп5 (С255-4) по ГОСТ 27772-2021. Фундамент сооружения представлен железобетонным ростверком размерами $2.1 \times 2.1 \times 0.6$ м (бетон класса по прочности на сжатие В25 и марки F200 и W8). Свайный куст принят состоящим из 4-х свай длиной 4 м диаметром 400 мм. Сваи приняты железобетонными буронабивными из бетона кл. В25, F200, W8; каждая свая армирована 8 стержнями арматуры d18 A400 (з.с. 5 см).

Программная реализация выполнена в ПК ЛИРА-САПФИР (ЛИРА-САПР) с привлечением специализированных модулей, интегрированных в указанный программный комплекс: модуль «Грунт» для генерации трёхмерной модели основания с учётом реальных характеристик

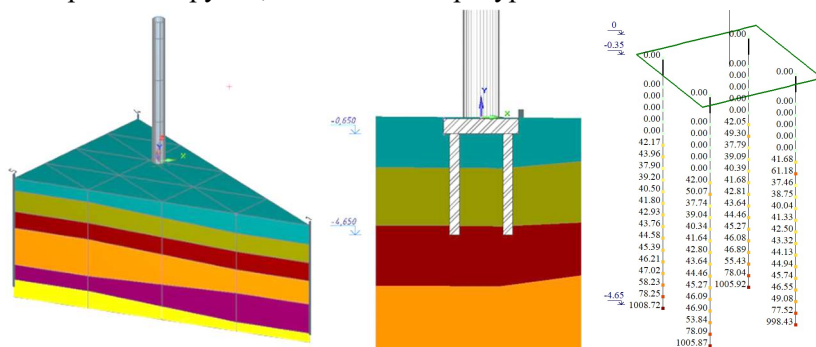


Рис. 1. Геотехническая модель сооружения: слева – общий вид,
по центру – поперечный разрез,
справа – мозаика жесткости КЭ свай, т/м

Критерии соответствия нормам представлены комплексной системой ограничений: горизонтальное смещение верха трубы не должно превышать $H/75 = 227$ мм согласно п. 5.2 [7]; ширина раскрытия трещин в ростверке ограничена 0,15 мм по табл. 5.2 [7]; крен фундамента не может превышать 0,005 согласно табл. 5.1 [7]; минимальная собственная частота конструкции должна быть не ниже 2 Гц по п. 4.8 [7] (для исключения резонанса).

Результаты динамического анализа подтвердили отсутствие риска резонансных колебаний. Первая собственная частота конструкции составила 4,989 Гц, что существенно превышает нормативное ограничение в 2 Гц. Более того, критическая скорость ветра, вызывающая вихревое возбуждение, определена как 30,7 м/с, что превышает максимальную расчётную скорость 23,8 м/с для принятого района строительства (Тульская область).

Прочностные расчёты выявили значительные запасы несущей способности: максимальный коэффициент использования был получен из условия местной устойчивости стального ствола и составил 76,6%; мак-

симальное усилие в сваях не превысило 8,0 т, минимальный коэффициент запаса в сваях составил 1,07. Деформационные параметры также соответствуют нормативным требованиям: фактическое горизонтальное смещение верха составило 72 мм (31.7% от предельного значения); ширина раскрытия трещин в сваях не превысила 0.05 мм.

В отличие от упрощённых подходов, реализованный подход обеспечивает корректное моделирование взаимного влияния работы ствола дымовой трубы с грунтом основания через ростверк и куст свай, что весьма затруднительно при раздельном расчёте фундамента и надземной части.

Следует отметить, что в настоящем исследовании не учитывается химическая активность газового потока и её влияние на коррозионные процессы, что требует дополнительного изучения, при этом защита конструкций от коррозии обеспечивалась соблюдением нормативных требований СП 28.13330 и СП 375.1325800.

В заключении следует отметить, что предложенная методология комплексного конечно-элементного моделирования в ПК ЛИРА-САПФИР (ЛИРА-САПР) обеспечивает соответствие актуальным нормативным требованиям. Технологическими преимуществами методики являются: автоматическое определение характеристик жёсткости элементов, учитывающих взаимодействия с грунтом; оптимизация армирования железобетонных элементов по критериям прочности, в том числе с учётом продавливания, и трещиностойкости.

Полученные результаты показывают высокую точность реализованной методики и позволяют утверждать, что применение комплексного подхода к расчёту дымовых труб обеспечивает полное соответствие нормативным требованиям. Использование специализированных модулей ЛИРА-САПФИР позволило автоматически определить характеристики свайного основания и оптимизировать армирование железобетонных элементов, что в свою очередь даёт возможность сократить материалоёмкость и повысить экономичность разрабатываемой документации.

Реализованная методика комплексного расчёта дымовых труб в виде системы «ствол-ростверк-свай-грунт» с использованием программного комплекса ЛИРА-САПФИР показала свою эффективность и позволила обеспечить соответствие современным нормативным требованиям. Применение указанного подхода позволяет снизить риск ошибок при проектировании и уменьшить материальные затраты благодаря оптимизации конструкции. Тем не менее, необходимо продолжение исследований для расширения области применения методики в особых условиях сейсмических районов строительства с интенсивностью землетрясений свыше 7 баллов по шкале MSK-64, а также для высотных сооружений (при высоте более 100 м).

Библиографический список

1. Попова Ю. А. Различные виды дымовых труб на промышленных объектах / Ю. А. Попова, Э. К. Акимова // Матрица научного познания. – 2020. – № 5. – С. 68–76.
2. Брыжатая Е. О. Напряженно-деформированное состояние конструкций оболочки дымовой трубы при регулировании вертикального положения / Е. О. Брыжатая // Строитель Донбасса. – 2025. – № 1(30). – С. 28–35. – DOI: 10.71536/sd.2024.3с30.4.
3. Глухов В. С. Контролируемая надежность свайного фундамента при реконструкции дымовой трубы / В. С. Глухов, М. В. Глухова // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2021. – № 1(16). – С. 9–18.
4. Параметрическое моделирование конструкций в среде визуального программирования / Н. А. Бузало, Н. Г. Царитова, И. Д. Платонова, В. Н. Лысенко // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 4. <https://esj.today/PDF/03SAVN421.pdf> (доступ свободный).
5. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : Принят межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 14 ноября 2014 г. N 72-П). – Введ. 2015-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 23 с.
6. Компьютерные технологии проектирования железобетонных конструкций / Ю. В. Верюжский, В. И. Колчунов, М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерский. – Киев : Книжное издательство НАУ, 2006. – 808 с.
7. СП 375.1325800.2023. Трубы промышленные дымовые. Правила проектирования : свод правил / утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 28 декабря 2023 г. № 1008/пр. – Введ. 2024-01-29. – 117 с.

УДК 624.07

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА CONCRETE В ПК PLAXIS ДЛЯ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ ТРЕБОВАНИЙ СП 63.13330.2018

Чигинский Д.С.

ООО «Строительное Проектирование», г. Тула, Россия

При проектировании бетонных и железобетонных конструкций в современных условиях очевидна необходимость использования функционала доступного в инженерной практике программного обеспечения, ре-

ализующего сложные напряженно-деформированные состояния, нелинейное перераспределение усилий после трещинообразования и реальную работу композитного материала. В этой связи одним из вариантов решения является применение программного комплекса Plaxis.

Возможность решения поставленной задачи с помощью вычислительного инструментария Plaxis в виду наличие модели материала, которая называется Concrete (бетон), ранее известной как Shotcrete, первоначально разработанной для моделирования поведения торкретбетона обделок тоннелей [1]. При этом в настоящее время указанная модель в Plaxis может быть полезна при моделировании усиления грунтов (например, железобетонными сваями), укрепления грунтов, например, методом струйной цементации (Jet-grouting) или при устройстве бареттных фундаментов [2], кроме того, её можно использовать и для других конструкций, выполненных из материалов на цементной основе.

С помощью указанной модели бетона можно получить реалистичные распределения напряжений, так как она учитывает нелинейность поведения материала. Кроме того, можно проверить прочность конструкции на всех фазах расчёта (стадиях работы проектируемой конструкции).

Таким образом, данная модель является универсальным инструментом для анализа широкого круга задач: от усиления грунтов бетонными сваями до железобетонных конструкций на естественном и свайном основаниях.

Модель бетона представляет собой упругопластическую модель для моделирования поведения материала с учётом ограниченной прочности при сжатии и растяжении, зависимость от времени прочности и жёсткости, реализации упрочнения и разупрочнения, ползучести и усадки [1].

Центральным элементом модели Concrete является концепция комбинированной поверхности текучести: для сжимающих напряжений используется поверхность Мора-Кулона, учитывающая рост прочности при увеличении среднего напряжения; для растяжения применяется критерий Ренкина с изотропным разупрочнением. Данный подход позволяет дифференцированно описывать поведение материала в принципиально различных условиях нагружения.

Переходя к практической реализации, необходимо акцентировать внимание на процедуре параметризации модели, требующей задания 25 параметров, включая следующие, которые, как правило, знакомы инженерам-расчётчикам:

- Плотность бетона, γ , кН/м³;
- Модуль Юнга (Young's modulus) для бетона в возрасте 28 сут., E_{28} , кН/м²;
- Коэффициент Пуассона, ν ;

- Прочность бетона при одноосном сжатии, $f_{c,28}$, кН/м²;
- Прочность бетона при одноосном растяжении, $f_{t,28}$, кН/м²;
- Максимальный угол трения, $\varphi_{\max}$, °.

Вместе с этим имеются реже встречающиеся параметры:

- Нормализованная начальная мобилизованная прочность, f_{c0n} ;
- Нормализованная прочность при разрушении, f_{cfn} ;
- Нормализованная остаточная прочность, f_{cun} ;
- Энергия трещинообразования бетона при сжатии, $G_{c,28}$, кН/м;
- Энергия трещинообразования бетона при растяжении, $G_{t,28}$, кН/м;

Последние, очевидно, требуют привлечения экспериментальных данных. При этом следует отметить, что имеются справочные данные для всех не установленных нормами параметров [3].

В контексте верификации результатов принципиальное значение имеют индикаторы разрушения [4]:

– Точки «Tension cut-off» (белый куб) – точка ограничения натяжения, указывает на то, что напряжения находятся на границе разрушения при растяжении, включая пересечение поверхности Ренкина и поверхности Мора-Кулона, соответственно, отображают достижение предельного растягивающего напряжения, визуальнo маркируя зоны трещинообразования без полного разрушения материала;

– Точки «Failure points» (красный куб) указывает на то, что напряжения находятся на поверхности Мора-Кулона или поверхности размягчения по Кулону-Мору и соответственно, отображают критические области истощения несущей способности при сжатии.

Как следствие, отсутствие последних в результатах расчётов указывает на соблюдении требований по первой группе предельных состояний [5] (по прочности рассчитываемой конструкции). А отсутствие или наличие точек «Tension cut-off» свидетельствует только об отсутствии или образовании трещин, но ещё не является свидетельством о нарушении требований по второй группе предельных состояний, так как параметр ширина раскрытия трещин отсутствует. Проверка требований по прогибам выполняется по перемещениям узлов в соответствующих направлениях контроля и не имеет специального маркера.

Особенностью модели Concrete является строго установлены знак напряжений: растяжение – положительно и σ_1 является большим главным (растягивающим) напряжением, а σ_3 – является меньшим главным (сжимающим) напряжением.

Кривая напряжения-деформации при сжатии определяется на основе нормализованных значений прочности и разделяется на четыре части:

- Часть I – квадратичное деформационное упрочнение;
- Часть II – линейное деформационное разупрочнение;
- Часть III – линейное деформационное разупрочнение;
- Часть IV – постоянная остаточная прочность.

Прочность при одноосном сжатии бетона в возрасте 28 суток $f_{c,28}$ может быть получена по результатам одноосных испытаний на сжатие. При сжатии модель материала Concrete следует методу, предложенному в [6]. Поведение модели бетона при растяжении является линейно-упругим до тех пор, пока не будет достигнута прочность на растяжение $f_{t,28}$, а затем реализуется линейное деформационное разупрочнение.

При этом следует обратить внимание на наличие обоснованного в [7] понимания недостатков модели, а именно того, что корневая особенность модели – комбинация сдвигового механизма разрушения для сжатия (Мора-Кулона) и отрывного – для растяжения (Ренкина) противоречит единой природе разрушения бетона.

Учитывая многопараметрическое описание материала, в рамках инженерной практики контроль работы модели и, как следствие, проверка несущей способности по первой (прочности) и второй (трещиностойкости) группам предельных состояний конструкции может осуществляться с помощью следующих значений, получаемых по результатам расчёта методом конечных элементов (МКЭ) в Plaxis:

- максимальные сжимающие и растягивающие напряжения в отдельных точках интегрирования по Гауссу (точках напряжений – «Stress points») не должны превышать сопротивления бетона при сжатии R_b (R_{bn}) и растяжении R_{bt} (R_{btn}), принимаемых в зависимости от класса бетона на сжатие [8];

- максимальные деформации при сжатии не должны превышать предельно допустимых деформаций – 0,0035, см. п. 6.1.20 [8];

- в случае наличия требования об отсутствии образования трещин, максимальные деформации при растяжении не должны превышать предельно допустимых деформаций – 0,00015, см. п. 6.1.22 [8], а также отсутствие образования точек «Tension cut-off»;

- коэффициенты использования при сжатии UtilFC и при растяжении UtilFT, как правило, не должны превышать значение 1,0, см. п. 15.5 [3].

- отсутствие образования точек «Failure point».

Обобщая изложенное, следует отметить, что возможности модели Concrete в Plaxis в увязке с нормативными требованиями [8] создают

полноценную основу для практических инженерных расчётов прочности, деформативности и трещиностойкости бетонных и железобетонных конструкций МКЭ.

Вместе с этим следует отметить необходимость внимательного анализа и дополнительного экспериментального подтверждения справочных значений параметров рассмотренной модели для применяемых в Российской Федерации бетонов различных классов. Особого внимания требуют конструкции с наличием включений арматуры, а соответственно, проработка контактного взаимодействия «бетон-арматура» и распределения напряжений (усилий) в арматуре; для конструкций, работающих в грунте, актуальным остаётся вопрос численного моделирования поведения грунта на границе контакта «грунт-бетон».

Библиографический список

1. Schädlich B. A new constitutive model for shotcrete / B. Schädlich, H. Schweiger // *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*: Delft, Netherlands, 2014. – P. 103-108. – DOI: 10.1201/b17017-20.
2. Behloul D. Numerical analysis of laterally loaded barrette foundation / D. Behloul, S. A. Rafa, B. Moussai // *Soils and Rocks. An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2023. – [Указать том и номер]. – DOI: 10.28927/SR.2023.002122.
3. PLAXIS CE V20 : пособие по моделям материалов. – 2020. – 238 с.
4. PLAXIS 3D 2024.1 : 3D Reference Manual. – 2024. – 668 с.
5. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : Принят межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 14 ноября 2014 г. N 72-П). – Введ. 2015-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 23 с.
6. Schütz R. Advanced constitutive modelling of shotcrete. Model formulation and calibration / R. Schütz, D. Potts, L. Zdravkovic // *Computers and Geotechnics*. – 2011. – Vol. 38, no. 6. – P. 834-845. – DOI: 10.1016/j.compgeo.2011.05.006.
7. Windisch A. Extended Rankine failure criteria for concrete / A. Windisch // *Concrete Structures : journal of the Hungarian group of fib*. – 2022. – Vol. 23. – P. 4-10. – DOI: 10.32970/CS.2022.1.2.
8. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (актуализированная редакция СНиП 52-01-2003). – Введ. 2019-06-20. – Москва : Минстрой России, 2018. – 143 с.

СЕКЦИЯ «ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

УДК 691.3

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ С МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ ОТВАЛЬНОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА, ВВОДИМОГО СУСПЕНЗИЕЙ

Барковская С.В., Краснова У.В.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Вопрос утилизации шлаков в составах бетонов в качестве заполнителей и наполнителей является всегда актуальным, многие авторы продолжают свои изыскания в данной области [1], к тому же шлак успешно является составляющей цементов [2], позволяя получение цементов низких классов активности и экономию цементного клинкера, который при помоле дает высокие классы по прочности.

По данным [3] на 2020 г. металлургическое производство дало более 136 млн. т. образовавшихся отходов, поэтому применение шлаков в качестве составляющих бетонных смесей и бетонов актуальная экологическая задача.

В работах авторов [4, 5] рассматривается возможность введение тонкомолотого шлака в состав цементных вяжущих в качестве водных суспензий, при этом стабилизацию суспензий проводили ультразвуковой обработкой. Авторы данных работ также проводили успешные испытания ультразвуковой стабилизации суспензий с углеродными нанотрубками [6].

В данной работе представлены результаты влияния введения тонкомолотого доменного шлака в состав мелкозернистых бетонов на прочность при сжатии. Рассматриваемый способ введения тонкомолотого шлака – ручное распределение его в растворе добавки-суперпластификатора, затем данная суспензия вводилась в состав мелкозернистого бетона. При этом рассматривали различное количество вводимого шлака в состав мелкозернистого бетона, в качестве замещения цемента, без снижения прочностных характеристик. Полученные результаты планируется перенести на исследования в составах тяжелых бетонов, следовательно, испытания образцов-кубов, поэтому результаты испытаний на растяжение при изгибе в данной работе не приводятся.

Используемые сырьевые материалы: портландцемент класса ЦЕМ I 32,5 Н с активностью 39,2 МПа; песок строительный с модулем крупности 2,2

(группа средний); добавка SikaPlast – 2067LF в различном количестве от массы цемента; тонкомолотый отвальный доменный шлак (ОДШ) с удельной поверхностью $3140 \text{ см}^2/\text{г}$. Равномерное распределение микронаполнителя в растворе добавки достигалось без дополнительного оборудования, встряхиванием в пробирке. Следует отметить, что данная суспензия может быть использована сразу после приготовления и не предназначена для хранения, т.к. микронаполнитель осаждается в растворе в течении часа, в отличие от результатов, полученных в работах [4, 5], целью данного исследования также было и снижение ресурсоемкости.

Для определения прочностных характеристик заформовывались образцы-балочки $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$, твердение происходило в н.у. (температура $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, влажность $95 \pm 5\%$) в течение 28 суток. При проведении исследований все смеси изготавливались равноподвижными с расплывом конуса на встряхивающем столике $170 \pm 5 \text{ мм}$ [7].

Введение суперпластификатора в состав мелкозернистой бетонной смеси необходимо, т.к. тонкомолотый микронаполнитель способствует увеличению расхода воды в бетонах. К тому же, мелкозернистые бетонные смеси, по сравнению с бетонными смесями для тяжелых бетонов, и сами характеризуются повышенным расходом воды, т.к. мелкий заполнитель обладает большей удельной поверхностью по сравнению с крупным заполнителем [7]. Поэтому для сокращения расхода воды в составах и сохранения их подвижности вводилась добавка – SikaPlast – 2067LF – суперпластификатор – водная композиция модифицированных поликарбонатных эфиров в различном количестве от массы цемента.

Оптимальное количество добавки поверхностно-активного вещества в составе бетонной смеси было определено предварительными испытаниями и составило 0,6% от массы цемента.

Результаты зависимости прочности на сжатие мелкозернистых бетонов от способа введения микронаполнителя (МН) в бетонную, приведены на рисунке 1. На рисунке также приведены результаты введения тонкомолотого шлака в состав мелкозернистых бетонных смесей без пластификатора. Суспензия представляла собой тонкомолотый шлак, распределенный в воде затворения. Следует отметить, что без суперпластификатора тонкомолотый шлак плохо смачивается водой и плохо в ней распределяется. Происходит очень быстрое осаждение частиц в растворе, их оседание на дне пробирки.

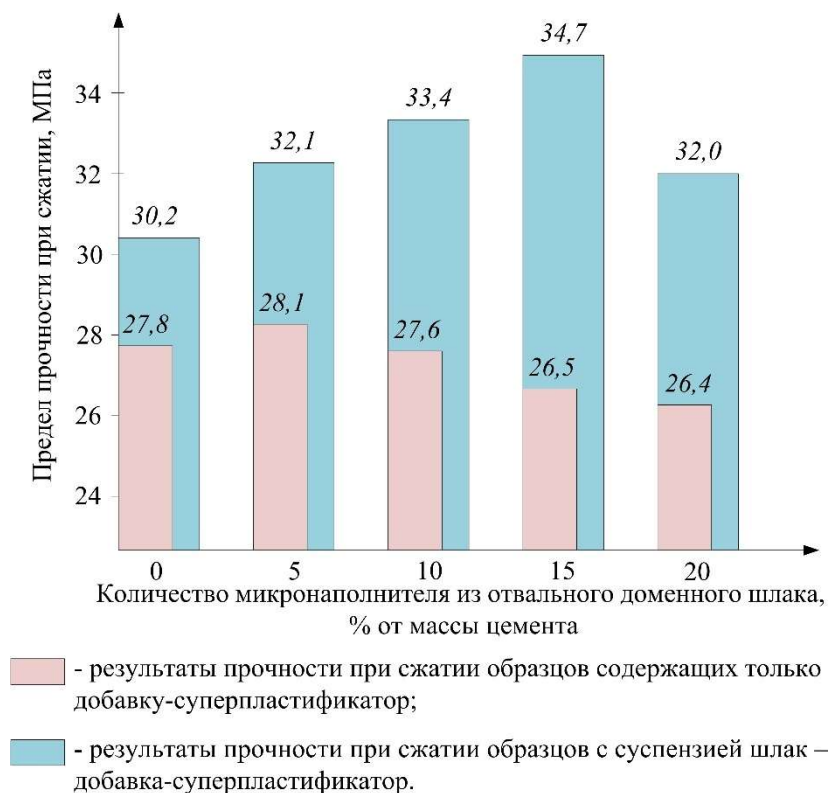


Рис. 1 Зависимость прочности на сжатие мелкозернистых бетонов от количества микронаполнителя из отвального доменного шлака в суспензии

Из результатов рисунка 1 следует, что оптимальным количеством микронаполнителя из отвального доменного шлака в составах без добавки-суперпластификатора является 5% от массы цемента: прирост прочности на сжатие составил 1,1% от контрольного состава. При условии использования суспензии вода-суперпластификатор-шлак оптимальным является содержание шлака 15% от массы цемента: прирост прочности на сжатие составил 14,9% от контрольного состава. Таким образом, использование суспензии вода-суперпластификатор-шлак дает больший прирост прочности при сжатии в мелкозернистых бетонах и позволяет большую экономию цемента. Недостатком применения данной суспензии необходимость использования её в течение часа после приготовления и невозможность её хранения, т.к. микронаполнитель из отвального доменного шлака осаждается в суспензии.

Библиографический список

1. Хоботова Э. Б. Исследование ресурсной ценности отвалных доменных шлаков / Э. Б. Хоботова, М. И. Игнатенко, И. В. Грайворонская, Ю. С. Каложная // Экология и промышленность. – 2019. – № 2(59). – С. 61–69.
2. ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия. – Введ. 2017-03-01. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 15 с. – (Взамен ГОСТ 31108-2003).
3. Абдуллина Л. Ш. Получение вторичного сырья при рециклинге отходов металлургического производства / Л. Ш. Абдуллина, С. М. Тайсина // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2022. – № 21. – С. 246–257.
4. Немирова В. А. Применение шлаковых суспензий в цементных композитах / В. А. Немирова, И. В. Козлова // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 2(198). – С. 137–139.
5. Козлова И. В. Структурные модели и механизм влияния стабилизированных суспензий нано- и ультрадисперсных добавок на свойства цементных композиций : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / И. В. Козлова. – Москва, 2017. – 243 с.
6. Самченко С. В. Стабилизация дисперсий углеродных нанотрубок при ультразвуковой обработке / С. В. Самченко, О. В. Земскова, И. В. Козлова // Техника и технология силикатов. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 14–18. – EDN SNAVPH.
7. Баженов Ю. М. Технология и свойства мелкозернистых бетонов : учеб. пособие / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, Р. Б. Ергешев. – Алматы : КазГосИНТИ, 2000. – 195 с.

УДК 666.972.4:691.54

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРЦЕМЕНТНОГО ВЯЖУЩЕГО В КОНСТРУКЦИОННОМ НЕАВТОКЛАВНОМ ГАЗОБЕТОНЕ

Белов В.В., Микаелян Х.А.
ТверьГТУ, г. Тверь, Россия

Введение. Производство ячеистых бетонов было запущено в России в 1950-х годах. С тех пор отрасль производства ячеистых материалов набирала обороты: вводились новые компонентные добавки, изменялись технологические особенности производства, совершенствовалось оборудование. Основная задача в процессе изготовления ячеистых бло-

ков заключается в том, чтобы увеличить энергоэффективность, уменьшив время возведения и упростить строительство здания. Из огромного количества ячеистой блочной продукции можно выделить три ведущих материала: газосиликатные, газобетонные и пенобетонные блоки. Газобетонные блоки обладают пористой структурой, малым весом, достаточной прочностью, большими габаритными размерами, низкой теплопроводностью, хорошей звукоизоляцией и высокой огнестойкостью, что делает данные материалы очень похожими друг на друга [1].

Отношение прочности к плотности изделий из легких бетонов регулируется плотностью легкого заполнителя. Чем выше это соотношение, тем больше коэффициент конструктивного качества (ККК) материала. Однако в силу неоднородности такого материала рост ККК за счет увеличения пористости легкого заполнителя ограничен, так как повышается вероятность разрушения несущего каркаса легкого бетона из ослабленного пористого заполнителя. Таким образом, попытки компенсировать падение прочности и показателя ККК увеличением в пределах разумных норм расхода цемента либо увеличением его марочности малоэффективны [2].

Неавтоклавные газобетонные изделия менее трудоемкие в производстве и не требуют дорогостоящего оборудования. Основным недостатком материала является более низкая формовочная прочность в отличие от автоклавных, но за счет гидравлического вяжущего (цемента) данный материал устойчив к воздействию влажной среды, которая обеспечивает процесс гидратации цемента, что способствует дополнительному эффекту – частичному самовосстановлению структуры материала [3].

Модифицирование структуры и свойств неавтоклавного газобетона для улучшения его механических свойств. Снижение материалоемкости строительных конструкций является важным шагом в направлении реальной экономии материальных и энергетических ресурсов, снижения экологической нагрузки, связанной с их непосредственным изготовлением, а также получением используемых для них вяжущих веществ. Практическая реализация данного тезиса может быть осуществлена за счет двух различных подходов. Первый предполагает изготовление конструкций сложных переменных сечений с полыми слабонагруженными (нерабочими) участками, а второй – сохранение сплошного сечения конструкции, но изготовление ее из поризованного материала. Имеется ряд работ, посвященных неавтоклавным газобетонам на основе композиционных вяжущих различных видов, составов и способов получения. Во всех этих работах в целом подтверждаются эффективность и перспек-

тивность данного направления. При этом важным недостатком исследований является то, что показатели применяемого вяжущего и показатели конечного ячеистого бетона изучаются в основном независимо. Авторы рассматривают характеристики газобетона как следствие действия рецептурно-технологических факторов в процессе его получения, одним из которых является активность вяжущего [4].

По мнению автора [4], правильнее рассматривать как минимум два структурообразующих процесса, протекающих параллельно и последовательно на различных масштабных уровнях. Микроуровень – структурообразование камня на основе композиционного вяжущего, макроуровень – газовая поризация ячеистобетонного массива. Эти процессы оказывают большое взаимное влияние друг на друга, в связи с чем в данной статье предпринята попытка проследить влияние продуктов реакции газовыделения на твердение камня на основе композиционных вяжущих, а также состава композиционного вяжущего – на изменение вязкости формовочной массы как важного условия образования качественной малодефектной поровой структуры ячеистого бетона.

При производстве газобетона важнейшим этапом является вспучивание. От равномерности распределения пор и их размера будут зависеть такие показатели качества, как теплопроводность, паропроницаемость, морозостойкость, прочность на сжатие и др. Регулировать формирование структуры ячеистого бетона можно за счет определенных технологических параметров [5]. Показано, что для получения изделия с высокой прочностью необходимо создать материал с минимальным количеством дефектов. Формирование оптимальной структуры неавтоклавного газобетона зависит от параметров, определяющих кинетику газообразования (добавки газообразователя, щелочи, их соотношение и др.), и параметров, регулирующих скорость увеличения вязкости и пластической прочности ячеистого бетона (температура смеси, введение химических добавок и др.).

Количество воды является одним из важнейших параметров для формирования пористой структуры газобетона. При высоком водотвердом соотношении (В/Т) пузырьки газа будут прорываться сквозь массу, в результате чего массив не вспучится. При недостаточной вязкости смеси начнет происходить эффект «кипения». Был проведен эксперимент для определения оптимального В/Т. В результате испытаний начиная с В/Т = 0,3 наблюдалось постепенное увеличение коэффициента вспучивания. При В/Т, равном 0,4, коэффициент был максимальным. При дальнейшем увеличении количества воды произошло уменьшение высоты подъема

массива, что было связано с улетучиванием определенного процента водорода сквозь толщу смеси [5].

Опираясь на базовые положения строительного материаловедения и бетоноведения и учитывая специфику неавтоклавного газобетона, исследователи провели анализ факторов повышения прочности материала (рис. 1) [6].



Рис. 1. Основные пути повышения прочности газобетона [6]

В работе [7] рассмотрены оптимальные составы неавтоклавного газобетона марок по средней плотности D500, D600 и D800 со сниженным расходом цемента на основе наполненного связующего вещества. В качестве исходных материалов использовали бездобавочный портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5, неактивированный порошок минеральный (доломитовая мука) по ГОСТ Р 52129-2003, микрокремнезем, алюминиевую пудру марки ПАП-2, суперпластификатор С-3, ускорители твердения NaCl и NaOH.

Для определения оптимального состава неавтоклавного газобетона марки по средней плотности D800 выполнялся двухфакторный планированный эксперимент с варьированием В/Т (0,42–0,44) и содержания алюминиевой пудры (350–400 г на 1 м³ газобетона) при постоянных значениях других рецептурных факторов: отношении минерального порошка к цементу по массе МП/Ц = 1,3; отношении микрокремнезема к цементу по массе МК/Ц = 0,09; содержании добавок в процентах от массы цемента – С-3 (0,6); NaCl (0,5); NaOH (0,5). Образцы размерами 100×100×100 мм твердели в течение 7 суток в нормальных условиях (температура – (20 ± 2) °С, влажность воздуха – 95–100 %) [7].

В работах [8, 9] подобраны составы с целью сравнения физико-механических свойств неавтоклавного газобетона, модифицированного комплексной добавкой С-3М + NaOH, и соответствующих бездобавочных составов. Кроме того, сравнивались физико-механические показатели

газобетона, твердевшего при различных условиях. В ходе исследований получена марка газобетона по плотности D700 [8].

Предел прочности при сжатии образцов марки D700 возрастает при снижении В/Т. У образцов, твердеющих при нормальных условиях, прирост прочности составил 33 % по сравнению с бездобавочным, после пропаривания это значение достигает 36 %, а после автоклавирования – 43 % (рис. 2) [8].

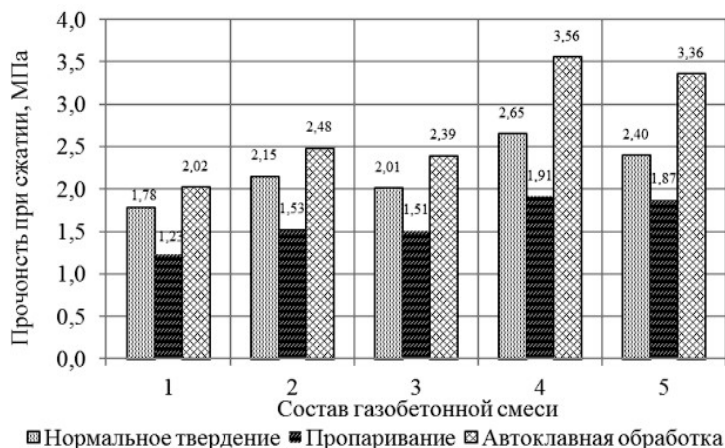


Рис. 2. Зависимость предела прочности неавтоклавногазобетона марки D700 при сжатии от расхода комплексной добавки и условий твердения [8]

В работе [9] использован органический наполнитель, отход сельскохозяйственного производства, а именно костра льна, в качестве дисперсного армирования газобетона. По результатам испытаний ячеистобетонных изделий образцы имеют плотность от 350 до 450 кг/м³, открытую пористость 38–45 %, предел прочности при сжатии от 0,9 до 1,5 МПа. Показатели качества ячеистого бетона, полученного из предложенной сырьевой смеси, позволяют применять его как теплоизоляционный и теплоизоляционно-конструкционный материал [9].

Важным качественным параметром газобетона является усадка при высыхании. Известно, что ячеистые бетоны дают очень большую усадку. Результаты исследований подтверждают известные теории о том, что на композиционном вяжущем величина усадки значительно сокращается по сравнению с контрольным цементным составом. Создание микрооднородной межпоровой перегородки газобетона с равномерным распределением высокодисперсных продуктов гидратации композиционного вяжущего обеспечено гранулометрией вяжущего, морфологией

и генезисом тонкодисперсных минеральных добавок, а также введением углеродного наноматериала [10]. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы: при введении углеродного наноматериала (УНМ) наблюдается увеличение прочности газобетона как в ранние (7 суток), так и в поздние (14, 28 суток) сроки твердения. Для составов с обычным ПЦ и композиционным вяжущим увеличение прочности составило примерно 50 % по сравнению с контрольными составами. Кроме того, применение композиционного вяжущего приводит к снижению усадки при высыхании газобетона по сравнению с контрольным цементным составом, а использование углеродного наноматериала в качестве микронаполнителя способствует снижению коэффициента теплопроводности, что связано с изменением структуры газобетона [10].

Важной особенностью технологии ячеистого бетона является необходимость достижения высокой степени поризации смеси и сохранения ее устойчивости в течение этого процесса. Выбор добавок обусловлен их значительным влиянием на коллоидно-химические свойства жидкой фазы суспензии при небольшом содержании этих добавок, а также положительным влиянием на процессы гидратации и твердения цемента [11].

В работе [12] в качестве модификатора использовалась пластифицирующая добавка «АртКонкрит». На рис. 3 показан расход модификатора и его влияние на В/Т газобетонной смеси при постоянном диаметре расплава по Суттарду. По сравнению с контрольной смесью В/Т смеси снижается от 12,2–34,7 % с увеличением модификатора. Это приводит к увеличению предела прочности при сжатии образцов от 1,26–2,79 МПа по сравнению с контрольным образцом газобетона (рис. 4) [12].

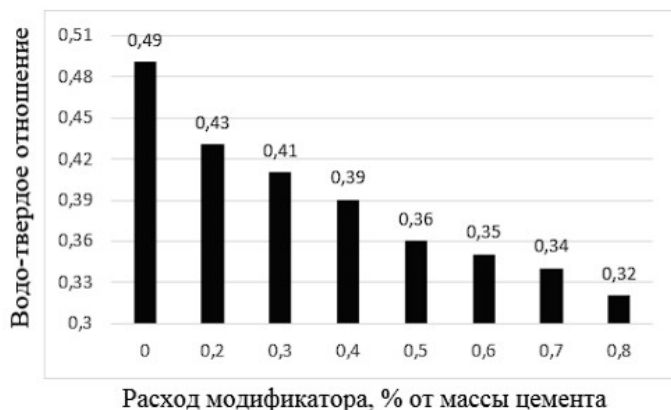


Рис. 3. Зависимость В/Т газобетонной смеси от расхода модификатора [12]

В работе [13] рассматривалось влияние добавок ПАВ, NaOH, KOH, CaCl_2 и температуры смеси на процесс вспучивания. Так как при литевой технологии процесс вспучивания длится 15–30 минут, важным фактором является удлинение срока вязкопластичного состояния шлама.

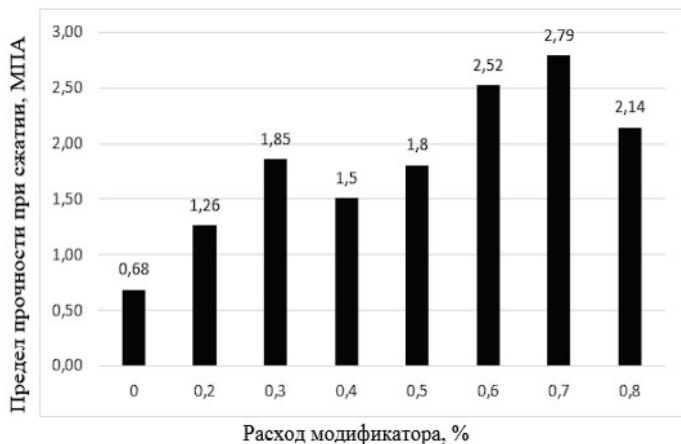


Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии образцов газобетона после тепловлажностной обработки от расхода модификатора [12]

В производстве возникает необходимость интенсификации процесса вспучивания. Делается это за счет повышения pH среды, в частности введением в смесь щелочей NaOH и KOH. Для регулирования сроков схватывания вяжущего и обеспечения стабилизации пористой структуры материала в смесь вводится хлористый кальций (от 0,2 до 1,3 % от массы вяжущего). Установлено, что максимальная прочность газобетона достигается при расходе CaCl_2 0,5–0,6 % от массы вяжущего. С увеличением количества NaOH и KOH в смеси полнее и интенсивнее протекает реакция между алюминиевой пудрой и щелочью, а следовательно, выделяется больше газа, что приводит к увеличению пористости и снижению средней плотности бетона. При расходе NaOH в количестве 1 % от массы цемента прочность неавтоклавного бетона имеет наибольшее значение [13].

Использование полимерцементного вяжущего как потенциальный способ улучшения механических свойств неавтоклавного газобетона. Полимерцементные материалы относятся к композиционным вяжущим, которые получают на основе неорганической составляющей в сочетании с органическим компонентом. В качестве неорганической составляющей применяют цемент, гипс, а в качестве органической используют

водорастворимые материалы (фурановые и эпоксидные смолы и др.) и водные дисперсии полимеров (латексы, поливинилацетат (ПВА) и др.). Полимерцементные материалы представляют собой композиты, у которых матрицей является каркас, образованный благодаря продуктам гидратации минерального компонента с распределенном в этом каркасе затвердевшим полимером [14].

Полимерные добавки в значительной степени повышают прочность минеральных вяжущих веществ. Так, в случае использования ПВА прочность полимерцемента при растяжении и изгибе в 2–2,5 раза выше, чем у обычного цемента. Если полимер недостаточно водостоек, то при увлажнении прочность полимерцемента снижается. Важна очень высокая адгезия полимерцемента почти ко всем применяемым строительным материалам. При содержании полимера 20–25 % клеящая способность полимерцемента приближается к клеящей способности чистого полимера [15].

В работах [15, 16] проведены исследования влияния полимеров и условий твердения на прочностные характеристики полимерцементных вяжущих. Прочностные свойства ПЦ-материалов существенно зависят от условий твердения: в воздушно-влажных условиях полимерная пленка замедляет испарение воды и тем самым улучшает гидратацию частиц, хотя замедляет скорость процесса; при водном твердении или во влажных условиях значительно замедляется формирование полимерной структуры, что обуславливает снижение прочностных показателей, особенно при изгибающихся нагрузках. Рекомендуется комбинированный режим, сочетающий 7–10 суток твердения образцов во влажных условиях с последующей воздушно-сухой гидратацией (относительная влажность 40–60 %) [15].

При оптимальных значениях полимерцементного отношения П/Ц для большинства полимерных добавок наблюдается максимум прочностных показателей как при сжатии, так и при изгибе. На прочностные характеристики материалов интенсивнее влияет полимерцементное отношение, а не водоцементное. Причем характер зависимостей «прочность – П/Ц» различен и определяется условиями твердения, природой полимера, содержанием добавок в полимерном компоненте, воздухововлечением и другими факторами. В зависимости от растворимости добавок изменяется их действие на прочностные характеристики цементного камня. Если для водорастворимых полимеров наблюдается рост прочности на сжатие, то дисперсии в значительной степени повышают прочность при изгибающих и растягивающих нагрузках, что наиболее эффективно для данного композиционного материала [15].

В работе [16] для получения полимерцементного вяжущего предварительно дробили клинкер в металлической ступке до однородного гранулометрического состава. Помол дробленого клинкера происходил в однолитровой шаровой мельнице с добавлением 5 % гипса и от 0,5 до 1,5 % ПВА до удельной поверхности 350 м²/кг в течение 40 минут. Формовались малые образцы с водоцементным отношением В/Ц = 0,26 и последующим хранением в водной среде, а также воздушно-сухих условиях. Визуально консистенция цементного теста исследованных образцов остается неизменной. В результате проведения испытаний образцов, насыщенных водой, и образцов, которые хранились не в водной среде, на прочность установлено, что при оптимальных значениях П/Ц для большинства полимерных добавок наблюдается максимум прочностных показателей сухих образцов как при сжатии, так и при изгибе. В то же время с увеличением содержания ПВА прочность образцов в возрасте 2 суток после хранения в водной среде снижается. Предполагается, что происходит частичное вымывание ПВА водой, что свидетельствует ее помутнение при хранении образцов в воде. Таким образом, полимерцементные композиции наиболее интенсивно твердеют в воздушно-сухих условиях, когда в результате испарения воды происходит быстрое упрочнение полимерной составляющей связующего. Во влажной среде, исключаяющей высыхание, полимерная часть упрочняется медленно, прочность камня оказывается ниже, чем при твердении в воздушно-сухих условиях, поэтому во влажных условиях эксплуатировать материал нежелательно [16].

Закключение. Повысить прочность неавтоклавного газобетона можно путем снижения В/Т, использования модификаторов с оптимальной дозировкой, повышения плотности и дисперсного армирования, а именно за счет оптимального содержания алюминиевой пудры и В/Т [7], а также применения комплексной добавки С-3М + NaOH, которая (в зависимости от условий твердения) обеспечивает прирост прочности газобетона от 33 до 43 % [8].

Данные источников [15, 16] показывают, что в настоящее время доступным резервом улучшения механических свойств неавтоклавного газобетона, который почти совсем не используется, является применение смешанного полимерцементного вяжущего. Следует учитывать, что прочность полимерцементных вяжущих во многом зависит от полимерцементного отношения, а также от условий твердения. Увеличение количества добавки ПВА приводит к снижению прочности образцов, находящихся в водной среде, но в воздушно-сухих условиях прочность растет.

Таким образом, использование полимерцементного вяжущего на основе водорастворимых полимеров оптимального состава и в оптимальном содержании может оказать пластифицирующее влияние на сырьевую смесь и повысить прочность конструкционного газобетона неавтоклавного твердения, который преимущественно эксплуатируется в воздушно-сухих условиях. Установление всех условий и аспектов данного влияния – это перспективное направление дальнейших исследований в области совершенствования технологии получения этого актуального строительного материала

Библиографический список

1. Рыжих В. Д. Ячеистые бетоны как основной стеновой материал в малоэтажном жилищном строительстве / В. Д. Рыжих, В. Н. Тарасенко // Инновации в науке и практике : сборник статей по материалам IV Международной научно-практической конференции. – Уфа : Дендра, 2017. – С. 184–188.
2. Елесин М. А. Метод повышения конструктивного качества газобетонов и усовершенствование технологии его получения / М. А. Елесин, Д. А. Авилов // Культура. Наука. Производство. – 2023. – № 11. – С. 74–76.
3. Дюсембинов Д. С. Модифицированные газобетонные изделия неавтоклавного твердения / Д. С. Дюсембинов, Е. Е. Сабитов // Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве : сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск : Изд-во филиала КузГТУ, 2017. – С. 347–350.
4. К вопросу изучения особенностей структурообразования композиционных вяжущих для неавтоклавных газобетонов / В. С. Лесовик [и др.] // Строительные материалы и изделия. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 41–47.
5. Леонтьев С. В. Исследование влияния технологических факторов на процессы формирования структуры неавтоклавного газобетона / С. В. Леонтьев, М. Д. Галкина // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2021. – Т. 1. – С. 314–318.
6. Елистраткин М. Ю. Повышение прочности неавтоклавного газобетона / М. Ю. Елистраткин, М. В. Абсиметов, А. Э. Ермолаева [и др.] // Фундаментальные основы строительного материаловедения : сборник докладов Международного онлайн-конгресса. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. – С. 50–58.
7. Белов В. В. Неавтоклавный газобетон с наполненной цементной матрицей / В. В. Белов, Р. А. Али // Вестник Тверского государственного

технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». – 2022. – № 2(14). – С. 5–15.

8. Малинин Д. Г. Неавтоклавные газобетоны повышенной трещиностойкости с низким водотвердым отношением / Д. Г. Малинин // Молодежные инновации : сборник материалов семинара молодых ученых XXII Международной научной конференции. – Москва : НИУ МГСУ, 2019. – С. 141–145.

9. Сырьевая смесь для ячеистых бетонов : пат. 2767503 С1 Рос. Федерация № 2021123476 / О. Е. Смирнова, А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков. – Заявл. 04.08.2021 ; опубл. 17.03.2022, Бюл. № 8. – 6 с.

10. Эжен Н. М. Применение композиционных вяжущих и углеродного наноматериала для получения газобетона / Н. М. Эжен, К. Акмалайулы // Наука и инновационные технологии. – 2022. – № 2(23). – С. 92–98.

11. Технология изготовления комплексных модификаторов для газобетона / А. В. Косых [и др.] // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – Братск, 2019. – Т. 1. – С. 120–124.

12. Мартынова В. Б. Влияние расхода модификатора на физико-механические свойства газобетона неавтоклавного твердения / В. Б. Мартынова, А. В. Парамонова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2019. – № 13(56). – С. 73–77.

13. Абдыраймов Ж. А. Влияния различных добавок на технические свойства неавтоклавного газобетона / Ж. А. Абдыраймов, С. Ж. Мелибаев // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. – 2016. – № 1(51). – С. 156–161.

14. Темный В. Д. Получение полимерцементного вяжущего / В. Д. Темный, Д. А. Мишин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова : сборник трудов конференции. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2019. – С. 2632–2635.

15. Ахметвалиев Н. Н. Прочностные характеристики полимерцементного вяжущего / Н. Н. Ахметвалиев // Студенческий форум. – 2019. – № 2(53). – С. 28–31.

16. Влияние условий твердения портландцемента с добавкой ПВА на его прочностные показатели / В. Д. Темный [и др.] // Международная научно-техническая конференция молодых ученых : сборник трудов конференции. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 3464–3468.

УДК 691.311

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МОДИФИЦИРОВАННОГО АНГИДРИТОВОГО ВЯЖУЩЕГО
В СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЯХ ДЛЯ СТЯЖКИ ПОЛА**

Бурьянов А.Ф., Лукьянова Н.А., Булдыжова Е.Н.
НИУ МГСУ, г. Москва, Россия

Гидратация ангидрита занимает длительное время, особенно если он не подвергается достаточному измельчению. Для ускорения процесса гидратации можно также использовать специальные ускорители твердения [1]. Важно обеспечить правильное соотношение компонентов и оптимальные условия для процесса гидратации [2,3,4]. Например, сульфаты щелочных металлов, такие как сульфат натрия или сульфат калия, могут ускорить гидратацию ангидритового вяжущего за счет ионного обмена с поверхностью частиц вяжущего с последующим образованием труднорастворимых двойных солей [5]. Органические добавки могут увеличить растворимость ангидритового вяжущего и способствовать образованию более сильных химических связей в затвердевшем материале [6].

Изучение и оптимизация процесса гидратации ангидритовых вяжущих с активирующими добавками представляет собой важную задачу для строительной индустрии, поскольку позволяет повысить качество и ускорить производство строительных материалов. Введение активирующих добавок может осуществляться как совместно с вяжущим при производстве строительных материалов, так и путем их введения в готовый материал на строительной площадке.

Для повышения удобоукладываемости ангидритовых смесей используются пластификаторы различной природы и состава. Пластификаторы применяются в зависимости от конкретных условий и требований, предъявляемых к строительному материалу. Некоторые из них могут быть органическими, натуральными, синтетическими или минеральными. Важно правильно подобрать пластификатор с учетом состава ангидритовой смеси и требуемых свойств готового продукта [7].

Некоторые исследования показывают, что добавление пластификаторов может ускорить процесс твердения ангидритовых вяжущих и повысить их прочность, в то время как другие исследования указывают на то, что пластификаторы могут замедлить твердение и ухудшить механические свойства материала.

Противоречивые результаты объясняются различиями в составе используемых пластификаторов, их концентрацией, способом введения и

другими факторами. Для того чтобы точно определить механизм влияния пластификаторов на твердение ангидритовых вяжущих, требуются исследования с использованием различных методов анализа.

В целом, пластификаторы могут играть важную роль в улучшении свойств ангидритовых вяжущих, но необходимо тщательно подбирать их тип и концентрацию для достижения оптимальных результатов.

В работе использовался природный гипсовый камень Бесленеевского месторождения, который обжигался во вращающей печи при температуре 900 °С Воронежской компанией ООО «ГИПСТЕХ» до получения нерастворимого ангидрита [8].

В качестве активаторов твердения применялись: портландцемент производства ОАО «НОВОРОСЦЕМЕНТ» марки 500 без добавок (щелочной активатор), химические реактивы ч.д.а, х.ч.(сульфатные активаторы) [9].

Для исследования подвижности смесей задействовали пластификаторы различной природы марки «Melment», «MELFLUX, C-3».

Для изготовления сухих строительных смесей использовался природный песок ОАО «Хромцовский карьер».

В качестве пластификаторов выбраны добавки различной природы: суперпластификатор C-3 на основе сульфонафталинформальдегида; Melment F10, Melment F 15G, Melment F245 на основе сульфомеламинформальдегида; Melflux 1641F, MELFLUX 2651F на основе полиэфиркарбоксилата, MelfluxSELECT 5691F на основе полиэфиркарбоновых кислот. Количество пластификатора вводится исходя из рекомендаций производителей. Полученные результаты влияния пластификаторов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты влияния пластификаторов на основе полиэфирных кислот на свойства ангидритовых вяжущих

№ состава	Пластификатор		Расплы в, см	Начало схватывания, мин	Прочность при сжатии, МПа	
	Вид	Количество, %				Вид
1	Melflux 1641F	0,05	-	90	20,2	21,4
2	Melflux 1641F	0,1	-	88	21,0	26,5
3	Melflux 1641F	0,15	-	90	19,9	20,5
4	Melflux 1641F	0,2	13,0	93	18,8	14,0

№ состава	Пластификатор		Расплы в, см	Начало схватыв ания, мин	Прочность при сжатии, МПа	
	Вид	Количес тво, %				Вид
5	Melflux 1641F	0,3	16,0	93	11,5	14,3
6	Melflux 1641F	0,4	18,0	96	9,3	7,3
7	Melflux 1641F	0,2	-	62	21,0	23,8
7	Melflux 1641F	0,2	-	62	21,0	23,8
8	Melflux 1641F	0,3	13,5	67	14,9	18,3
9	Melflux 1641F	0,35	15,5	72	8,9	9,5
10	Melflux 1641F	0,4	17,0	77	6,5	8,0
11	Melflux 1641F	0,15	12,0	95	17,3	14,8
12	Melflux 1641F	0,2	13,5	95	15,9	14,9
13	Melflux 1641F	0,25	14,5	100	7,7	11,8
14	Melflux 1641F	0,3	17,0	106	7,5	8,5
15	Melflux 2651F	0,2	14,0	110	6,8	5,4
16	Melflux 2651F	0,3	15,0	115	5,0	4,3
17	Melflux 5691F	0,2	14,5	117	5,0	7,1
18	Melflux 5691F	0,3	16,0	120	4,2	2,2
19	Melment F15 G	0,2	-	95	20,4	15,9
20	Melment F15 G	0,4	-	95	14,1	15,8
21	Melment F15 G	0,6	-	97	19,1	14,6
22	Melment F15 G	0,8	11,0	97	19,6	12,9
23	Melment F15 G	1,0	16,0	100	9,9	9,3

№ состава	Пластификатор		Расплы в, см	Начало схватыв ания, мин	Прочность при сжатии, МПа	
	Вид	Количес тво, %				Вид
24	Melment F15 G	1,5	16,0	100	4,3	3,7
25	Melment F10	0,6	-	89	22,4	21,5
26	Melment F10	0,8	-	90	25,9	24,2
27	Melment F10	1,0	10,0	93	28,2	26,6
28	Melment F10	1,5	13,5	93	28,0	26,3
29	Melment F10	2,0	16,0	95	23,9	22,4
30	Melment F10	1,0	-	61	19,1	21,0
31	Melment F10	1,5	-	65	26,7	26,8
32	Melment F10	1,75	-	67	22,1	21,2
33	Melment F10	2,0	-	68	25,4	24,7
34	Melment F10	2,5	-	68	17,8	16,1
35	Melment F10	0,4	-	88	18,5	17,1
36	Melment F10	0,6	14,0	89	20,6	20,8
37	Melment F10	0,8	16,0	92	20,9	21,9
38	Melment F10	1,0	16,0	92	23,6	22,7
39	Melment F10	1,5	17,5	94	18,4	16,8
40	Melment F245	0,4	-	87	18,7	27,8
41	Melment F245	0,8	13,0	90	18,6	20,7
42	Melment F245	1,0	15,0	93	20,2	20,3

Применение пластификатора поликарбоксилатного типа Melflux 1641F не приводит к повышению технологических свойств свежеприготовленных растворов (рисунок 1).

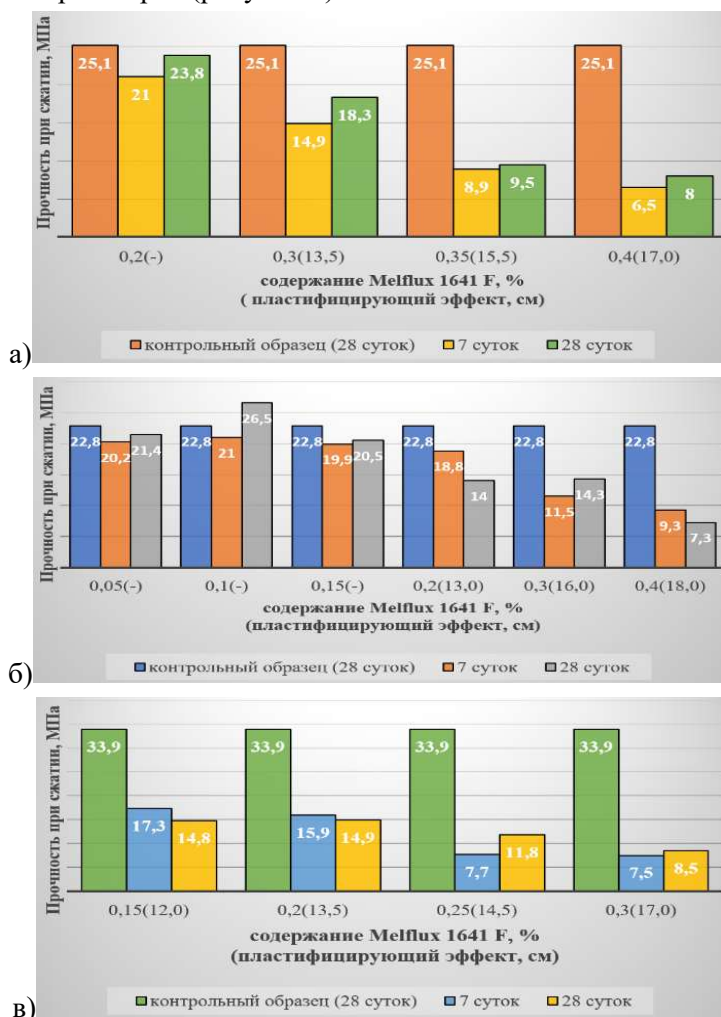


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания Melflux 1641F, МПа: ПЦ 500-Д0-5,0 %, K_2SO_4 –2,0 %, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ –1,0% (а); ПЦ 500-Д0–3,5 %, K_2SO_4 – 1,5 %, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,6 % (б); ПЦ 500-Д0–2,0 %, K_2SO_4 – 1,0 %, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,2 % (в)

Таблица. 2. Результаты влияния пластификаторов на основе сульфомеламинформальдегида на свойства ангидритовых вяжущих

№ состава	Пластификатор		Расплавы, см	Начало схватывания, мин	Прочность при сжатии, МПа	
	Вид	Количество, %				Вид
43	С-3	0,5	-	180	15,8	17,3
44	С-3	1,5	-	Более 480	5,8	6,3

У состава № 2 повышается прочность при сжатии по сравнению с контрольным образцом (ангидритовое вяжущее без пластификатора с таким же количеством активатора), но не получен пластифицирующий эффект. При увеличении количества пластификатора удается добиться текучести смесей, но затвердевшие образцы теряют прочность при сжатии. У состава № 8 пластифицирующий эффект достигнут и прочности при сжатии составляет 18,3 МПа. Действие данного пластификатора требует дополнительно изучения.

На рисунке 2 показана зависимость предела прочности при сжатии от содержания Melment F15 G. Были проверены составы со следующим содержанием активатора: ПЦ 500-Д0 3,5 %, K_2SO_4 1,5 %, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,6 %.

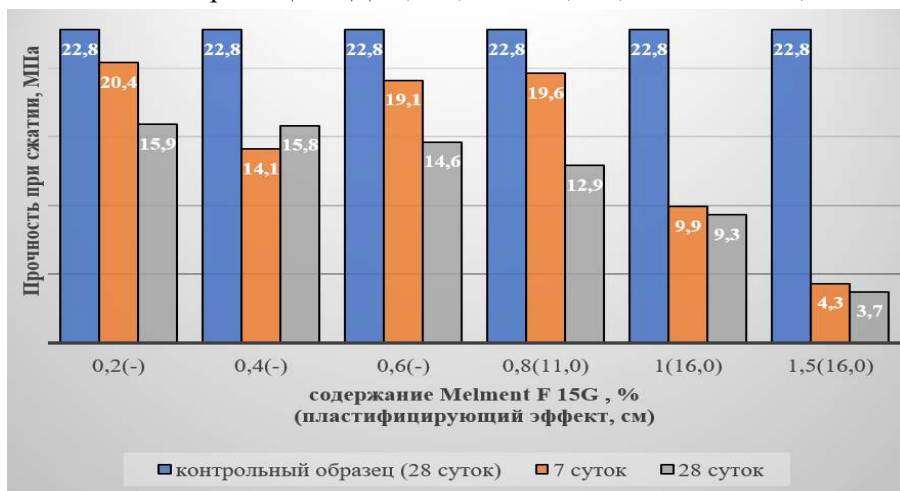


Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания MelmentF15 G, МПа (ПЦ 500-Д0– 3,5 %, K_2SO_4 – 1,5 %, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,6 %)

На диаграмме видно, что прочность по сравнению с контрольным образцом ниже, пластифицирующий эффект достигается при добавлении пластификатора в количестве 0,8-1,5 %, но увеличение дозировки пластификатора приводит к сильному падению прочности.

У составов, содержащих Melflux 2651F и Melflux 5691F, ангидритовое тесто имеет повышенную подвижность, но наблюдается отделение воды, которое приводит к поверхностному пористому слою на затвердевших образцах, и в итоге низкому набору прочности.

При введении суперпластификатора С-3 происходит падение прочности образцов и нет текучести у ангидритовых смесей, это связано с тем, что пластификатор, адсорбируется как на частицах ангидритового вяжущего, так и на частицах ускорителя, что ведет к блокированию активных участков, снижая эффективность действия активатора твердения. Таким образом, с введением пластификатора положительный эффект от введения активатора нейтрализуется.

Также было изучено влияние Melment F10 на технологические свойства ангидритовых вяжущих (рисунок 3).

У составов, содержащих активатор в соотношении- ПЦ 500-Д0 5,0 %, K_2SO_4 2,0 %, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 1,0 % не получен пластифицирующий эффект от увеличения количества пластификатора, но предел прочности при сжатии получается сопоставим с контрольным образцом, у образцов № 31 и № 33 наблюдается повышение прочности. У составов рисунок 3 б) пластифицирующий эффект увеличивается при введении Melment F10 в количестве 1-2 %, предел прочности при сжатии практически у всех образцов превышает контрольный образец. Удастся добиться растекаемости смеси составов с активатором ПЦ 500Д0-2,0%, K_2SO_4 1,0%, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,2 %, при добавлении пластификатора от 0,6-1 %. Но прочность получившихся образцов ниже прочности контрольного образца и составляет 20,8-22,7 МПа. Такие же результаты достигнуты при введении Melment F245 в количестве 0,8 -1,0 %.

Использование суперпластификаторов приводит к улучшению работоспособности ангидритовой смеси и позволяет достичь требуемой подвижности без увеличения водоцементного отношения. Таким образом, выбор суперпластификатора и активатора твердения играет важную роль в получении строительного материала с необходимыми характеристиками. Дальнейшие исследования в этой области могут способствовать разработке новых эффективных добавок для ангидритовых вяжущих.

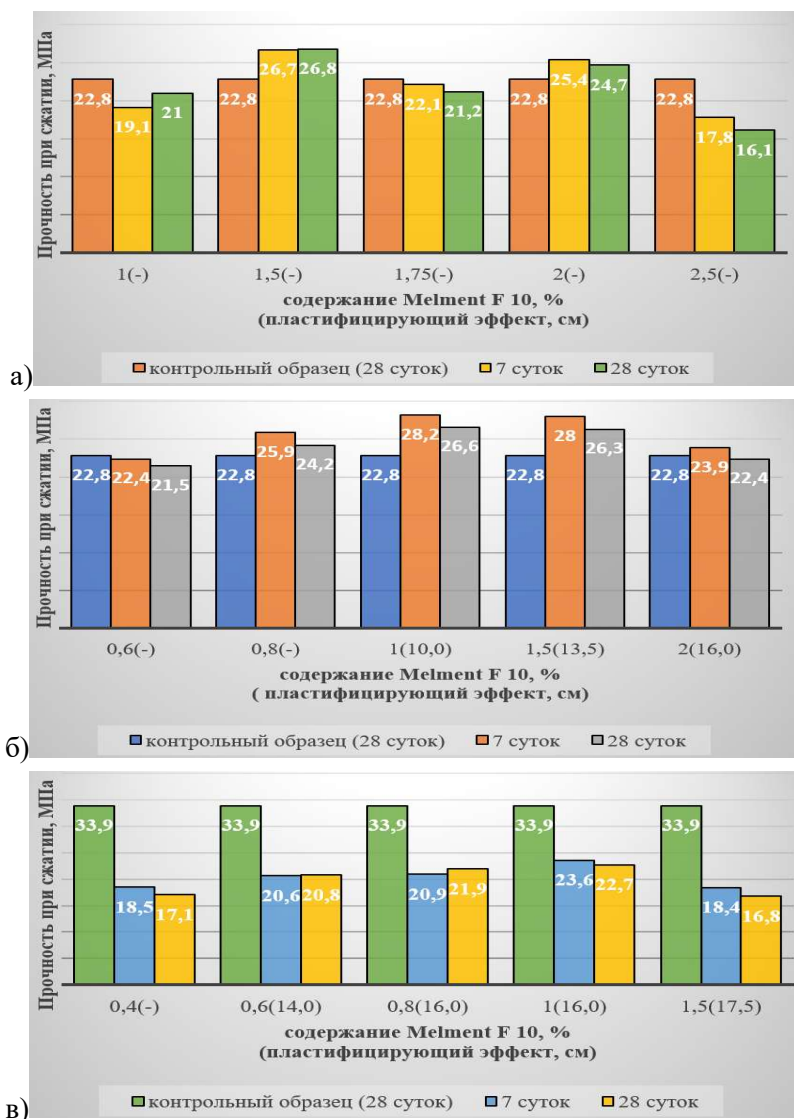


Рис. 3. Зависимость предела прочности от содержания MelmentF 10 МПа: а) ПЦ 500-Д0– 5,0 %, K_2SO_4 – 2,0 %, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 1,0 %; ПЦ 500-Д0–3,5 %, K_2SO_4 – 1,5 %, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,6 % (б); ПЦ 500-Д0– 2,0 %, K_2SO_4 – 1,0 %, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,2 % (в)

Библиографический список

1. Guerra-Cossio M. A. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction / M. A. Guerra-Cossio, J. R. González-Lopez, R. X. Magallanes-Rivera, A. A. Zaldivar-Cadena, M. Z. Figueroa-Torres // 2nd International conference on Bio-based Building materials. – 2017. – P. 1–5.
2. Каклюгин А. В. Прессованные композиты на основе модифицированного гипсового вяжущего повышенной воздухоустойчивости / А. В. Каклюгин, Л. И. Касторных, Н. С. Ступень, В. В. Коваленко // Строительные материалы. – 2020. – № 12. – С. 40–46. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-40-46>.
3. Мещеряков Ю. Г. Влияние условий дегидратации гипса и фосфогипса на структуру и технические свойства вяжущего / Ю. Г. Мещеряков, С. В. Фёдоров, В. П. Сучков // Строительные материалы. – 2020. – № 7. – С. 23–27.
4. Petropavlovskaya V. Gypsum Composition with a Complex Based on Industrial Waste / V. Petropavlovskaya, M. Sulman, T. Novichenkova, M. Zavadko, K. Petropavlovskii // Chemical Engineering Transactions. – 2021. – Vol. 88. – P. 1009–1014.
5. Токарев Ю. В. Оценка эффективности применения водной дисперсии углеродных частиц в ангидритовом вяжущем / Ю. В. Токарев, М. А. Волков, А. В. Агеев, Н. В. Кузьмина, В. П. Грахов, Г. И. Яковлев, Д. Р. Хазеев // Строительные материалы. – 2020. – № 1–2. – С. 24–35. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-24-35>.
6. Клименко В. Г. Роль двойных солей на основе сульфатов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ в технологии получения ангидритовых вяжущих / В. Г. Клименко // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 12. – С. 119–125.
7. Токарев Ю. В. Ангидритовые композиции, модифицированные ультрадисперсной добавкой на основе MgO / Ю. В. Токарев, Г. И. Яковлев, А. Ф. Бурьянов // Строительные материалы. – 2012. – № 7. – С. 17–19.
8. Клименко В. Г. Кислотно-основные взаимодействия в гипсостекольных системах / В. Г. Клименко, В. И. Павленко, С. К. Гасанов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2015. – № 5. – С. 77–81.
9. Бурьянов А. Ф. Возможность разработки модели твердения ангидритового вяжущего / А. Ф. Бурьянов, Н. А. Гальцева, Е. Н. Булдыжова, К. С. Петропавловский // Молодые учёные России : сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. – 2020. – С. 28–30.
10. Бурьянов А. Ф. Изучение влияния температуры обжига на природный гипсовый камень / А. Ф. Бурьянов, Х. Б. Фишер, Ю. А. Соколова, Н. А. Гальцева, Е. Н. Булдыжова // Строительное материаловедение: настоящее и будущее : сборник научных трудов II Всероссийской конференции. – 2021. – С. 9–11.

УДК 691

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУКТУРОБРАЗОВАНИИ СТРОИТЕЛЬНОГО ГИПСА И СПОСОБАХ ЕГО УЛУЧШЕНИЯ

Сергеева С.Б.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Российская Федерация располагает значительными запасами гипсового камня, а высокий уровень научных исследований российских ученых в области гипсовых вяжущих признан во всем мире. Несмотря на это производство и применение гипсовых вяжущих и материалов на их основе в настоящий момент развиваются недостаточно высокими темпами. В промышленных масштабах выпускаются преимущественно низкомарочный строительный гипс, в небольших количествах для специальных целей - высокопрочный гипс и гипсоцементнопуццолоновые вяжущие. На отечественном рынке строительных материалов преобладает продукция зарубежных производителей, имеющая высокую стоимость и недоступная для широкого круга потребителей.

В связи с этим актуальной является задача создания конкурентоспособных композиционных материалов на основе низкомарочного строительного гипса путем проектирования рациональных составов композиций с комплексом отечественных природных и техногенных химических добавок, а также совершенствования технологии их получения [1].

Наибольшей известностью в настоящее время пользуются три основные теории гидратации и твердения гипсовых вяжущих веществ.

Согласно кристаллизационной теории Ле-Шателье процесс гидратации обусловлен растворением полуводного гипса с образованием метастабильного насыщенного раствора, его гидратацией в растворенном состоянии с образованием двуводного гипса.

Поскольку вещества, участвующие в реакции, обладают разной растворимостью (растворимость полугидрата в воде в пересчете на CaSO_4 составляет 8 г/л, а двугидрата 2 г/л), то раствор, насыщенный по отношению к полугидрату, будет пересыщенным по отношению к двугидрату, поэтому в жидкой фазе возникают условия для образования зародышей кристаллов двугидрата и выпадения их из раствора. Это вызывает уменьшение концентрации полугидрата в жидкой фазе, создавая возможность для растворения новых порций этого вещества и образования пересыщенного раствора двуводного сульфата кальция. Кристаллы двугидрата растут, переплетаются, срастаются, обуславливая схватывание и твердение смеси.

В основе теории Ле-Шателье лежит положение о том, что химическая реакция гидратации вяжущего вещества протекает в жидкой фазе (растворе) после растворения исходного продукта. С окончанием химического процесса гидратации заканчивается и физический процесс кристаллизации. К этому же времени достигается и максимальная прочность системы во влажном состоянии. В дальнейшем прочность затвердевшего гипса по мере высыхания значительно возрастает, что объясняется уже не дальнейшими процессами гидратации, а удалением воды. Из водного раствора при этом выделяется двугидрат, способствующий упрочнению контактов между кристаллическими сростками. При полном высыхании рост прочности прекращается.

По Михаэлису коллоидная масса из мельчайших частиц двугидрата, образующаяся в результате проникновения молекул воды в поверхностный слой частиц полуводного гипса, постепенно кристаллизуется. Прочность в дальнейшем растет за счет самоуплотнения системы вследствие перераспределения влаги от периферийных слоев к центру зерна вяжущего.

По теории Байкова процесс твердения вяжущих делится на три периода:

I – смачивание и частичное растворение исходного вещества с образованием насыщенного раствора;

II – взаимодействие полугидрата с молекулами воды с их прямым присоединением к твердому веществу и образованием коллоидной массы высокодисперсных частичек двугидрата в виде геля;

III – кристаллизация.

Коллоидный раствор (гель) очень неустойчив и уже через короткий промежуток времени, измеряемый минутами, кристаллизуется. Вследствие образования более крупных кристаллов устойчивость системы нарушается, раствор, насыщенный по отношению к мелким кристаллам, пересыщен по отношению к крупным. В результате крупные кристаллы растут и снижают концентрацию вещества в растворе. Это нарушает равновесие раствора с мелкими кристалликами, которые растворяются, стремясь повысить концентрацию до насыщения. Процесс продолжается до полного исчезновения мелких кристаллов. Рост прочности гипсового камня происходит в течение некоторого периода и объясняется перекристаллизацией тонкодисперсных частичек двугидрата в более крупные кристаллы.

В дальнейшем теории твердения получили свое развитие в работах П.П. Будникова, А.В. Волженского, И.П. Выродова, А.Ф. Полака, В.Б. Ратинова, П.А. Ребиндера, Е.Е. Сегаловой и др.

В настоящее время отсутствует единое мнение о механизме гидратационного твердения гипсовых вяжущих. Большинство ученых придерживаются и развивают кристаллизационную теорию твердения.

Некоторые считают, что гидратация вяжущих веществ происходит топохимическим путем.

Исследователей привлекает гипотеза, по которой взаимодействие различных вяжущих с водой в реальных условиях протекает по смешанной схеме, т.е. одновременно, по Ле-Шателье, с растворением частиц вещества в воде, последующей гидратацией и переходом в кристаллический двугидрат, и топохимически, по Байкову, с прямым присоединением воды к твердой фазе. В настоящее время наибольшее внимание уделяется изучению элементарных актов гидратации и структурообразования гипсовых вяжущих веществ.

При гидратационном твердении процессы, протекающие в системе „вяжущее – вода” подразделяются на три группы:

- растворение и взаимодействие воды с исходным твердым веществом;
- образование зародышей новых гидратных соединений;
- конденсация и образование кристаллической структуры.

Растворение представляет собой сложный процесс. По мнению исследователей кристаллизационной схемы гидратационного твердения, при соприкосновении твердой фазы (полугидрата) с водой происходит адсорбция молекул воды. Последние, имея сильнополярную структуру, взаимодействуют с ионами кристаллической решетки полугидрата по ионно-дипольной схеме. В результате чего кристаллическая решетка исходного вещества разрушается, ионы твердой фазы за счет диффузии переходят в раствор, концентрация его постепенно повышается и достигает насыщения.

При гидратации по твердофазной схеме, когда нет условий для полного растворения полугидрата, активные центры, которые образуются при обжиге гипса в результате протонной перегруппировки ОН-групп, согласно новой концепции дегидратации гипса, и имеют высокую реакционную способность, не могут существовать долгое время в окружении молекул воды, и они немедленно хемосорбируют ее.

В ходе гидратации образуются также вторичные активные центры. Именно они являются определяющими при образовании конденсационных контактов, в которых имеет место непосредственное взаимодействие твердых поверхностей.

Химическое взаимодействие молекул воды с твердой фазой (переход полугидрата в двугидрат) в первом случае происходит в растворе, а во втором – топохимически.

Возникновение зародышей по кристаллизационной схеме из пересыщенного раствора обусловлено столкновением, ориентацией и срастанием одно- и двухмерных частиц двугидрата, образующихся в пересыщенном растворе.

В случае смешанного механизма гидратационного твердения, когда продукты реакции полугидрата с водой уже не могут растворяться, они образуют гель, представляющий собой метастабильную систему, которая постепенно превращается в конденсационно-кристаллизационную структуру. Необходимым условием срастания первичных кристаллов является их сближение до расстояний молекулярного порядка, что возможно только при отсутствии энергетического барьера между частицами. Учитывая, что образование первичных кристаллов двуводного гипса коллоидных размеров, т.е. коллоидация, сопровождается увеличением объема твердой фазы, что в свою очередь приводит к возникновению в твердеющей системе „гипс-вода” стесненного состояния, преодоление энергетического барьера при кристаллизации происходит самопроизвольно.

Надо отметить, что все перечисленные периоды не идут в строгой последовательности и накладываются друг на друга. На поверхности полугидрата возможно образование коллоидной массы еще до полного насыщения раствора, а кристаллизация начинается еще до окончания процессов растворения и коллоидации. Процесс твердения будет протекать более благоприятно, если срастание первичных кристаллов происходит в начале процесса твердения, когда концентрация раствора высока [1].

Развитие структуры твердения, по мнению П.А. Ребиндера и его сотрудников, протекает в два этапа:

- формирование каркаса кристаллизационной структуры с возникновением контактов срастания между кристалликами новообразований;
- рост составляющих этот каркас кристалликов двугидрата. При этом происходит как рост прочности структуры, так и ее уменьшение за счет появления внутренних растягивающих напряжений, возникающих в результате направленного роста кристаллов.

Конечная прочность структуры твердения в значительной степени определяется величиной и кинетикой пресыщения в жидкой фазе твердеющей суспензии, что зависит от растворимости исходного вяжущего и суммарной скорости его растворения. Высокое пересыщение и большая суммарная скорость растворения благоприятствуют увеличению

числа возникающих зародышей кристаллов и контактов между ними, что способствует уменьшению внутренних напряжений и увеличению прочности структуры. Для достижения наибольшей прочности структуры необходимо создать оптимальные условия гидратации, обеспечивающие возникновение кристалликов новообразований достаточной величины при минимальных напряжениях, сопровождающих формирование и развитие кристаллизационной структуры.

Вопросом улучшения качества полуводного строительного гипса занимается Х. Ветегрове, дипломированный инженер, руководитель отдела гипсовых технологий компании Claudius Peters Projects GmbH (Германия)

Им и его командой разработан технологический способ улучшения исходных свойств строительного гипса.

Развивая концепцию искусственного старения (изменение характеристик гипса при продолжительном хранении или перевалке – называется естественным старением) компания Claudius Peters разработала технологию, позволяющую улучшить следующие параметры при производстве гипса:

- гомогенизацию качества продукта;
- стабилизацию продукта;
- снижение водопотребления;
- снижение стоимости производства;
- увеличение прочности продукта.

Ключевым компонентом в этом процессе является гомогенизатор Claudius Peters. Гомогенизатор поставляется в стандартной модификации (без давления) и в специальной модификации с повышенным давлением работы. Технология SmartGyp Process, в которую гомогенизатор включен в систему кальцинации на основе мельницы Claudius Peters. Свежекальцинированный гипс поступает в непрерывном режиме из фильтра кальцинации при температуре кальцинации и вводится в гомогенизатор. С той же производительностью обработанный гипс выгружается из гомогенизатора, в данном случае к последующему процессу охлаждения. Уровень гипса в гомогенизаторе обеспечивает обработку гипса в течение определенного времени. Вода может подаваться в гомогенизатор в виде влаги с газами технологического процесса из установки кальцинации, а также в виде пара и/или при непосредственном распылении непосредственно в гомогенизаторе.

В стандартном гомогенизаторе введенные газы обеспыливаются фильтром технологического процесса, для находящегося под давлением гомогенизатора клапан управления давлением будет контролировать требуемое давление и отводить избыточное количество газа в фильтр.

Гомогенизатор представляет собой вертикальный реактор, днище которого оснащается тканью, способствующей равномерному распределению газа псевдооживления. Благодаря псевдооживленному состоянию гипс может легко перемещаться в реакторе и интенсивно контактировать с привнесенной влагой. Кроме того, центральная вертикальная труба реактора получает дополнительное количество воздуха, что позволяет транспортировать гипс от днища к верхней секции гомогенизатора, интенсифицируя смешивание и гомогенизацию продукта.

Как было описано выше, давление может значительно влиять на характеристики продукта. При использовании гомогенизатора под давлением в технологии SmartGyp Process максимально улучшается продукт на основе непрерывного процесса с управляемыми условиями старения: – уровень материала в гомогенизаторе под давлением определяет время обработки; – клапан управления давлением регулирует давление; – регулировка смеси пара, газа технологического процесса и воды позволяет контролировать температуру процесса, а также количество и параметры влаги. Включение технологии SmartGyp Process в систему кальцинации, возможно для большинства систем кальцинации, как для новых установок, так и для улучшения существующих [2].

Библиографический список

1. Ферронская А. В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) : справочник / А. В. Ферронская. – Москва : Изд-во АСВ, 2004. – 488 с.
2. Ветегрове Х. Гомогенизатор Claudius Peters – гипсовая технология для снижения затрат и повышения качества / Х. Ветегрове // Строительные материалы. – 2010. – № 7. – С. 2–4.

УДК 691

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЕТОНА МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Федосов С.В.¹, Пуляев И.С.², Митягина А.Н.²

¹НИИ МГСУ, г. Москва, Россия

²Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

Строительство крупных инженерных сооружений часто связано с использованием больших объемов бетона, что оказывает значительное воздействие на окружающую среду. Массивные конструкции, такие как плотины, мосты, фундаменты высотных зданий и промышленные объ-

екты, характеризуются высоким содержанием цементосодержащих материалов, значительным тепловыделением при гидратации цемента и длительным периодом застывания. Эти факторы создают ряд проблем, связанных с негативным влиянием на экосистемы и ресурсы планеты. Актуальность проблемы экологии и устойчивости строительных материалов, особенно бетона, обусловлена рядом факторов, влияющих на окружающую среду и здоровье населения. Метод исследования основан на анализе существующей научной литературы по вопросу исследования. На основе проведенного анализа существующих научных исследований представлены примеры снижения влияния бетона на окружающую среду. Использование бетона в массивных конструкциях приносит не только пользу обществу в виде прочных и надежных строений, но и несет серьезную угрозу окружающей среде. Углекислые выбросы, повышенное тепловое излучение, уничтожение плодородных земель и нарушение водного баланса являются следствием широкого распространения бетона. Решение указанных проблем возможно путем комплексного подхода, включающего использование экологических ингредиентов, снижение энергоемкости производства и продвижение концепции «экологического бетона».

Бетон является одним из наиболее распространенных строительных материалов, используемых в возведении массивных конструкций. Его широкое применение обусловлено высокой прочностью, долговечностью и доступностью исходных компонентов. Однако производство и эксплуатация бетона оказывают значительное воздействие на окружающую среду, вызывая загрязнение воздуха, воды и почвы, а также способствуя увеличению объемов отходов строительства и сноса. Экологические проблемы, связанные с производством и применением бетона, становятся всё более значимыми в условиях роста населения планеты и увеличения спроса на строительные материалы.

Анализ влияния массивных бетонных конструкций на экологию показал, что на сегодняшний день недостаточно проработан вопрос снижения последствий воздействия бетона на экологию.

Воздействие бетона, его производства и применения на окружающую среду носит многогранный характер и отчасти объясняется прямыми последствиями деятельности в сфере строительства и инфраструктурного обустройства, а также эмиссиями углекислого газа. Около 4–8% общемировых выбросов CO₂ генерирует именно производство бетона [1]. Значительное число факторов находится в зависимости от конкретных условий реализации проекта. Основой бетона выступает цемент, сам по

себе оказывающий заметное влияние на экологию и социальную сферу, играя ключевую роль в формировании общего экологического эффекта бетона. В сравнении с иными стройматериалами, такими как алюминий, сталь и кирпичи, бетон выделяется среди них как один из наименее энергоемких вариантов [2].

Цемент служит ключевым элементом бетонных растворов. Наиболее важные негативные последствия для окружающей среды при производстве цемента связаны с двумя основными факторами:

- Выделение пыли, поступающей из дымоходов и быстровоспламеняющихся компонентов.

- Газообразные выбросы в атмосферу, включающие двуокись азота (NO_2), двуокись серы (SO_2), углекислый газ (CO_2) и другие соединения.

Аналитический анализ проведенных исследований показал, что главными источниками образования цементной пыли выступают фабрики по подготовке сырья, обжиговые печи, охлаждающие установки для клинкера и размольные агрегаты. Формирование мелкодисперсной пыли возникает при прохождении горячих выхлопных газов и воздушных потоков сквозь мелкоизмельченный материал. Процесс выделения пыли усиливается при хранении, перевозке и операциях загрузки-разгрузки.

Исследованы различные направления научных исследований и практических мероприятий, направленные на снижение негативного воздействия бетона на природу и обеспечение безопасной эксплуатации массивных конструкций.

Установлено, что цементная пыль отрицательно воздействует на здоровье человека, животных и представителей растительного мира. Наибольший ущерб наносится растениям: пылевые частицы закупоривают устьица листьев, через которые осуществляется транспирация воды и обмен газом с внешней средой. Это ухудшает общее состояние растений, замедляя темпы их роста и развития [3].

В настоящей статье определены основные факторы влияния бетона на окружающую среду, а также проработаны разные стратегии и методы, позволяющие минимизировать неблагоприятное воздействие бетона на окружающую среду.

При анализе существующей научной литературы чаще всего используется метод критического анализа источников (или литературный обзор, англ. literature review). Его суть заключается в систематическом изучении и оценке научных публикаций по конкретной тематике с целью выявления основных идей, концепций, результатов исследований, а также определения пробелов и противоречий между ними.

Метод включает следующие этапы: сбор материалов; классификация и систематизация; анализ содержания; критическая оценка.

Таким образом, литературный обзор представляет собой важную часть многих научных проектов, позволяющую обеспечить фундамент теоретической базы перед проведением собственных исследований.

Бетон – это искусственно созданный камневидный материал, состоящий из трех основных компонентов: цемента, крупного и мелкого заполнителя, а также воды. Дополнительно применяются химические добавки, которые придают бетону специфические свойства (водонепроницаемость, устойчивость к морозу и кислотам). Именно выбор компонентов определяет многие экологические аспекты бетона.

Компоненты бетона:

Цемент – основной ингредиент, определяющий прочность и стойкость бетона. Производится путем высокотемпературной обработки известняка и глинистых минералов.

Заполнитель – крупный и мелкий наполнитель (щебень, гравий, песок), придающий плотность и устойчивость бетона.

Химические добавки – пластификаторы, ускорители, антизамерзатели и другие ингредиенты, регулирующие процессы твердения и прочность бетона.

Производство цемента является крупнейшим источником выбросов CO_2 , вызванных термохимическими реакциями при обработке известняка. Одна тонна произведенного цемента выделяет порядка 700 кг углекислого газа. Основная доля CO_2 - эмиссии связана с термообработкой известняка, при которой высвобождается карбонат кальция, преобразующийся в оксид кальция (известь) и углекислый газ [4].

Еще одной проблемой является высокое энергопотребление. Большая часть энергии тратится на нагрев сырья до температуры свыше 1400 градусов. Источником энергии чаще всего служат уголь, нефть и природный газ, что усугубляет проблему выбросов парниковых газов.

Большое количество используемого бетона означает высокие издержки природных ресурсов и значительную долю выбросов в атмосферу. Основной ресурсоемкостью отличается добыча заполнителей (песка, щебня, гравия), которая влечет нарушение естественного рельефа и разрушение естественных ландшафтов.

Энергетическая составляющая тоже играет важную роль. Высокие температуры производства цемента и сушка компонентов приводят к значительным потерям тепла и электроэнергии. Поэтому основное

направление экологизации бетонного производства – экономия энергии и переход на возобновляемые источники.

Огромные объемы бетона, используемые в городах, оказывают существенное влияние на формирование городского климата. Они аккумулируют тепло днем и медленно отдают ночью, создавая так называемый «тепловой остров». Этот феномен усиливает дискомфорт жителей городов летом и зимой, увеличивая расходы на кондиционирование помещений и отопление.

Массовое использование бетона в городских застройках нарушает естественный баланс солнечной радиации и осадков, препятствуя естественной циркуляции воздуха и поддерживая высокую температуру в течение длительного периода суток.

Одним из важнейших экологических рисков массивных бетонных конструкций является проблема уплотненного слоя земли вокруг фундамента и под ним. Гидроизоляция бетонных покрытий препятствует нормальной инфильтрации дождевых и талковых вод, приводя к накоплению поверхностных вод и образованию луж. Такой застой приводит к заболачиванию участков и развитию патогенной микрофлоры.

Инъекция жидкого углекислого газа в бетонную смесь была успешно внедрена в промышленных условиях, и в настоящее время данная методика используется свыше чем на пятидесяти заводах по производству бетона и железобетонных изделий в Соединенных Штатах Америки и Канаде. Этот метод помогает предприятиям выпускать более экологичный («зеленый») бетон и одновременно повышает их экономическую эффективность. Введение CO_2 в свежий раствор провоцирует химическое взаимодействие с водной составляющей смеси, результатом которого является образование нанокристаллов кальцитового карбоната, выполняющих функцию ядер кристаллизации для гидратов цемента, способствуя ускорению процесса затвердевания раствора. Подробная схема протекания химической реакции и конечные продукты представлены на рисунке 1.

Быстрое формирование данных наночастиц CaCO_3 изменяет кинетику твердения бетона и повышает его раннюю прочность, что в свою очередь позволяет снизить содержание цемента в рецептуре при сохранении требуемых физико-механических характеристик. На рис. 2 показан эффект нарастания прочности во все сроки твердения от введения малых доз CO_2 в свежую бетонную смесь.

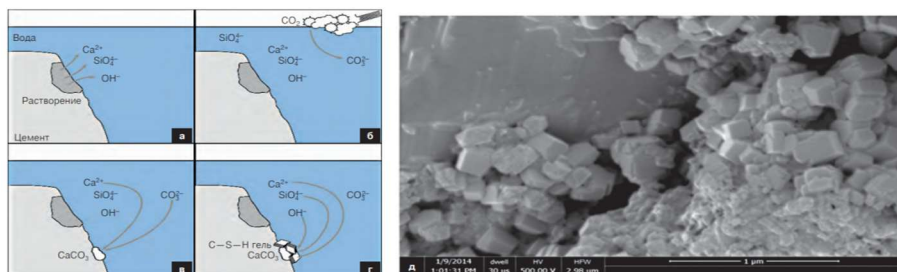


Рис.1. Стадии твердения цемента в присутствии карбонат-ионов (а–г) и осаденный продукт – кристаллы CaCO_3 (д) [5, 6]

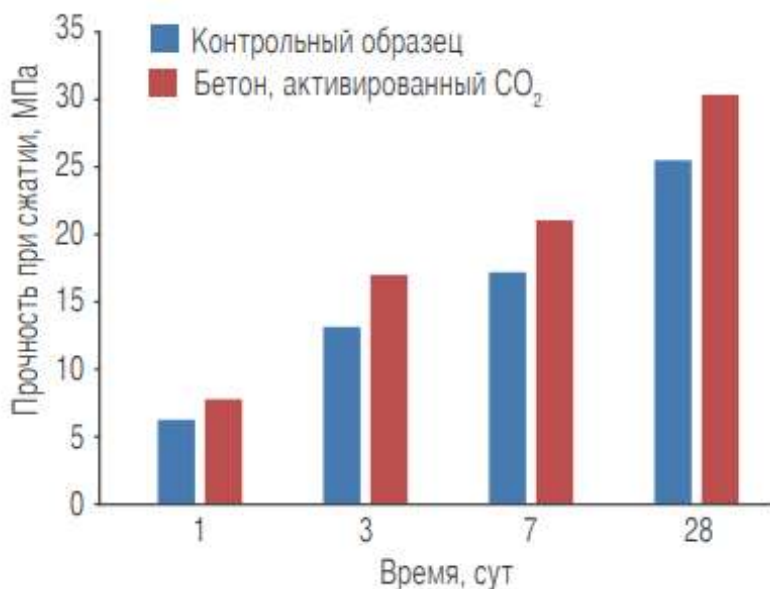


Рис. 2. Прочность при сжатии образцов бетона, изготовленного с введением CO_2 , и контрольного образца [6]

Практика заводов, изготавливающих обычный бетон, подтвердила, что включение углекислого газа в состав бетонной смеси даёт возможность снизить количество используемого портландцемента и прочих связующих компонентов примерно на пять процентов. Это означает, что введение CO_2 уменьшает эмиссию парниковых газов не только благодаря своему включению непосредственно в структуру бетона, но и дополнительно за счёт уменьшения расхода топлива, необходимого для производства нужного объёма цемента. Причём экономия ресурсов, возникающая вследствие снижения энергозатрат на изготовление цемента,

оказывает гораздо большее положительное влияние на окружающую среду, нежели прямое использование углекислого газа в составе бетонной продукции.

Хотя бетон считается достаточно долговечным материалом, рано или поздно наступает период, когда здание подлежит реконструкции или сносу. Обычно демонтаж старых построек приводит к появлению огромного объема бетонных обломков, большая часть которых отправляется на свалки, перегружая мусорные полигоны.

Вторичная переработка бетона ограничена сложностью разделения компонентов и трудностями извлечения чистого цемента. Часто старые блоки превращаются в мелкие камни и щебенку, применяемые лишь в дорожном строительстве, но полноценная переработка практически невозможна ввиду сложности удаления арматуры и других посторонних элементов.

Одним из перспективных направлений в снижении экологического следа бетона является введение биологически активных добавок, создающих самовосстанавливающиеся структуры. Такие добавки представляют собой микроорганизмы, способные формировать карбонизированные отложения при повреждении бетонной конструкции. Благодаря этому бетон способен самостоятельно устранять микротрещины, что увеличивает его долговечность и уменьшает потребность в ремонте [7].

Также изучаются возможности создания самоуплотняющегося бетона, использующего меньше воды и исключаящего необходимость вибрации при заливке. Самостоятельное уплотнение помогает избегать пустот и слабых мест, что положительно сказывается на безопасности.

Исследователи предлагают варианты замены части цемента в составе бетона различными золами и шлаками, остающимися после сгорания угля и производства стали соответственно. Это позволило бы сократить выбросы CO_2 и повысить устойчивость готового продукта. В ряде случаев замена обычного цемента этими материалами способна улучшить механико-физические свойства бетона, сделать его дешевле и экологичнее.

Другой вариант – создание "зеленых" цементов, изготавливаемых с минимальным количеством тепловых реакций и низким содержанием карбонатов. Уже разработаны проекты, предусматривающие замену стандартного портландцемента на глиноземистый цемент или использование негашеной извести, которая нейтрализует щелочную реакцию при взаимодействии с водой.

Современные тенденции градостроительства направлены на активное озеленение урбанизированных пространств. Один из популярных приемов – интеграция зеленых крыш и вертикальное озеленение фасадов зданий. Так,

размещение зеленой кровли поверх бетонных конструкций способно поглощать часть солнечного излучения, улучшать микроклимат и способствовать осаждению дождевых вод, очищая городской воздух.

Другими способами интеграции зелени в городскую инфраструктуру являются зеленые тротуары и дороги, пропускающие влагу внутрь слоев дорожного полотна. Подобная конструкция имитирует природные механизмы отвода и распределения влаги, помогая предотвратить образование грязевых и снежных масс на улицах мегаполисов [5].

Стоимость экологических мероприятий, применяемых при производстве и эксплуатации бетона, различается в зависимости от региона и масштаба строительства. Более строгие нормы контроля выбросов и обязательные инвестиции в современные технологии защиты окружающей среды вынуждают производителей повышать цены на продукцию. Хотя подобные вложения экономически оправданы в долгосрочной перспективе, некоторые компании предпочитают обходить жесткие ограничения, используя устаревшие и неэффективные технологии.

Государство должно поддерживать развитие предприятий, предлагающих экологичные решения, предлагая налоговые льготы и субсидии для тех компаний, которые внедряют новейшие технологии производства бетона.

Закключение. Таким образом, использование бетона в массивных конструкциях приносит не только пользу обществу в виде прочных и надежных строений, но и несет серьезную угрозу окружающей среде. Углекислые выбросы, повышенное тепловое излучение, уничтожение плодородных земель и нарушение водного баланса являются следствием широкого распространения бетона.

Решение указанных проблем возможно путем комплексного подхода, включающего использование экологичных ингредиентов, снижение энергоемкости производства и продвижение концепции «экологического бетона». Осознанный подход к материалам и технологиям позволит создать будущее, в котором строительство гармонично сосуществует с природой, минимизирует антропогенное давление и сохраняет чистоту окружающего мира.

Библиографический список

1. The Guardian. Бетон: самый разрушительный материал на Земле [Электронный ресурс]. – 25.02.2019. (дата обращения: 13.07.2022).
2. Kropp J. Бетон / J. Kropp // Энциклопедия промышленной химии Ульмана. – VCH, 2012. – DOI: 10.1002/14356007.107_101.

3. Крамар, Л. Я. Быстротвердеющий, высокопрочный и морозостойкий бетон на основе шлакопортландцемента / Л. Я. Крамар, И. М. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 48-53. – DOI 10.14529/build210106. – EDN VDLMCV.

4. Залятдинов А. А. Исследование влияния CO₂ на формирование наноразмерной структуры и физикомеханические свойства бетона / А. А. Залятдинов, Р. У. Каменов, Д. С. Реченко // Нанотехнологии в строительстве. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 249–256. – DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-3-249-256. – EDN: DZJPZF.

5. Monkman S. Ready mixed concrete production using waste CO₂ (prerelease) / S. Monkman // 1st International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering (NHICE-01), Victoria, BC, Canada, April 25–27, 2018.

6. Kline J. Carbonate bonding – safe and effective CO₂ sequestration / J. Kline, C. Kline // International Cement Review. – January 2016. – P. 43–45.

7. Эванс Л. Экологический рейтинг цемента / Л. Эванс, М. Муттер // Цемент и его применение. – 2019. – № 4. – С. 24–27.

8. Невилль А. М. Свойства бетона / А. М. Невилль. – Москва : Стройиздат, 1972. – С. 269–271.

СЕКЦИЯ «ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ОБСЛЕДОВАНИЕ И УСИЛЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ»

УДК 624.075

КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ЖИВУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЗДАНИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Андреева Е.Д., Прохорова А.В.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Регулярно отмечается рост аварий, связанных с террористическими актами, взрывами бытового газа или просто из-за удаления опор при наезде автотранспорта, которые не были предусмотрены на стадии проектирования. Подобные аварийные воздействия могут привести к обрушению отдельных конструкций или всего здания. В связи с этим возникает необходимость в разработке методик и алгоритмов расчета несущих систем на живучесть для обеспечения защиты зданий от прогрессирующего обрушения.

Разработка теории живучести сооружений связана с накоплением соответствующих статистических данных об особенностях аварийных воздействий на сооружения, с анализом данных результатов обследования эксплуатируемых сооружений, а главное - с постановкой специальных экспериментальных исследований.

За последние двадцать лет был реализован ряд экспериментальных исследований для изучения механизмов сопротивления разрушению железобетонных конструкций, подверженных прогрессирующему разрушению при сценариях удаления колонны. Учеными были изучены различные типы конструкций, таких как балочно-колонные и балочно-плитные подконструкции, плоские каркасные конструкции и крупномасштабные здания.

Yu J. и Tan K.H. [1, 2] провели экспериментальное исследование на двухпролетных железобетонных балках при сценарии удаления средней колонны. Экспериментальные работы проводились на различных сериях балок, с различными параметрами армирования и размерами сечения балки, без и с преднапряжением. Авторы пришли к ряду выводов: арочный эффект, возникающий из-за горизонтального ограничения, может повысить изгибную способность балок. Чем больше отношения ширины к высоте и меньше процент армирования, тем больше проявляется ароч-

ный эффект; процент армирования существенно влияет на несущую способность подконструкции, особенно в стадии работы как висячей системы; преднапряжение усиливает арочный эффект в подконструкции.

Jian H. [3] и его коллегами были проведены испытания совместной работы ригеля и плит при выключении крайней колонны. Авторы пришли к выводу, что плиты перекрытия играют важную роль в сопротивлении против прогрессирующего обрушения железобетонных конструкций и перераспределения силовых потоков; картина трещинообразования существенно изменилась. Плиты значительно улучшили несущую способность и начальную жесткость образцов.

Li S. [4] исследовали влияние ненесущих стен в качестве заполнителя на прогрессирующее разрушение железобетонных конструкций. Эксперименты проводились на четырехпролетном двухэтажном железобетонном каркасе в уменьшенном масштабе с заполненными стенами, по сценарию удаления средней колонны. Выводы, сделанные авторами исследования: железобетонная рама с заполнением имеет более высокое сопротивление прогрессирующему разрушению по сравнению с рамой без стен. Однако пластичность ригелей в раме с заполнением была меньше по сравнению с рамой без стен.

Гениев Г.А. и Колчунов В.И. в работах [5, 6] описывают ряд закономерностей деформирования, трещинообразования и разрушения для фрагментов конструктивных систем при предельных состояниях. Авторами экспериментально установлено, что внезапное выключение одного из несущих элементов из конструктивной системы вызывает не только перераспределение силовых потоков, но и динамическое догружение её элементов. Образование трещин в железобетонных конструкциях существенно усиливает эффект динамических догрузений. В зависимости от топологии конструктивной системы, места расположения выключаемого элемента и других факторов разрушение конструкции может носить локальный или прогрессирующий характер [5, 6].

В работе Савина С.Ю., Федоровой Н.В., Емельянова С.Г. рассмотрен вариант потери устойчивости одного из несущих элементов сборно-монолитного многоэтажного здания из панельно-рамных железобетонных конструкций [7]. Было проведено исследование, связанное с накоплением коррозионных повреждений в несущих конструкциях и в отдельных связях и закреплениях конструкций. Авторы описывают алгоритм и выполняют численный анализ устойчивости фрагмента каркаса многоэтажного здания из панельно-рамных элементов при потере устойчивости одной из колонн

здания, вызванной выключением из работы закладных деталей [7]. Рассмотренная методика рекомендуется для проверки сопротивляемости конструктивных систем прогрессирующему обрушению.

Экспериментальные исследования параметров живучести реальных или масштабированных подконструкций зданий и сооружений при медленном или внезапном выключении из работы одного из несущих элементов, выполненные зарубежными и отечественными учеными позволили выяснить ряд принципиальных особенностей деформирования и разрушения железобетонных конструктивных систем при особых воздействиях.

Проведенный анализ даёт понять, что необходимо расширение экспериментальных и теоретических исследований по обеспечению требуемого уровня живучести несущих систем с учетом особых воздействий.

Библиографический список

1. Yu J. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages / J. Yu, K. H. Tan // *Engineering Structures*. – 2013. – Vol. 55. – P. 90–106.
2. Yu J. Special Detailing Techniques to Improve Structural Resistance against Progressive Collapse / J. Yu, K. H. Tan // *Journal of Structural Engineering*. – 2014. – Vol. 140, no. 3. – Art. 04013077.
3. Jian H. Testing and Analysis on Progressive Collapse-Resistance Behavior of RC Frame Substructures under a Side Column Removal Scenario / H. Jian, S. Li, L. Huanhuan // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. – 2016. – Vol. 30, no. 5. – Art. 04016022.
4. Li S. Experimental and numerical study on progressive collapse process of RC frames with full-height infill walls / S. Li, S. Shan, C. Zhai, L. Xie // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol. 59. – P. 57–68.
5. Гениев Г. А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях / Г. А. Гениев, В. И. Колчунов, Н. В. Ключева, А. И. Никулин, К. П. Пятикрестовский. – Москва : АСВ, 2004. – 215 с.
6. Колчунов В. И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В. И. Колчунов, Н. В. Ключева, Н. Б. Андросова, А. С. Бухтиярова. – Москва : АСВ, 2014. – 208 с.
7. Саввин С. Ю. Анализ живучести сборно-монолитных каркасов многоэтажных зданий из железобетонных панельно-рамных элементов при аварийных воздействиях, вызванных потерей устойчивости одной из колонн / С. Ю. Саввин, Н. В. Федорова, С. Г. Емельянов // *Жилищное строительство*. – 2018. – № 12. – С. 3–7.

УДК 624.04

**ХАРАКТЕРНЫЕ ДЕФЕКТЫ И ПОВРЕЖДЕНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ СУХОГО И ЖАРКОГО КЛИМАТА
(ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕСПУБЛИКЕ УЗБЕКИСТАН)**

Ахмаджанов М.З.

ТГТУ, г. Ташкент, Узбекистан

Сначала проанализируем вопрос о терминологии, используемой при обследовании и оценке состояния мостовых сооружений. При этом заметим, что довольно длительное время мостовики использовали термин «дефект» при анализе поведения мостовых сооружений и их элементов, невзирая на причину появления этого дефекта. Мы же полагаем, что такое смешивание в одну кучу всех видов дефектов, невзирая на их происхождение неправильно, и потому предлагаем впредь пользоваться такими определениями [1].

Под дефектом будем понимать отклонение сооружения и его элементов от проекта в процессе его изготовления, транспортировки и монтажа.

А вот под повреждением будем понимать отклонение от проекта, полученное сооружением или его элементом в процессе эксплуатации.

При использовании таких определений сразу становится понятно, что на дефекты действует понятие гарантийного срока, ибо их появление является следствием ошибок, небрежности и других причин, порождаемых изготовителями. А вот на повреждения гарантийный срок не распространяется, ибо их появление является следствием воздействия или сил природы, приводящих к деградации свойств материалов и элементов мостовых сооружений из этих материалов, или же следствием неправильной работы эксплуатирующих организаций, не уделяющих должного внимания надзору, содержанию, и, при необходимости, ремонту мостовых сооружений.

Отметим при этом, что иногда возникают конфликты между эксплуатирующими организациями и строителями, когда эксплуатационники предъявляют претензии строителям в появлении повреждений, а не дефектов на мостовых сооружениях, хотя в этом вина именно эксплуатационников, а не строительных организаций, так как повреждения могут появиться и в течение гарантийного срока, но строительные организации не должны отвечать за их появление. То есть появление повреждений даже в пределах гарантийного срока не является виной строителей и потому они не должны нести за них ответственности.

Общие сведения о дефектах и повреждениях мостовых сооружений. Результаты многолетних исследований многих организаций, занимающихся обследованием, оценкой состояния и прогнозированием поведения мостовых конструкций, показывают, что наиболее распространены в мостовых сооружениях являются следующие дефекты и повреждения [2 - 17]:

- разрушение дорожного покрытия (более 65-70%);
- разрушение бетона барьерного ограждения (70-80%);
- разрушение (повреждение) деформационных швов, креплений их элементов из-за несовершенства конструкций, низкого качества выполнения работ и отсутствия надлежащей эксплуатации (до 60-80%);
- трещины в элементах пролетного строения и опор - силовые, осадочные, технологические (до 30-35%);
- повреждение и разрушение стыковых соединений - диафрагм, шпальных стыков объединений плит, главных балок и железобетонной плиты в сталежелезобетонных пролетных строениях (50-55%);
- разрушение железобетонной плиты проезжей части ввиду несовершенства гидроизоляции и протечек воды, выщелачивания бетона и коррозии арматуры, трещин, низкого качества изготовления (60-65%);
- недостаточная толщина защитного слоя (50%);
- сколы и раковины в элементах железобетонных конструкций (50-55%);
- разрушение бетона узлов опирания балок на опорные части (25-30%);
- дефекты опорных частей, в том числе РОЧ из фторопласта (45-50%);
- увеличение толщины дорожного покрытия до 20-25 см вместо 6-7 см по проекту (до 35%);
- выход из строя элементов водоотвода (35-40%);
- отсутствие строительного подъема главных несущих элементов - балок и ферм (45-50%);
- провисание главных балок и ферм (20%);
- коррозия элементов пролетного строения ввиду несвоевременной окраски, отсутствия защитного слоя бетона (65-70%);
- просадка грунта конусов насыпи за шкафными стенками устоев (30-33%);
- разрушение бетона опор, особенно в зоне переменного горизонта воды (30-35%);
- разрушение грунта отсыпки, укрепления конусов насыпей устоев, особенно на гибких свайных ростверках, ввиду неорганизованного водоотвода (60%);
- механические повреждения элементов конструкций пролетных строений и опор мостов (20-25%);

- отсутствие (неудовлетворительное техническое состояние) смотровых приспособлений (более, чем на 40% обследованных мостов со средними и большими пролетами), что существенно снижает эффективность их содержания.

Организация мониторинга мостовых сооружений. Согласно [18,19,20], мониторинг мостового сооружения включает контроль и управление эксплуатационным состоянием сооружения для надежной его эксплуатации в течение заданного срока службы при действующих нагрузках и других внешних воздействиях, причем:

- мониторинг на начальном, проектном этапе сводится к правильному определению зоны размещения мостового сооружения, правильному назначению конструкции сооружения и его элементов, выбору наиболее подходящих к конструкции и условиям работы материалов, правильному анализу напряженно-деформированного состояния сооружения с учетом возможных отклонений и повреждений при его эксплуатации;

- мониторинг на этапе изготовления, транспортировки и монтажа включает разработку правильных технологий изготовления, транспортировки и монтажа сооружения из составляющих элементов;

- мониторинг в процессе эксплуатации включает своевременную и правильную диагностику и оценку состояния сооружения и его элементов, корректную оценку остаточного ресурса и грузоподъемности при наличии обнаруженных повреждений, а также разработку правильных мероприятий по усилению, ремонту, а при необходимости – проведения реконструкции или даже замены отдельных элементов или всего сооружения.

Решение большинства вышеуказанных задач возможно только при наличии расчетных моделей мостового сооружения, корректно описывающих его поведение с учетом влияния обнаруженных в процессе диагностики дефектов и повреждений, а также при наличии соответствующих экспериментальных данных для идентификации и верификации этих моделей.

Поэтому для исследователей видится большая и сложная задача по созданию банков данных моделей деформирования и разрушения мостовых сооружений и их элементов с учетом свойств материалов, возможных дефектов и повреждений, а также с указанием корректных областей их применения. Нужны банки данных с моделями внешних силовых, температурных и других внешних воздействий, банки данных типовых проектов, использованных при проектировании мостовых сооружений, а также банки данных о дефектах и повреждениях различного вида и способах их учета при построении расчетных моделей мостовых сооружений. Здесь большую роль могут сыграть интеллектуальные технологии [20].

Решение этих задач в последнее время значительно усложняется в связи с необходимостью импортозамещения ряда важных компонентов, а также в связи с необходимостью разработки отечественных программных продуктов.

Дефекты и повреждения железобетонных мостовых сооружений в условиях сухого и жаркого климата. Так как подавляющее большинство мостовых сооружений строится из железобетона, то представляет интерес исследование влияния сухого и жаркого климата, характерного для республики Узбекистан на железобетон.

Климат в Узбекистане сухой и жаркий, то есть резко континентальный, температура воздуха летом может превышать 42 градуса по Цельсию, а в пустынных регионах в жаркий период даже может достигать 70 градусов по Цельсию. То есть Узбекистан является засушливым регионом с небольшим суммарным количеством осадков, которое в подавляющей части территории составляет не больше 200–300 мм. Сухая жаркая погода приводит к необходимости корректировать обычные технологии создания и даже эксплуатации железобетонных мостовых сооружений. Следует учитывать довольно быструю потерю подвижности бетонной смеси при ее транспортировке и выдерживании до укладки, возможное растрескивание бетона в процессе твердения и набора прочности, из-за значительной начальной усадки бетонной смеси, неравномерность температурного поля в железобетонных конструкциях из-за меняющегося направления освещения и нагрева солнечными лучами. Все это может привести к сокращению долговечности мостовых железобетонных сооружений [21].

Следовательно, учет воздействия сухого и засушливого климата на кратковременные (прочность и жесткость) и длительные (ползучесть, релаксация) механические характеристики материалов мостовых сооружений (бетона и железобетона), работающих в условиях Узбекистана, необходим.

Исследования проблемы влияния сухого жаркого климата на железобетонные конструкции при различных схемах нагружения проводятся уже довольно давно. Сошлемся на работы [22 - 28].

При этом отличия технологии возведения железобетонных пролетных строений мостовых сооружений в условиях сухого жаркого климата рассмотрены в публикациях [29-33].

И, хотя нормативные документы республики Узбекистан требуют проведения регулярных обследований и оценки эксплуатационного состояния мостовых сооружений, до недавнего времени такая работа практически не проводилась, поэтому информации о дефектах и повреждениях мостовых сооружений недостаточно.

Отметим встречающиеся на железобетонных мостовых сооружениях республики Узбекистан повреждения:

- Нарушение устойчивости мостовых опор вследствие общего и местного размыва грунта во время паводков (рис.1).



Рис.1. Размыв береговой опоры моста через реку Сангзар

- Карбонизация и хлоридная коррозия железобетонных конструкций мостовых сооружений, причиной которых является недостаточная толщина защитного слоя бетона (рис. 2).



Рис. 2. Отслоение защитного слоя бетона и коррозия арматуры, вызванные совместным действием хлоридов и карбонизации

- Повреждения плит проезжей части, оголовков опор и деформационных швов, причиной которых является некачественная гидроизоляция и плохо организованный водоотвод с проезжей части и от деформационных швов (рис. 3).



Рис. 3. Замачивание ригеля мостовой опоры из-за нарушения водоотвода

- Усадочные, температурные, силовые и коррозионные трещины в железобетонных пролетных строениях и опорах, вызванные различными причинами технологического и эксплуатационного характера (некачественный уход при бетонировании, пропуск сверхнормативной нагрузки, коррозия арматуры, вызванная действием карбонизации и хлоридов).

- Повреждения деформационных швов, вызванные неправильным их подбором, некачественной установкой и анкерровкой, отсутствием переходных участков для сглаживания перепадов жесткостей при проезде с дорожной одеждой на деформационные швы, быстрым уплотнением дорожной одежды на подходах к деформационным швам.

- Повреждения опорных частей из-за использования недолговечных конструкций опорных частей, неправильного их подбора и установки; в результате происходит коррозионное разрушение металлических элементов опорных частей, наблюдаются сколы торцов пролетных строений, заклинивание опорных частей.

- Повреждения дорожной одежды из-за неправильного назначения конструкции дорожной одежды (заметим, что дорожная одежда на мостовых сооружениях должна отличаться от дорожной одежды на дорогах), использования некачественных материалов, плохого водоотвода.

- Повреждения перильных ограждений, вызванные некачественным бетонированием, отсутствием антикоррозионной защиты.

В работе рассмотрен вопрос о правильном использовании терминов дефекты и повреждения. Первые являются следствием некорректной работы строителей, а вторые – следствие несовершенства эксплуатации. Далее на основе анализа отечественных и зарубежных публикаций приведена статистическая информация о наиболее характерных дефектах и

повреждениях мостовых сооружений. Особое внимание уделено проблеме организации прочностного мониторинга и рассмотрены особенности мониторинга на этапе проектирования, изготовления, транспортировки, монтажа и эксплуатации мостовых сооружений. Сформулирована задача по созданию банков данных моделей деформирования и разрушения мостовых сооружений и их элементов с учетом свойств материалов, возможных дефектов и повреждений. Затем для иллюстрации приведены дефекты и повреждения железобетонных мостовых сооружений в условиях сухого и жаркого климата и отмечено, что хотя нормативные документы республики Узбекистан и требуют проведения регулярных обследований и оценки эксплуатационного состояния мостовых сооружений, но до недавнего времени такая работа проводилась в недостаточном объеме и поэтому информации о дефектах и повреждениях мостовых сооружений недостаточно. В конце работы приведены повреждения, наиболее часто встречающиеся на железобетонных мостовых сооружениях республики Узбекистан.

Библиографический список

1. Овчинников И. Г. Мониторинг деформаций мостовых опор и проблемы экологически рационального проектирования мостовых сооружений / И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, А. К. Аншваев, И. Р. Гасанов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 3. – С. 60–69. – DOI: 10.15593/24111678/2022.03.07.
2. Овчинников И. Г. Диагностика мостовых сооружений / И. Г. Овчинников, В. И. Кононович, О. Н. Распоров, И. И. Овчинников. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2003. – 181 с.
3. Кокодеев А. В. Подводное обследование мостов / А. В. Кокодеев, И. Г. Овчинников // Инновации и исследования в транспортном комплексе : материалы II Международной научно-практической конференции. – Курган, 2014. – С. 133–141.
4. Кокодеев А. В. Обследование, мониторинг, выполнение ремонтных и восстановительных работ на подводных частях транспортных сооружений / А. В. Кокодеев, И. Г. Овчинников // Науковедение. – 2014. – № 5(24). – С. 1–36.
5. Прокопов А. Ю. О результатах натурных исследований состояния мостовых опор в руслах малых рек на границе «вода – воздух» / А. Ю. Прокопов, А. Л. Яцык // Перспективи розвитку будівельних технологій : матеріали 9-й Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. – Дніпропетровськ : НГУ, 2015. – С. 168–171.

6. Грацинский В. Г. Результаты проведения подводного обследования автодорожного моста «Саратов – Энгельс» / В. Г. Грацинский, А. В. Кокодеев, И. Г. Овчинников // Дороги и мосты. РосдорНИИ. – 2015. – Вып. 33. – С. 248–262.
7. Zhang G. Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review / G. Zhang, Y. Liu, L. Jiang, J. Yang // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2017. – Vol. 9, no. 12. – P. 388–406. – DOI: 10.1016/j.jtte.2021.12.003.
8. Silano L. Bridge Inspection and Rehabilitation, A Practical Guide / L. Silano, A. Henderson. – New York : John Wiley & Sons, 1993. – ISBN 0-471-53263-2.
9. Moehle J. Preliminary Observations on the Performance of Concrete Freeway Structures / J. Moehle. – Berkeley : National Information Service for Earthquake Engineering, Univ of California, 1999. – URL: www.eerc.berkeley.edu/loma_prieta/moehle.html.
10. Ma Y. Probabilistic Life Prediction for Reinforced Concrete Structures Subjected to Seasonal Corrosion-Fatigue Damage / Y. Ma, Z. Guo, L. Wang, J. Zhang // Journal of Structural Engineering. – 2020. – Vol. 146. – Art. 04020117.
11. Wang L. Concrete cracking prediction under combined prestress and strand corrosion / L. Wang, L. Dai, H. Bian, Y. Ma, J. Zhang // Structural Infrastructure Engineering. – 2019. – Vol. 15. – P. 285–295.
12. Zollini S. UAV Photogrammetry for Concrete Bridge Inspection Using Object-Based Image Analysis (OBIA) / S. Zollini, M. Alicandro, D. Dominici, R. Quaresima, M. Giallonardo // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – Art. 3180.
13. Alsharqawi M. Integrated condition rating and forecasting method for bridge decks using Visual Inspection and Ground Penetrating Radar / M. Alsharqawi, T. Zayed, S. Abu Dabous // Automation in Construction. – 2018. – Vol. 89. – P. 135–145.
14. Mohan A. Crack detection using image processing: A critical review and analysis / A. Mohan, S. Poobal // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – Vol. 57. – P. 787–798.
15. Yu Y. Crack detection of concrete structures using deep convolutional neural networks optimized by enhanced chicken swarm algorithm / Y. Yu, M. Rashidi, B. Samali, M. Mohammadi, T. N. Nguyen, X. Zhou // Structural Health Monitoring. – 2022. – Vol. 21. – Art. 14759217211053546.
16. Dung C. V. Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network / C. V. Dung, L. D. Anh // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 99. – P. 52–58.

17. Kullaa J. Damage Detection of the Z24 Bridge Using Control Charts / J. Kullaa // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2003. – Vol. 17, no. 1. – P. 163–170. – DOI: 10.1006/mssp.2002.1555.

18. Овчинников И. Г. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга / И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, О. И. Нигаматова, Е. С. Михалдыкин // *Транспортные сооружения*. – 2014. – Т. 1, № 1. – DOI: 10.15862/01TS114.

19. Döhler M. Structural Health Monitoring with Statistical Methods during Progressive Damage Test of S101 Bridge / M. Döhler, F. Hille, L. Mevel, W. Rücker // *Engineering Structures*. – 2014. – Vol. 69. – P. 183–193. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.03.010.

20. Sun L. Review of Bridge Structural Health Monitoring Aided by Big Data and Artificial Intelligence: From Condition Assessment to Damage Detection / L. Sun, Z. Shang, Y. Xia, S. Bhowmick, S. Nagarajaiah // *Journal of Structural Engineering*. – 2020. – Vol. 146, no. 5. – Art. 04020073. – DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002535.

21. Валиев Ш. Н. Вопросы проектирования, строительства и эксплуатации железобетонных мостовых сооружений в условиях сухого жаркого климата Республики Узбекистан / Ш. Н. Валиев, М. З. Ахмаджанов, И. Г. Овчинников // *Транспортные сооружения*. – 2023. – Т. 10, № 4. – 14 с. – URL: <https://t-s.today/issue-4-2023.html>

22. Зезари С. Ф. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных конструкций в условиях сухого жаркого климата : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. Ф. Зезари. – Москва, 1992. – 21 с.

23. Ризаев Б. Ш. Прочность, деформативность и трещиностойкость внецентренно-сжатых железобетонных элементов в условиях сухого жаркого климата : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б. Ш. Ризаев. – Ташкент, 1995. – 19 с.

24. Камбаров Х. У. Железобетонные конструкции в условиях жаркого климата : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Х. У. Камбаров. – Ташкент, 1998. – 38 с.

25. Седнави Гассан. Напряженно-деформированное состояние железобетонных пролетных строений мостов с учетом ползучести бетона в условиях жаркого климата : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Гассан Седнави. – Москва, 2010. – 25 с.

26. Холмирзаев С. А. Деформативность, трещиностойкость и прочность сжатых железобетонных элементов из керамзитобетона в сухом

жарком климате : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. А. Холмирзаев. – Ташкент, 2023.

27. Ризаев Б. Ш. Деформативные характеристики тяжелого бетона в условиях сухого жаркого климата / Б. Ш. Ризаев, Р. А. Мавлонов // Вестник Науки и Творчества. – 2017. – № 3. – С. 114–118. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28915446> (дата обращения: 12.10.2023). – EDN YITRNJ.

28. Ризаев Б. Ш. Анализ влияния сухого жаркого климата на работу железобетонных элементов / Б. Ш. Ризаев, Т. И. Эгамбердиева // Экономика и социум. – 2021. – № 6-2. – С. 191–196. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46425852> (дата обращения: 12.10.2023). – EDN BDETAW.

29. Ризаев Б. Ш. Деформации усадки бетона в условиях сухого жаркого климата / Б. Ш. Ризаев, А. Т. Мамадалиев, И. И. Умаров // Экономика и социум. – 2022. – № 1-2. – С. 455–462. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48005890> (дата обращения: 12.10.2023). – EDN JPAHAV.

30. Липсмайер Г. Строительство в условиях жаркого климата / Г. Липсмайер ; пер. с англ. А. С. Брика. – Москва : Стройиздат, 1984. – 189 с.

31. Чижев С. В. Метод возведения дисперсно-армированных железобетонных пролётных строений мостов в условиях сухо-жаркого климата / С. В. Чижев, Э. Т. Яхшиев // Наукоедение. – 2016. – Т. 8, № 5. – С. 05TVN516. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN516.pdf> (дата обращения: 12.10.2023). – EDN XCMQUB.

32. Тринкер А. Б. Технологии бетонов в жарком климате / А. Б. Тринкер // Технологии бетонов. – 2018. – № 1-2. – С. 47–49. – URL: <http://www.tehnobeton.ru/pdf/2018-1-2/47-49.pdf> (дата обращения: 12.10.2023). – EDN OULMKH.

33. Арчакова В. А. Особенности производства бетонных работ в жарком и сухом климате / В. А. Арчакова, А. Ю. Давиденко // Наука молодых – будущее России : сб. науч. ст. 3-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых : в 6 т. – Курск, 2018. – Т. 4. – С. 19–22. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36764128> (дата обращения: 12.10.2023). – EDN YTPULJ.

34. Бельхадж С. Технология бетонирования в условиях жаркого климата Марокко / С. Бельхадж, Р. А. Ибрагимов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – № 2. – С. 41–48. – URL: https://izvestija.kgasu.ru/files/2_2020/41_48_Belkhadj_Said_Ibragimov.pdf (дата обращения: 24.10.2023). – EDN KDBJYP.

УДК 69.01

**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ, ВНОСИМОЙ ВЗАИМНЫМ
ВЛИЯНИЕМ СВАЙ В КУСТЕ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ
СВАЙ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ**

Батырев К.Г.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Рост городов, связанное с этим увеличение плотности населения, глобальные экономические процессы, градостроительные и архитектурные новации неизбежно влияют на строительный прогресс. При этом неизбежно растут нагрузки на фундаменты и напряжения в конструкциях, немаловажную роль играет фактор увеличения сложности инженерно-геологических условий городских – все это определяет необходимость внедрения современных решений при выборе типов фундаментов.

Оптимальным решением является широкое внедрение свайных фундаментов. Сваи различных видов в настоящее время широко применяются при проектировании фундаментов на искусственном свайном основании. Использование свай позволяет возводить здания и сооружения даже в особо-сложных условиях – при слабых грунтах, высоком уровне грунтовых вод, сложном характере рельефа.

Использование свайных фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях требует разработки оптимальных методов расчета.

Ключевым элементом здесь является точное понимание механизма работы системы свайный фундамент – грунтовый массив. Без точных математических моделей разработка эффективного проекта не представляется возможной.

При максимальном использовании несущей способности свай как по материалу свай, так и по грунту наилучшая рациональность и экономичность проектных решений свайных фундаментов. К сожалению, в сложившейся отечественной практике зачастую не полностью используется прочность свай по грунту, причём в ряде случаев ее недоиспользование достигает 40 %. Данное обстоятельство можно объяснить следующим: излишней осторожностью при проектировании, некачественными изысканиями, неправильным применением методик расчета и, конечно же, недостатками самих используемых методов расчета.

В городах, расположенных как на берегах, так и в устьях рек, часто приходится возводить здания и сооружения на значительной толще слабых грунтов, мощность которых часто превышает 20÷30 м. Эта толща состоит в том числе из слоев органогенных, биогенных и глинистых грунтов в текучем состоянии. Такие условия предопределяют использование свайных фундаментов зданий и сооружений. Однако во многих

случаях даже при длине свай 20 м они получаются висячими и имеют несущую способность по грунту существенно ниже, чем может выдержать железобетонная свая по материалу.

В качестве примера рассмотрим объект, расположенный на берегу р. Упы в г. Тула (рисунок 1).

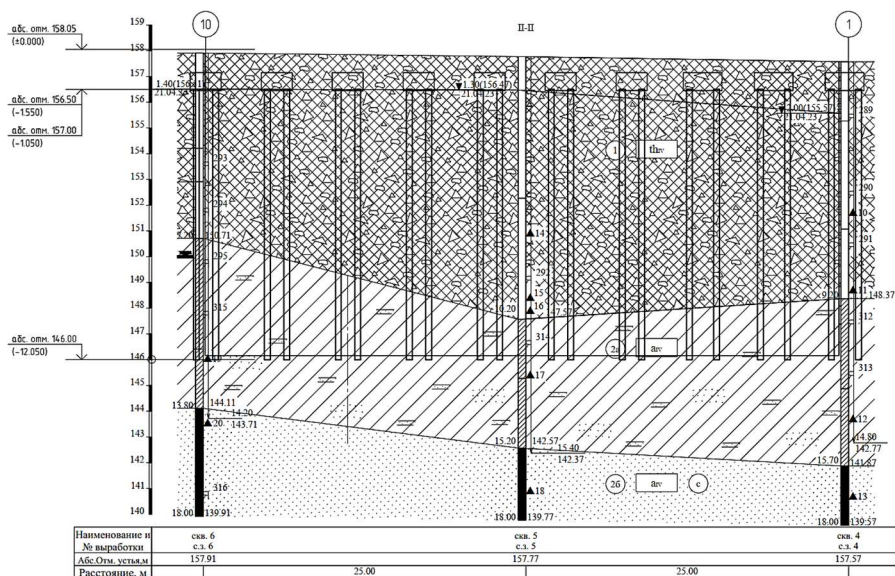


Рис. 1 Инженерно-геологический разрез

Мощность техногенных насыпных грунтов (ИГЭ №1) составляет от 7,5 до 10 м. В проекте были приняты буровые сваи диаметром 450 мм длиной 12,0 м, работающие как висячие. Нижний конец свай опираются на суглинки мягкопластичные (ИГЭ №2) с показателем текучести $IL=0,64$. При этом, в соответствии с п.7.2.14 СП 24.13330.2021, несущую способность свай следует определять по результатам статических испытаний. Таких испытаний должно быть выполнено не менее 3-х.

По завершению работ по устройству свайного поля было произведено контрольное испытание свай по схеме, изображенной на рисунке 2.

Однако, поскольку испытываемые и анкерные сваи являются элементами кустов свай ростверков, уже выполненных под колонны каркаса, был нарушен ряд требований ГОСТ 5686-2020. Так, в Таблице 5.1 ГОСТ 5686-2020 для круглых буронабивных свай диаметром d до 800 мм расстояние в свету должно быть не менее $3d$ и при этом не менее 2 м. То есть, при диаметре свай 450 мм расстояние в свету должно быть не менее $3 \times 0,45 = 1,35 \text{ м} \leq 2 \text{ м}$, следовательно, следует принять 2 м. Фактическое

расположение на примере сваи №128 приведено на рисунке 3. Расстояние в свету между испытуемой (св. 128) и анкерными сваями (св. 124, 126, 130, 132) составило 1,67 м, что меньше 2,0 м.

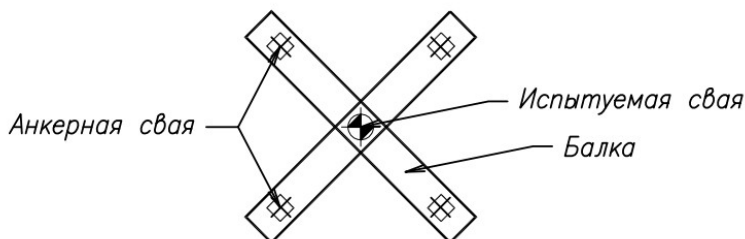


Рис. 2 Схема испытания свай статической нагрузкой

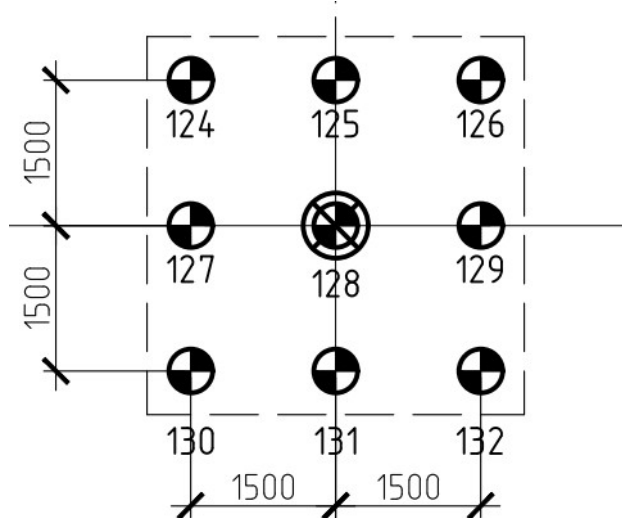


Рис. 3 Схема расположения испытуемых свай

Как следствие - полученные результаты не являются полностью достоверными и требуют либо повторного выполнения испытаний с соблюдением требований ГОСТ 5686-2020, либо определения погрешности полученных результатов к «эталонным» значениям.

Поскольку повторное выполнение натурных испытаний требует временных (изготовление свай, набор бетоном необходимой прочности, выполнение испытаний и обработка результатов) и материальных затрат, был выбран второй вариант - определение погрешности уже полученных результатов испытаний.

С целью определения погрешности выполненных испытаний свай статической нагрузкой был выполнен ряд расчетов:

1. В модуле SoilTest (Plaxis) выполнено моделирование испытания сваи методом компрессионного сжатия грунтов. Сделана калибровка (уточнение) параметров геотехнических моделей грунтов, в том числе подобраны оптимальные модели грунтов для каждого ИГЭ. Выполнен анализ результатов, полученных в модуле SoilTest, и определение наиболее подходящих для описания имеющихся грунтов геомеханических моделей грунтов. При этом были приняты следующие модели грунтов: для ИГЭ №2 - модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb), для ИГЭ №1 - модель упрочняющегося грунта (Hardening soil).

2. Выполнено численное моделирование испытания одиночной сваи в составе куста свай в Plaxis 3D. Данное моделирование численно описывает испытание свай статической нагрузкой в соответствии с ГОСТ 5686-2020. Причем расчет выполнен дважды:

2.1. Положение испытываемой сваи принято по фактическому положению сваи №128. Расстояние между испытываемой и анкерными сваями приняты в осях (в свету) 2,12 (1,67) м.

2.2. Положение контрольной сваи принято по ближайшей горной выработке (скв.1). Расстояние между испытываемой и контрольной сваями принято в осях (в свету) 2,45 (2,0) м, что соответствует требованиям ГОСТ 5686-2020.

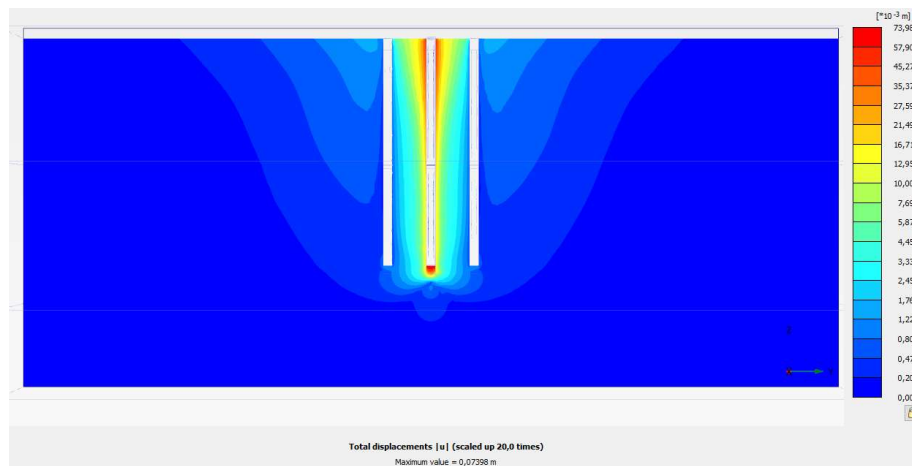


Рис. 4. Деформируемая схема (св. 128) в PLAXIS 3D

Аналогичные расчеты выполнены так же еще для 3-х других контрольных свай. Моделирование работы одиночных свай в составе кустов дало результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета одиночных свай

№ свай	Нагрузка на сваю по результатам фактически выполненного контрольного испытания, т	Нагрузка на сваю по результатам модельного испытания с параметрами испытываемых свай «как есть»	Нагрузка на сваю по результатам модельного испытания в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-2020	Отклонение значений в столбце 3 от «эталонных» в столбце 4
1	2	3	4	5
31	27,5	40,54	39,64	2,27%
101	27,5	38,24	36,57	4,57%
128	33,0	38,73	35,40	9,41%
196	33,0	36,15	35,40	2,12%

Примечания:

- нагрузка на сваю определена по значению нагрузки при осадке в 30 мм,

- принят параметр интерфейса $R_{\text{inter}}=1,0$ отражающий характер взаимодействия свай и грунта по ее контуру.

Расхождение между данными столбцов 4 и 2 связано не только с погрешностью конечно-элементного моделирования, но и с тем, что положение испытываемых свай (по столбцу 4) было принято по скважинам инженерно-геологических изысканий, как того требует п.4.5 ГОСТ 5696-2020, в то время как расстояние между фактически испытанными сваями (столбец 2) и горными выработками составило от 10 до 15 м, то есть сказалось так же различие в геологическом строении.

Из приведенных данных видно, что максимальная погрешность составляет менее 10%.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что невыполнение требований ГОСТ 5686-2020 дает завышенные на 10% результаты, то есть несущую способность свай можно принять по результатам фактически выполненных испытаний с поправочным понижающим коэффициентом 0,9.

Таким образом показано, что с помощью конечно-элементного моделирования можно рассчитать погрешность, вносимую несоблюдением

требований к взаимному расположению свай в следствии взаимного влияния испытуемых и анкерных свай без выполнения повторных натурных испытаний.

Библиографический список

1. ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. – Москва : Стандартинформ, 2020.
2. ГОСТ 5686-2020. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. – Москва : Стандартинформ, 2020.
3. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений : актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* : свод правил. – Москва : Минрегион России, 2011.
4. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты : актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 : свод правил. – Москва : Минстрой России, 2021.
5. Долматов Б. И. Особенности работы свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б. И. Долматов. – Москва : Трест «Оргсельстрой», 1966. – 6 с.
6. Кургузов К. В. Сравнение методик расчета несущей способности свай / К. В. Кургузов, И. К. Фоменко // Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ) : материалы Международной научно-практической конференции. – Москва, 2018. – Т. 2. – С. 254–255.
7. Кургузов К. В. Оценка несущей способности свай. Методы расчета и проблематика / К. В. Кургузов, И. К. Фоменко, О. Н. Сироткина // Известия Томского государственного университета. Инжиниринг ресурсов. – 2019. – Т. 330, № 10. – С. 7–25.
8. PLAXIS CONNECT Edition V20 : научное пособие. – 2020. – 300 с.
9. PLAXIS CONNECT Edition V20 : пособие по моделям материалов. – 2020. – 198 с.

УДК 699.852.7

ЧТО НА СЕГОДНЯШНИЙ ДЕНЬ ПРЕДСТАВЛЯЮТ СОБОЙ УБЕЖИЩА?

Бурковская Е.А.¹, Федосов С.В.¹, Лазарев А.А.²

¹НИУ МГСУ, г. Москва, Россия

²ИПСАГПС МЧС России, г. Иваново, Россия

В соответствии с ГОСТ Р 42.4.03-2022 убежище – защитное сооружение гражданской обороны, предназначенное для защиты укрываемых в

течение нормативного времени от расчетного воздействия поражающих факторов ядерного и химического оружия и обычных средств поражения, бактериальных (биологических) средств и поражающих концентраций аварийно химически опасных веществ, возникающих при аварии на потенциально опасных объектах, а также от высоких температур и продуктов горения при пожарах.

Согласно ГОСТ Р 42.4.03-2022 убежища классифицируют: по защищенности от действия избыточного давления во фронте ВУВ; защищенности от радиации внешнего облучения; продолжительности функционирования; вместимости; вертикальной посадке; месту расположения; времени возведения; этажности.

Принципы производства убежищ гражданской обороны:

- Герметизация и фильтровентиляция. Для защиты от отравляющих веществ, бактериальных средств и радиоактивной пыли сооружение герметизируют и оснащают фильтровентиляционной установкой. Она очищает наружный воздух, распределяет его по отсекам и создаёт в убежище избыточное давление.

- Использование прочных стен, перекрытий и дверей, а также герметических конструкций и фильтровентиляционных устройств, это создаёт благоприятные условия для укрываемых.

- Обеспечение надёжных входов и выходов, а также аварийных выходов на случай завала или повреждения основных выходов.

- Обеспечение системы воздухообеспечения, которая обеспечивает укрываемых необходимым количеством воздуха, придаёт ему нужную температуру, влажность и газовый состав.

- Размещение в местах наибольшего сосредоточения укрываемых. Убежища следует располагать в местах, где находится наибольшее количество людей, при этом радиус сбора укрываемых должен составлять не более 500 м.

Функции убежищ:

- защита от обломков разрушающихся зданий, от проникающей радиации и радиоактивной пыли, от попаданий внутрь помещений сильнодействующих ядовитых и отравляющих веществ, бактериальных средств, повышенных температур при пожарах, угарного газа и других опасных веществ в чрезвычайных ситуациях;

- обеспечение длительного пребывания людей благодаря надёжному электропитанию, санитарно-техническим устройствам (водопровод, канализация, отопление), радио- и телефонной связи, а также запасам воды, продовольствия и медикаментов;

- обеспечение санитарно-гигиенических условий, обеспечивающих нормальную жизнедеятельность людей в убежищах в случае заражения окружающей среды на поверхности радиоактивными, отравляющими веществами и бактериальными средствами или возникновения массовых пожаров;

- использование в мирное время - многие убежища строят с учётом возможности их применения для различных культурно-бытовых и производственных целей.

Задачи правительства:

1. Определение перечня имеющегося фонда защитных сооружений гражданской обороны;

2. Уточнение перечня заглубленных и других помещений подземного пространства (подвалы жилых домов, подземные пешеходные переходы, тоннели, цокольные этажи зданий, автомобильные подземные паркинги);

3. Доведение информации до населения об имеющихся на территории ЗС ГО, заглубленных и других помещений подземного пространства, а также о порядке действий населения при получении сигнала гражданской обороны «Внимание всем!»;

4. Приведение и содержание заглубленных и других помещений подземного пространства в состоянии, пригодном для укрытия населения;

5. Проведение осмотров, проверок содержания заглубленных и других помещений подземного пространства, пригодных для укрытия населения.

6. Ведение учёта существующих и создаваемых объектов гражданской обороны.

Убежище на современном этапе. На современном этапе накопление фонда ЗС ГО прекратилось, наблюдается повсеместное ухудшение их технического состояния и снижение готовности к приему укрываемых.

За период перестройки нашего общества, приватизации объектов экономики, часть защитных сооружений гражданской обороны в период с 1991 года по апрель 1994 года оказались некому не нужными, другие были приватизированы и проданы. Только с выходом в свет постановления Правительства Российской Федерации от 23 апреля 1994 года № 359, которое утвердило «Положение о порядке использования объектов и имущества гражданской обороны приватизированными предприятиями, учреждениями и организациями», удалось остановить незаконную приватизацию объектов гражданской обороны и упорядочить использование защитных сооружений.

Однако, отдельные руководители предприятий и организаций продолжали активно работать по приватизации и купле объектов граждан-

ской обороны. В результате не своевременного выхода законов и подзаконных актов, отсутствия механизма реализации этих законов и безответственности отдельных руководителей убежища были приватизированы и заключены в уставной фонд предприятий и выкуплены.

Настоящую «революцию» в военном деле и в ударах по городам принесла Первая мировая война. Авиация, мощнейшая дальнобойная артиллерия и газ – эта ужасающая триада дамокловым мечом нависла над городами Европы. Тогда же и стали возводить первые специализированные защитные сооружения.

Уже тогда в качестве ЗС ГО стали использовать метрополитен и укрепленные подвалы домов. Конечно, прямое попадание тяжелого снаряда или 500-килограммовой бомбы они не выдерживали, зато защищали от всего остального. В это время стали создавать и правительственные ЗС ГО, которые были солидно укреплены, имели фильтры и вентиляцию, что защищало от газа, электричество, запасы еды и воды. Такие же сооружения создавались для важных узлов связи и организаций.

Новые угрозы заставили эволюционировать и защитные сооружения. На случай ядерных ударов в стране создавалось гигантское количество убежищ. Они делились на 2 категории (первая – наиболее защищенная) и противохимические убежища. Создавались различные полумифические правительственные ЗС ГО и системы сообщений, такие как «Ямантау» или «Метро-2». Отдельно следует упомянуть подземные склады Госрезерва (Росрезерва), разбросанные в подземных убежищах по всей стране, готовые снабжать и кормить страну в случае масштабного конфликта.

В городах же по всему бывшему Советскому Союзу вплоть до наших дней остались тысячи ЗС ГО. К сожалению, многие из них заброшены или проданы частным владельцам, некоторые даже превращены в музеи.

В убежище должны быть места для сидения на 80 %, для лежания на 20 % укрываемых. Между сиденьями ширина проходов составляет не менее 0,85 м.

Убежище состоит из основного помещения, предназначенного для размещения укрываемых людей, и вспомогательных помещений-входов, фильтровентиляционной камеры, санитарного узла, для отопительного устройства, а в ряде случаев и помещений для защищенной дизельной установки и артезианской скважины.

Для того чтобы в помещениях, где располагаются укрываемые, не проникал зараженный радиоактивными, отравляющими веществами и бактериальными средствами воздух, они хорошо герметизируются.

Если убежище загерметизировано надежно, то после закрывания дверей, ставен и приведения фильтровентиляционного агрегата в действие давление воздуха внутри убежища становится несколько выше атмосферного (образуется так называемый подпор).

В убежище оборудуются различные инженерные системы: электро-снабжения, водоснабжения, отопления. В нем оборудуется также радиотрансляционная точка и устанавливается телефон.

В помещениях убежища размещаются, кроме того, комплект средств для ведения разведки, защитная одежда, средства тушения пожара, аварийный запас инструмента, средства аварийного освещения, запас продовольствия и воды.

В убежище должны быть также документы, определяющие характеристику и правила содержания его, паспорт, план, правила содержания и табель оснащения убежища, схема внешних и внутренних сетей с указанием отключающих устройств, журнал проверки состояния убежища и др.

Техника развития и математическая модель. исследуемые материалы. Оценка эксплуатационного состояния сложных технических систем, к которым относятся ЗС ГО, предполагает проведение исследований по созданию математической модели оценки их свойств и определению путей ее реализации. В общем случае математическая модель оценки должна состоять из типовых компонентов, связанных между собой логическими функциями с возможностью их адаптации под решение вновь возникающих задач.

Большинство используемых в настоящее время математических моделей оценки эксплуатационного состояния сложных технических систем предполагают использование вероятностных методов оценки их свойств. Применительно к ЗС может быть использована математическая модель, предложенная Ключевым В.В., Фурсовым А.С. и Филиновым М.В., при использовании которой изменение эксплуатационного состояния ЗС можно характеризовать траекторией, показывающей его движение во времени в пространстве параметров. Попадание траектории в критическую область свидетельствует о критическом состоянии ЗС. Так как результаты измерений эксплуатационных свойств ЗС являются случайными величинами, то для описания их связей используется вероятностный подход. Если отнести ЗС к восстанавливаемым системам, то потоки их отказов и восстановлений подчиняются экспоненциальному закону и могут быть представлены математической моделью Маркова.

При старении конструкций и элементов убежищ гражданской обороны могут возникать различные дефекты, например:

- Коррозия. Износ материалов ограждающих и несущих конструкций под воздействием агрессивной внешней среды.

- Трещины. Возникают в бетонных и железобетонных конструкциях, в продольных швах и в местах опирания сборных и сборномонолитных конструкций.

- Просадка пола. Возникает из-за слабого уплотнения грунта основания или его вымывания грунтовыми водами.

- Увлажнение конструкций. Происходит из-за нарушения целостности покрытия гидроизоляции и герметичности в местах пропуска коммуникаций, а также из-за нарушений работоспособности дренажной системы или её отсутствия.

- Нарушение гидроизоляции приводит к изменению температурно-влажностного режима в сооружениях, что вызывает коррозию.

- Нарушение изоляции и герметизации может привести к проникновению заражённого воздуха через различные трещины и неплотности. Для этого убежища должны герметизироваться и оснащаться фильтровентиляционным оборудованием, которое очищает наружный воздух, распределяет его по отсекам и создаёт в помещениях избыточное давление.

Рекомендации по эксплуатации убежищ:

1. Инженерно-техническое оборудование должно содержаться в исправном состоянии и готовности к использованию по назначению.

2. При эксплуатации систем вентиляции необходимо периодически очищать от грязи и снега воздухозаборные и вытяжные каналы и противовзрывные устройства.

3. В мирное время запрещается перепланировка помещений, устройство отверстий или проёмов в ограждающих конструкциях, нарушение герметизации и гидроизоляции, демонтаж оборудования, применение сгораемых синтетических материалов при отделке помещений.

4. Рекомендуется проводить комплексную оценку технического состояния убежищ один раз в три года.

В качестве предложения хочется обозначить предложение для автоматизации контроля герметичности ЗС ГО, чтобы исключить «человеческий фактор» и быстро реагировать на ухудшение показателей, например, при увеличении относительной влажности воздуха и др. После обозначения такого предложения можно выйти на патентование технических средств для автоматизации контроля ЗС ГО, подготовить на основе теории тепломассопереноса физико-математические модели для прогнозирования работы данных технических средств и определить места их установки, количества и т.д.

УДК 624.21

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Воронков О.Н., Валиев Ш.Н.

МАДИ, г. Москва, Россия

В настоящее время строительная отрасль проходит через процесс серьезной трансформации, связанный с отказом от традиционных методов проектирования, строительства и эксплуатации в пользу инновационных способов реализации проектов.

Строительные проекты по своему характеру являются чрезвычайно информационно насыщенными. Их растущая сложность, отсутствие необходимой информации для принятия решений в нужное время, нарастающее давление по срокам в условиях традиционных методов их реализации могут быть причинами снижения эффективности строительства.

Постепенный повсеместный переход на технологии информационного моделирования (ТИМ) стал ответом на необходимость сбора, учета и обработки в процессе жизненного цикла значительных объемов информации, последующую (иногда многократную) корректировку данных в процессе реализации проекта.

Существует множество определений ТИМ, в большей или меньшей степени отражающих его сущность, однако общий их смысл сводится к тому, что это – процесс создания и управления информацией на всех стадиях жизненного цикла объекта [1]. Можно охарактеризовать ТИМ как процесс коллективного создания и использования информации о сооружении, формирующий основу для всех решений на протяжении всего жизненного цикла.

Актуальность данного вопроса обусловлена тем, что Правительство РФ (постановление № 2357 от 20.12.2022 г. [2]) и Минтранс России (распоряжение от 17.09.2020 г. № АК-177-р [3]) приняли некоторые нормативные акты в области цифровой трансформации строительной отрасли. С 1 июля 2024 года использование ТИМ при строительстве объектов за счет федерального бюджета является обязательным.

Предусматривается, что ТИМ будет охватывать все этапы жизненного цикла сооружения: от составления технического задания до эксплуатации и демонтажа.

В сложившейся практике эксплуатации мостовых сооружений по результатам надзора, т.е. проверки соответствия количественных или ка-

чественных характеристик конструкции или сооружения установленным техническим требованиям, выносятся рекомендации по необходимости проведения различных организационных и технологических мероприятий для поддержания мостового сооружения в исправном и работоспособном состоянии.

Такая практика имеет ряд недостатков, которые в конечном итоге могут повлиять на корректность определения фактического технического состояния мостовых сооружений и принимаемых решений по дальнейшей эксплуатации. Среди таких недостатков можно выделить:

- зависимость от полноты и достаточности проведения работ по надзору;
- разрозненность мест хранения информации;
- документация не содержит сведения о состоянии моста в реальном времени;
- документация хранится в бумажном формате;
- человеческий фактор;
- ограниченная возможность прогнозирования.

Поэтому необходимо развивать про-активные подходы, предусматривающие эффективное управление актуальными для объекта рисками при эксплуатации, обеспечивая максимальную безопасность, надежность и долговечность. Таким подходом может служить применение ТИМ технологий.

Период эксплуатации является самым длительным в жизненном цикле объекта, поэтому особенностью данного этапа является то, что могут возникнуть существенные изменения объекта, например, в результате реконструкции или капитального ремонта, а также вывода из эксплуатации и даже сноса.

Поэтому ТИМ на данном этапе – это непрерывный процесс. Первоначальная модель после постройки многократно меняется с учетом возникающих воздействий. С учётом длительности этапов эксплуатации информационная модель может не только обновляться, но и переделываться уже на новом технологическом уровне.

Переданная после строительства модель на этапе эксплуатации представляет собой основу для создания цифрового двойника сооружения.

Цифровой двойник – это цифровое представление предполагаемого или реального физического продукта, системы или процесса (физического двойника), который служит его практически неотличимым цифровым аналогом для практических целей. Он позволяет воссоздать события, которые происходят в действительности или теоретически могут

наступить, а также процессы, которые нацелены на снижение рисков, связанных с наступлением того или иного события.

В виртуальной среде цифровые двойники действуют как копии физических объектов, предоставляя информацию для принятия решений.

Отличием цифровых двойников от статических ТИМ-моделей заключается в том, что статические ТИМ-модели не позволяют хранить динамические данные об изменении характеристик объектов, поступающие с датчиков мониторинга. А в рамках концепции «цифрового двойника» модель меняется одновременно с физическим аналогом.

Цифровые двойники делятся на несколько уровней в зависимости от способа и задач управления объектом и степени сложности моделей.

Применительно к эксплуатации мостовых сооружений технологически информация, полученная на основе текущих и периодических осмотров, обследований, диагностик, датчиков мониторинга, передается в общую базу данных, где происходит оценка текущего уровня технико-эксплуатационного состояния моста. По результатам оценки делается вывод о соответствии или несоответствии уровня транспортно-эксплуатационного состояния мостовых сооружений нормативным требованиям. Если несоответствия были выявлены, то в дальнейшем принимаются решения о необходимости совершенствования системы работ по эксплуатации, корректировки программ содержания мостовых сооружений или иных управляющих воздействий [4].

Таким образом, на стадии эксплуатации жизненного цикла сооружения ТИМ решает следующие задачи:

1. Планирование технического обслуживания и ремонта;
2. Мониторинг эксплуатационных характеристик;
3. Управление эксплуатацией сооружений;
4. Моделирование чрезвычайных ситуаций;
5. Прогнозирование технического и транспортно-эксплуатационного состояния.

Можно выделить следующие преимущества и недостатки применения ТИМ технологий при эксплуатации мостовых сооружений. Преимущества:

- оптимизация процесса эксплуатации;
- доступность информации;
- эффективное расходование ресурсов;
- возможность краткосрочного и долгосрочного прогнозирования.

Недостатки:

- высокая стоимость внедрения на начальном этапе;

- недостаточный опыт взаимодействия с новой технологией;
- необходимость подготовки специалистов;
- отступ от сложившихся практик.

В целом, имеющийся опыт показывает, что использование ТИМ приводит к значительному улучшению многих финансово-экономических и технико-технологических показателей.

По данным Минстроя РФ по итогам четвертого квартала 2024 г. доля использования ТИМ в отрасли выросла с 26% до 30% [5].

На рост показателей применения ТИМ положительно влияют не только требования закона, но и общие тренды цифровизации отрасли и признание положительных эффектов от ТИМ. Технологии информационного моделирования становятся важным инструментом оптимизации и увеличения эффективности строительства.

В настоящее время на рынке российского программного обеспечения существуют готовые программные комплексы для решения различных задач в рамках ТИМ: от комплексного проектирования, до организации среды общих данных и валидации моделей.

Таким образом, применение ТИМ-технологий дает возможность автоматизировать жизненный цикл мостового сооружения, а информационная модель в виде цифрового двойника может являться достоверным и объективным источником информации об объекте, что значительно увеличивает эффективность эксплуатации.

Использование ТИМ, учитывая сквозное внедрение на всех этапах жизненного цикла объектов, может повысить надежность и безопасность эксплуатации мостовых сооружений.

Библиографический список

1. Кравченко Т. В. BIM-технологии в управлении строительными проектами / Т. В. Кравченко // Молодой ученый. – 2019. – № 3 (241). – С. 176–179.
2. Правительство Российской Федерации : официальный сайт. – Москва, 2025. – URL: <http://government.ru> (дата обращения: 25.01.2025). – Загл. с экрана.
3. Юридическая информационная система «Легалакт» : законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации / ООО "Инфра-Бит". – Москва, 2025. – URL: <https://legalacts.ru> (дата обращения: 25.01.2025). – Загл. с экрана.
4. Кравченко А. Е. Системно-ситуационный подход к управлению транспортно-эксплуатационным состоянием мостовых сооружений с ис-

пользованием прогнозирующих моделей / А. Е. Кравченко, О. Н. Воронков // Научные труды КубГТУ : электронный сетевой политематический журнал. – 2023. – № 4. – С. 1–16.

5. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации : официальный сайт. – Москва, 2025. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru> (дата обращения: 25.01.2025). – Загл. с экрана.

УДК 624.21/.8:536.3

ВЛИЯНИЕ ТИПА ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ НА СОХРАННОСТЬ ИХ ПРОЕКТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Гриднев С.Ю., Ненашев Д.С.

ВГТУ, г. Воронеж, Россия

На кафедре «Строительной механики» ВГТУ были выполнены исследования по изучению особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС) пролетных строений автодорожных мостов с металлической ортотропной плитой проезжей части и сталежелезобетонных пролетных строений на воздействии одного из наиболее значимых природных факторов - потока солнечного излучения или, как принято говорить, солнечной радиации [1-6]. В качестве объектов исследования приняты такие пролетными строениями из-за их наибольшей чувствительности к несимметричным воздействиям как многократно статически неопределимым системам. Особенностью воздействия солнечной радиации наряду с временной подвижной нагрузкой является то, что пролетные строения находятся в условиях постоянно меняющихся в течение суток и времени года несимметричных температурных воздействий. В работе [7] показано, что действующие нормативные документы по расчету пролетных строений на тепловой поток солнечного излучения не учитывают реально имеющее место несимметричное воздействие солнечного излучения, а предполагают только симметричное воздействие на элементы сооружения и дано обоснование необходимости внесения изменений в нормативную базу при расчете пролетных строений мостов на температурное климатическое воздействие.

Отметим, что под воздействием солнечной радиации находятся не только пролетные строения, но другие конструктивные элементы моста. Опорные части при этом меняют свое проектное положение и в них, в ряде случаев, возникают значительные дополнительные усилия. Опира-

ние пролетного строения не должно приводить к появлению дополнительных усилий. Это приводит к особенностям при установке и дальнейшей эксплуатации опорных частей. Связанные с этим проблемы никак не учитываются в нормативных документах и в литературе. Они должны учитываться и для уточнения НДС пролетных строений и для расчета непосредственно самих опорных частей. Несимметричные температурные деформации можно компенсировать коорректировкой их положения. Добавим, что перемещения от температурных деформаций могут быть, в ряде случаев, сопоставимы от подвижной нагрузки.

В качестве объекта исследования принято металлическое пролетное строение с ортотропной плитой, выполненного по типовому проекту 378-КМ Ленгипротрансмоста автодорожного моста через реку Ворона в г. Борисоглебске длиной 43,1 м с двумя главными балками двутаврового сечения высотой 2400 мм, металлической ортотропной плитой с покрывным листом толщиной 12 мм и общей шириной 11340 мм.

Для выполнения численных исследований по оценке и сохранности проектного положения опорных частей разного типа и влияния опорных частей на НДС пролетных строений в комплексе «ПК Ли́ра САПР» были разработана усовершенствованная пространственная конечно-элементная (КЭ) модель (Рис. 1) исследуемого объекта, включающие слои дорожной одежды, которые позволяют учитывать неравномерное распределение температуры по высоте поперечного сечения мостового сооружения и слоев дорожной одежды.

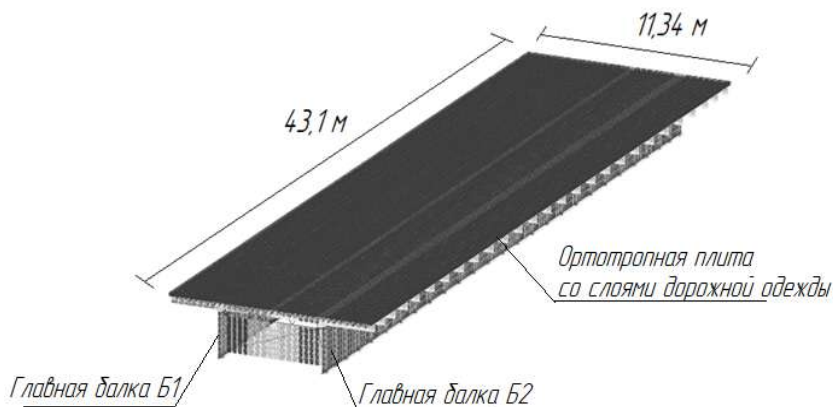


Рис. 1. Конечно-элементная модель пролетного строения

Для моделирования ортотропной плиты и слоев дорожной одежды использованы объемные конечные элементы, для главных балок и ребер

жесткости - КЭ оболочки, для поперечных и продольных связей - стержневые КЭ. В КЭ модели учтены механические свойства материалов слоев дорожной одежды, которые могут меняться в диапазоне температур от воздействия солнечной радиации. Добавлена модель обобщенной подвижной опоры. Отметим, что такая обобщенная опорная часть моделировалась в КЭ модели либо пространственным стержнем с 12 степенями свободы, либо совокупностью упругих связей, податливость которых была определена ранее с помощью построенных КЭ моделей. При использовании обобщенной модели из совокупности упругих связей легко перейти к любым типам опор, запрещая линейные или угловые перемещения узлам или назначая нулевую податливость в соответствующем направлении. Это позволяет оценивать изменение проектного положения опорных частей разных типов.

Для металлического пролетного строения с ортотропной плитой в практике мостостроения используются в последнее время чаще шаровые сегментные с применением антифрикционных материалов, а также резинометаллические тангенциальные, катковые, секторные и реже каткового или стаканного типа. Тип назначается в зависимости величины вертикальных и горизонтальных нагрузок, воспринимаемых нагрузок ожидаемых линейных и угловых перемещений.

Далее будем выполнять расчет с на резинометаллическими опорными частями, которая всесторонне деформируется в процессе эксплуатации при несимметричном температурном воздействии. Такие опорные части испытывают сжатие, сдвиг и изгиб в двух плоскостях, кручение относительно оси опирания.

Численные расчеты по определению характеристик податливости резино-металлических опорных частей проведены методом конечных элементов для РОЧ, используемых для пролетных строений с ортотропной плитой, с использованием средств программного комплекса MSC.Patran/MSC.Marc [8]. Разработанная КЭ модель (рис. 2) состоит из 10192 гексаэдрических конечных элементов первого порядка (1920 для стали со стандартной формулировкой и 8272 для резины с формулировкой Hybrid (Herman) Reduced Integration (Германа с пониженным интегрированием)).

Контактное взаимодействие стальных листов с резиной смоделировано следующим образом: для стальных листов назначены восемь деформируемых контактных тел, состоящих из одного слоя конечных элементов каждое, для резины назначены так же восемь деформируемых контактных тел, состо-

ящих из конечных элементов, стыкующихся с соответствующими контактными телами стальных листов. Тип контакта, учитывая прочное сцепление резины с металлом, – GLUE (склейка).

Выполнена серия расчетов в программном комплексе ЛИРА-СА-ПРНДС пролетных строений только на воздействие солнечной радиации с использованием полученных натурными измерениями температурных моделей в течение суток в жаркое время года.

Для иллюстрации выполненных численных исследований на рис. 3 и рис. 4 приведем некоторые результаты численных расчетов.

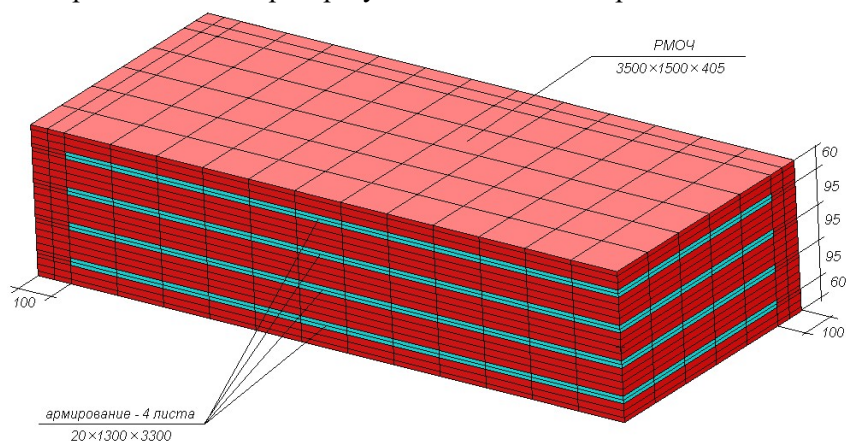
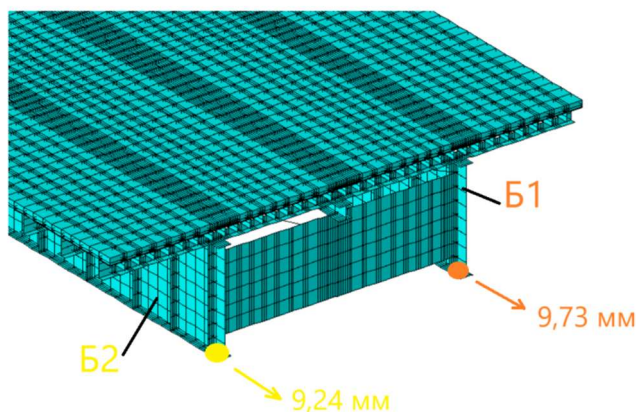


Рис. 2. Конечно-элементная модель $\frac{1}{4}$ РМОЧ



Максимальные перемещения опорных частей от проектного положения в течение дня при температурных деформациях

Рис. 3. Максимальные перемещения опорных частей в течении одного дня жаркого времени года при температурных деформациях

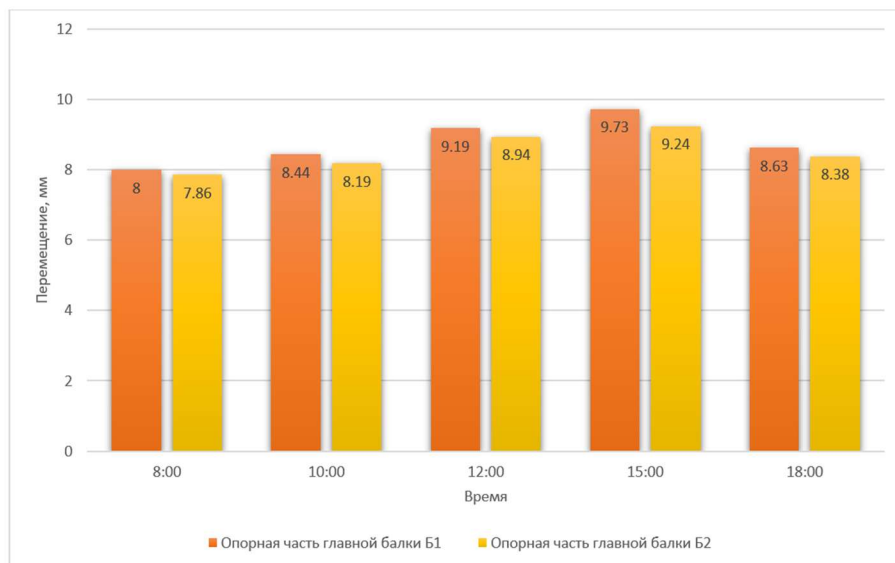


Рис. 4. Изменение продольных смещений главных балок в течение дня

Выводы:

1. Результаты численных исследований для принятого типа опорных частей показали значительные несимметричные дневные и сезонные смещения от проектного положения подвижных опорных частей, что подтверждает пространственный несимметричный характер деформирования пролетных строений.

2. Смещения опорных частей существенно зависит от типа опорных частей.

3. На стадии проектирования необходимо выполнять проверку сохранности проектного положения опорных частей при учете неравномерного нагрева пролетного строения.

4. При установке пролетного строения на опоры учитывать опасные по времени и температурным интервалам случаи воздействия солнечной радиации.

Библиографический список

1. Podlesnykh I. S. Verifying Regulatory Documents for Solar Radiation Level Control When Estimating Stress-Strain State of the Spans Based on the Orthotropic Slab / I. S. Podlesnykh, S. Yu. Gridnev, N. A. Barchenkova // The 24th International Scientific Conference MECHANIKA-2019. – 2019. – P. 116–122.

2. Гриднев С. Ю. Влияние неравномерного нагрева на распределение напряжений в элементах пролетного строения с ортотропной плитой / С. Ю. Гриднев, И. С. Подлесных // Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры : сборник материалов XX Международной научно-технической конференции. – Тула, 2019. – С. 108–110.

3. Гриднев С. Ю. Особенности температурного поля в элементах пролетного строения автодорожного моста при близких к нулю отрицательных температурах / С. Ю. Гриднев, И. С. Подлесных // Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры : сборник материалов XX Международной научно-технической конференции. – Тула, 2019. – С. 110–112.

4. Подлесных И. С. Уточнение напряженно-деформированного состояния пролетного строения с ортотропной плитой при учете солнечной радиации / И. С. Подлесных, С. Ю. Гриднев, Ю. И. Скалько // Транспортные сооружения. – 2019. – № 4. – URL: <https://t-s.today/PDF/15SATS419.pdf>. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. – DOI: 10.15862/15SATS419.

5. Gridnev S. Yu. Estimating the influence of solar radiation at different seasons on the mode of deformation of a span structure with an ortotropic plate / S. Yu. Gridnev, I. S. Podlesnykh, Yu. I. Skalko, A. V. Rezunov // Archives for Technical Sciences. – 2020. – No 23. – P. 59–66.

6. Гриднев С. Ю. Методика измерения температурного поля пролетного строения с ортотропной плитой при воздействии солнечной радиации / С. Ю. Гриднев, И. С. Подлесных // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии : сборник материалов XXI Международной научно-технической конференции. – Тула, 2020. – С. 62–68.

7. Гриднев С. Ю. Обоснование необходимости внесения изменений в нормативную базу при расчете пролетных строений мостов на температурное климатическое воздействие / С. Ю. Гриднев, И. Г. Овчинников, И. С. Подлесных // Транспортные сооружения. – 2024. – Т. 11, № 3. – URL: <https://t-s.today/PDF/16SATS324.pdf>. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. – DOI: 10.15862/16SATS324.

8. Гриднев С. Ю. Определение податливости мостовых резинометаллических опорных частей в условиях всестороннего деформирования / С. Ю. Гриднев, Д. В. Боровков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2009. – № 1(13). – С. 83–91.

УДК 004.021

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Иванов О.А.

НИУ МГСУ, г. Москва, Россия

Мониторинг состояния строительных конструкций представляет собой критически важную область инженерной науки, направленную на раннее обнаружение повреждений в инженерных сооружениях с целью предотвращения отказов и обеспечения условно-ориентированного технического обслуживания [1]. С ростом возраста гражданской инфраструктуры и увеличением требований к безопасности эксплуатации, развитие эффективных методов мониторинга состояния строительных конструкций приобретает особую актуальность.

Традиционные методы мониторинга, основанные на визуальных осмотрах, аналитических моделях и обработке сигналов, демонстрируют существенные ограничения в условиях современных требований к автоматизации и точности диагностики [1]. В этом контексте применение методов машинного обучения (Machine Learning, ML) открывает новые возможности для автоматизации различных аспектов мониторинга, включая обнаружение, локализацию, классификацию и количественную оценку повреждений, а также прогнозирование остаточного ресурса конструкций.

Традиционные методы и их ограничения. Вибрационные методы диагностики. Фундаментальной основой динамического мониторинга является анализ изменений модальных параметров конструкций под воздействием повреждений. В статье Composite plate damage localization based on modal parameters [2] авторы предложили метод локализации деламINATIONных повреждений композитных пластин на основе отношения изменений собственных частот, реализуемый через функцию повреждения, который продемонстрировал высокую точность в определении зоны повреждения как в численных экспериментах, так и при экспериментальной валидации.

Однако традиционные подходы страдают от ряда фундаментальных ограничений, описанных в статье Machine Learning Based Quantitative Damage Monitoring of Composite Structure [3]. Во-первых, малые повреждения оказывают незначительное влияние на общие динамические характеристики конструкции, что затрудняет их обнаружение. Во-вторых, изменения условий окружающей среды, такие как температура, влажность и нагрузка, могут вызывать изменения в сигналах датчиков, маскируя эффекты от повреждений.

Модально-параметрические методы. В статье *Beam Damage Assessment Using Natural Frequency Shift and Machine Learning* [4] авторы исследовали применение сдвига естественных частот для оценки повреждений балок с использованием методов машинного обучения, создав базу данных из 36,5 тысяч смоделированных сценариев повреждений балки. Их двухэтапный подход "от грубого к точному", с применением классической модели машинного обучения Random Forest и искусственных нейронных сетей, достиг точности локализации трещин 89%, что свидетельствует о потенциале машинного обучения для повышения эффективности традиционных методов.

Тем не менее, эти методы сталкиваются с принципиальными ограничениями при работе с неидеальными граничными условиями и требуют значительных объемов безшумных данных для обучения.

Современные подходы машинного обучения. Супервизорные методы обучения. Систематический анализ современной литературы выявляет доминирование супервизорных алгоритмов в области мониторинга, согласно статье *Algorithms and Techniques for the Structural Health Monitoring of Bridges: Systematic Literature Review* [5]. Авторы в своем обзоре 45 исследований (2016-2023) идентифицировали три основные категории алгоритмов распознавания образов: супервизорные алгоритмы обучения (Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbors), нейронные сети (ANN, CNN) и комбинированные подходы.

В работе *Detection, Localization, and Quantification of Damage in Structures via Artificial Neural Networks* [6] авторы продемонстрировали эффективность единого подхода на основе нейронных сетей прямого распространения для одновременного обнаружения, локализации и количественной оценки повреждений. Их методология показала точность до 99,57% при валидации на численных моделях, лабораторных экспериментах и реальном мосту Z24, с погрешностями количественной оценки, не превышающими 6%.

Несупервизорные и полусупервизорные подходы. Особый интерес представляют несупервизорные методы, способные работать в условиях ограниченной доступности размеченных данных о повреждениях. Авторы в статье *A data-based structural health monitoring approach for damage detection in steel bridges using experimental data* [7] разработали методологию мониторинга для стальных мостов, комбинирующую извлечение авторегрессионных признаков с супервизорными (kNN, SVM, RF, NB) и несупервизорными (MSD) алгоритмами машинного обучения. Результаты показали отличную классификацию типов повреждений с помощью SVM и низкий уровень ложных срабатываний в несупервизорном режиме обнаружения новизны.

Недавние исследования также указывают на перспективность подходов машинного обучения без учителя, использующих передовые методы, включая Graph CNN и Transformer networks [8]. Эти методы специально разработаны для преодоления проблемы ограниченных размеченных данных в задачах мониторинга, обеспечивая точный анализ и синтез признаков из временных рядов сенсорных данных для точной идентификации повреждений.

Глубокое обучение в структурном мониторинге. Сверточные нейронные сети. Применение глубоких сверточных нейронных сетей (CNN) в мониторинге строительных конструкций демонстрирует значительные преимущества в автоматическом извлечении признаков из сырых данных датчиков. В статье [3] представили всесторонний обзор применения машинного обучения для количественного мониторинга повреждений композитных конструкций, выделяя CNN как один из наиболее перспективных подходов для локализации и оценки степени повреждения.

Особенно примечательным является применение одномерных CNN для прямого обучения на данных ультразвуковых направляющих волн, что позволяет обойти этап ручного извлечения признаков и повысить устойчивость метода к шуму.

Гибридные архитектуры CNN-LSTM. Авторы в статье CNN-LSTM-Based Damage Localization of Plate Structure [9] предложили инновационную архитектуру CNN-LSTM для локализации повреждений в пластинчатых структурах. Их подход преобразует одномерные сигналы Lamb-волн в двумерные изображения градаций серого, из которых CNN извлекает пространственные признаки, а LSTM – временные. Результирующая модель достигла средней евклидовой ошибки локализации 3,42 см при 100% точности обнаружения повреждений с порогом 60 мм, что значительно превосходит традиционные подходы (MED = 12,70 см для MLP и 6,75 см для DI+1D CNN).

Графовые сверточные сети. В работе Application of Graph Convolutional Neural Networks Combined with Single-Model Decision-Making Fusion Neural Networks in Structural Damage Recognition [10] авторы представили новаторский подход, моделирующий массивы датчиков в виде графов с последующим применением трехслойных графовых сверточных нейронных сетей (GCN) для извлечения признаков. Их single-model decision-making fusion neural network (S_DFNN) продемонстрировала существенные преимущества по сравнению с традиционными 1D-CNN и LSTM подходами, достигнув точности 99,57% на каркасных конструкциях и повышения точности распознавания повреждений главной балки вантового моста на 11,44%.

Принципиальное преимущество GCN заключается в способности явного моделирования пространственно-структурных взаимосвязей между датчиками, тогда как 1D-CNN и LSTM рассматривают датчики независимо, что особенно важно при работе со сложными сенсорными конфигурациями MDPI Sensors.

Генеративные модели и аугментация данных. Генеративные состязательные сети в мониторинге строительных конструкций. Критической проблемой применения методов машинного обучения в мониторинге конструкций является нехватка размеченных данных о повреждениях, особенно для редких или катастрофических дефектов. Авторы статьи A literature review: Generative adversarial networks for civil structural health monitoring [11] предложили новаторский подход к решению этой проблемы с использованием генеративных состязательных сетей (GAN). Их методология основана на применении 1-D WGAN-GP для генерации синтетических вибрационных сигналов с последующей классификацией сгенерированных и реальных данных с помощью 1-D DCNN.

Экспериментальные результаты показали высокую эффективность подхода: точность классификации составила 97-100%, а значения FID (Fréchet Inception Distance) снизились с 0,136 до $1,5 \times 10^{-5}$, что свидетельствует о высоком качестве генерируемых данных.

Методы аугментации сигналов ускорения. Дальнейшее развитие GAN-подходов представлено в работе, посвященной аугментации размеченных данных об ускорении для обнаружения структурных повреждений Generative adversarial networks for labeled acceleration data augmentation for structural damage detection [12]. Методология включает применение 1-D WDCGAN-GP для генерации синтетических сигналов ускорения и их интеграцию в обучающие наборы данных с различными соотношениями аугментации. Результаты показали, что модели, обученные на синтетически дополненных данных, достигают точности обнаружения повреждений 97% по сравнению со 100% для моделей, обученных исключительно на реальных данных, что демонстрирует практическую применимость GAN-аугментации при недостатке экспериментальных данных.

Гибридные и мультимодальные подходы. Интеграция физических моделей и машинного обучения. В статье Structural damage detection using deep learning and FE model updating techniques [13] предложили гибридную методологию, комбинирующую методы обновления конечно-элементных моделей с глубоким обучением для обнаружения структурных повреждений. Их трехэтапный подход включает: (1) построение эталонной FE-модели, (2) генерацию множественных сценариев повре-

ждений на основе эталонной модели, и (3) обучение нейронной сети глубокого обучения на первых трех собственных частотах для оценки локализации и степени повреждения.

Экспериментальная валидация на трехэтажной стальной раме показала высокую точность: $RMSE < 0,85\%$ при тестировании на симулированных данных и среднюю погрешность оценки жесткости $0,29\%$ для неповрежденного состояния и $1,58\%$ для поврежденного состояния. Принципиальное преимущество такого гибридного подхода заключается в реалистичности обучающих данных, поскольку обновленная FE-модель отражает динамические характеристики конкретной конструкции, уменьшая расхождения между моделью и реальностью.

Комплексные системы машинного обучения. Авторы в работе *Damage identification for bridges using machine learning: Development and application to KW51 bridge* [14] разработали всестороннюю методологию CMLDI (Comprehensive Machine Learning-based Damage Identification) для мостов, интегрирующую обработку сигналов с множественными алгоритмами машинного обучения. Методология включает три последовательных этапа: (1) генерацию данных через FEM-моделирование, (2) идентификацию повреждений на основе модального анализа с использованием k-NN классификаторов, и (3) идентификацию повреждений на основе динамических данных ускорения с применением stacked GRU, kNN и CNN.

Практическое применение на реальном железнодорожном мосту KW51 продемонстрировало высокую эффективность: точность $>95-100\%$ при различных условиях нагружения и уровнях шума, что подтверждает перспективность мультимодальных подходов для промышленного применения.

Практические применения и валидация. Экспериментальные исследования. Авторы *Damage Detection with Data-Driven Machine Learning Models on an Experimental Structure* [15] провели всестороннее исследование data-driven моделей машинного обучения на экспериментальной трехэтажной стальной раме. Их анализ 680 сигналов от четырех акселерометров с применением различных методов извлечения признаков (PSD сегменты, вейвлет-коэффициенты, Most Damage-Sensitive Segment метод) показал, что специализированные FFT-основанные признаки обеспечивают точность до $81,3\%$, эффективно подавляя влияние эксплуатационных и экологических вариаций.

Принципиально важным выводом этого исследования является необходимость тщательного извлечения признаков: модели, обученные на сырых временных рядах без предварительной обработки, показали точность около 45% , тогда как domain-informed трансформации (PSD, WT, MDSS) повышали точность до $>75\%$.

Промышленные приложения. Систематический обзор промышленных применений показывает растущее внедрение ML-методов в реальные системы мониторинга [1]. Современные системы используют разнообразные типы датчиков, включая оптоволоконные сенсоры, пьезоэлектрические материалы (PZT), наноматериальные покрытия, вихретоковые датчики, и системы акустической эмиссии для захвата различных физических параметров конструкций.

Особенно перспективными являются встроенные мультимедийные сенсорные сети для мониторинга композитных конструкций во время производства и эксплуатации, которые генерируют гетерогенные данные, требующие продвинутых методов машинного обучения для эффективной обработки и интерпретации [3].

Выявленные проблемы и ограничения. Технические ограничения. Несмотря на значительные достижения в области применения машинного обучения для мониторинга строительных конструкций, ряд фундаментальных проблем остается нерешенным. Основным ограничением является недостаток репрезентативных полномасштабных данных и сложность генерации выборок различных типов повреждений [3]. Большинство исследований проводится на упрощенных лабораторных макетах, что ограничивает применимость результатов к реальным конструкциям.

Неоднозначность механизма связи "сигнал-повреждение" из-за вариабельности условий окружающей среды остается критическим вызовом [3]. Изменения температуры, влажности, нагрузки могут маскировать или имитировать эффекты от повреждений, что требует развития методов компенсации экологических влияний.

Методологические проблемы. Ограниченная интерпретируемость и объяснимость ML-моделей представляет серьезное препятствие для их широкого промышленного внедрения [1]. Инженеры-практики требуют не только точных прогнозов, но и понимания механизмов принятия решений, что особенно критично в приложениях, связанных с безопасностью.

Проблема "проклятия размерности" при работе с высокомерными пространствами признаков ограничивает количество признаков, которые могут быть включены на канал датчика [7]. Решение этой проблемы требует либо увеличения объема обучающих данных, либо применения методов снижения размерности, каждый из которых имеет свои ограничения.

Перспективы развития. Современные исследования указывают на несколько перспективных направлений развития ML-методов в мониторинге строительных конструкций. Интеграция физических моделей и машинного обучения представляет особый интерес, поскольку позволяет интегрировать физические принципы и доменные знания с data-driven подходами [1].

Такие гибридные подходы могут обеспечить лучшую обобщающую способность и физическую осмысленность результатов.

Transfer learning и multi-task learning представляют перспективные направления для повышения эффективности использования ограниченных данных [1]. Развитие методов переноса знаний между различными типами конструкций может значительно ускорить внедрение ML-систем в промышленность.

Развитие облачных сервисов для обработки данных и энергоэффективных реализаций ML-алгоритмов является ключевым для широкомаштабного развертывания систем мониторинга [1]. Встроенные системы с низким энергопотреблением могут обеспечить непрерывный мониторинг без необходимости в централизованной обработке данных.

Интеграция датчиков, работающих в режиме постоянного мониторинга (Smart Sensing), открывает новые возможности для создания распределенных систем мониторинга с автоматической адаптацией к изменяющимся условиям эксплуатации. Такие системы могут обеспечить анализ состояния конструкций в режиме реального времени с минимальным человеческим вмешательством.

Заключение. Проведенный анализ научной литературы показывает, что применение методов машинного обучения в области структурного мониторинга здоровья строительных конструкций переживает период интенсивного развития. От традиционных статистических подходов область эволюционировала к сложным архитектурам глубокого обучения, способным автоматически извлекать информативные признаки из сырых сенсорных данных и обеспечивать высокую точность диагностики.

Особенно перспективными представляются гибридные подходы, комбинирующие физические модели с data-driven методами, генеративные модели для решения проблемы нехватки данных, и мультимодальные системы, интегрирующие различные типы сенсорной информации. Графовые нейронные сети открывают новые возможности для моделирования сложных пространственных взаимосвязей в сенсорных массивах.

Тем не менее, ряд фундаментальных проблем требует дальнейшего исследования, включая повышение интерпретируемости моделей, разработку методов компенсации экологических воздействий, и создание энергоэффективных решений для промышленного внедрения.

Развитие области машинного обучения в мониторинге строительных конструкций требует системного подхода, включающего не только совершенствование алгоритмов, но и создание стандартизированных баз данных, разработку унифицированных метрик оценки и установление лучших практик для валидации и верификации ML-моделей в критически важных приложениях безопасности.

Данный обзор основан на анализе современной научной литературы и отражает текущее состояние исследований в области применения методов машинного обучения для выявления дефектов строительных конструкций по результатам динамического мониторинга. Представленный материал может служить основой для определения направлений дальнейших исследований и практических разработок в данной области.

Библиографический список

1. Нуман М. Успехи в мониторинге состояния конструкций: обзор подходов машинного обучения для обнаружения и оценки повреждений / М. Numan // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2024. – Т. 20, № 1. – С. 124–142. – DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-1-124-142.
2. Cao J. Composite plate damage localization based on modal parameters / J. Cao, H. Yu, J. Yan, J. Liao // *Vibroengineering PROCEDIA*. – 2022. – Vol. 40. – P. 32–37. – DOI: 10.21595/vp.2022.22382.
3. Qing X. Machine Learning Based Quantitative Damage Monitoring of Composite Structure / X. Qing, Y. Liao, Y. Wang, B. Chen, F. Zhang, Y.-S. Wang // *International Journal of Smart and Nano Materials*. – 2022. – Vol. 13. – P. 1–36. – DOI: 10.1080/19475411.2022.2054878.
4. Gillich N. Beam Damage Assessment Using Natural Frequency Shift and Machine Learning / N. Gillich, C. Tufisi, C. Sacarea, C.V. Rusu, G.R. Gillich, Z.I. Praisach, M. Ardeljan // *Sensors (Basel)*. – 2022. – Vol. 22, № 3. – P. 1118. – DOI: 10.3390/s22031118.
5. Sonbul O.S. Algorithms and Techniques for the Structural Health Monitoring of Bridges: Systematic Literature Review / O.S. Sonbul, M. Rashid // *Sensors (Basel)*. – 2023. – Vol. 23, № 9. – P. 4230. – DOI: 10.3390/s23094230.
6. Kautcz Monteiro D. Detection, Localization, and Quantification of Damage in Structures via Artificial Neural Networks / D. Kautcz Monteiro, L. Miguel, G. Zeni, T. Becker, G. Andrade, R. Barros // *Shock and Vibration*. – 2023. – Vol. 2023. – P. 1–19. – DOI: 10.1155/2023/8829298.
7. Svendsen B.T. A data-based structural health monitoring approach for damage detection in steel bridges using experimental data / B.T. Svendsen [и др.] // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. – 2021. – Vol. 12. – P. 101–115.
8. Liu J. Structural damage detection and localization via an unsupervised anomaly detection method / J. Liu, Q. Li [и др.] // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2024. – Vol. 252.

9. Sun Y. CNN-LSTM-Based Damage Localization of Plate Structure / Y. Sun, X. Zhou, Q. Long, M. Jian // *Materials*. – 2025. – Vol. 18. – P. 2081. – DOI: 10.3390/ma18092081.
10. Li X. Application of Graph Convolutional Neural Networks Combined with Single-Model Decision-Making Fusion Neural Networks in Structural Damage Recognition / X. Li, L. Xu, H. Guo, L. Yang // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – Art. 9327.
11. Lüleci F. A literature review: Generative adversarial networks for civil structural health monitoring / F. Lüleci, N. Catbas, O. Avci // *Frontiers in Built Environment*. – 2022. – Vol. 8. – DOI: 10.3389/fbuil.2022.1027379.
12. Lüleci F. Generative Adversarial Networks for Labeled Acceleration Data Augmentation for Structural Damage Detection / F. Lüleci, N. Catbas, O. Avci // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. – 2022. – Vol. 13. – DOI: 10.1007/s13349-022-00627-8.
13. Lee Y. Structural damage detection using deep learning and FE model updating techniques / Y. Lee, H. Kim, S. Min, H. Yoon // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – Art. 18694. – DOI: 10.1038/s41598-023-46141-9.
14. Qiu Y. Damage identification for bridges using machine learning: Development and application to KW51 bridge / Y. Qiu, D.W. Abueidda [и др.] // *arXiv*. – 2024. – Art. 2408.03002.
15. Alemu Y. Damage Detection with Data-Driven Machine Learning Models on an Experimental Structure / Y. Alemu, T. Lahmer, C. Walther // *Eng*. – 2024. – Vol. 5. – P. 629–656. – DOI: 10.3390/eng5020036.

УДК 69.059.3

ОБЗОР ПРЕИМУЩЕСТВ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕВОЛОКНА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Панкратов А.И., Прохорова А.В.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Бетон остается одним из наиболее востребованных строительных материалов. Для укрепления бетонных конструкций успешно используются стальные элементы. Однако в условиях суровых атмосферных воздействий металлические элементы не всегда оказываются эффективными, поэтому происходит расширение области применения инновационных материалов в строительстве.

Изучение свойств композитных материалов на основе углеволокна, а также разработка инновационных способов их применения для армирования и усиления строительных конструкций является целью актуальных научных исследований.

Клюев С. В. и Лесовик Р.В. в своих работах представляют способы усиления строительных конструкций с помощью композитов [1, 4]. Авторы разработали методику расчета изгибаемых конструкций, усиленных композитами на основе углеволокна, провели проверку обеспечения несущей способности по наклонным сечениям [1]. В работах [2, 3] был выполнен расчет площади сечения арматуры из углеродной ленты, а также проведена проверка уровня напряжений и деформаций.

Армированные углеволокном композиционные материалы, которые рекомендуют применять для усиления строительных конструкций, позволяют обеспечить достаточно высокую несущую способность [1]. Авторы отмечают, что в зависимости от состава и структуры композиционные материалы могут иметь прочность гораздо более высокую, чем у стали.

Углеволокно имеет ряд существенных преимуществ в сравнении с использованием традиционных металлических элементов [5]:

- более стойкое к перепадам температур,
- более экономичное,
- прочность углеволокна в 7 раз выше,
- на 70% легче железа.

Углеволокно наклеивается на поверхности несущих конструкций слоями, в результате чего полезный объем помещения не изменяется. Данный факт становится приоритетным при ремонте, восстановлении и усилении как гражданских, так и для производственных зданий.

Следует обратить внимание на еще одно важное достоинство конструкций, армированных углеволокном, – их влагостойкость. Для большинства конструктивных материалов восприимчивость к влаге представляет собой очень серьезную проблему, которая требует применения дополнительных технических и технологических решений.

Различают следующие технологии усиления железобетонных конструкций углеволокном:

1. Для укрепления мостов и пролетных построек характерно использование лент из углеволокна.

2. Для усиления балок, ригелей, колонн и отверстий используются холсты из углеволокна. Преимуществом холстов можно выделить его гибкость, которая позволяет придать нужную форму конструкции.

3. Для усиления железобетонных конструкций применяются сетки из углеволокна, которые являются наиболее огнеупорными. [5].

Композитный материал может быть соединен с поверхностями балок и плит для повышения расчетной изгибной прочности сечений, действуя как дополнительный, работающий на растяжение усиливающий элемент.

Поперечное сечение продольных элементов назначается из условий восприятия дефицита момента поперечным сечением ригеля. Продольные элементы в обязательном порядке анкеруются с помощью поперечных накладок, которые наклеиваются поверх продольных на концах изгибаемых элементов. [2].

Повышение несущей способности колонн на действие продольной силы может быть обеспечено наклейкой композита в поперечном направлении [2].

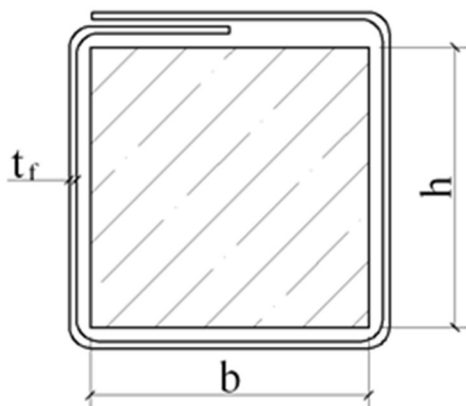


Рис. 1. Сечение армированной колонны

Для повышения несущей способности при осевом сжатии в направлении, перпендикулярном оси элемента, можно рекомендовать применение обоймы композитным материалом (рис. 1). Толщину обоймы можно определить, используя выражение

$$t_f \geq 0,5k_h \left(\frac{bh}{b+h} \right), \quad (1)$$

$$k_h = \frac{0,8(\varepsilon_{bu} - 0,004) \cdot 1,5R}{R_f \varepsilon_{fu}}, \quad (2)$$

где b и h – размеры сечения, причем $\frac{b}{h} \leq 1,5$; R_b – нормативное сопротивление бетона сжатию, кгс/см²; $\varepsilon_{bu} = 0,003$ – максимальная деформация бетона при сжатии; R_f – нормативное сопротивление композитного материала растяжению, b – ширина сечения колонны, см; h – высота сечения колонны, см; t_f – толщина оболочки из композитного материала, см [2].

При проектировании усиления должно соблюдаться условие [2]:

$$E_f \varepsilon_f \leq 0,75 R_f, \quad (3)$$

где E_f – нормативное значение модуля упругости композитного материала, кгс/см²; ε_f – нормативная деформация растяжения композитного материала.

Круговое обертывание углеволокном создает ограничение деформированию в поперечном направлении путем создания обоймы с ориентацией волокон в поперечном направлении и приводит к увеличению прочности при сжатии. При увеличении сжимающих нагрузок обойма испытывает растяжение, сдерживая развитие поперечных деформаций. Влияние продольно расположенных волокон на прочность при сжатии бетонного элемента игнорируется. Для обеспечения надежной работы обоймы требуется ее плотный контакт с элементом, при этом величина сцепления с бетоном решающего влияния не оказывает (рис. 2).

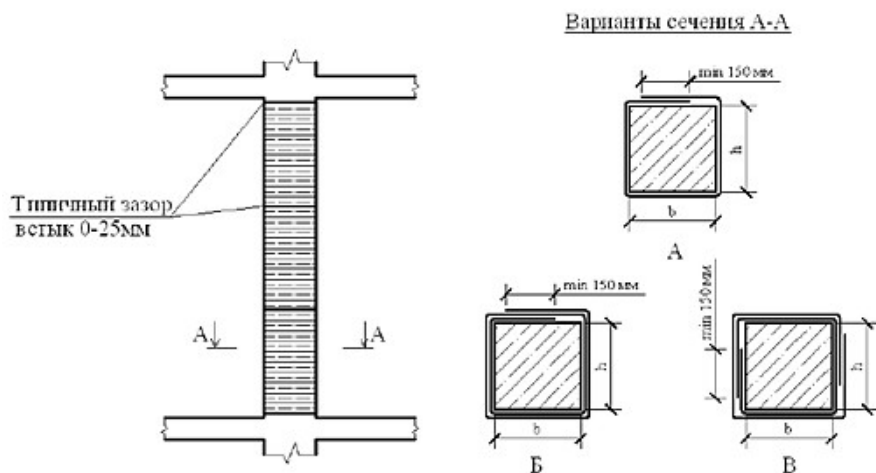


Рис. 2. Типовое решение обеспечения плотного контакта обоймы с усиливаемым элементом

Прочность на сжатие бетонного элемента с учетом напряжения в обойме σ_f можно вычислить следующим образом

$$R_{bf} = R_b \left[2,25 \sqrt{1 + 7,9 \frac{\sigma_f}{R_b} - 2 \frac{\sigma_f}{R_b}} - 1,25 \right], \quad (4)$$

где R_{bf} – прочность на сжатие бетонного элемента, кгс/см²; R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию, кгс/см²; σ_f – максимальные расчетные напряжения в обойме, кгс/см² [2].

Выражение (4) традиционно используется для расчетов усиления конструкций при использовании стальной обоймы. Исследования Ключева С. В. и Лесовика Р. В., показали, что эту зависимость можно использовать также при определении прочности бетона для бетонных элементов с обоймами из углеволокна [2].

Рассмотренные выше особенности углеволокна позволяют сделать вывод, что применение композитов в качестве инновационного способа усиления становится приоритетным при восстановлении и усилении строительных конструкций зданий и сооружений. Ключевым фактором является то, что повышенная влагостойкость этих материалов позволяет применять их в различных областях промышленности, в том числе на особо опасных промышленных объектах с агрессивными средами.

Библиографический список

1. Ключев С.В. Расчет изгибаемых конструкций, усиленных композитами на основе углеродного волокна / С.В. Ключев, Р.В. Лесовик, В.Г. Рубанов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 4. – С. 55–58.
2. Ключев С.В. Расчет строительных конструкций, усиленных углеволокном / С.В. Ключев, Р.В. Лесовик, В.Г. Рубанов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 5. – С. 54–56.
3. Ключев С.В. Усиление и восстановление конструкций с использованием композитов на основе углеволокна / С.В. Ключев // Бетон и железобетон. – 2012. – № 3. – С. 23–26.
4. Ключев С.В. Усиление строительных конструкций композитами на основе углеволокна: монография / С.В. Ключев, А.В. Ключев, Р.В. Лесовик. – Lambert, 2011. – 123 с.
5. Агапов А.А. Усиление углеволокном в 21 веке / А.А. Агапов, С.М. Есипов // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2023. – № 1–1. – С. 6–8.

УДК 504.054

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ГРАЖДАНСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ПРИМЕРЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ДЕВЕЛОПЕРА

Рагозина А.В.

СПбПУ им. Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

По данным ЮНЕП (Программа ООН по окружающей среде), на строительный сектор приходится порядка 34% глобальных выбросов углекислого газа [1]. Основной вклад в эти выбросы вносят эксплуатация зданий и инфраструктуры (отопление, кондиционирование и освещение), а также производство и использование материалов с высоким углеродным следом, таких как цемент, сталь и алюминий.

Таким образом, строительные компании призваны сыграть решающую роль в сокращении выбросов парниковых газов (далее – ПГ) от зданий и инфраструктурных проектов, поскольку они несут главную ответственность за их строительство, включая выбор материалов и компонентов энергосистем.

Основным российским законодательным инструментом, регулирующим отчетность и методику расчетов выбросов ПГ, являются Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» [2]. В качестве руководства по расчету выбросов по Охвату 3 используется Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions [3], а также Corporate Value Chain (Scope 3) Standard - международные стандарты GHG Protocol для учета выбросов ПГ.

В соответствии с методиками был произведен расчет выбросов парниковых газов за отчетные года для одного из ведущих девелоперов России. Сфера деятельности включает в себя строительно-монтажные работы, разработку проектов, реализацию квартир, продажу и аренду коммерческих площадей, инвестиции, отделку, управление построенными объектами.

При разработке реестра рассматриваются все виды парниковых газов, подлежащих обязательному учету в соответствии с Рамочной конвенцией ООН об изменении климата: диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4), закись азота (N_2O), гидрофторуглероды (ГФУ), перфторуглероды (ПФУ), гексафторид серы (SF_6) и трифторид азота (NF_3).

Основной вклад в прямые выбросы вносят выбросы диоксида углерода (CO_2) от сжигания топлива стационарными источниками (дизель-генераторные установки). Среди энергетических косвенных выбросов (Охват 2)

преобладают выбросы CO₂ от использования электроэнергии. Наибольший вклад в прочие косвенные выбросы (Охват 3) вносят выбросы от использования проданной продукции (от потребления энергии объектами недвижимости, введенными в эксплуатацию в отчетный период).

Согласно GHG Protocol, определение операционных границ включает в себя выявление выбросов ПГ, связанных так или иначе с деятельностью организации, и разделение их на следующие категории. Прямые выбросы ПГ (Охват 1) – выбросы ПГ от источников, принадлежащих организации и/или непосредственно контролируемых ею. Энергетические косвенные выбросы ПГ (Охват 2) – это выбросы от производства электрической и тепловой энергии, поступившей (приобретенной) от внешних источников и потребленной на нужды организации. Прочие косвенные выбросы ПГ (Охват 3) – это связанные с деятельностью организации выбросы ПГ от источников, принадлежащих другим организациям (лицам) или контролируемых ими, помимо источников, на которых осуществляется выработка энергии (электроэнергия, теплоэнергия) для нужд организации. Сумма этих выбросов представляет собой полный углеродный след организации, учитывающий выбросы ПГ по всей цепочке поставок.

В соответствии с рекомендациями Межправительственной группы экспертов по вопросам изменения климата (МГЭИК) [5], в большинстве случаев для количественного определения выбросов ПГ используется расчетный метод, основанный на применении формул вида:

$$E = (A \times EF_{\text{ПГ}} \times GWP_{\text{ПГ}}) \quad (1)$$

где E – выбросы парниковых газов, т CO₂-экв.; A – данные о какой-либо деятельности организации за рассматриваемый период, например, о сжигании топлива, приводящей к выбросам ПГ (activity); $EF_{\text{ПГ}}$ – коэффициент выброса парникового газа; $GWP_{\text{ПГ}}$ – потенциал глобального потепления для соответствующего парникового газа.

Для прямых и энергетических косвенных выбросов ПГ производится расчет выбросов по отдельным видам газов (диоксид углерода (CO₂), метан (CH₄), закись азота (N₂O) и гидрофторуглероды (ГФУ)), в тоннах CO₂-эквивалента с последующим суммированием. Прочие косвенные выбросы ПГ сразу рассчитываются как совокупный выброс в тоннах CO₂-эквивалента без разделения по видам ПГ.

Для всех категорий источников расчеты выбросов ПГ основаны на использовании данных о деятельности организации: внутренних отчетов о получении и распределении топлива, электрической и тепловой энергии, о поступлении основных видов строительных материалов (сталь,

бетон, кирпич и т. д.) для выполнения строительно-монтажных работ. Коэффициенты выбросов ПГ для стационарного и мобильного сжигания топлива были приняты в соответствии с методическими рекомендациями. Региональный коэффициент выброса ПГ (диоксида углерода, CO_2) для тепловой энергии, полученной от сторонних энергоисточников, был принят по данным Методики ПНСТ 646-2022 [6] с учетом местоположения потребителей энергии в г. Москва. Коэффициенты выброса ПГ для сетевой электроэнергии с разделением по ценовым зонам РФ использованы из базы данных АО «Администратор торговой системы» [7] за отчетные года. Для оценки прочих косвенных выбросов ПГ использовалась информация DEFRA [8], специализированная база данных SimaPro для оценки жизненного цикла (LCA) [9], а также собственные методики.

Результаты количественного определения выбросов ПГ расчета представлены на рис. 1.

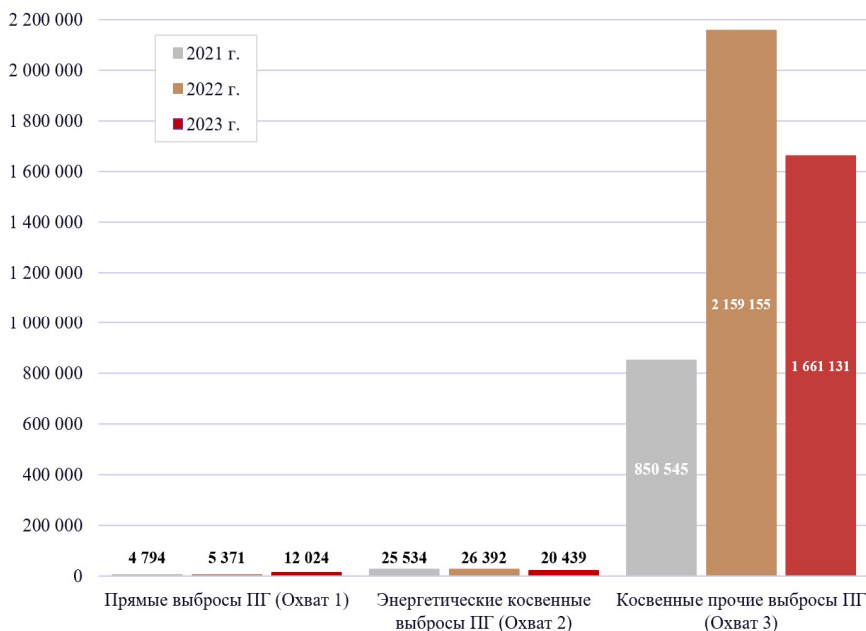


Рис. 1. Прямые и косвенные выбросы ПГ, т CO_2 -экв

Наибольший вклад в категорию прямых выбросов ПГ в 2023 г. (12 024 т CO_2 -экв., или 99,2%) внесли выбросы ПГ от стационарного сжигания топлива. Основным видом сжигаемого топлива служит дизельное топливо, используемое для работы электрических генераторов.

Доля выбросов от сжигания топлива в передвижных установках в прямых выбросах организации крайне незначительна и равна всего 99 т CO₂-экв., или 0,8% (данные 2023 г.), что объясняется небольшим количеством транспортных единиц в автопарке.

Выбросы ПГ от потребления электрической энергии со стороны составляют большую часть суммарных энергетических косвенных выбросов – 20 224 т CO₂-экв., или 98,9%, тогда как выбросы ПГ от потребления сторонней тепловой энергии эквивалентны 215 т CO₂-экв., или 1,1% суммарных выбросов Охвата 2 (данные 2023 г.). В общей сумме прямых и энергетических косвенных выбросов ПГ абсолютное большинство (в пересчете на т CO₂-экв.) приходится на диоксид углерода (CO₂) – 99,7%, тогда как на долю метана (CH₄) приходится всего 0,07%, на долю закиси азота (N₂O) – 0,19%.

Среди прочих косвенных выбросов ПГ (Охват 3) наибольший вклад имеет категория «Использование проданной продукции» – 1 249 400 т CO₂-экв., или 75,2% (данные 2023 г.), что связано со значительными объемами потребления тепловой и электрической энергии объектами недвижимости в течение срока эксплуатации. На долю косвенных выбросов от приобретенных товаров и услуг пришлось 24,0%.

Таким образом, суммарные выбросы ПГ (Охват 1+2) в течение 2021-2023 гг. изменялись незначительно, что с учетом структуры источников организации говорит об относительно стабильном потреблении основных видов топливно-энергетических ресурсов. Изменение прямых и энергетических косвенных выбросов в основном является следствием снижения потребления сетевой электроэнергии и заменой ее на собственную электроэнергию, выработанную на дизельных электростанциях. Прочие косвенные выбросы (Охват 3) являются наиболее значимой категорией выбросов ПГ и составляют 1 661 131 т CO₂-экв., или 98,1% от совокупных прямых и косвенных выбросов ПГ (Охват 1+2+3) в целом по организации (данные 2023 г.).

В заключение, была проведена комплексная оценка эмиссий парниковых газов, сопровождающих различные этапы строительной деятельности. Анализ показал, что наибольший вклад в общее количество выбросов приходится на производство строительных материалов (в частности, цемента, стали и других энергоемких компонентов), а также на этап эксплуатации зданий, особенно в условиях неэффективного энергопотребления. Применение методик, основанных на анализе жизненного цикла (LCA),

позволяет выявить ключевые источники эмиссий и количественно оценить их вклад. Расчеты, выполненные на примере типового строительного объекта, подтвердили высокую углеродоемкость традиционных строительных процессов. Полученные результаты могут быть использованы как основа для дальнейших исследований и разработки практических рекомендаций по декарбонизации строительной отрасли.

Библиографический список

1. ЮНЕП: выбросы в строительном секторе перестали расти // ЮНЕП. – URL: <https://news.un.org/ru/story/2025/03/1462381>.
2. Приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов».
3. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard // World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. – URL: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>.
4. GHG Protocol: Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard // World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. – URL: <https://ghgprotocol.org/corporate-value-chain-scope-3-standard>.
5. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. / Под ред. С. Игглестона, Л. Буэндия, К. Мива, Т. Нгара и К. Танабе // Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. – ИГЕС, Япония, 2006. – Т. 2. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html>.
6. Методика оценки снижения углеродного следа ПНСТ 646-2022, утвержденная приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26.04.2022 № 35-пнст.
7. База данных АО «Администратор торговой системы». – URL: <https://www.atsenergo.ru/>.
8. Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA (Департамент окружающей среды, продовольствия и сельского хозяйства Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии). – URL: <https://www.gov.uk/>.
9. SimaPro, LCA software. – URL: <https://simapro.com/>.

УДК 691.328: 620.193

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ БИОДЕСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Федосов С.В.¹, Петрухин А.Б.², Нармания Б.Е.¹
НИУ МГСУ, г. Москва, Россия, ²ИГПУ, г. Иваново, Россия

В рамках научной специальности 2.1.14 «Управление жизненным циклом объектов строительства» проведено множество исследований, разработаны различные методики и подходы к мониторингу технического состояния зданий и сооружений [1-3]. Однако, существуют некоторые аспекты, требующие дальнейшего изучения и развития, такие как улучшение методов прогнозирования состояния строительных конструкций и материалов с целью предотвращения аварийных ситуаций, а также разработка новых технологий для более эффективного их мониторинга.

В соответствии с указанным предметом настоящего исследования является долговечность железобетонной конструкции на протяжении жизненного цикла объекта капитального строительства под воздействием биологически активных сред с учетом внутренних и внешних факторов.

Научная гипотеза данного исследования состоит в предположении возможности управления жизненным циклом объекта строительства на всех этапах, используя инструмент прогнозирования и контроля изменения долговечности его железобетонных конструкций под воздействием биологически активных сред с учетом, изменяющихся на протяжении жизненного цикла внутренних и внешних факторов.

Жизненные циклы железобетонных зданий и сооружений (ЖБЗиС) и железобетонных несущих конструкций тесно связаны, поскольку оба элемента являются неотъемлемыми частями строительного процесса и функционирования зданий и сооружений. Данное утверждение обосновывается следующим.

Определим основные понятия предмета настоящего исследования:

Жизненный цикл железобетонных зданий и сооружений включает все стадии от проектирования и строительства до эксплуатации, технического обслуживания, демонтажа и утилизации. Он охватывает все аспекты, такие как проектирование, производство, монтаж, эксплуатация, техническое обслуживание и утилизация (рис. 1) [4, 5, 6].

Железобетонные несущие конструкции – это элементы, которые обеспечивают прочность и устойчивость сооружения. Они включают колонны, балки, плиты и другие элементы, которые воспринимают нагрузки и передают их на фундаменты [7].

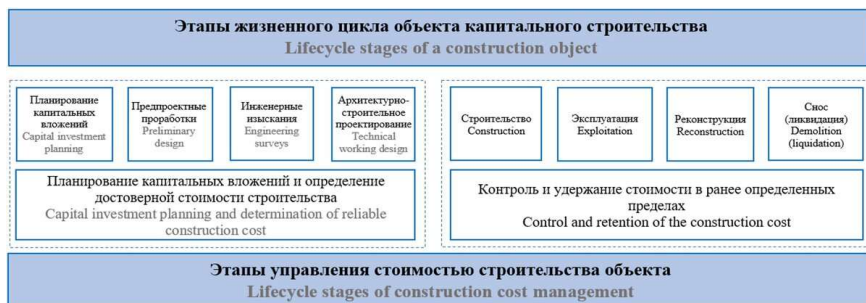
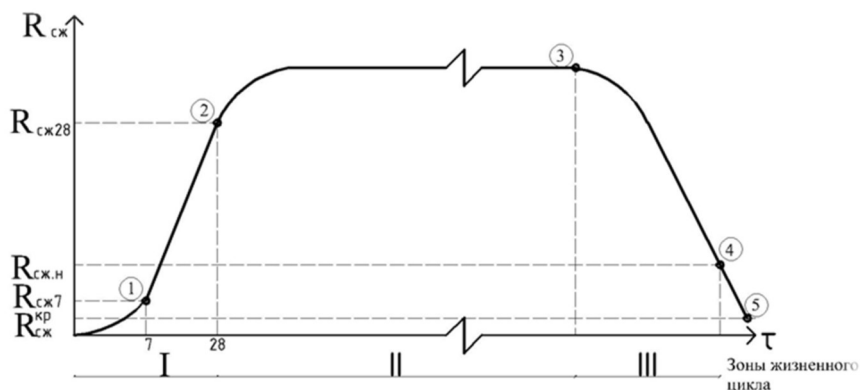


Рис. 1. Этапы жизненного цикла объектов строительства

Жизненный цикл железобетонной конструкции акцентирует внимание на трёх ключевых этапах его существования: этапе нарастания прочности, этапе эффективной эксплуатации и этапе снижения прочности и является элементом жизненного цикла ЖБЗиС (Рис. 2) [4].

Рис. 2. Графическая модель изменения прочности на сжатие $R_{сж}$ во времени жизненного цикла конструкции в период эксплуатации здания

На рисунке: I – зона нарастания прочности; «7», «28» суток – характерные отметки 1 и 2; II – зона эффективной (нормативной) эксплуатации – характерные отметки 2 и 3; III – зона снижения (потери) прочности – характерные отметки 3, 4 и 5; $R_{сжн}$ – нормативное значение прочности, при котором конструкция признается аварийной и требуется срочная ее замена; $R_{сжкр}$ – критическое значение прочности, при котором наступает неизбежное обрушение конструкции – характерная отметка 5.

Связь между жизненным циклом ЖБЗиС и несущими железобетонными конструкциями на различных этапах заключается в следующем:

- Проектирование: на этапе проектирования железобетонных зданий и сооружений особое внимание уделяется выбору и расчету несущих конструкций. Это определяет их прочность, долговечность и способность выдерживать эксплуатационные нагрузки.

- Строительство: во время строительства несущие конструкции формируются и устанавливаются в соответствии с проектными требованиями. Качество выполнения этих работ напрямую влияет на жизненный цикл всего сооружения.

- Эксплуатация: Железобетонные несущие конструкции должны обеспечивать надежность и безопасность в течение всего срока эксплуатации. Их состояние и характеристики могут изменяться под воздействием различных факторов, таких как коррозия, усталость материала и механические нагрузки.

- Обслуживание и мониторинг: Регулярный контроль состояния несущих конструкций позволяет выявить потенциальные проблемы на ранних стадиях. Это важно для продления жизненного цикла сооружения и предотвращения аварийных ситуаций.

- Ремонт и реконструкция: По мере старения и износа железобетонных конструкций может потребоваться их ремонт или модернизация. Это также влияет на общий жизненный цикл сооружения.

- Демонтаж и утилизация: В конце жизненного цикла сооружения необходимо учитывать методы демонтажа и утилизации железобетонных конструкций, что может повлиять на экологические аспекты и ресурсы.

Таким образом, жизненный цикл железобетонных сооружений и железобетонных несущих конструкций взаимосвязаны и взаимозависимы. Кроме того, качество проектирования, строительства, эксплуатации и обслуживания несущих конструкций, которые определяют жизненный цикл железобетонной конструкции, определяют долговечность и безопасность всего сооружения. Понимание этой связи важно для эффективного управления жизненным циклом и обеспечения надежности строительных объектов.

Прогнозирование биодеструкции железобетона в ЖБЗиС – это важный аспект, который помогает оценить долговечность и устойчивость конструкций к воздействию биологических факторов во времени. Биодеструкция может происходить под воздействием различных микроорганизмов, таких как бактерии, грибы и водоросли, которые могут негативно влиять на прочность и долговечность железобетона. Рассмотрим основные этапы и методы прогнозирования этого процесса:

а. Изучение факторов, способствующих биодеструкции.

Влажность: Высокий уровень влажности создает благоприятные условия для роста микроорганизмов. Изучение уровня влажности в конструкциях помогает понять риск биодеструкции.

Температура: Оптимальные температурные условия могут способствовать активному развитию микроорганизмов. Мониторинг температурных режимов в сооружениях важен для прогнозирования.

Химический состав бетона: Наличие определенных добавок или компонентов в составе бетона может влиять на его восприимчивость к биодеструкции. Анализ химического состава помогает выявить уязвимости.

б. Методы прогнозирования.

Лабораторные испытания: Исследования образцов бетона в контролируемых условиях позволяют оценить скорость и степень биодеструкции под воздействием различных микроорганизмов. Это может включать инокуляцию образцов и наблюдение за изменениями в их структуре и прочности.

Моделирование: Использование математических моделей для прогнозирования процессов биодеструкции на основе данных о внешних факторах (влажность, температура, состав) и характеристиках бетона. Модели могут учитывать динамику роста микроорганизмов и их влияние на материал.

Полевые исследования: Мониторинг состояния железобетонных конструкций в реальных условиях эксплуатации позволяет собирать данные о факторах, способствующих биодеструкции, и выявлять ее признаки на ранних стадиях.

в. Оценка рисков.

Анализ данных: Сбор и анализ данных о состоянии конструкций, уровне влажности, температуре и химическом составе бетона помогают оценить риск биодеструкции и определить наиболее уязвимые участки.

Разработка рекомендаций: на основе полученных данных и прогнозов разрабатываются рекомендации по улучшению защиты железобетона от биодеструкции. Это может включать выбор специальных добавок, обработку поверхности или улучшение вентиляции.

г. Мониторинг и управление.

Регулярный мониторинг: важно проводить регулярные проверки состояния железобетонных конструкций для своевременного выявления признаков биодеструкции и принятия мер по ее предотвращению.

Управление ресурсами: Прогнозирование позволяет более эффективно планировать ресурсы для обслуживания и ремонта, а также оптимизировать расходы на защиту конструкций.

Таким образом, прогнозирование биодеструкции железобетона в ЖБЗиС – это комплексный процесс, который требует учета множества факторов и применения различных методов. Эффективное прогнозирование позволяет не только продлить срок службы конструкций, но и обеспечить их безопасность и устойчивость в специфических условиях эксплуатации.

Контроль биодеструкции железобетона в ЖБЗиС – не менее важный процесс, который помогает выявить и предотвратить разрушение материалов под воздействием микроорганизмов. Определим основные методы и подходы, используемые для этого контроля:

а. Визуальный осмотр.

Проверка состояния поверхности: Регулярные визуальные осмотры позволяют выявить первые признаки биодеструкции, такие как трещины, отслоения и изменения цвета. Обращение внимания на участки с повышенной влажностью или затенением поможет выявить потенциальные проблемы.

б. Лабораторные исследования.

Анализ образцов: Извлечение образцов бетона для лабораторных исследований позволяет проводить микробиологические тесты, которые определяют наличие и количество микроорганизмов, способствующих биодеструкции. Это может включать микроскопию, посевы на питательные среды и молекулярные методы (например, ПЦР).

Тесты на прочность: Определение механических свойств образцов бетона, таких как прочность на сжатие и растяжение, помогает оценить степень повреждения материала.

в. Мониторинг условий эксплуатации.

Измерение влажности и температуры: Установка датчиков для постоянного мониторинга уровня влажности и температуры в конструкциях позволяет выявить условия, способствующие росту микроорганизмов.

Контроль химического состава: Анализ химического состава бетона, включая уровень pH и содержание солей, может помочь определить его восприимчивость к биодеструкции.

г. Инструментальные методы.

Ультразвуковая диагностика: Использование ультразвуковых методов позволяет оценить внутреннее состояние бетона, выявляя скрытые дефекты, которые могут быть вызваны биодеструкцией.

Рентгенография и томография: Эти методы позволяют получить изображения внутренней структуры бетона и выявить изменения, связанные с разрушением.

д. Моделирование и прогнозирование.

Математическое моделирование: Создание моделей, которые учитывают факторы, способствующие биодеструкции, позволяет прогнозировать ее развитие и оценивать риски.

Анализ данных: Сбор и анализ данных о состоянии конструкций и условиях эксплуатации помогают в разработке эффективных стратегий мониторинга и профилактики.

е. Полевые испытания.

Испытания на месте: Полевые испытания, такие как тесты на прочность или коррозионные испытания, помогают получить данные о состоянии бетона в реальных условиях эксплуатации.

ж. Регулярное обслуживание и мониторинг.

Плановые проверки: Установление графика регулярных проверок и мониторинга состояния конструкций позволяет своевременно выявлять и устранять проблемы, связанные с биодеструкцией.

Документирование и управление данными: Ведение записей о проведенных проверках, анализах и результатах позволяет отслеживать изменения в состоянии конструкций и принимать обоснованные решения о необходимых мерах.

Таким образом, контроль, как и прогнозирование биодеструкции железобетона в ЖБЗиС требует комплексного подхода, но отличается содержанием процесса, включающего визуальные осмотры, лабораторные исследования, мониторинг условий эксплуатации и использование современных инструментальных методов. Это позволяет не только своевременно выявлять проблемы и принимать меры для продления срока службы конструкций, но и обеспечить их безопасность и устойчивость в условиях эксплуатации.

Управление жизненным циклом ЖБЗиС в рамках обозначенного предмета исследования – это сложный и многогранный процесс, в котором ключевую роль играют прогнозирование и контроль биодеструкции. Эти аспекты помогают обеспечить долговечность и безопасность конструкций, минимизируя риски разрушения. Рассмотрим подробнее, как осуществляется это управление.

Прогнозирование биодеструкции начинается с оценки рисков. Специалисты анализируют условия эксплуатации, изучая такие факторы, как уровень влажности, температуру, наличие агрессивных химических веществ и микробиологических угроз. Это позволяет им оценить вероятность биодеструкции. Далее они используют математические модели для прогнозирования потенциального роста микроорганизмов и их воздействия на бетон и

арматуру, что помогает предсказать, как быстро может произойти разрушение в зависимости от условий их эксплуатации.

Исторические данные также играют важную роль в прогнозировании. Анализ предыдущих случаев биодеструкции в аналогичных условиях позволяет сделать выводы о вероятности и скорости разрушения. Долгосрочные исследования, отслеживающие изменения в состоянии бетона и арматуры на протяжении времени, помогают выявить закономерности и предсказать будущие проблемы.

Контроль биодеструкции включает в себя регулярный мониторинг состояния конструкций. Проводятся визуальные и инструментальные осмотры, которые помогают выявить первые признаки повреждений, такие как трещины или изменения цвета. Установка датчиков для измерения влажности, температуры и других факторов, способствующих биодеструкции, позволяет получать данные в реальном времени и оперативно реагировать на изменения.

Лабораторные исследования также являются важной частью контроля. Извлечение образцов бетона для анализа на наличие микроорганизмов и их влияние на прочность материала помогает оценить состояние конструкции. Тесты на прочность позволяют определить степень повреждения бетона.

Когда результаты мониторинга готовы, принимаются обоснованные решения. Сбор и анализ данных о состоянии конструкции помогают определить необходимость ремонта или замены элементов. На основе полученных данных разрабатываются планы по проведению профилактических и восстановительных работ.

Профилактика и ремонт – это следующие шаги в управлении жизненным циклом. Применение антикоррозийных и антибактериальных средств защищает железобетон от биодеструкции. В случае выявления повреждений проводятся ремонтные работы, которые могут включать инъекцию специальных составов, замену поврежденных участков и другие методы.

Документирование и управление данными также являются важными аспектами. Создание базы данных, в которой ведутся записи о состоянии конструкций, проведенных проверках и результатах анализов, помогает отслеживать изменения и улучшать процессы управления. Обучение персонала методам контроля и прогнозирования биодеструкции способствует повышению эффективности управления жизненным циклом железобетонных зданий и сооружений.

Таким образом, управление жизненным циклом железобетонных сооружений через прогнозирование и контроль биодеструкции требует системного подхода. Это включает в себя анализ условий эксплуатации,

мониторинг состояния, лабораторные исследования и оперативное реагирование на полученные данные. Такой комплексный подход позволяет не только продлить срок службы конструкций, но и обеспечить их безопасность и надежность в эксплуатации.

При этом, на каждом этапе жизненного цикла строительного объекта процесс управления неодинаков, имеет свои особенности и отличия в содержании. В соответствии с изложенными выше положениями, авторами была разработана методика управления жизненным циклом объектов строительства, основанная на использовании инструмента прогнозирования и контроля биодеструкции железобетонных конструкций, основное содержание которой было изложено авторами в ранее опубликованных работах [4, 5].

Библиографический список

1. Пасканый В.И. Моделирование бизнес-процессов инжиниринговых компаний на этапах жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта / В.И. Пасканый, А.А. Лапидус // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 11. – С. 1789–1796.

2. Теличенко В.И. Методы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с учетом влияния экологических и других видов рисков / В.И. Теличенко, А.А. Лапидус, М.Ю. Слесарев, М.М. Али // Строительство: наука и образование. – 2024. – Т. 14, № 2. – С. 166–177.

3. Лапидус А.А. Системный анализ влияния процесса инженерных изысканий при совершенствовании процесса управления жизненным циклом объектов социальной инфраструктуры / А.А. Лапидус, В.А. Локтев // Components of Scientific and Technological Progress. – 2024. – № 2 (92). – С. 28–34.

4. Федосов С.В. Организационно-технические принципы мониторинга состояния здания на этапе эксплуатации жизненного цикла / С.В. Федосов, А.А. Лапидус, А.Б. Петрухин, Б.Е. Нармания // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 1. – С. 128–138.

5. Федосов С.В. Понятие «жизненный цикл здания»: к вопросу о концептуальности / С.В. Федосов, Б.Е. Нармания, Е.Л. Смирнова, В.С. Коновалова, Н.С. Касьяненко // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20, № 4. – С. 584–595.

6. Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – 5-е изд. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 524 с.

Жизненный цикл объектов строительства [Электронный ресурс] // Яндекс.Картинки. – URL: <https://yandex.ru/images/search?lr=128682&source=serp&stype=image&text=жизненный%20цикл%20объектов%20строительства>.

СЕКЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

УДК 378.126

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ПЕДАГОГА-ЛИДЕРА В ВУЗЕ: КЛЮЧЕВЫЕ ЭТАПЫ И ОСОБЕННОСТИ

Бажутова В.О.

ТулГУ, г. Тула, Россия

В современном образовательном пространстве роль педагога выходит за рамки традиционной передачи знаний. Сегодня от преподавателя ожидается лидерство, способность вдохновлять студентов, организовывать учебный процесс и способствовать развитию личностных качеств у будущих специалистов. Процесс формирования педагога-лидера в вузе является сложным и многогранным, включающим несколько этапов и направлений развития.

Современная образовательная ситуация актуализирует важность развития педагога-профессионала, востребованного социумом, обладающего необходимыми профессиональными компетенциями, позволяющими эффективно управлять разными видами деятельности; творчески мыслящего, способного к эффективной профессиональной деятельности и проявлению лидерских позиций [1, 2, 3, 4]. Данный аспект обуславливает необходимость определения лидерского потенциала, обеспечивающего индивидуальный процесс профессионального и творческого самосовершенствования педагога и профессиональную траекторию развития [1]. Поэтому системное и целенаправленное развитие качеств лидера будущего педагога становится одним из решающих факторов профессиональной подготовки, акцентируя как содержательные, так и технологические преобразования образовательной деятельности в вузе.

Данное обстоятельство обусловило цель исследования: выявить существенные характеристики педагога-лидера и разработать педагогические условия формирования лидерских качеств обучающихся – будущих педагогов высшего образования в образовательном процессе вуза.

Объект исследования – лидерство как психолого-педагогическая характеристика личности. Субъект исследования – педагогические условия формирования лидерских качеств будущих педагогов высшего образования [2].

Важно понимать, что образование – это, прежде всего, важнейшая часть длительного процесса развития человеческой личности.

На начальных этапах студентам и будущим педагогам важно познакомиться с концепциями лидерства, его видами и особенностями в образовательной сфере. В рамках учебных программ реализуются курсы по педагогической психологии, педагогическому мастерству, управлению учебным процессом. Осознание значимости лидерских качеств формирует у студентов мотивацию к развитию личностных ресурсов.

В ходе этого процесса человек не только приобретает необходимые знания, умения и навыки, но и "впитывает" определенные культурные ценности. Термины "образование", "образ" и "образец" являются синонимами. Иными словами, с исторической и этимологической точки зрения образовательный процесс – это процесс формирования личности учащегося в соответствии с определенным образом (образцом). И этим образцом является не кто иной, как источник знаний, то есть учитель [3].

Практика играет ключевую роль в формировании педагогического лидерства. Студенты проходят стажировки, участвуют в педагогических мастер-классах, реализуют собственные проекты и инициативы. В процессе практической деятельности развиваются коммуникативные навыки, умение работать в команде, принимать решения и нести ответственность за результаты.

Роль личности педагога в образовательном процессе очень важна. Образовательный процесс – это не только процесс передачи необходимой учебной и научной информации, но и процесс взаимодействия преподавателей и студентов – процесс взаимного влияния и обмена эмоциями, идеями и опытом. Преподаватели должны не только повышать желание студентов учиться, но и максимально мотивировать их. Как показывает практика, студенты предпочитают изучать предметы, на которых преподаватель вызывает у них уважение и сопереживание. Каждый студент видит в преподавателе прежде всего человека. Совокупность знаний, накопленных учителем, и его образовательные ресурсы являются личными и индивидуальными в сознании ученика и являются выражением личности учителя. Это придает им особый смысл и значение.

Личность учителя – это как "живое зеркало", в которое часто "смотрят" ученики. В результате мировоззрение, поведение и образ жизни педагога, а также его отношение к работе так или иначе влияют на всех учеников. Поэтому педагогам важно наблюдать за собой и чувствовать, что каждый их шаг, слово и поступок находится под строжайшим контролем всех на свете [4].

Процесс формирования педагога-лидера в вузе является сложным и многогранным, включающим несколько этапов и направлений развития:

1. Теоретическая подготовка и осознание роли лидера. На начальных этапах студентам и будущим педагогам важно познакомиться с концепциями лидерства, понять его значение в образовательной сфере. В рамках учебных программ реализуются курсы по педагогической психологии, управлению образовательными процессами, развитию коммуникативных навыков. Осознание своей роли как потенциального лидера помогает сформировать мотивацию к развитию лидерских качеств.

2. Практическая деятельность и развитие профессиональных компетенций. Следующий этап – участие в практических мероприятиях: стажировках, педагогических мастер-классах, проектах с участием студентов и коллег. В ходе практики формируются навыки командной работы, управления проектами, разрешения конфликтных ситуаций. Важным аспектом является развитие инициативности и ответственности за результаты своей деятельности.

3. Внедрение инновационных методов и инициативное руководство. Педагог-лидер должен быть готов к внедрению новых технологий и методов обучения. Это включает участие в научно-исследовательской деятельности, разработку собственных образовательных программ, проведение семинаров и тренингов для коллег и студентов. Такой опыт способствует развитию лидерских качеств через инициативу и самостоятельность.

4. Менторство и наставничество. Для формирования устойчивых лидерских качеств важна практика наставничества – помощь младшим коллегам или студентам в профессиональном росте. Менторство развивает коммуникативные навыки, эмпатию и умение мотивировать других.

5. Постоянное развитие и самосовершенствование. Лидерство – это динамический процесс, требующий постоянного обучения и саморефлексии. Участие в конференциях, семинарах, обмен опытом с коллегами позволяют педагогам оставаться актуальными в своей сфере.

Процесс формирования педагога-лидера в вузе – это системный подход к развитию профессиональных и личностных качеств будущего специалиста. Он включает теоретическую подготовку, практическую деятельность, внедрение инноваций, наставничество и постоянное самосовершенствование. Такой подход способствует подготовке педагогов нового поколения – инициативных, компетентных лидеров, способных эффективно реализовывать свои функции в условиях современного образования.

Библиографический список

1. Питюков В.Ю. Что такое педагогическая технология // Воспитание школьников. – М., 1995.
2. Селевко Г.К. Современные образовательные технологии. – М., 1998.
3. Ткачев В.О. Применение компьютерных технологий на уроках английского языка // АЯШ. – 2005. – № 3(11). – С. 64.
4. Солонин С.И. Качество образования: проблемы и задачи изменения внутренней среды ВУЗа / С.И. Солонин, С.В. Кортов // Университетское управление: практика и анализ. – 2003. – № 2(25). – С. 64–69.

УДК: 691.322

ВНЕДРЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА В МАГИСТЕРСКИЕ ДИССЕРТАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Белов В.В., Смирнов М.А.
ТверьГТУ, г. Тверь, Россия

Главным инструментом повышения качества образования в техническом университете является инновационная деятельность преподавателей, студентов и сотрудников, связанная с разработкой востребованных проектов в области модернизации промышленных предприятий и подготовкой для них конкурентоспособных инженерных кадров.

Главный источник конкурентных преимуществ современной компании – инновационный потенциал персонала. Именно благодаря ему появляются прорывные инновации, которые могут вывести компанию в лидеры рынка. Хотя организации инновационной сферы зачастую предпочитают нанимать специалистов с техническим образованием, считая компетентность в области экономики и менеджмента недостаточной для руководства инновационными проектами, тем не менее таким специалистам, как правило, не хватает навыков в области инновационного менеджмента и управления проектами.

В современной системе российского технического образования пока не сформирован концептуальный подход к подготовке специалистов с компетенциями в области инновационного менеджмента. Учебные программы в этой сфере представлены по следующим направлениям:

- образование в сфере управления инновациями как базовое (подготовка бакалавров и магистров);
- образование в сфере управления инновациями как дополнение к первому высшему образованию: программы второго высшего образования, профессиональной переподготовки и повышения квалификации.

При этом обучение осуществляется в образовательных центрах, к которым относятся не только вузы, но и отраслевые центры профессиональной переподготовки, консалтинговые организации, проводящие бизнес-семинары и тренинги [1].

Наиболее широко представлены программы дополнительного и второго высшего образования в сфере управления инновациями в Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС), Государственном университете управления, Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (СПбПУ). Слушатели данных программ, как правило, имеют базовое техническое или естественнонаучное образование, обладают достаточным опытом в бизнесе и на этой основе предъявляют конкретные требования к образованию в сфере экономики и менеджмента [2].

Программы повышения квалификации специалистов (до 150 ч) и программы профессиональной переподготовки (более 500 ч) носят учебно-консультационный характер и направлены на формирование профессиональных компетенций в следующих областях:

- оценка коммерческой значимости результатов исследований и разработок;
- управление интеллектуальной собственностью;
- составление и экспертиза инновационных проектов, в том числе бизнес-планов;
- поиск стратегических партнеров и др. [3].

При этом до сих пор не достигнут консенсус в отношении того, какое базовое образование должен иметь менеджер инновационной деятельности: техническое или экономическое. Продолжается дискуссия по вопросам: в какой степени необходимы инновационному менеджеру или предпринимателю базовые технические и естественнонаучные знания, кого лучше «доучивать» для работы в инновационной сфере – специалиста с базовым естественным или экономическим (управленческим) образованием?

Согласно распространенной концепции, руководитель инновационного проекта должен обладать базовым техническим образованием и дополнительно пройти обучение в сфере управления проектом. Очевидно, что элементы такого обучения необходимо внедрять в учебные планы подготовки магистров и специалистов. В российской системе технического образования в программах магистратуры и специалитета до сих пор преобладают технические и естественнонаучные дисциплины и недостаточно компонентов инновационной направленности.

Образовательная деятельность по подготовке магистров и специалистов как инновационных инженеров, что в настоящее время является главной задачей технического университета, должна базироваться на формировании, внедрении и совершенствовании инновационных навыков у молодых специалистов технического профиля, прежде всего в рамках выпускных квалификационных работ, в частности магистерских диссертаций. Эта деятельность должна идти по пути представления выпускных квалификационных работ в форме стартапов за счет внедрения в диссертации элементов инновационного проекта и требует включения в учебные планы соответствующих дисциплин, а также использования методических приемов на всем протяжении обучения, начиная от выдачи заданий на начальном этапе и заканчивая инновационными разработками в период заключительных практик и подготовки диссертации. В отличие от традиционных образовательных методов процесс подготовки инновационных инженеров должен также иметь инновационный характер. Необходима разработка обучающих методов, которые способствуют повышению качественных показателей обучения и сокращению сроков достижения специалистами уровня инновационного инженера.

В Тверском государственном техническом университете на кафедре производства строительных изделий и конструкций одним из авторов разработан и введен в образовательный процесс подготовки магистров по направлению «Строительство», профиль «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», учебный курс «Организационно-управленческие инновации в строительстве», что чрезвычайно актуально для специалистов строительной отрасли. В этом курсе рассматриваются ключевые положения управления инновационными проектами в строительной сфере: общие вопросы развития социально-экономических систем; стратегические аспекты реализации инновационной деятельности, начиная с выявления взаимозависимостей между предпринимательством и инновационной деятельностью, до организационных стратегий инновационного предпринимательства, стратегии продвижения нововведений в условиях жесткой конкурентной борьбы; особенности рынка научно-технической продукции и поведения фирм на нем; принципы деятельности инновационных организаций и стратегии развития; мотивация персонала, участвующего в изменениях; ресурсное обеспечение инновационной деятельности.

Кроме того, вся научно-исследовательская деятельность магистрантов на кафедре в рамках соответствующих практик и самостоятельной работы, которая является основой будущих магистерских диссертаций,

начиная с выдачи индивидуальных заданий, нацелена на практическое применение и коммерческую эффективность. Этому же во многом посвящены занятия по дисциплине «Научно-практический семинар», задачами которой являются:

- ознакомление студентов с методикой разработки научных гипотез, составления программы исследований, выполнения экспериментов и их текущего анализа;

- выработка у студентов умения получения определенных результатов исследовательской деятельности, выдвижения новых идей, доведения результатов до практического использования с возможностью коммерциализации и разработки концепции инновационного проекта, передачи результатов для обсуждения научно-технической общественностью;

- привитие у студентов способности оформлять, представлять и докладывать результаты выполненной работы в форме публикаций, презентаций и устных докладов.

В итоге прохождения данной дисциплины практически все магистранты профиля ТСК на базе выполненной под руководством преподавателя кафедры научно-исследовательской работы по индивидуальной теме подготавливают инновационную разработку по образцу и подобию проектов конкурса «УМНИК», и многие из студентов успешно выступают в этом конкурсе.

Заключительное оформление магистерской диссертации с элементами инновационного проекта или стартапа магистранты профиля ТСК выполняют в рамках проектной, преддипломной практик, а также подготовки диссертации. В частности, основной целью проектной практики является закрепление студентом теоретических знаний, полученных в процессе обучения; формирование и развитие у студентов навыков разработки и анализа инновационных проектов в виде бизнес-планов и стартапов в области производства строительных материалов, изделий и конструкций. Задачами данной практики выступают:

- формирование понимания особенностей инновационной деятельности и специфических черт управления инновационными проектами;

- формирование комплекса знаний и навыков в области анализа и оценки инвестиционных инновационных проектов;

- разработка и анализ инновационного проекта в виде бизнес-плана и стартапа в области производства строительных материалов, изделий и конструкций на основе собственных научных исследований.

На преддипломной практике студенты завершают привязку своего инновационного проекта к конкретному предприятию стройиндустрии

г. Твери, Тверской области или других регионов России, что является основным содержанием научно-прикладного раздела магистерской диссертации, являющегося заключительным разделом ВКР и подводящего итоги предыдущих двух разделов: аналитического (теоретического) и научно-экспериментального.

Рассмотренные методические приемы, по мнению авторов, являются эффективным методическим инструментарием, обеспечивающим единство теоретической и практической подготовки молодых специалистов технического профиля инновационной направленности, что сегодня настоятельно требует практика отечественных предприятий и организаций от высшего технического образования.

Библиографический список

1. Зинов В.Г. Менеджмент инноваций: Кадровое обеспечение. – М.: Дело, 2005. – 496 с.
2. Гунин В.Н. Аналитические и научно-методические материалы для переподготовки и повышения квалификации кадров инновационной сферы деятельности / В.Н. Гунин, Б.Н. Киселев, С.Ю. Ляпина, А.Е. Сутормина. – М.: ГУУ, 2006. – 69 с.
3. Хомутский Д.Ю. Как измерить инновации // Управление компаний. – 2006. – № 2. – С. 15–19.

УДК 624.07

ТИМ-ТЕХНОЛОГИИ КАК МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ И ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ

Ковалев Г.Р., Теличко В.Г.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Одна из важных задач строительства – это обеспечение граждан и государства грамотной, то есть правильно спроектированной, выверенной площадью под создание городской инфраструктуры, позволяющей обеспечить человека всеми необходимыми условиями для комфортного и привычного труда, быта, отдыха; расширение территорий открытых зеленых пространств; образование здорового, удобного и эстетически привлекательного пространства. Технологии информационного моделирования (ТИМ) – это методы преобразования информации об объекте капитального строительства в одну или несколько информационных моделей. Этот процесс включает в себя инструменты, методы, рабочие процессы, знания и виды деятельности.

Благодаря использованию вышесказанных способов можно добиться повышения качества и производительности труда, автоматизации и уменьшения затрат, так как одним информационным пространством работает не один человек, а сразу несколько, поэтому при необходимости они могут сразу корректировать свои действия. Эту эффективность доказывает множество успешных проектов, созданных по всему миру [1].

Аэропорт Хельсинки, Финляндия, 2023 г. С точки зрения сервиса и удобства этот аэропорт считается одним из лучших в мире. Проект расширения второго терминала аэропорта с помощью ТИМ стартовал в 2017 году. Переделка включала в себя создание новых взлетно-посадочных полос для больших самолетов, увеличение числа парковочных мест, общей площади до 103 тыс. кв. м и объединение всех сервисов аэропорта в одном месте.

Использование ТИМ обеспечило слаженную работу на протяжении всего проекта. Все участники, производители комплектующих, строительные подрядчики, были вовлечены в еженедельный процесс обновления более 400 моделей в едином цифровом пространстве. Проектирование основывалось на обширных данных лазерного сканирования [2].

One Nine Elms, Великобритания, 2023 г. Команда применила ТИМ при проектировании подвала и цоколя в проекте One Nine Elms. Это самое высокое многофункциональное жилое здание в Европе, оно расположено в Лондоне. Трехмерная модель здания, созданная с использованием ТИМ, включала все элементы арматурной сетки, заложенной в фундамент. Армирование было очень сложным, но цифровые модели арматуры помогли строителям визуализировать возможные проблемы на самом раннем этапе. ТИМ позволили реализовать проект в срок, сократить количество изменений, минимизировать задержки и, как результат, затраты [2].

Все это возможно благодаря массе программ, которые позволяют разным отраслям создавать продукты, а потом взаимодействовать с другими сферами. Таким образом большой проект может быть делегирован, а потом собран воедино для оценки, корректировки и т.д.

Смотря на приведенные выше данные следует мыслить о выведении ТИМ в массовое использование. На данный момент студентам ТулГУ начиная с первых курсов предоставлена возможность прикоснуться к данной сфере.

Учебным планом направления «Строительство» в Тульском государственном университете предусмотрено внедрение технологий информационного моделирования посредством реализации нескольких курсов с использованием отечественного программного обеспечения. ПО «Renga», компании Аскона, первый продукт с которым знакомятся студенты первого курса. «Первый дом» – первый шаг к познанию цифрового мира, к которому необходимо готовиться все последующие курсы, да и после окончания ВУЗа по средствам переподготовки и курсов повышения квалификации. ПО «PILOT», той же компании Аскона, позволит охватить цифровые объемные пространства с нанесением инженерных сетей различной принадлежности. Работая в программе «Renga», можно познакомиться с одним из представителей ТИМ. На официальном сайте доступны методические указания по созданию первого проекта для понимания всех базовых возможностей программы.

Благодаря этой программе обучения студенты ИГДиС создали высокоточные модели 6 и 8 корпуса (см. рис. 1-4).

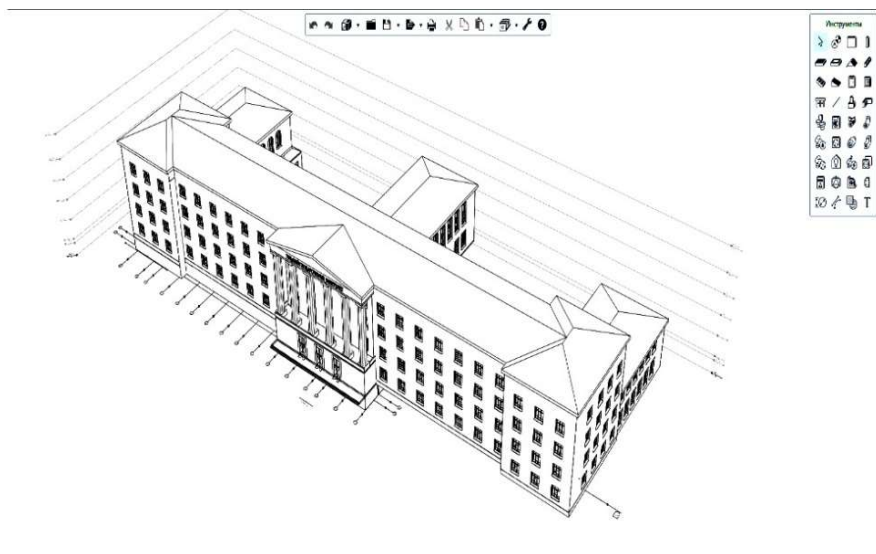


Рис. 1. Модель 6-ого корпуса ТулГУ

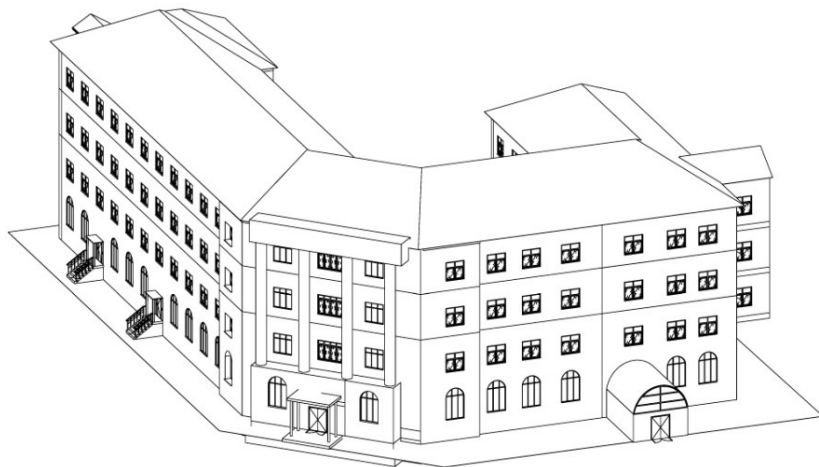


Рис. 2. Модель 8-ого корпуса ТулГУ

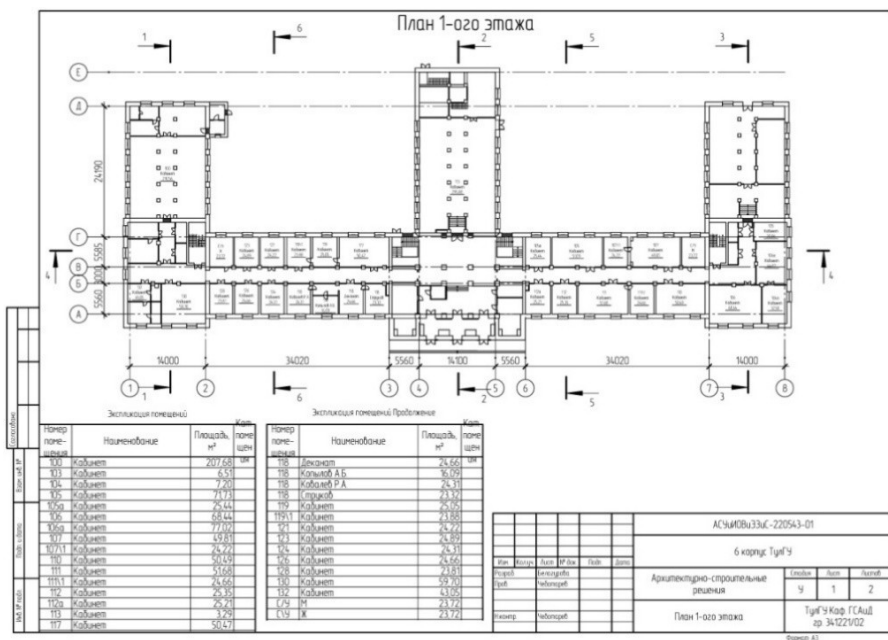


Рис. 3. План 1-ого этажа 6-ого корпуса ТулГУ

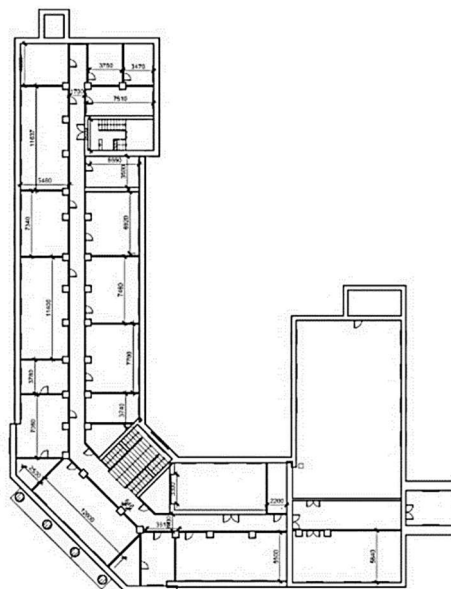


Рис. 4. План

Одним из плюсов работы в программах связанных ТИМ является хорошая совместимость. Так в вышеупомянутую программу «Renga» к созданному проекту можно импортировать ландшафт, дополнительную инфраструктуру или при необходимости добавить фурнитуру. Еще одно взаимодействие, которое необходимо внедрить при обучении в ВУЗе это взаимодействие с программами 1С, поскольку экономика пронизывает процессы проектирование строительства, реконструкции и капитального ремонта.

Использование ТИМ позволяет сократить количество проектных ошибок, снизить уровень затрат и эффективно распределить ресурсы, при этом повышается эффективность работы и сокращаются сроки строительства.

Библиографический список

1. ИНФАРС [Электронный ресурс]: группа компаний. Итоги 2023 года для Renga Software и строительной отрасли России. Перспективы и планы / Группа компаний ИНФАРС. – Электрон. дан. – [Б. м.], 2023. – URL: <https://infars.ru/news/itogi-2023-goda-dlya-renga-software-i-stroitelnoy-otrasli-rossii-perspektivy-i-plany/> (дата обращения: 15.12.2024).

2. РОСКАПСТРОЙ [Электронный ресурс]: ФАУ. 8 выдающихся ТИМ-проектов по всему миру / ФАУ «РОСКАПСТРОЙ». – Электрон. дан. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: <https://digital-build.ru/8-vydayushhihsya-tim-proektov-po-vsemu-miru/> (дата обращения: 16.12.2024).

УДК 624.04

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ В УЧЕБНОЙ, НАУЧНОЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СФЕРЕ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Овчинников И.И.¹, Овчинников И.Г.²

¹ ТИУ, г. Тюмень, СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

² УрГУПС, г. Екатеринбург, ТИУ, г. Тюмень, Россия

Современные технологии искусственного интеллекта, в частности нейронные сети, активно внедряются в образовательную сферу, трансформируя традиционные методы обучения [1-4]. Их применение позволяет персонализировать учебный процесс, автоматизировать рутинные задачи и повысить эффективность усвоения знаний. Нейросети открывают новые горизонты для образования, делая его гибким, доступным и эффективным. Однако их использование должно быть сбалансированным, дополняя, но, не заменяя человеческий фактор в обучении.

В учебном процессе, инженерном деле и научной работе могут использоваться нейросети DeepSeek Chat, Perplexity. Для того, чтобы пользоваться нейросетью DeepSeek нужно перейти на сайт: <https://chat.deepseek.com/>.

1. Рассмотрим применение нейросети для анализа положений нормативных документов.

В отечественных нормативных документах часто требования идут без каких-либо пояснений, что существенно затрудняет анализ причин, почему данные требования появились, и определения возможности отклонения от данных требований.

Проведем анализ нескольких положений СП 35.13330.2011 (с изменением 5) для примера:

Задание нейросети: в п. 5.43. СП 35.13330 с изменением 5 указано, что вертикальные упругие прогибы пролетных строений, вычисленные при действии подвижной временной вертикальной нагрузки, не должны превышать для городских и автодорожных мостов величины 1/400 от расчетной длины пролета. Поясни, откуда возникло данное требование.

Требование о предельном вертикальном упругом прогибе пролётных строений мостов **1/400 от расчётной длины пролёта** (п. 5.43 СП 35.13330) обусловлено несколькими ключевыми факторами:

1. Обеспечение комфорта и безопасности движения

- Большие прогибы под подвижной нагрузкой (автомобили, трамваи) создают дискомфорт для водителей и пассажиров, а также повышают риск потери устойчивости транспортных средств (особенно при высоких скоростях).
- Резкие колебания могут привести к ухудшению сцепления колёс с покрытием, что опасно в дождь или гололёд.

2. Защита конструкции от динамических воздействий

- При частых или чрезмерных прогибах возрастают динамические нагрузки на элементы моста (балки, плиту проезжей части, опоры), что ускоряет усталостное разрушение материалов.
- Ограничение прогиба снижает амплитуду колебаний, предотвращая резонансные явления.

3. Сохранение целостности дорожного покрытия

- Деформации пролётного строения могут вызывать трещины в асфальтобетонном слое или стыках, приводя к преждевременному износу покрытия и необходимости частых ремонтов.

4. Исторический и нормативный контекст

- Значение **1/400** основано на многолетней инженерной практике и исследованиях:
 - В европейских стандартах (например, EN 1990) аналогичные ограничения: **1/250–1/500** в зависимости от типа моста.
 - В США (AASHTO) — **1/800** для пешеходных мостов и **1/1000** для железнодорожных, но для автодорожных чаще **1/500**.

Рис. 1. Ответ нейросети

Как видно, указанные в ответе выводы логичны и приемлемы.

2. Применение нейросети для вариантного проектирования.

В инженерной практике часто применяется вариантное проектирование, то есть метод разработки нескольких альтернативных решений (вариантов) для одного объекта с последующим их сравнением по технико-экономическим показателям и выбором наиболее эффективного. Цель вариантного проектирования - найти наиболее эффективное решение, учитывая: технические требования (прочность, долговечность, эксплуатационные качества), экономическую целесообразность (стоимость строительства и содержания), сроки реализации, экологические и социальные факторы.

В мостостроении применяется для выбора схемы моста, материалов пролётных строений, типа опор и т.д.

Попробуем применить нейросеть для сравнения вариантов:

Задание нейросети: Объект: стальной автодорожный мост, три пролёта, неразрезная схема, стальная ортотропная плита, предполагаемая интенсивность движения 10000 авт/сут, регион – Саратовская область. Какую конструкцию дорожной одежды предпочтительнее использовать (литой асфальтобетон, ЩМА и т.п.). Приведи сравнительный анализ вариантов по различным показателям.

Ответ нейросети:

Сравнительный анализ конструкций дорожной одежды для стального автодорожного моста.

Объект:

- 3-пролётный неразрезной мост с ортотропной плитой.
- Интенсивность: 10 000 авт./сут (высокая нагрузка).
- Регион: Саратовская область (резко-континентальный климат: жаркое лето, холодная зима, перепады температур).

Основные требования к покрытию:

- Адгезия к стали – исключение отслоений.
- Устойчивость к деформациям – ортотропная плита «работает» под нагрузкой.
- Долговечность – минимум ремонтов при высокой интенсивности.
- Морозо- и теплостойкость – перепады от -30°C до $+40^{\circ}\text{C}$.
- Шумопоглощение – комфорт для движения.

Варианты покрытий и их сравнение

Критерий	Литой асфальтобетон (ЛАБ)	Щебеночно-мастичный асфальт (ЩМА)	Полимербетон (например, на эпоксидной основе)
Адгезия к стали	Отличная (за счёт высокой текучести при укладке)	Хорошая (требуется праймер)	Отличная (химическое сцепление)
Устойчивость к деформациям	Высокая (эластичен, не трескается при изгибе плиты)	Средняя (жестче, возможны микротрещины)	Очень высокая (но хрупкость при низких температурах)

Критерий	Литой асфальтобето н (ЛАБ)	Щебеночно- мастичный асфальт (ЩМА)	Полимербе- тон (напри- мер, на эпок- сидной ос- нове)
Износостойкость	Высокая (но мягче ЩМА)	Очень высокая (за счёт щебня)	Чрезвычайно высокая
Температуростой- кость	До +60°C (может размягчаться)	До +80°C (лучше устойчивость)	До +120°C (но плохое поведение при -20°C и ниже)
Шумопоглощени е	Среднее (гладкая поверхность)	Хорошее (шероховатость)	Плохое (гладкость, высокий шум)
Стоимость	1.0х (базовая)	1.2х (дороже за счёт щебня и полимеров)	3.0–4.0х (очень дорого)
Сложность укладки	Проще (не требует уплотнения)	Сложнее (нужен виброкаток)	Очень сложно (специальны е условия)
Ремонтопригод- ность	Легко ремонтируетс я	Средняя	Крайне сложно (требуется фрезеровка)
Применимость в Саратовской области	Лучший вы- бор (баланс цены и устой- чивости к пе- репадам тем- ператур)	Хорош, но тре- бует качествен- ного праймера	Не рекомен- дуется (риск растрескива- ния зимой)

Рекомендация для данного объекта:

- Оптимальный вариант: Литой асфальтобетон (ЛАБ).

Почему:

- Лучшая адгезия к ортотропной плите без риска отслоений.
- Устойчивость к деформациям (неразрезная система «работает» на изгиб).
- Достаточная долговечность при умеренной стоимости.
- Простота укладки в условиях моста (не нужен тяжёлый каток).
- Альтернатива: ЩМА с полимерно-битумным вяжущим (ПБВ).

Условия:

- Обязательное нанесение праймера (например, битумно-резинового) для сцепления со сталью.
 - Контроль температуры укладки (перегрев плиты недопустим).
- Отказ от полимербетона. Несмотря на долговечность, не подходит из-за:
- Хрупкости при морозах.
 - Чрезмерной стоимости.
 - Сложностей ремонта.

Дополнительные меры для надёжности

- Грунтовка стального настила: праймер типа Cold Bonding Liquid (например, от *Mastic Asphalt Council*).
- Армирование ЛАБ: добавка стальной фибры для повышения трещиностойкости.
- Устройство гидроизоляции: если применяется ЩМА, нужен слой эпоксидной гидроизоляции под ним.

Вывод: для заданных условий (стальной неразрезной мост в Саратовской области) литой асфальтобетон – наиболее сбалансированное решение. ЩМА допустим при усиленном контроле технологии, но требует больше затрат на этапе строительства.

Ответ нейросети не совсем корректен, например, есть вопросы по стоимостным показателям, но в целом доводы, приведенные в ответе логичны, и могут использоваться как база для заключения.

3. Применение нейросети для написания аннотации к статье.

Допустим, вы написали статью, и вам надо написать к ней аннотацию и выделить ключевые слова. Для сравнения возьмем уже опубликованную авторами статью: <https://t-s.today/13ts417.html> (рис.2).

Майстренко, И. Ю. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 / И. Ю. Майстренко, И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников [и др.] // Транспортные сооружения. — 2017. — Т. 4. — № 4. — URL: <https://s.today/PDF/13TS417.pdf>. — DOI: 10.15862/13TS417. (дата обращения: 12.04.2025).

Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1

Майстренко Игорь Юрьевич

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Россия, Казань
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: igor_maystr@mail.ru

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bridgeart@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Балаковский инженерно-технологический институт (филиал), Россия, Балаково
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Кокодеев Артемий Витальевич

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
Аспирант
E-mail: artemkokodeev@gmail.com

Рис. 2. Примерная статья

напиши аннотацию к статье, выдели ключевые слова, подбери УДК. Аннотация и ключевые слова на двух языках. Введение

К сожалению, аварии и разрушения строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе и транспортных сооружений (и, в частности мостов), в последнее время стали обычным явлением, о чем говорят, например, результаты анализа, проведенные авторами работ [1 - 6]. На основе этого анализа можно сформулировать следующие выводы применительно к транспортным сооружениям:

- аварии и разрушения транспортных сооружений происходили в прошлое время, имеют место в настоящее время и скорее всего, будут происходить в будущем;

Рис. 3. Запрос к нейросети (вся статья вставлена через буфер обмена) Ответ нейросети:



Аннотация

На русском:

В статье рассматриваются причины аварий и разрушений мостовых сооружений, анализируются примеры катастроф, произошедших в разных странах, и предлагаются меры по повышению безопасности транспортных конструкций. Особое внимание уделено факторам, способствующим авариям: ошибкам проектирования, нарушениям технологии строительства, недоучету нагрузок (ветровых, динамических), коррозии материалов и природным воздействиям. Приводятся примеры разрушений мостов, включая известные катастрофы (обрушение моста Тэй в Шотландии, моста Такома-Нэрроуз в США, аварии в России и других странах). Делается вывод о необходимости систематизации данных об авариях, совершенствования нормативной базы и внедрения современных методов мониторинга и диагностики.

Ключевые слова:

мостовые сооружения, аварии мостов, причины разрушений, безопасность, проектирование, строительство, эксплуатация, динамические нагрузки, устойчивость конструкций.

На английском:

The article examines the causes of accidents and failures of bridge structures, analyzes cases of disasters in different countries, and proposes measures to improve the safety of transport infrastructure. Special attention is paid to factors contributing to accidents: design errors, construction defects, underestimation of loads (wind, dynamic), material corrosion, and environmental impacts. Examples of bridge collapses, including well-known disasters (Tay Bridge in Scotland, Tacoma Narrows Bridge in the USA, accidents in Russia and other countries), are provided. The conclusion emphasizes the need for systematizing accident data, improving regulatory frameworks, and implementing modern monitoring and diagnostic methods.

Keywords:

bridge structures, bridge failures, collapse causes, safety, design, construction, operation, dynamic loads, structural stability.

УДК (Универсальная десятичная классификация)

624.21:658.382.3

(Мосты и тоннели / Безопасность и надежность сооружений)

Рис. 4. Ответ нейросети

Вывод: ответ нейросети достаточно корректен, что позволяет использовать ее для решения таких задач.

Также нейросеть может использоваться для перевода текста, для написания программного кода при обработке данных, для подбора аппроксимирующей функции, для разработки рабочей программы дисциплины и так далее.

Внедрение нейросетей в образовательную, научную, инженерную деятельность открывает новые возможности, но также ставит ряд этических вопросов и ограничений (достоверность информации, плагиат и списывание, защиту персональных данных и т.д.). Эти проблемы требуют тщательного анализа, чтобы минимизировать риски и обеспечить ответственное использование технологий.

Библиографический список

1. Шестакова Е.Б. Анализ возможностей применения искусственных нейронных сетей в инженерном образовании / Е.Б. Шестакова, П.Д. Шестаков // Путевой навигатор. – 2024. – № 58(84). – С. 36–49. – EDN KKOENS.
2. Бородин Д.В. Возможности применения нейронных сетей в строительном материаловедении / Д.В. Бородин, С.С. Рябова // Инженерные исследования. – 2022. – № 5(10). – С. 3–11. – EDN BMLSFT.
3. Никитенко В.М. Интеграция искусственного интеллекта в строительную отрасль / В.М. Никитенко, В.М. Камчаткина // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2024. – Т. 1. – С. 223–227. – EDN MGSBBH.
4. Исаев М.М. Применение нейросети в проектировании и строительстве зданий / М.М. Исаев // Университетская наука. – 2023. – № 2(16). – С. 71–73. – EDN EIQHFU.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ»..... 5

Барченкова Н.А., Карак К.А.

Оптимизация топологии трубчатой несущей системы воздушного перехода
магистрального трубопровода..... 5

Вершинин В.В., Мондрус В.Л.

Об учёте третьего инварианта тензора напряжений
при формализации прочностных свойств материала в задачах пробивания
пластины жёстким телом..... 9

Воронина И.Ю.

Влияние деформационных свойств бетона на напряженное состояние обделки
подводного тоннеля..... 17

Горбачева О.А.

Расчет гибкой пластины модифицированным
методом последовательных нагружений..... 23

Долгих Н.Г., Судакова И.А.

Математическая модель деформирования и прочности стальной стропильной
фермы с учетом современных норм проектирования РФ и Еврокодов..... 31

Дятлов В.В., Гриднев С.Ю., Скалько Ю.И.

Оптимизация размеров грунтового основания при моделировании
передачи динамического воздействия автомобильного
транспортного потока на жилые здания 37

Дятлов В.В., Гриднев С.Ю., Скалько Ю.И.

Оценка влияния образования волнового в грунтовом основании на характер
распространения вибрационной нагрузки от транспортных потоков 47

Иноземцев В.К., Редков В.И.

Оценка общей устойчивости высотного объекта
на деформируемом основании с учетом конструктивной нелинейности..... 52

Кривулина Э.Ф., Шляхова А.С.

Оценка разрушающего усилия на пористый брус 59

Кудрявцев М.А., Анциферов С.В.

Напряженное состояние массива пород вокруг напорной выработки,
расположенной вблизи горного склона 62

Мир-Салим-заде М.В.

Зарождение трещин в стрингерной пластине,
ослабленной круговым отверстием 69

Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Квасников Т.М.

Численное моделирование работы
перфорированного резинометаллического виброизолятора
с использованием языка программирования Python 75

Соколов О.О., Шагинян Г.В., Боловикова Ю.А., Левченко А.В.

Перспективы использования нелинейно-деформационной модели
при расчете двухслойных изгибаемых элементов
с высокопрочным бетоном в сжатой зоне 82

Овчинников И.И., Овчинников И.Г.

К вопросу об устойчивом проектировании мостовых сооружений 86

Саммаль А.С., Юдин С.С., Афанаскина П.М.

Аналитический метод расчета многослойной обделки гидротехнического
туннеля, сооружаемого под защитой слоя пород с более высокими
деформационными характеристиками..... 91

Синева Н. Ф., Селиванов Ф.С.

Энергетический подход в упругой устойчивости оболочек 96

Теличко В.Г., Ковалев Г.Р.

Сравнительный анализ плит перекрытия с использованием стальной
и композитной арматуры в ANSYS..... 100

Трещев А.А.

Деформирование пластины за пределами упругости
дилатирующего материала..... 104

Трещев А.А., Дорошенко Д.И.

К оценке НДС термомеханически нагруженной ортотропной
сферической оболочки с отверстием..... 108

Трещев А.А., Селезнев И.Р.

Напряженно-деформированное состояние ортотропной пластины
на упругом основании 113

Трещев А.А., Теличко В.Г., Бесстраинов Д.О.

Конечно-элементная модель нетонкой ортотропной сферической оболочки
с учетом наведенной неоднородности 117

Трещев А.А., Теличко В.Г., Бесстраинов Д.О.

Влияние полых включений на механическое поведение многослойного
ортотропного полупространства 125

Чигинская И.А., Теличко В.Г., Чигинский Д.С.

Комплексный расчёт дымовых труб
как системы «Ствол-Ростверк-Сваи-Грунт» в ПК ЛИРА-САПФИР 132

Чигинский Д.С.

Применение модели материала Concrete в ПК PLAXIS
для расчета несущей способности бетонных конструкций
с учётом требований СП 63.13330.2018..... 137

СЕКЦИЯ «ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ» 142

Барковская С.В., Краснова У.В.

Мелкозернистые бетоны с микронаполнителем из отвального
доменного шлака, вводимого суспензией 142

Белов В.В., Микаелян Х.А.

Обоснование возможности применения полимерцементного вяжущего
в конструкционном неавтоклавном газобетоне 145

Бурьянов А.Ф., Лукьянова Н.А., Булдыжова Е.Н.

Исследование возможности использования модифицированного
ангидритового вяжущего в сухих строительных смесях для стяжки пола 156

Сергеева С.Б.

Современные представления о структурообразовании
строительного гипса и способах его улучшения..... 165

Федосов С.В., Пуляев И.С., Митягина А.Н.

Экологические аспекты бетона массивных конструкций 170

СЕКЦИЯ «ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ОБСЛЕДОВАНИЕ И УСИЛЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ»..... 179

Андреева Е.Д., Прохорова А.В.

Краткий обзор исследований живучести и длительной прочности
зданий из железобетонных конструкций..... 179

Ахмаджанов М.З.

Характерные дефекты и повреждения железобетонных
мостовых сооружений в условиях сухого и жаркого климата
(применительно к республике Узбекистан) 182

Батырев К.Г.

Оценка погрешности, вносимой взаимным влиянием свай
в кусте при испытаниях свай статической нагрузкой 192

Бурковская Е.А., Федосов С.В., Лазарев А.А.

Что на сегодняшний день представляют собой убежища? 197

Воронков О.Н., Валиев Ш.Н.

Опыт применения технологий информационного моделирования
при эксплуатации мостовых сооружений 203

Гриднев С.Ю., Ненашев Д.С.

Влияние типа опорных частей пролетных строений автодорожных мостов
на сохранность их проектного положения деформировании
под воздействием солнечной радиации 207

Иванов О.А.

Современные подходы к применению методов машинного обучения
для мониторинга строительных конструкций 213

Панкратов А.И., Прохорова А.В.

Обзор преимуществ применения инновационных материалов
на основе углеволокна при восстановлении несущей способности
железобетонных строительных конструкций..... 221

Рагозина А.В.

Анализ источников выбросов парниковых газов
в гражданском строительстве на примере отечественного девелопера226

Федосов С.В., Петрухин А.Б., Нармания Б.Е.

Прогнозирование и контроль биодеструкции железобетона
как способ управления жизненным циклом зданий и сооружений231

СЕКЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ПО НАПРАВЛЕНИЮ «СТРОИТЕЛЬСТВО»239

Бажутова В.О.

Процесс формирования педагога-лидера в вузе:
ключевые этапы и особенности239

Белов В.В., Смирнов М.А.

Внедрение элементов инновационного проекта
в магистерские диссертации в техническом университете242

Ковалев Г.Р., Теличко В.Г.

ТИМ-технологии как метод оптимизации выполнения работ
и обучения студентов246

Овчинников И.И., Овчинников И.Г.

Применение нейросетей в учебной, научной и инженерной деятельности
в сфере транспортного строительства251

Для заметок

Научное издание

Актуальные проблемы строительства
и строительной индустрии

Сборник материалов XXVI Международной
научно-технической конференции
(26-27 июня 2025 г.)

Авторское редактирование

ПРИНЯТО 28.07.25 ПОДПИСАНО В ПЕЧАТЬ 04.08.205

Формат бумаги 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 21,6

Тираж 100 экз. (1-й з-д) Заказ 100

Тульский государственный университет

300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95