

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Российская академия архитектуры и строительных наук  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тулльский государственный университет»

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ**

**Сборник материалов XXIV Международной  
научно-технической конференции  
(29 , 30 июня 2023 г.)**



**ТулГУ**  
1930  
**ТУЛА**  
2023

УДК 69(062)  
ББК 38я431  
А43

**А43 Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии:** сборник материалов XXIV Международной научно-технической конференции / под общ. ред. Т.Е. Сишняной. Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. 247 с.

ISBN 978-5-7679-5271-7

В настоящем сборнике опубликованы материалы, представленные участниками XXIV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (Тульский государственный университет, 29 – 30 июня 2023 года, 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: Моисеев В.А. - президент АСРО ОПТО; Захарова И.А. - к.ф.-м.н., доц. ТулГУ; Теличко В.Г. - к.т.н., доц. ТулГУ; секретарь - к.т.н., асс. Кузнецова В.О.

#### 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., ЮЗГУ (г. Курск);

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);

Белостоцкий А.М. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., ООО «СтаДиО» (г. Москва);

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

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. - чл.-корр. 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).

УДК 69(062)  
ББК 38я431

ISBN 978-5-7679-5271-7

© Авторы сборника, 2023  
© Издательство ТулГУ, 2023

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 XXIV International  
scientific and technical conference  
(June 29 – 30, 2023)**



**Contemporary issues of engineering and building industry:** a collection of materials of the XXIV International Scientific and Technical Conference / ed. T.E. Sinitsyna. Tula: Publishing House of TulGU, 2023. 247 p.

ISBN 978-5-7679-5271-7

This package consists of articles submitted by participants of XXIV International scientific and technical conference «Contemporary issues of engineering and building industry» (Tula State University, June 29 – 30, 2023, Tula).

#### ORGANIZING COMMITTEE

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

Deputy convener: Treschev 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: Moiseev V.A. - president of the ASRO OPTO (Tula); Zaharova I.A. - candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent, Tula State University; Telichko V.G. - candidate of Technical Sciences, docent, Tula State University; secretary - Kuznetsova V.O., candidate of Technical Sciences, assistant, Tula State University.

#### PROGRAM COMMITTEE

##### Co-conveners:

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

##### Members of program committee:

Anpilov S.M. - Adv. of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Prof., NGASU (Novosibirsk); Belov V.V. - Adv. of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Prof., TSTU (Tver); Belostotsky A.M. - Corr. M. of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Prof., StaDiO LLC (Moscow); Erofeev V.T. - Academician of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Prof., NR MSU (Saransk); Monastyr'ev P.V. - Corr. M. of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Prof., TSTU (Tambov); Mondrus V.L. - Corr. M. of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Prof., NRU MGSU (Moscow); Merkulov S.I. - Corr. M. of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Prof., KSU (Kursk); Zubchaninov V.G. - Doctor of Technical Sciences, Prof., TSTU (Tver); Ovchinnikov I.G. - Academician of AT, Doctor of Technical Sciences, Prof., SSTU (Saratov); Rimshin V.I. - Corr. M. of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Prof., NRU MGSU (Moscow); Rumyantseva V.E. - Corr. M. of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Prof., IGPU (Ivanovo); Sidorov V.N. - Corr. M. of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Prof., MGSU (Moscow); Sokolova Yu.A. - Academician of the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Prof., MGSU (Moscow); Fedosov S.V. - Academician of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Prof., NRU MGSU (Moscow); Cherkasov V.D. - Corr. M. of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Prof., NR MSU (Saransk); Mueller W.H. - Doctor of Economics, Prof., Berlin Tech. University (Berlin, Germany).

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

УДК 66.013.512

### «GALAPAGOS» КАК ИНСТРУМЕНТ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ «ТЕНСЕГРИТИ»

Арутюнян Л.А.<sup>1</sup>, Севрунов И.А.<sup>1</sup>, Овчинников И.Г.<sup>2</sup>  
УрГУПС<sup>1</sup>, г. Екатеринбург,  
СГТУ им. Гагарина Ю.А.<sup>2</sup>, г. Саратов, Россия

In recent years, there has been a growing interest in parametric design and optimization, which allows designers to efficiently explore and analyze a large design space to find the optimal solution. Parametric design involves the use of parameters or variables to create a range of design options that can be evaluated and optimized using computational tools. One popular optimization tool is the *Galapagos* algorithm, which is based on evolutionary principles and allows for the optimization of multiple parameters simultaneously. The use of *Galapagos* as a parametric design tool has shown promising results in various fields, including architecture, engineering, and product design.

The main objective of this research article is to explore the application of *Galapagos* as a parametric design tool. Specifically, this research aims to investigate the effectiveness of *Galapagos* in optimizing the design of a complex object, such as a *Tensegrity*. Additionally, the research aims to identify the key factors that influence the performance of the *Galapagos* algorithm in parametric design and optimization.

The research article will test the hypothesis that the use of *Galapagos* as a parametric design tool can lead to more efficient and effective design solutions. The research questions that will guide the investigation are:

How does the *Galapagos* algorithm perform in optimizing the design of a complex object?

What are the key factors that influence the performance of the *Galapagos* algorithm in parametric design and optimization?

What are the benefits and limitations of using *Galapagos* as a parametric design tool?

The methodology for this research article involves a literature review to explore the current state of knowledge on parametric design and optimization, as well as the use of *Galapagos* in these fields. The research will then involve

the development of a parametric design problem and the implementation of the *Galapagos* algorithm to optimize the design. The performance of the algorithm will be evaluated based on the quality of the design solutions generated and the time required for optimization. Additionally, sensitivity analysis will be conducted to identify the key factors that influence the performance of the algorithm. The results of the research will be discussed in relation to the research objectives and research questions, and potential future research directions will be suggested.

Parametric design is a design process that involves the use of parameters or variables to create a range of design options that can be evaluated and optimized using computational tools [1]. It enables designers to explore and analyze a large design space quickly, efficiently, and objectively, leading to more optimized and effective design solutions.

Previous researches have demonstrated the effectiveness of parametric design and optimization in various in architecture, engineering, and product design [2]. It has been shown to improve the efficiency and accuracy of the design process, reduce errors and waste, and lead to better quality designs.

The *Galapagos* algorithm is an evolutionary optimization tool that is based on the principles of natural selection. It allows designers to optimize multiple design parameters simultaneously [3], creating a range of possible design solutions that can be evaluated and compared. The algorithm is particularly effective in complex design problems, where a large number of variables need to be considered. However, the performance of *Galapagos* is dependent on various factors, including the selection of *fitness* functions, the choice of parameters, and the quality of the initial population. Further research is needed to explore the effectiveness of *Galapagos* in different design problems and to identify the key factors that influence its performance.

The design problem in this research article involves the form finding of tensegrity structures, where the aim is to find the optimal shape of the *Tensegrity* structure (Figure 1) based on the trusses' length and maximum surface area, and then identify the optimal conditions for construction based on its mass and cross-section. The parameters of the design problem include the length of the trusses, the number of trusses, the surface area of the structure, and the cross-section and mass of the *Tensegrity* structure.

The parametric design approach involves the creation of a parametric model that uses variables and equations to define the relationships between the parameters of the design problem. This approach enables the generation of multiple design options based on different combinations of the parameters (Figure 2), allowing for an efficient exploration of the design space.

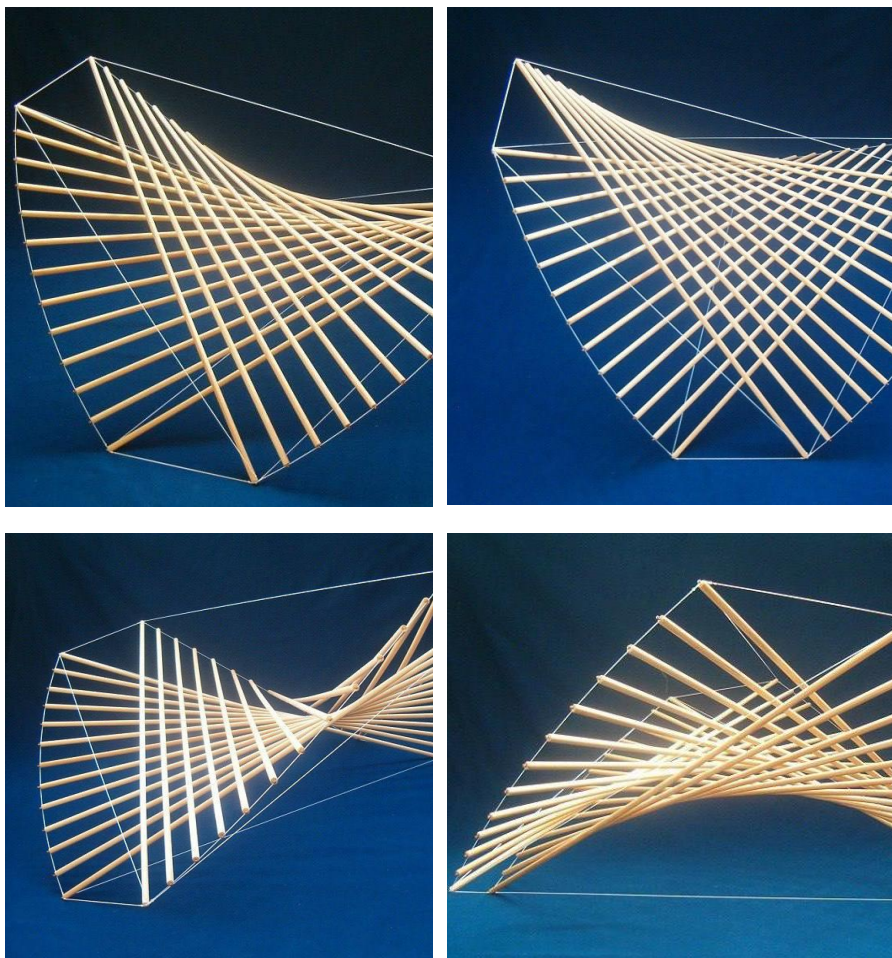


Fig 1. Tensegrity sample. (<http://www.tensegriteit.nl/e-zadel.html>)

The *Galapagos* algorithm was used to find optimal solution by changing the parameters *Length* and *Strength* which involve to the shape of parametric model (connected in *Genome* input (Figure 4)). The parameters used in the *Galapagos* implementation included the length of the trusses, the cross-section of the structure, and the mass of the structure. Constraints were also defined to ensure that the design solutions were feasible, including maximum and minimum limits on the trusses' length and maximum surface area. Fitness functions were defined to evaluate the quality of the design solutions, based on the maximum surface area of the structure and the minimum mass of the structure.





As was mentioned before: In the "Genome" input, we specify all the coefficients that regulate the characteristics of "Length" and "Strength". However, the information connected to the "Fitness" input is not as obvious and requires additional elaboration, as this input must contain a comparative parameter for selection.



Fig. 4. node *Galapagos*.

To create a characteristic that can be used as a fitness function in the "*Galapagos*" node, several principles should be followed:

By adhering to the above principles, a characteristic can be created that will be effectively used as a fitness function in the *Galapagos* node in *Rhinoceros*.

Based on the above principles, the following characteristic was developed:

The essence of the function is the opposition of two mutually exclusive parameters:

- The length of the cables, which tends towards 0;
- The surface area, which tends towards infinity.

The algorithm, pursuing these goals, finds the most advantageous shape of the structure that can be used as a starting point. The use of this function allows reducing the time and resource costs in the search for the optimal form. After successfully finding the desired shape, the selection of the cross-section of the rods and cables can be carried out. For this purpose, the *Karamba3D* plugin can be applied.

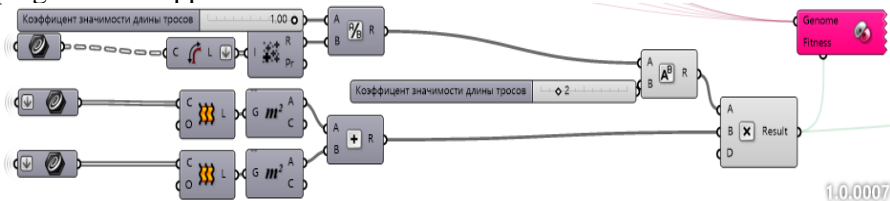


Fig. 5. Algorithm for *Galapagos*

The computational environment used in this research article was *Grasshopper*, which is a visual programming language and environment that is integrated with the 3D modeling software, *Rhino*. The parametric model was created using *Grasshopper*, and the *Galapagos* algorithm for *Grasshopper*. The model was evaluated using the *Kangaroo2* physics engine, which enabled

the simulation of the structure's behavior and ensured that the design solutions were stable and feasible.

The methodology used in this research article demonstrated the effectiveness of parametric design and the *Galapagos* algorithm in solving complex design problems, such as form finding of *Tensegrity* structures. The use of *Grasshopper* and *Kangaroo2* enabled the creation of a sophisticated parametric model that could generate a range of design options and evaluate their feasibility and stability. The *Galapagos* algorithm optimized the design solutions efficiently, leading to more effective and efficient tensegrity structures' construction. The methodology used in this research article can be applied to other design problems, demonstrating the potential of parametric design and optimization tools in the field of engineering and architecture.

The optimization process involved the implementation of the *Galapagos* algorithm to find the optimal solutions for the *Tensegrity* structure's form finding and construction. The algorithm was used to search for the optimal combination of truss length, that maximized the structure's surface area and minimized length, while also ensuring its stability.

The analysis and interpretation of the results showed that the parametric design approach and the *Galapagos* algorithm were effective in optimizing the tensegrity structure's form finding. The results also demonstrated the importance of using optimization tools to achieve the best design solutions, highlighting the benefits of integrating computational tools in the design process. The optimized solutions were compared with previous designs and benchmarks to evaluate their effectiveness.

In conclusion, the results showed a significant improvement in surface area and mass compared to the initial designs and previous benchmarks, indicating that the parametric design approach and the *Galapagos* algorithm were successful in optimizing the tensegrity structure's form finding (Figure 6). The comparison also highlighted the potential of this approach in creating innovative and efficient designs that were not achievable using traditional design methods. The methodology used in this research article can be applied to other design problems, demonstrating the potential of parametric design and optimization tools in the field of engineering and architecture.

The results of this research article have several implications for the design problem and the application of *Galapagos* as a parametric design tool. First, the optimized solutions demonstrated the potential of using parametric design and optimization tools to create efficient and effective *Tensegrity* structures. Second, the use of *Galapagos* as a parametric design tool allowed for the

exploration of multiple design solutions and the optimization of design parameters, leading to more innovative and efficient designs.

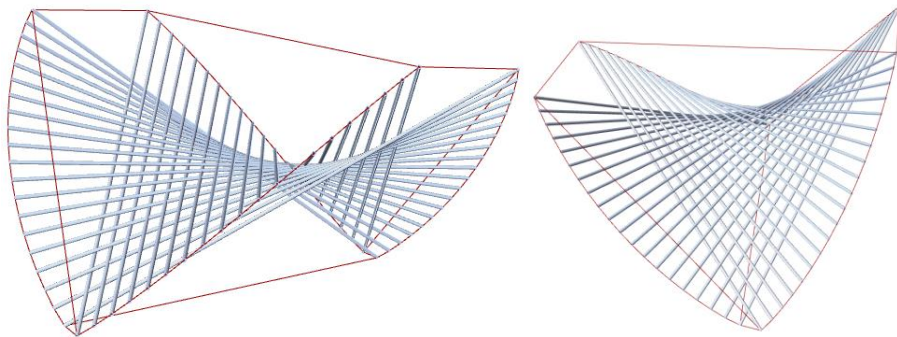


Fig. 6. Result after applying solution of *Galapagos*

Despite the promising results, there are some limitations and challenges associated with the parametric design approach and the use of *Galapagos* as an optimization tool. One of the main challenges is the complexity of the optimization process, which requires a significant amount of computational power and time. Another challenge is the need for a thorough understanding of the design problem and the optimization parameters, as incorrect or inadequate parameters can lead to suboptimal solutions. Finally, the approach is limited by the accuracy of the computational models used, which can introduce errors and inaccuracies in the optimization process.

Overall, the research contributes to the growing body of knowledge on the use of parametric design and optimization tools in engineering and architecture. The implications of the research for the broader field of parametric design and optimization are significant. The results of this research can inform the development and application of parametric design and optimization tools in other fields, such as product design and manufacturing.

Future research and development can build on the findings of this research article to further explore the potential of parametric design and optimization tools in engineering and architecture. One suggestion for future research is to investigate the potential of using other optimization algorithms and tools to optimize design parameters and explore multiple design solutions. Additionally, future research can explore the integration of machine learning and artificial intelligence algorithms into the optimization process to improve the accuracy and efficiency of design solutions. Finally, future research can investigate the application of parametric design and optimization tools to other

design problems, highlighting the potential of these tools to enhance efficiency and innovation in the field of design.

#### Библиографический список

1. Monedero J. Parametric design: a review and some experiences //Automation in construction. - 2000. - Т. 9. - №. 4. - С. 369-377.
2. Dasari S. K. et al. Computational approach for form-finding optimal design //Architecture, Structures and Construction. - 2022. - С. 1-11.
3. Eltaweel A., Yuehong S. U. Parametric design and daylighting: A literature review //Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2017. - Т. 73. - С. 1086-1103.

УДК 69.07

### **О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В НОРМАХ РФ**

Быстров Н.С., Овчинников И.Г.  
*УрГУПС, г. Екатеринбург, Россия*

Каждый год во всем мире происходят сильные землетрясения, которые несут за собой человеческие жертвы и большие экономические последствия. Сейсмологическая теория изучается уже более века с целью минимизировать последствия землетрясений. В начале 20 века в этой области был достигнут значительный прогресс, благодаря этому началось активное развитие новых численных методов оценки землетрясений [1]. Недавние трагические землетрясения, которые произошли в феврале 2023 года в Турции и Сирии, показали актуальность данной темы и на сегодняшний день.

Сейсмолог Пол Эрли однажды точно подметил: «Обычно людей убивают не сами землетрясения, а здания». Именно поэтому ученые по всему миру уделяют особое внимание вопросу о расчете зданий на устойчивость к сейсмическим воздействиям [2,3]. Исследования причин разрушения зданий при землетрясениях позволяют наработать опыт, который в дальнейшем оказывают положительное влияние на снижение аварийности объектов строительства.

Анализ повреждений, несущих конструкций у строительных объектов в Турции и Сирии, позволило определить причины их масштабных разрушений:

- Возникновение высоких значений ускорения грунта;
- Реализация проектов без сотрудничества с опытными инженерами;

- Некомпетентность органов инспекций, которые должны были производить контроль качества во время производства работ;

- Применение арматуры из гладкого профиля. Данная арматура не обеспечивает нужного сцепления с бетоном;

- Отсутствие закольцованности хомутов, используемых в колоннах или балках и их редкий шаг;

- Несоответствие проектной марки бетона фактической. Это связано с проблемами проверки качества бетонной смеси, которую привозят с завода, а также с плохим уходом за бетоном на строительной площадке во время проведения работ;

Данные факторы необходимо учитывать и при строительстве в России, так как в состав страны входят сейсмически опасные зоны, в которых в любой момент может произойти землетрясение.

Для возможности строительства зданий и сооружений всейсмически опасных районах производят расчеты на прочность и устойчивость, с учетом особого сочетания нагрузок. При этом для повышения надежности зданий используют: системы сейсмоизоляции, особые конструктивные и объемно-планировочные решения.

Сейсмическое воздействие отличается от других трудностью его точного моделирования в расчетной схеме. Оно носит случайный характер, поэтому невозможно точно предсказать какое воздействие будет оказывать влияние на проектируемый объект. Россия и другие развитые страны разработали собственные своды правил, которые применяются при строительстве в сейсмически опасных районах.

В нормах РФ при расчете зданий и сооружений на сейсмические воздействия, в зависимости от важности объекта, рассматриваются два случая - максимальное расчетное землетрясение и проектное землетрясение.

Проектное землетрясение - землетрясение с максимальной интенсивностью на площадке строительства, которое повторяется один раз в 100 лет.

Максимальное расчетное землетрясение - землетрясение с максимальной интенсивностью на площадке строительства, которое повторяется один раз в 500 лет.

В зависимости от уровня ответственности объекта в нормах Российской Федерации выделяют два метода расчета - прямой динамический анализ и линейно-спектральный. В СП 14.13330.2018 реализован расчет по линейно-спектральному методу.

Линейно-спектральный метод построен на основе концепции спектра ответа. Спектр ответа (спектр отклика) однокомпонентной акселерограммы - функция, связывающая между собой максимальное по модулю

ускорение одномассового линейного осциллятора и соответствующий этому ускорению период (либо частоту) собственных колебаний того же осциллятора, основание которого движется по закону, определенному данной акселерограммой.

Расчётная сейсмическая нагрузка, при применении линейно-спектрального метода определяется по формуле:

$$S_{ik}^J = K_0 \cdot K_1 \cdot S_{0ik}^J \quad (1)$$

где  $K_0$  - коэффициент, учитывающий назначение и ответственность сооружения;  $K_1$  - коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения объекта;  $S_{0ik}^J$  - значение сейсмической нагрузки, определяемые в предположении упругого деформирования конструкций по формуле:

$$S_{0ik}^J = m_k^j \cdot A \cdot \beta_i \cdot K_\Psi \cdot \eta_{ik}^J \quad (2)$$

где  $m_k^j$  - масса здания или момент инерции соответствующей массы здания;  $A$  - значение ускорения в уровне основания, принимаемое равным 1,0; 2,0; 4,0 м/с<sup>2</sup> для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов соответственно;  $\beta_i$  - коэффициент динамичности;  $K_\Psi$  - коэффициент, характеризующий способность объекта к рассеиванию энергии;  $\eta_{ik}^J$  - коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по  $i$ -й форме, от узловой точки приложения рассчитываемой нагрузки и направления сейсмического воздействия.

В наших нормах, спектры ответов представлены в виде кривых, которые имеют зависимость от периода колебаний осциллятора, расположенного на разных типах грунта. Для оценки сейсмических воздействий вводится такое понятие как «спектральный коэффициент динамичности», зависимость которого представлена на рисунке 1.

Важно отметить, что многие российские ученые придерживаются мнения о том, что спектральные динамические коэффициенты, представленные в сводах правил РФ, не соответствуют характеристикам возможных землетрясений и поэтому не могут быть рекомендованы в качестве исходных данных для расчёта [4,5,6]. Кривые, представленные в наших нормативных документах, имеют значительное отличие от экспериментально обоснованных спектров, которые применяются в других странах. Для развития методов расчета на сейсмические воздействия авторам российских норм необходимо выпустить научные труды, в которых будут подробно описаны процессы получения спектральных кривых и представлена их достоверность при применении на практике.

Данная информация поможет конструкторам лучше понять физический процесс расчета строительных конструкций при землетрясениях и убедиться в надежности российских норм.

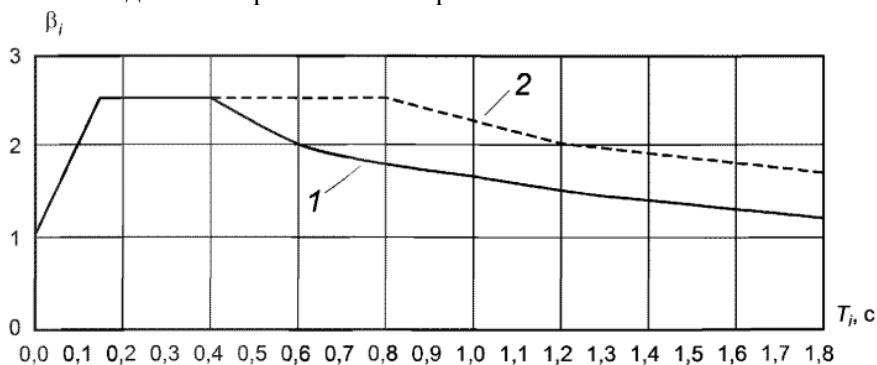


Рис. 1. Спектральный коэффициент динамичности  $\beta_1$  [1].

Прямой динамический метод позволяет произвести расчет на заданные акселерограммы с использованием прямого интегрирования без разложения по формам, что дает более точный результат. По нормам РФ прямому динамическому анализу подвергаются только здания и сооружения 1 и 2 категорий сложности. Это связано с тем, что линейно-спектральный метод нельзя использовать для расчета систем с большим периодом собственных колебаний, таких как: большепролетные здания, мосты и т.п.

При реализации прямых динамических расчетов с применением акселерограмм за основу принимаются данные о землетрясениях, вызывающих колебания с преобладающими периодами, величины которых близки к периодам первой формы собственных колебаний проектируемого объекта.

**Заключение.** Динамический расчет методом прямого интегрирования уравнений движения выполняется для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности. Для расчета зданий и сооружений нормального уровня ответственности при сейсмических воздействиях, согласно действующим нормам РФ, применяется линейная спектральная теория. В эту теорию введено понятие спектрального динамического коэффициента. Данный коэффициент на сегодняшний день вызывает много споров из-за того, что нигде не объясняется как были получены формулы и кривые коэффициентов динамичности. На сегодняшний день, ключевым этапом развития сейсмостойкого строительства в РФ является разработка научных трудов, в которых будут описаны этапы

получения спектрального коэффициента динамичности и подтверждена его достоверность при практическом применении. Если же выпуск данных трудов не планируется, то необходимо рассмотреть возможность перехода на обоснованные теории зарубежных стран.

#### Библиографический список

1. Амосов А.А. Основы теории сейсмостойкости сооружений / А.А.Амосов, С.Б.Синицын. - М.: Изд-во АСВ, 2010. - 134 с.
2. Волосухин В.А. Сейсмостойкость строительных объектов и гидротехнических сооружений: учеб. пособие / В.А.Волосухин, В.П.Дыба, В.Н.Моргунов. - Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. - 166 с.
3. Earthquake Engineering. Theory and Implementation with 2015 International Building Code. Nazzal S. Armouti, Ph. D. PE.
4. Курбацкий Е.Н., Мондрус В.Л. Динамические коэффициенты или спектры ответов? Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений». 2019. № 3. С. 28-34.
5. Курбацкий Е.Н., Мазур Г.Э., Мондрус В.Э. Спектры ответов (спектры максимальных реакций) на землетрясения, но не коэффициенты динамичности при задании сейсмических воздействий // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений». 2019. № 6. С. 19-25.
6. Курбацкий Е.Н. Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения. Теория и приложения. Москва 2018.

УДК 539.3

### УСТОЙЧИВОСТЬ ОБОЛОЧЕК С НИЗКОЙ СДВИГОВОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

Иноземцев В.К., Синева Н.Ф.

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

Низкая сдвиговая жесткость материалов поперечном направлении характерна для конструктивных строительных материалов, особенно для новых композитных материалов и многослойных пакетов, созданных из разных по свойствам слоев.

Низкая сдвиговая жесткость конструкционного материала оболочки характеризуется отношением модуля сдвига в поперечном направлении  $G$  к модулю Юнга  $E$ , значение которого может достигать величины  $G/E = 1/100$ .

Устойчивость пологой оболочки может быть исследована при учете больших прогибов оболочки при действии поперечной нагрузки с позиций нелинейной теории.



Нелинейная теория основана на нелинейной связи деформаций с перемещениями в срединной поверхности оболочки. Перемещения  $U, V$  точек срединной поверхности отсчитывают вдоль линий кривизны  $x, y$ ; кривизны обозначены  $k_x$  и  $k_y$ , функция перемещений  $W$  (по нормали к срединной поверхности), функция усилий обозначена  $F$ . Размеры в плане прямоугольной оболочки обозначены  $a$  и  $b$ ,  $h$  - толщина,  $q$  распределенная нагрузка.

Нелинейная система уравнений теории пологих оболочек в смешанной форме.

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

где

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

Классическая кинематическая гипотеза Кирхгофа-Лява предполагает, что при деформировании оболочки ее поперечное сечение остается плоским и нормальным к срединной поверхности оболочки. Низкая сдвиговая жесткость поперечного сечения оболочки приводит к развитию деформаций поперечного сдвига, при котором поперечное сечение поворачивается на угол сдвига и искривляется (рис. 1).

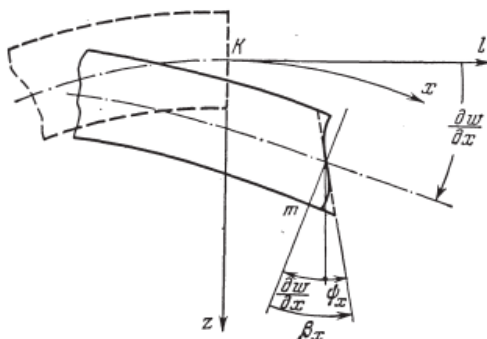


Рис. 1. Поворот поперечного сечения оболочки

Дифференциальные уравнения равновесия и граничные условия получим на основании вариационного принципа Э.Рейснера [1].

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta_{u_j \sigma_{ij}} (R - T) - \delta A dt = 0. \quad (3)$$

Здесь  $R$  - функционал Рейснера вида

$$R = \iint_S \left\{ \sum_{k=1}^2 \sum_{h_k}^2 \int \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left[ \sigma_{ij} \xi_{ij} - \frac{1}{2} \Pi(\sigma_{ij}) \right] dx_3 \right\} dx_1 dx_2;$$

$s$  - поверхность:

$$\begin{aligned} \Pi(\sigma_{ij}) &= a_{11}^k (\sigma_{11})^2 + a_{22} (\sigma_{22}) + 2a_{12} \sigma_{11} \sigma_{22} + \\ &+ (G_{12})^{-1} (\sigma_{12})^2 + (G_{13})^{-1} (\sigma_{13})^2 + (G_{23})^{-1} (\sigma_{23})^2; \\ a_{ii} &= (E_i)^{-1}; a_{ij} = -\nu(E_i)^{-1}; i = 1, 2; j = 1, 2; i = j; \end{aligned}$$

кинетическая энергия  $T$ :

$$T = \frac{1}{2} \int \int_S \int_h \sum_{j=1}^3 \rho_k (U_j)^2 dx_3 dx_2 dx_1, \rho - \text{плотность материала.}$$

Вариация работы внешних сил  $A$ :

$$\delta A = \iint_S \int_h \sum_i^2 \sum_j^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} \delta U_j^0 dx_3 dx_2 dx_1 + \iint_S P \delta U_3^0 dx_2 dx_1,$$

здесь: первое слагаемое - работа контурных нагрузок, второе - работа поперечной нагрузки, приложенной на поверхности оболочки.

Вариационное уравнение позволяет получить естественные условия на контуре, начальные условия и систему дифференциальных уравнений движения, описывающих свободные и вынужденные колебания двухслойных пластин. Эта система в случае статики описывает напряженно-деформированное состояние двухслойных пластин. Из условия равенства нулю коэффициентов при вариациях напряжений в выписанном вариационном уравнении, получаются физические соотношения.

Полагая равными нулю коэффициенты при независимых вариациях перемещений в вариационном уравнении и, вводя функцию усилий  $F$ , можно записать следующую систему дифференциальных уравнений с учетом инерции изгиба. Система дифференциальных уравнений равновесия для двухслойной конструкции будет иметь вид:

$$\sum_{k=1}^2 \int_{h_k} \sigma_{ij} dx_3 = \delta_{ij} \nabla^2 F - F_{,ij}; \quad \nabla^2 = (*)_{,11} + (*)_{,22}; \quad (4)$$

$$M_{11,11} + 2M_{12,12} + M_{22,22} + P = 0 \quad M_{11,1} + M_{12,2} - Q_1 = 0.$$

Полученные выражения для деформаций соответствуют уточненной модели пластины, обладающей низкой сдвиговой жесткостью, которая описывается нелинейной кинематической моделью. Построенная нелинейная кинематическая модель, как частный случай, позволяет получить линейную кинематическую модель и классическую модель прямых нормалей.

Сопоставим результаты расчета оболочки с кривизной  $k_x = k_y = 18$ , полученные на основе гипотезы модели Кирхгофа-Лява (график 1 на рис. 2), и модели с учетом деформации поперечного сдвига, при  $\frac{a^2 G}{h^2 E} =$  (афик 2 на рис. 2). Графики 1 и 2 на рис. 2 построены для центральной точки квадратной в плане оболочки.

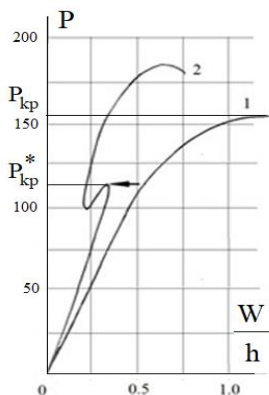


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета оболочки

$P_{кр}$ - критическая нагрузка на рис. 2 - для классической кинематической модели (Кирхгофа-Лява),  $P_{кр}^*$ -критическая нагрузка при низкой сдвиговой жесткости оболочки в поперечном направлении. Здесь можно отметить, что в предельной по нагрузке ( $P_{кр}^*$ ) точке на графике 2 переход к удаленному состоянию равновесия происходит в форме «выпучивания» вверх центра оболочки.

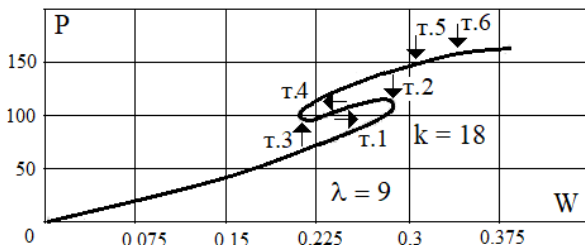


Рис. 3. Изменение формы деформирования поверхности оболочки.

Рассмотрим изменение формы деформирования поверхности оболочки для различных уровней нагружения. На рис. 4 показано изменение формы оболочки в виде отношения вертикального перемещения поверхности оболочки к значению перемещения в центре плана оболочки.

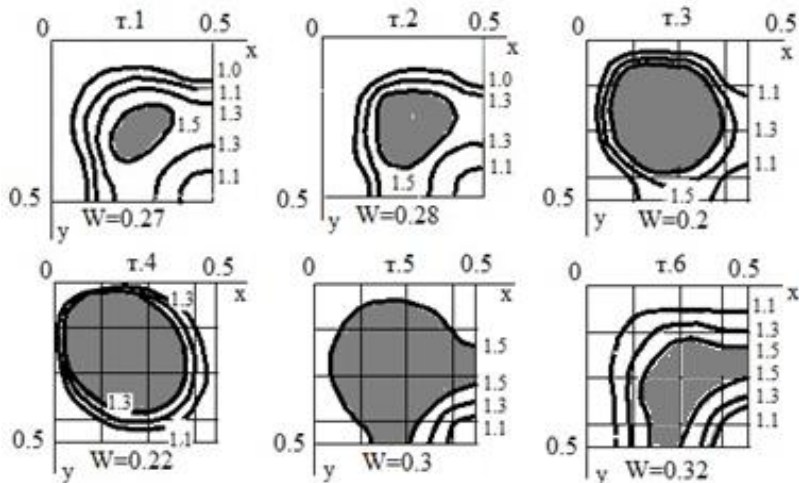


Рис. 4. Изменение формы оболочки

Здесь можно видеть, что максимальный прогиб оболочке развивается не в центре плана оболочки, а в «четвертях» ее плана, при этом центр оболочки «выпучивается» вверх. Такое явление некоторые авторы называют «местной потерей устойчивости».

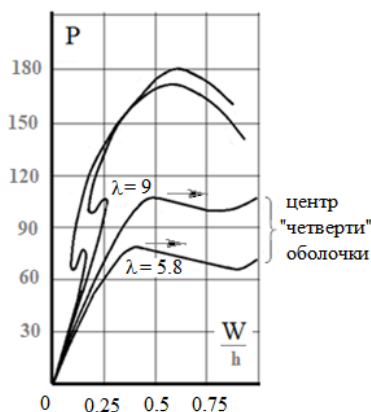


Рис. 5

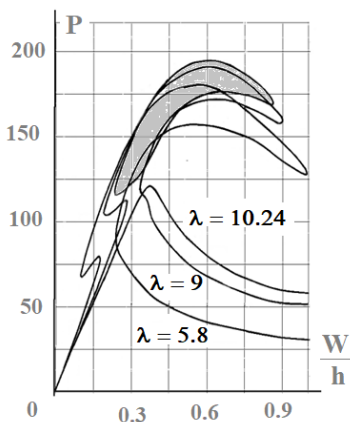


Рис. 6

Рост физико-геометрического параметра ( $\lambda = 10,24$ ) повышает критическую нагрузку. При этом появляется изолированное решение нелинейной задачи (рис. 7).

При возрастании сдвиговой жесткости поперечного сечения оболочки изолированные решения «стягиваются» в точку, а нелинейное решение совпадает с решением на основе классической модели (рис. 7).

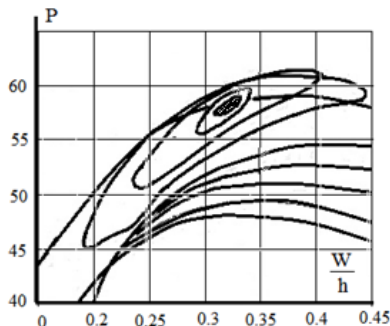


Рис. 7. Изолированное решение нелинейной задачи

Устойчивость состояний равновесия на ветвях нелинейных решений рассмотрим с позиций энергетического подхода. В этом случае исследуется изменение полной потенциальной энергии системы при ее отклонении от положения равновесия.

В положении равновесия полная потенциальная энергия оболочки, нагруженной консервативной системой сил, имеет стационарное значение, при этом, согласно теореме Лагранжа, положение равновесия будет устойчивым, если в этом положении потенциальная энергия минимальна по отношению к значениям энергии для всех смежных отклоненных состояний. Положение равновесия не будет устойчивым во всех случаях, если потенциальная энергия имеет стационарное, но не минимальное значение.

Полная энергия упругой системы  $\mathcal{E}$  представляет собой сумму потенциальной энергии деформации  $U$  и изменения потенциала нагрузки  $V$ , равного взятой со знаком минус работе внешней нагрузки  $R$ , производимой при деформировании оболочки:

$$\mathcal{E} = U + V = U - R.$$

Скажем характер изменения полной потенциальной энергии для оболочки, рассматриваемой как система с одной степенью свободы, деформированное состояние которой полностью определяется одним независимым параметром прогиба оболочки в центре (рис. 8).

На рис. 9 графиками 1, 2, 3, 4, 5 показан характер изменения энергии Э для уровней нагрузки равных 132; 209; 336; 400. Как видно по поведению графиков 1, 2, 3 положения равновесия, соответствующие заданным уровням нагрузки, являются устойчивыми на восходящей ветви графика «нагрузка-прогиб» (9) и неустойчивыми на нисходящей ветви.

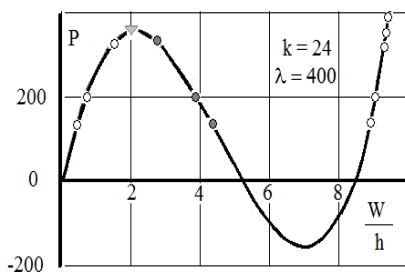


Рис. 8

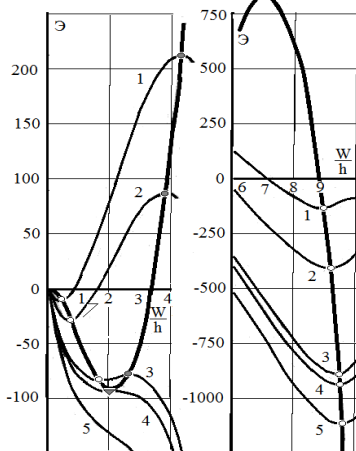


Рис. 9

Устойчивые положения равновесия на первой восходящей ветви отделены от устойчивых равновесных состояний на второй восходящей ветви значительным «энергетическим барьером» (графики 1 и 2), который снижается при повышении уровня нагружения (график 3). При достижении уровнем нагружения значения критической нагрузки, график изменения энергии имеет точку перегиба (график 4), при этом новое устойчивое равновесное состояние оболочки переходит на вторую восходящую ветвь. При значениях уровня нагружения превышающих критическое значение (график 5), устойчивые равновесные состояния на второй восходящей ветви устойчивы не только по отношению к близким равновесным формам, но и к равновесным формам, отвечающим любым конечным прогибам.

Изложенный путь исследования устойчивости положений статического равновесия используется во всех других более сложных случаях поведения оболочки, в том числе для систем со многими степенями свободы.

Результаты исследования устойчивости равновесных форм в закри-тической области деформирования представлены на рис. 10, где при  $\lambda = 9$  графиками 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 показано изменение энергии оболочки

вблизи положений равновесия при значениях нагрузки равных 99,6: 103,5: 107,3: 119: 140: 175: 184. Как показывают графики равновесные закритические состояния устойчивы, и существует третья восходящая ветвь со своей верхней критической нагрузкой. В случае образования замкнутого изолированного закритического решения (рис. 11), что происходит при  $\lambda = 10,24$ , по-прежнему три устойчивых восходящих ветви решения с соответствующими им тремя предельными критическими точками.

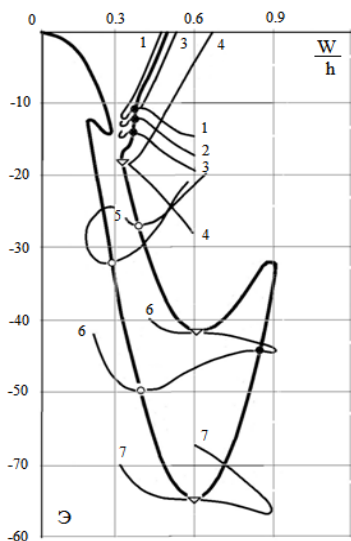


Рис. 10

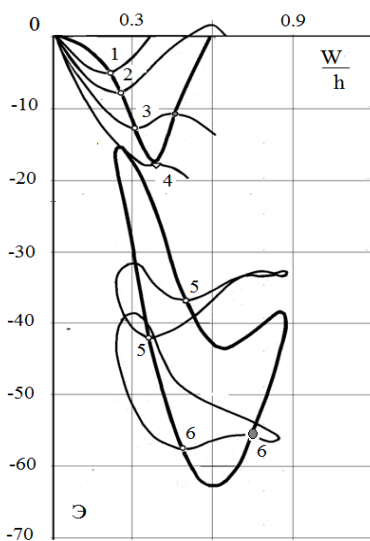


Рис. 11

На рис. 12 представлено изменение полной потенциальной энергии в области первой верхней предельной по нагрузке точки и начального закритического поведения. Графиками 1, 2, 3, 4, 5, 6 показаны энергетические уровни оболочки соответствующие следующим значениям нагрузки; 73: 91,2: 99,6: 103,5: 107,3: 111. Первая предельная точка соответствует критической нагрузке при которой исходное равновесное состояние на первой восходящей ветви переходит в состояние безразличного равновесия по отношению к смежному состоянию равновесия, при этом практически не существует энергетического барьера между исходным безразличным состоянием и соответствующим данному уровню нагрузки устойчивым состоянием равновесия на второй восходящей ветви. Здесь следует отметить, что уровни энергии вблизи первой критической нагрузки на устойчивых ветвях в области неоднозначности

решения по нагрузке (рис. 12) отличаются незначительно. Энергетический барьер, препятствующий переходу оболочки из одного равновесного состояния в другое, почти отсутствует. Эта тенденция сохраняется при сопоставлении энергетических уровней основного и изолированного решений (рис. 12).

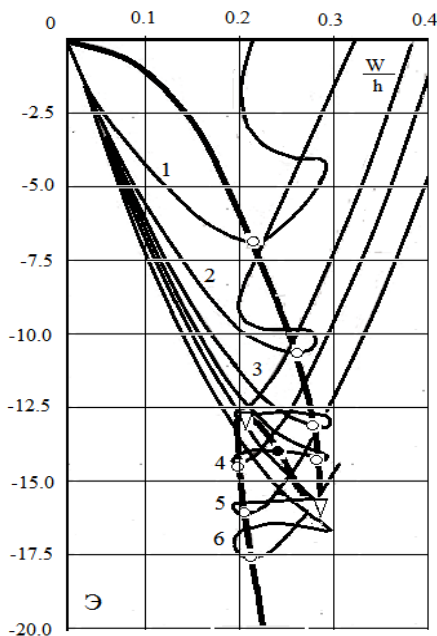


Рис. 12. Сопоставление энергетических уровней основного и изолированного решений

Таким образом, реализуемая равновесная форма такой оболочки в области первой критической нагрузки в известной мере является неопределенной. Данное состояние будем определять как состояние «множественности» равновесных форм. В данном примере оболочка, очевидно, может находиться в любом из трех найденных равновесных устойчивых состояниях, соответствующих одному и тому же значению нагрузки, близкому к критическому значению.

#### Библиографический список

1. (Reissner E., On a variational theorem in elasticity, J. Math and Phys., №2, 1950.



УДК 721.021.23

## **ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Кастырина А.А., Чигинский Д.С.  
*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Проблема надежности технических систем существует уже, как минимум, несколько десятилетий. Создание и использование систем и моделей без специальных мер по обеспечению их надежности не имеет смысла. Опасность заключается не только в том, что новая сложная техническая система не будет работать, но главным образом в том, что отказы в ее работе, в том числе и неправильная работа, может привести к катастрофическим последствиям. С учетом этого при проектировании, изготовлении и эксплуатации систем должны предприниматься соответствующие меры, обеспечивающие повышение надежности этих систем.

Факторы, влияющие на надежность при проектировании [1]:

- количество и качество элементов в модели оказывает влияние на надежность. Увеличение количества используемых элементов приводит к резкому ухудшению надежности;
- режим работы элементов. Самые надежные элементы, работающие в тяжелом, не предусмотренном для их применения режиме, могут стать источником частых отказов. Для каждого элемента устанавливаются технические условия на режим работы этого элемента;
- применение стандартных и унифицированных элементов резко повышает надежность модели.

Факторы, влияющие на надежность в процессе эксплуатации:

- квалификация обслуживающего персонала;
- внешние условия;
- на надежность влияет фактор времени.

Для построения любой модели важно определение структуры системы - совокупность связей между элементами системы, ограничивающих их взаимодействие. Классический подход к изучению взаимосвязей предусматривает рассмотрение их как отражение связей между отдельными подсистемами. Этот подход рассматривается при создании простых объектов предметной области. Реальный объект разбивается на отдельные подсистемы, то есть выбираются исходные данные  $D$  системы, моделируются и ставятся цели  $C$ , отражающие отдельные стороны процесса моделирования. По сути совокупности исходных данных ставится цель моделирования отдельной стороны функционирования системы. На базе этой цели формируется некая компонента  $K$ , а совокупность

компонент объединяется в модель М [2]. Диаграмма построения связей между отдельными подсистемами математической модели показана на рисунке 1.

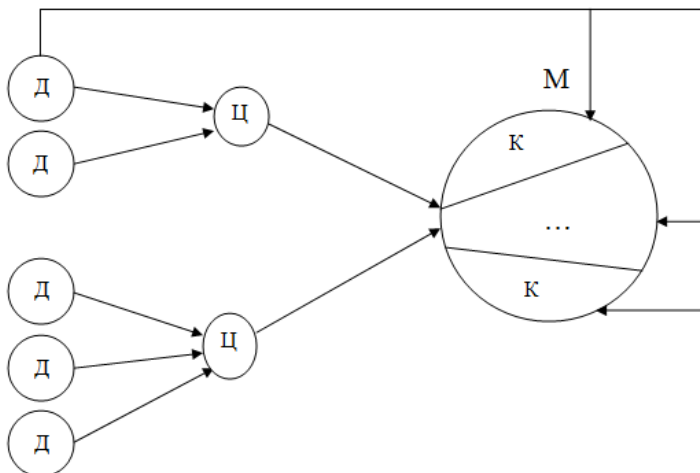


Рис. 1. Диаграмма создания математической модели

На примере диаграммы для математической модели составлена диаграмма для информационной модели здания. На рисунке 2 показаны структурные составляющие с момента начала реализации проекта до создания полноценной модели.

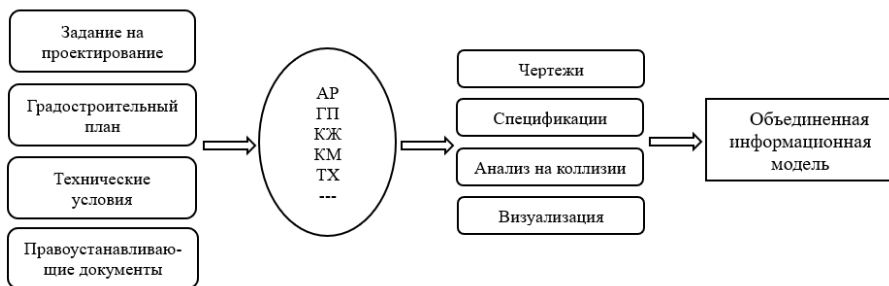


Рис. 2. Диаграмма создания информационной модели здания

Для создания надежной модели в процессе ее создания BIM-отделом выполняются проверки. Модель проверяется в определенной последовательности. Если этап не проходит проверку, то модель отправляется на доработку. Не допускается переход к следующему этапу до тех пор, пока не устранены замечания по предыдущим этапам проверки [3].

**Рабочие наборы.** Все элементы модели должны находиться в правильных рабочих наборах. Системы, разделы проекта должны находиться в разных рабочих наборах. Минимальный перечень рабочих наборов заносится в файл BIM-отделом при подготовке файла.

Если на 3D-виде отразить один рабочий набор системы, то на вид должны попасть все элементы этой системы, без пробелов. Для наглядности инструмент отображения рабочих наборов показывают разными цветами (рисунок 3).

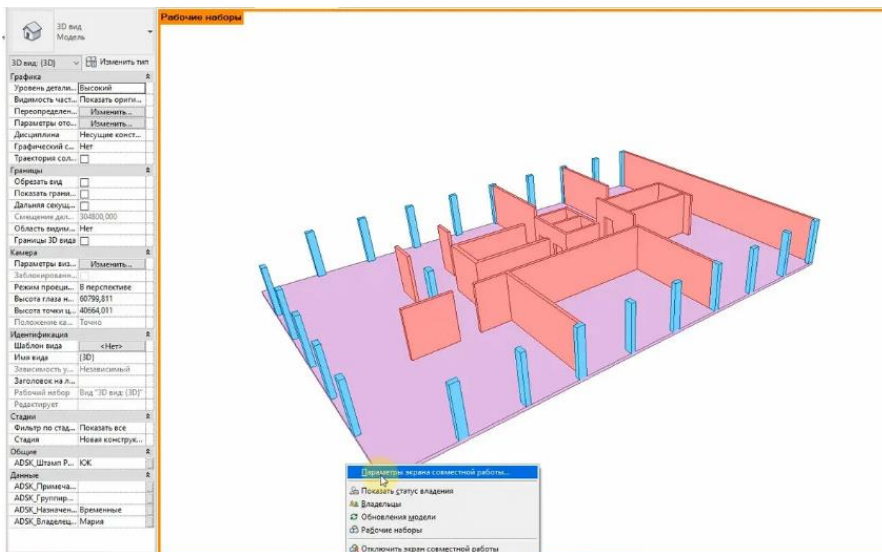


Рис. 3. Рабочие наборы в Revit

**Привязка элементов.** В модели не должно быть элементов, привязанных к неправильным уровням. Необходимо следить за тем, чтоб не моделировать элементы с привязкой к временным уровням, дублирующим уровням, перемещенным уровням. Переименование уровня иногда приводит к нарушению целостности систем.

**Целостность систем.** Все элементы, входящие в систему, должны правильно соединяться друг с другом, образуя единую систему. Количество, тип и наименование систем должно соответствовать ВЕР. Как правило, при подготовке файла в него заносится все возможные системы, которые будут использоваться при моделировании. Системы определены в соответствующих типоразмерах. Все элементы, образующие инженерную систему, должны соединяться через правильно настроенные соединители.

Если элементы не соединяются, то нужно обращать внимание на следующее:

- элементы не выравнены;
- не настроена трассировка;
- размеры соединителей элементов не совместимы;
- соединители принадлежат разным системам;
- соединители имеют направления (внутрь, наружу), которые не совпадают.

**Инженерные решения.** Системы должны быть построены в соответствии с принятыми техническими решениями. На этом этапе проверяются сечения, правильность типа используемого оборудования, правильность соединения элементов между собой. Ответственный за данную проверку - главный специалист по соответствующему разделу и главный инженер проекта.

**Коллизии.** Как правило, допуски на коллизии описываются в ВЕР или EIR в виде матрицы коллизий. Это таблица, в которой указано элементы каких категорий могут пересекаться друг с другом и насколько мм. Коллизии обычно проверяются, когда системы уже собраны и проверены на правильность технических решений. Нет смысла проверять пересечения, если в последствии окажется, что система построена неправильно. Коллизии со смежными системами проверяются в последнюю очередь.

Таким образом, рассмотрен некоторый инструментарий, позволяющий обеспечить надежность информационных моделей зданий и сооружений на всех этапах их жизненного цикла. Следует отметить, что разработка информационных моделей с учётом требований к их надежности позволяет рассчитывать на существенное сбережение материальных и временных ресурсов на последующих этапах проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

#### Библиографический список

1. Надежность информационных систем // Helpiks: сайт. - URL: <https://helpiks.org/4-38871.html> (дата обращения: 15.06.2023)
2. Есиков Д.О. Способы повышения устойчивости функционирования вычислительной системы // Молодежные инновации: сб. статей 7-й молодеж. науч.-практич. конф. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016
3. Этапы проверки качества моделей BIM-отделом // dzen: сайт. - URL: <https://dzen.ru/a/YpdLTdEW4mmf8w6k> (дата обращения: 15.06.2023)

УДК 539.3: 620.193:669

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ И ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ СПЛАВА ТИТАНА

Кузнецова В.О.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Титановые сплавы, не проявляющие изначально чувствительности к виду напряженного состояния, в ходе насыщения водородом приобретают наведенную зависимость деформационных и прочностных свойств от вида напряженного состояния с неоднородностью по направлениям градиентного воздействия среды. Свойства наведенной изменяющейся во времени разностойчивости важно учитывать при расчете элементов конструкций из титановых сплавов, работающих в условиях агрессивной водородосодержащей среды.

Рассмотренные модели конструкций, эксплуатирующихся в водородосодержащей среде, в работах Овчинникова И.Г. [1] представляют собой совокупности следующих элементов: модели конструктивного элемента, модели материала, модели воздействия среды и предельного состояния. На базе этого подхода в данной статье исследуется напряженно-деформированное состояние круговой цилиндрической оболочки, выполненной из титанового сплава ТС5, с учетом свойств водородного охрупчивания.

Объектом исследования является тонкостенная цилиндрическая оболочка кругового сечения из  $\alpha$ -сплава титана ТС5, нагруженная внутренним давлением (рис. 1).

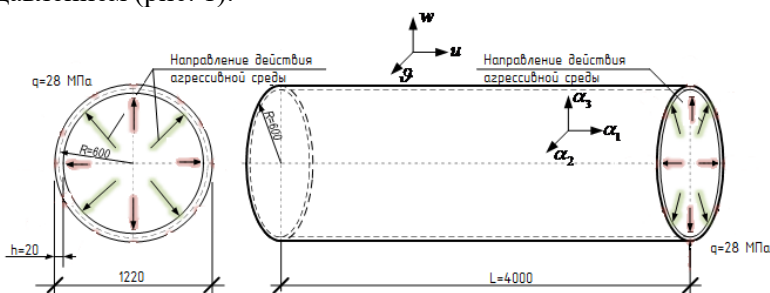


Рис. 1. Схема оболочки

Цилиндр жестко заземлен по торцам и имеет следующие геометрические параметры: длина вдоль образующей  $L=4$  м, радиус  $R=0,6$  м, к-кривизна оболочки, толщина оболочки  $h=0,02$  м. Нагрузка принималась

в интервале  $q = 0 \dots 28$  МПа. Для определения положения произвольной точки на срединной поверхности используем систему Гауссовых координат  $\alpha_1, \alpha_2$  и  $\alpha_3$ , для удобства далее обозначим  $\alpha_1 = X_1, \alpha_2 = \theta, \alpha_3 = z$ . Для описания перемещений произвольной точки тела цилиндрической оболочки введем триаду  $u, \mathcal{Q}, w$ , где  $u$  - перемещения вдоль оси образующей оболочки,  $\mathcal{Q}$  - окружные (круговые) перемещения,  $w$  - радиальные перемещения, соответствующие понятию прогиба для рассматриваемой оболочки.

Для оценки поведения цилиндрической оболочки при больших прогибах, в соответствии с гипотезами Кирхгофа-Лява и Кармана и ввиду осевой симметрии рассматриваемой задачи по силовым и деформационным параметрам, геометрические соотношения для срединной поверхности представим в виде [3]:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5(w_{,11})^2; \quad \varepsilon_\theta = kw; \quad \chi_1 = -w_{,11}; \quad e_1 = \varepsilon_1 + z\chi_1; \quad e_\theta = \varepsilon_\theta. \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_\theta$  - относительные деформации вдоль соответствующих осей,  $\chi_1$  - кривизна оболочки.

Рассмотрим нормированное пространство, связанное с октаэдрической площадкой. Напряженное состояние в нем определяется модулем вектора полного напряжения на этой площадке  $S_0$ , углом  $\psi$ , который образует вектор  $S_0$  с нормалью к этой площадке, и углом  $\phi$  - фазой напряжений [3]:

$$S_0 = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma = \sigma_{ij}\delta_{ij} / 3$  - среднее напряжение или нормальное октаэдрическое;  $\tau = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} / 3$  - касательное октаэдрическое напряжение;  $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$  - девиатор напряжений;  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера. Для удобства при описании состояний деформируемых сред рекомендуется перейти от углов  $\psi$  и  $\phi$  к их тригонометрическим представлениям:  $\xi = \cos \psi = \sigma / S_0$ ;  $\eta = \sin \psi = \tau / S_0$ ;  $\cos 3\phi = \sqrt{2} \det(S_{ij}) / \tau^3$ ;  $i, j = 1, 2, 3$ .

Кинетический потенциал деформаций запишем в виде [5]:

$$W_1 = (A_e(\lambda) + B_e(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_e(\lambda) + D_e(\lambda)\xi + E_e(\lambda)\eta \cos 3\phi)\tau^2 + \\ + [(A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta \cos 3\phi)\tau^2]^n, \quad (3)$$

где  $A_e(\lambda)$ ,  $B_e(\lambda)$ ,  $C_e(\lambda)$ ,  $D_e(\lambda)$ ,  $E_e(\lambda)$ ,  $A_p(\lambda)$ ,  $B_p(\lambda)$ ,  $C_p(\lambda)$ ,  $D_p(\lambda)$ ,  $E_p(\lambda)$  - функции, определяющие физико-механические характеристики материала, фигурирующие в записи потенциала квазилинейной и нелинейной частей и зависящие от степени насыщения водородом.

Материальные функции определяются из опытов по одноосным растяжению и сжатию следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} A_e(\lambda) &= 3[A_1(\lambda) + C_1(\lambda)]; & C_e(\lambda) &= 3[A_1(\lambda) - C_1(\lambda) / 2]; \\ B_e(\lambda) &= \sqrt{3}[B_1(\lambda) + 2D_1(\lambda)] & D_e(\lambda) &= \sqrt{27}B_1(\lambda); \\ E_e(\lambda) &= \sqrt{1,5}[B_1(\lambda) - D_1(\lambda)]; & A_p(\lambda) &= 3[A_2(\lambda) + C_2(\lambda)]; \\ C_p(\lambda) &= 3[A_2(\lambda) - C_2(\lambda) / 2]; & B_p(\lambda) &= 3[B_2(\lambda) + 2D_2(\lambda)]; \\ D_p(\lambda) &= \sqrt{27}B_2(\lambda); & E_p(\lambda) &= \sqrt{1,5}[B_2(\lambda) - D_2(\lambda)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Взаимосвязь тензоров деформаций и напряжений получим из выражения потенциала (3), применив к нему формулы Кастильяно:

$$e_{kk} = \frac{\partial W_1}{\partial \sigma_{kk}}; \quad 2\varepsilon_{ij} = \gamma_{ij} = \frac{\partial W_1}{\partial \tau_{ij}}; \quad (i, j, k = 1, 2, 3; i \neq j); \quad (5)$$

С учетом принятых модельных гипотез оболочки, связь деформаций с напряжениями представляется в виде:

$$\begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix}; \quad [A] = \begin{bmatrix} A_{11}(\lambda) & A_{12}(\lambda) \\ A_{21}(\lambda) & A_{22}(\lambda) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Обращая матричные уравнения (6), получим зависимости напряжений от деформаций:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \end{Bmatrix}; \quad [B] = \begin{bmatrix} B_{11}(\lambda) & B_{12}(\lambda) \\ B_{21}(\lambda) & B_{22}(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $[B] = [A]^{-1}$ ;  $A_{11}, A_{12}, \dots$  - компоненты симметричной матрицы податливостей  $[A]$ , являющиеся функциями, содержащими потенциал деформации  $W_1$  (3), зависящими от вида напряженного состояния и степени наводороживания титанового сплава. Эти компоненты определяются следующим образом:

$$A_{11}(\lambda) = \{2[R_1(\lambda) + 2R_3(\lambda)] / 3 + R_2(\lambda)\xi[3 - 2\xi^2] / 3 + R_4(\lambda)[\xi(2 - \eta^2) / 3 +$$

$$\begin{aligned}
 & +4(\sigma_{11} - 2\sigma_{22}) / 9S_0] + R_5(\lambda)[\eta \text{Cos } 3\phi(1 + \xi^2) + \\
 & \quad + 2\sqrt{2}\xi - 2\text{Cos } 3\phi - \sqrt{2}\sigma_{22} / S_0] \} / 3 \\
 A_{12}(\lambda) = & \{2[R_1(\lambda) - R_3(\lambda)] / 3 + [R_2(\lambda) + R_4(\lambda) / 3]\xi + \\
 & \quad + R_5(\lambda)[\text{Cos } 3\phi(1 - \eta) - \sqrt{2}\xi] \} / 3 \quad ; \\
 A_{22}(\lambda) = & \{2(R_1(\lambda) + 2R_3(\lambda)) / 3 + R_2(\lambda)\xi[3 - 2\xi^2] / 3 + \\
 & \quad + R_4(\lambda)[\xi(2 - \eta^2) + \\
 & \quad + 4(\sigma_{22} - 2\sigma_{11}) / 9S_0] + R_5(\lambda)[\eta \text{Cos } 3\phi(1 + \xi^2) + \\
 & \quad + 2\sqrt{2}\xi - 2\text{Cos } 3\phi - \sqrt{2}\sigma_{22} / S_0] \} / 3 \quad ;
 \end{aligned}$$

$$R_k(\lambda) = L_{ek}(\lambda) + n[(A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi)]^{n-1} L_{pk}(\lambda) ;$$

$$L_{m1}(\lambda) = A_m(\lambda) ; L_{m2}(\lambda) = B_m(\lambda) ; L_{m3}(\lambda) = C_m(\lambda) ; L_{m4}(\lambda) = D_m(\lambda) ;$$

$$L_{m5}(\lambda) = E_m(\lambda) ; \quad m = e, p ; \quad k = 1, 2, 3 ; \quad A_{12}(\lambda) = A_{21}(\lambda) .$$

Осевая симметрия задачи позволяет записать статические уравнения в упрощенном виде:

$$N_{1,1} = 0 ; \quad M_{1,1} - Q_1 - N_1 w_{,1} = 0 ; \quad Q_{1,1} - kN_\theta + q = 0 . \quad (8)$$

Усилия и моменты определяются путем интегрирования соответствующих напряжений по толщине цилиндрической оболочки:

$$\begin{aligned}
 N_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 dz ; \quad N_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta dz ; \quad M_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 z dz ; \quad M_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta z dz
 \end{aligned} \quad (9)$$

Используя выражения (9) и вычисляя только значимые силовые факторы через компоненты деформаций, получаем:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= K_{11}(\lambda)\varepsilon_1 + K_{12}(\lambda)\varepsilon_\theta + P_{11}(\lambda)\chi_1 ; \\
 N_\theta &= K_{12}(\lambda)\varepsilon_1 + K_{22}(\lambda)\varepsilon_\theta + P_{21}(\lambda)\chi_1 ; \\
 M_1 &= P_{11}(\lambda)\varepsilon_1 + P_{12}(\lambda)\varepsilon_\theta + D_{11}(\lambda)\chi_1 ,
 \end{aligned} \quad (10)$$

где интегральные характеристики от материальных функций с учетом влияния степени наводороживания находим через ее концентрацию  $\lambda$  в виде:



$$K_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) dz; \quad P_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z dz; \quad D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z^2 dz. \quad (11)$$

Параметры  $B_{ij}$  зависят от концентрации водорода  $\lambda$  и вида реализуемого напряженного состояния.

Внося интегральные характеристики напряженного состояния (10) в уравнения равновесия (8), с учетом материальных функций (11), приходим к системе двух разрешающих дифференциальных уравнений изгиба оболочки в перемещениях:

$$\begin{aligned} & K_{11}(\lambda)_{,1} (u_{,1} + 0,5(w_{,11})^2) + K_{11}(\lambda)(u_{,11} + w_{,11}) + K_{12}(\lambda)_{,1} kw + K_{12}(\lambda)kw_{,1} - \\ & - P_{11}(\lambda)_{,1} w_{,11} - P_{11}(\lambda)w_{,111} = 0, \\ & P_{11}(\lambda)_{,11} (u_{,1} + 0,5(w_{,11})^2) + P_{11}(\lambda)_{,1} (u_{,11} + w_{,11}) + P_{11}(\lambda)_{,1} (u_{,11} + w_{,11}) + \\ & + P_{11}(\lambda)(u_{,111} + w_{,111}) + P_{12}(\lambda)_{,11} kw + P_{12}(\lambda)_{,1} kw_{,1} + P_{12}(\lambda)_{,1} kw_{,1} + \\ & + P_{12}(\lambda)kw_{,11} - D_{11}(\lambda)_{,11} w_{,11} - 2D_{11}(\lambda)_{,1} w_{,111} - D_{11}(\lambda)w_{,1111} - \\ & - k[K_{12}(\lambda)(u_{,1} + 0,5(w_{,11})^2) + K_{22}(\lambda)kw - P_{21}(\lambda)w_{,11}] + q = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Дифференциальные уравнения (12), описывающие деформирование цилиндрической оболочки, имеют сильно выраженную нелинейность, что заметно осложняет их решение. Поэтому решение представленной системы уравнений проводим двухшаговым методом последовательных возмущений параметров В.В. Петрова [2]. Кроме того, требуется привлечение уточняющей итерационной процедуры метода переменных параметров упругости И.А. Биргера, включаемой на первом шаге нагружения.

Следуя методике последовательных нагружений, геометрические соотношения (5) для цилиндрических оболочек в приращениях запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta\varepsilon_1 &= \delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}; \quad \delta\varepsilon_\theta = k\delta w; \quad \delta\chi_1 = -\delta w_{,11}; \\ \delta e_1 &= \delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1} - z\delta w_{,11}; \quad \delta e_\theta = k\delta w. \end{aligned} \quad (13)$$

Физические зависимости (6) в линеаризованной форме представим следующим образом:

$$\delta e_1 = \frac{\partial e_1}{\partial \sigma_1} \delta \sigma_1 + \frac{\partial e_1}{\partial \sigma_\theta} \delta \sigma_\theta; \quad \delta e_\theta = \frac{\partial e_\theta}{\partial \sigma_1} \delta \sigma_1 + \frac{\partial e_\theta}{\partial \sigma_\theta} \delta \sigma_\theta; \quad (14)$$

Обращая соотношения (14) приходим к следующим зависимостям напряжений от деформаций в приращениях:

$$\delta\sigma_1 = B_{11}(\lambda)\delta e_1 + B_{12}(\lambda)\delta e_\theta; \quad \delta\sigma_\theta = B_{21}(\lambda)\delta e_1 + B_{22}(\lambda)\delta e_\theta, \quad (15)$$

$$\text{где } B_{11}(\lambda) = \frac{\Delta_{22}}{\Delta}; \quad B_{12}(\lambda) = B_{21}(\lambda) = -\frac{\Delta_{21}}{\Delta} = -\frac{\Delta_{12}}{\Delta}; \quad \Delta = \Delta_{11}\Delta_{22} - \Delta_{12}\Delta_{21};$$

$$B_{22}(\lambda) = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}; \quad \Delta_{11} = \frac{\partial e_1}{\partial \sigma_1}; \quad \Delta_{22} = \frac{\partial e_\theta}{\partial \sigma_\theta}; \quad \Delta_{12} = \Delta_{21} = \frac{\partial e_1}{\partial \sigma_\theta} = \frac{\partial e_\theta}{\partial \sigma_1}.$$

Уравнения связи усилий с деформациями срединной поверхности (10) в приращениях преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} \delta N_1 &= K_{11}(\lambda)\delta\varepsilon_1 + K_{12}(\lambda)\delta\varepsilon_\theta + P_{11}(\lambda)\delta\chi_1; \\ \delta N_\theta &= K_{12}(\lambda)\delta\varepsilon_1 + K_{22}(\lambda)\delta\varepsilon_\theta + P_{21}(\lambda)\delta\chi_1; \\ \delta M_1 &= P_{11}(\lambda)\delta\varepsilon_1 + P_{12}(\lambda)\delta\varepsilon_\theta + D_{11}(\lambda)\delta\chi_1. \end{aligned} \quad (16)$$

Уравнения равновесия (8) в линеаризованной форме преобразовываются к следующему виду:

$$\begin{aligned} \delta N_{1,1} &= 0; \quad \delta M_{1,1} - \delta Q_1 + w_{,1} \delta N_1 + N_1 \delta w_{,1} = 0; \\ \delta Q_{1,1} - k \delta N_\theta + \delta q &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

В случае рассматриваемой осесимметричной задачи отсутствует горизонтальная сила при не загруженных ею торцов оболочки, следовательно  $N_1 = 0$ . Отсюда получаем  $\delta Q_1 = \delta M_{1,1}$  и два уравнения равновесия. Применяя процедуры (9) и (11) и внося результаты в уравнения равновесия (17), получаем систему двух дифференциальных разрешающих уравнений в линеаризованной форме, удобной для применения метода конечных разностей [4]:

$$\begin{aligned} &K_{11}(\lambda)_{,1}(\delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}) + K_{11}(\lambda)(\delta u_{,11} + w_{,11} \delta w_{,1} + w_{,1} \delta w_{,11}) + \\ &+ K_{12}(\lambda)_{,1} k \delta w + K_{12}(\lambda) k \delta w_{,1} - P_{11}(\lambda)_{,1} \delta w_{,11} - P_{11}(\lambda) \delta w_{,111} = 0, \\ P_{11}(\lambda)_{,11}(\delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}) + 2P_{11}(\lambda)_{,1}(\delta u_{,11} + w_{,11} \delta w_{,1} + w_{,1} \delta w_{,11}) + \\ &+ P_{11}(\lambda)(\delta u_{,111} + w_{,111} \delta w_{,1} + 2w_{,11} \delta w_{,11} + w_{,1} \delta w_{,111}) + \\ &+ P_{12}(\lambda)_{,11} k \delta w + 2P_{12}(\lambda)_{,1} k \delta w_{,1} + \\ &+ P_{12} k \delta w_{,11} - D_{11}(\lambda)_{,11} \delta w_{,11} - 2D_{11}(\lambda)_{,1} \delta w_{,111} - D_{11}(\lambda) \delta w_{,1111} - \\ &- k_2 (K_{12}(\lambda)(\delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}) + K_{22}(\lambda) k \delta w - P_{12}(\lambda) \delta w_{,11}) + \delta q = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Для обеспечения полноты системы разрешающих уравнений (18) дополним её граничными условиями в соответствии с формулировкой модельной задачи, а конкретно, условиями защемления цилиндра по

торцам (с учетом осевой симметрии задачи): на торцах цилиндра с координатами  $L=0$  м и  $L=4$  м:  $\delta w = 0$ ,  $\delta w_{,1} = 0$ ,  $\delta u = 0$ .

Уравнение диффузии в линеаризованной форме запишется следующим образом:

$$\delta\lambda = 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \delta t \{ [\delta\lambda_2 \cos(i \cdot \pi) - \delta\lambda_1] / i \} \times \quad (19)$$

$$\times \sin(i \cdot \pi z / h) \cdot (-D\pi^2 i^2 / h^2) [1 + (-D\pi^2 i^2 / h^2)] / \pi,$$

где  $F_0 = Dt / h^2$  - число Фурье;  $i$  - число членов ряда;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - концентрация среды на поверхностях оболочки;  $h$  - толщина оболочки;  $z$  - координата точки по толщине оболочки.

Краевые и начальные условия при воздействии среды со стороны действия поперечной силовой нагрузки представлены следующим образом:

$$\delta\lambda(-h/2, t) = \delta\lambda_{\infty} = \delta\lambda_1; \quad \delta\lambda(+h/2, t) = 0 = \delta\lambda_2, \quad (20)$$

$$\delta\lambda(z, 0) = 0 \quad (21)$$

здесь  $\lambda_{\infty}$  - равновесная концентрация водородосодержащей среды.

Анализ эмпирических данных для материалов, проявляющих наведенную чувствительность к виду напряженного состояния в процессе наводороживания, позволяет представить условие пластичности в общем виде с учетом кинетики наводороживания следующим образом [3]:

$$F(\sigma_{ij}, \lambda) = \tau \cdot f(\xi, \lambda) = k_{\tau}(\lambda), \quad (22)$$

где  $f(\xi, \lambda)$  - функция, учитывающая вид напряженного состояния и зависящая от концентрации агрессивной среды в материале,  $k_{\tau}(\lambda) = \sqrt{2/3\tau_s(\lambda)}$ ,  $\tau_s(\lambda)$  - предел текучести при простом сдвиге.

Зависимость пластической характеристики  $k_{\tau}(\lambda)$  от концентрации  $(\lambda)$  для сплава ТС5 представим в виде следующей зависимости:

$$k_{\tau}(\lambda) = k_0(B_1 + B_2 e^{-C/B_0}) \quad (23)$$

где  $B_0 = 0,05632$ ;  $B_1 = 0,77016$ ;  $B_2 = 0,23153$ ;  $k_0 = k_{\tau 0} \approx 432,63$  Мпа.

С учетом влияния вида напряженного состояния в процессе наводороживания конструкций из титанового сплава, получим следующее выражение функции пластичности:

$$f(\xi, \lambda) = a_1(\lambda) + a_2(\lambda) \cdot e^{a_3(\lambda)\xi}, \quad (24)$$

где

$$a_1(\lambda) = \frac{A_{10} + A_{11} \cdot \text{sign}\xi}{\frac{\lambda + (A_{14} + A_{15} \cdot \text{sign}\xi)}{A_{16} + A_{17} \cdot \text{sign}\xi}} + A_{18} + A_{19} \cdot \text{sign}\xi ;$$

$$A_{12} + A_{13} \cdot \text{sign}\xi + e$$

$$A_{10} = 0,188245; A_{11} = -0,035555; A_{12} = 1; A_{13} = 0; A_{14} = -0,0346205;$$

$$A_{15} = -0,0234495; A_{16} = 0,01372735; A_{17} = 0,00462765; A_{18} = 0,840205;$$

$$A_{19} = 0,013305;$$

$$a_2(\lambda) = \frac{A_{20} + A_{21} \cdot \text{sign}\xi}{\frac{\lambda + (A_{24} + A_{25} \cdot \text{sign}\xi)}{A_{26} + A_{27} \cdot \text{sign}\xi}} + A_{28} + A_{29} \cdot \text{sign}\xi ;$$

$$A_{22} + A_{23} \cdot \text{sign}\xi + e$$

$$A_{20} = -0,106284; A_{21} = 0,117504; A_{22} = 0,5; A_{23} = -0,5; A_{24} = -0,0055855;$$

$$A_{25} = 0,0055855; A_{26} = -0,0096306; A_{27} = -0,0187303; A_{28} = 0,080935;$$

$$A_{29} = -0,092155; a_3(\lambda) = A_{30} + A_{31} \cdot \text{sign}\xi - (A_{32} + A_{33} \cdot \text{sign}\xi) \cdot \lambda ;$$

$$A_{30} = 2,120775; A_{31} = 1,497475; A_{32} = 3,79925; A_{33} = 30,04925.$$

С целью записи более компактной формы системы алгебраических уравнений воспользуемся разностной аппроксимацией четвертого порядка. Одномерность задачи позволяет представить образующую цилиндра в виде прямой, разбитой на  $m$  узловых точек: образующую оболочки разобьем на 30 участков, толщину - на 20. Интегрирование по толщине выполнялось численно по правилам Симпсона.

На основе полученных ранее уравнений состояния произведен численный анализ нелинейного деформирования круговой цилиндрической оболочки. Проведен анализ результатов расчета оболочки в условиях воздействия агрессивной водородосодержащей среды.

Рисунки 2 и 3 отражают распределение прогибов и горизонтальных перемещений срединной поверхности оболочки с увеличением нагрузки при разных уровнях водородонасыщения от  $\lambda = 0,01\%$  до  $\lambda = 0,08\%$ .

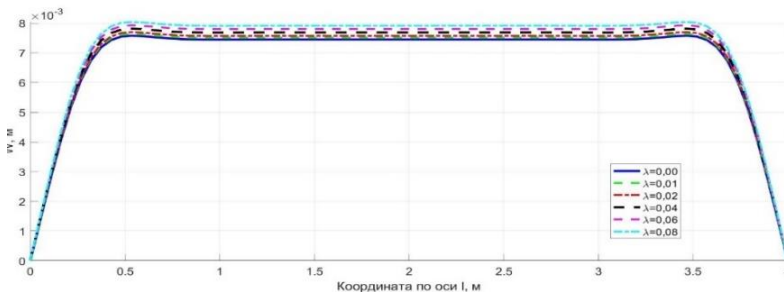


Рис. 2. Прогибы вдоль образующей цилиндра под воздействием нагрузки интенсивностью  $q = 28 \text{ МПа}$

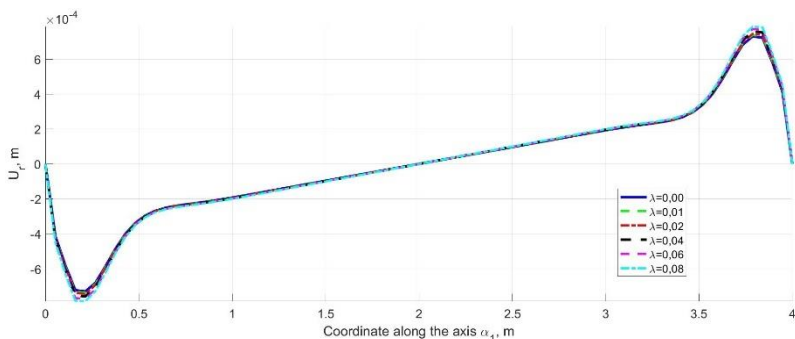


Рис. 3. Горизонтальные перемещения вдоль образующей цилиндра под воздействием нагрузки интенсивностью  $q = 28 \text{ МПа}$

Рисунки 4 и 5 свидетельствуют о том, что в процессе насыщения сплава водородом при фиксированной нагрузке напряжения увеличиваются.

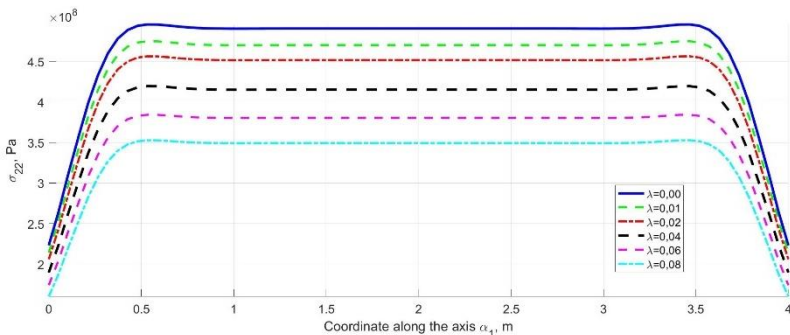


Рис. 4. Напряжения  $\sigma_\theta$  вдоль образующей цилиндра по нижней поверхности под воздействием нагрузки интенсивностью  $q = 28 \text{ МПа}$

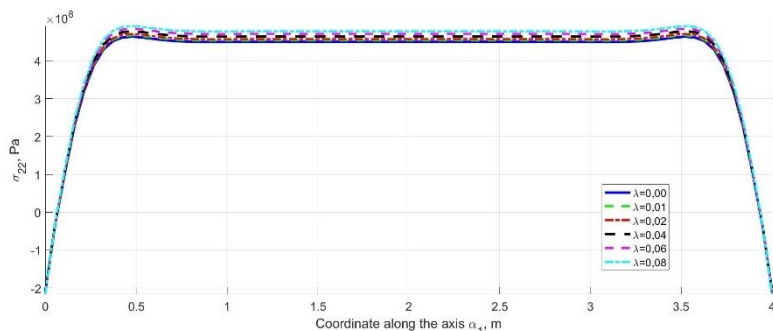


Рис. 5. Напряжения  $\sigma_\theta$  вдоль образующей цилиндра по верхней поверхности под воздействием нагрузки интенсивностью  $q = 28 \text{ МПа}$

В таблице 1 приведены данные сравнения результатов расчета цилиндрической оболочки из сплава титана TC5 по рассматриваемой модели с результатами, полученными на базе соотношений И.Г. Овчинникова и Л.А. Кирилловой.

Таблица 1 - Анализ результатов расчета оболочки

Концентрация водорода $\lambda$ , %	Растягивающее напряжение $\sigma_{\theta}^{\max}$ , МПа		Прогиб в центре плана оболочки $w_0$ , мм	
	Рассматриваемая модель	И.Г. Овчинников, Л.А. Кириллова	Рассматриваемая модель	И.Г. Овчинников, Л.А. Кириллова
0,00	350,07	350,07	7,18	7,18
0,08	515,17	386,89	8,75	7,57

Разница в результатах расчета оболочки, находящейся в существенно насыщенном состоянии (при  $\lambda = 0,08\%$ ) для величины напряжений составляет 33,8%, а для величин максимальных прогибов - 16,6%, объясняется это тем, что принятые потенциальные соотношения [3] изначально обладают более гибким механизмом учета влияния вида напряженного состояния на механические характеристики материалов в самом широком спектре их изменения, согласно сравнительному анализу с соотношениями И.Г. Овчинникова и Л.А. Кирилловой, а также с использованием наиболее точного численного метода МКР для того, чтобы возможно было произвести деформационный расчет заданной конструкции.

В результате обработки диаграмм деформирования круговой цилиндрической оболочки, выполненной из сплава титана TC5 с применением условия пластичности (22) получены зависимости величины прогибов, нагрузки и напряжений от степени концентрации среды при снижении условных пределов текучести, записанные в виде степенных полиномов:

$$\begin{aligned}
 w &= a_0 + a_1 \cdot \lambda + a_2 \cdot \lambda^2 + a_3 \cdot \lambda^3 \\
 q &= b_0 + b_1 \cdot \lambda + b_2 \cdot \lambda^2 + b_3 \cdot \lambda^3 \\
 \sigma_{\theta} &= c_0 + c_1 \cdot \lambda + c_2 \cdot \lambda^2 + c_3 \cdot \lambda^3 + c_4 \cdot \lambda^4
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

где  $a_0 = 0,0218$  м;  $a_1 = 0,00484$  м;  $a_2 = 0,11778$  м;  $a_3 = -1,3356$  м;

$b_0 = 25,15371$  МПа;  $b_1 = -294,25725$  МПа;  $b_2 = 5781,52393$  МПа;

$b_3 = -44550,17793$  МПа;  $c_0 = -3,51132$  Па·10<sup>8</sup>;  $c_1 = 55,17977$  Па·10<sup>8</sup>;

$$c_2 = - 1813,45787 \text{ Па} \cdot 10^8; c_3 = 30423,006 \text{ Па} \cdot 10^8;$$

$$c_4 = - 159679,505 \text{ Па} \cdot 10^8.$$

Зависимость прогибов и напряжений цилиндрической оболочки от нагрузки при разной степени наводороживания с фиксацией предельного состояния изображена на рисунках 6-9.

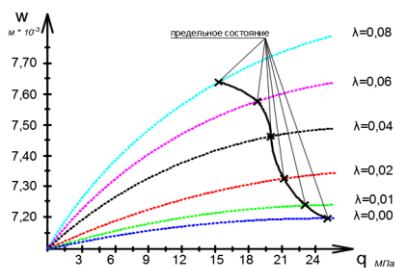


Рис. 6. Зависимость прогибов цилиндрической оболочки от нагрузки при разной степени наводороживания с фиксацией предельного состояния

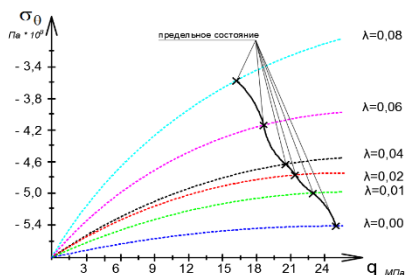


Рис. 7. Зависимость окружных напряжений цилиндрической оболочки от нагрузки при разной степени наводороживания с фиксацией предельного состояния

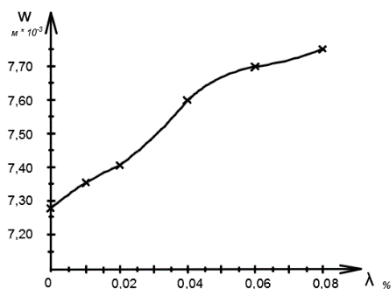


Рис. 8. Зависимость прогибов цилиндрической оболочки от степени наводороживания с фиксацией предельного состояния

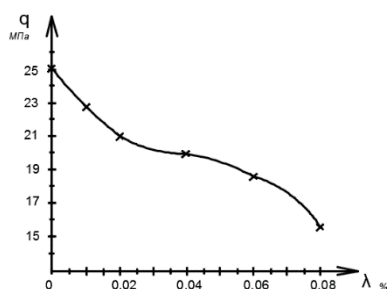


Рис. 9. Зависимость величины приложенной нагрузки на цилиндрическую оболочку от степени наводороживания с фиксацией предельного состояния

Представленные диаграммы наглядно иллюстрируют тот факт, что с увеличением концентрации водорода в материале предельное состояние конструкции по условным пределам текучести достигается при приложении к оболочке меньшей нагрузки относительно начального состояния  $\lambda = 0\%$ .

Проведя количественный анализ результатов, приведенных на диаграммах 6-9, можно сделать вывод о том, что предельное состояние по условным пределам текучести с повышением концентрации водорода в теле материала наступает существенно раньше, относительно начального состояния  $\lambda = 0\%$  как по напряжениям, так и по прогибам. Это объясняется снижением механических характеристик материала под воздействием агрессивной водородосодержащей среды с течением времени. Из результатов видно, что в момент полного насыщения толщины оболочки до  $\lambda = 0,08\%$  по отношению к исходному состоянию  $\lambda = 0\%$  различие величин прогибов составляет 6,85 %, напряжений - 62,46 %, а предельной нагрузки - 58,86 %, что недопустимо при эксплуатации конструкций высокой ответственности.

Полученные результаты решения конкретной задачи деформирования тонкой круговой цилиндрической оболочки из титанового сплава ТС5 свидетельствуют о необходимости применения гибкого механизма, позволяющего учитывать изменения механических характеристик материала под воздействием агрессивной водородосодержащей среды.

#### Библиографический список

1. Овчинников И.Г. Математическое моделирование процесса взаимодействия элементов конструкций с агрессивными средами / И.Г.Овчинников, В.В.Петров // Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах. - Саратов: Сарат. политехн. ин-т., 1983. С. 3-11.
2. Петров В.В. Двухшаговый метод последовательного возмущения параметров и его применение к решению нелинейных задач механики деформируемого твердого тела [Текст] / В.В.Петров, И.Г.Овчинников, В.К.Иноземцев // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред. - Саратов: СГТУ, 2001. - С. 6-12.
3. Трещев А.А. Изотропные пластины и оболочки, выполненные из материалов, чувствительных к виду напряженного состояния: монография. М.: Тула: РААСН; Изд-во ТулГУ, 2013. - 249 с.
4. Кузнецова В.О. Деформирование цилиндрической оболочки из титанового сплава под воздействием агрессивной водородосодержащей среды / В.О.Кузнецова, А.А.Трещев // Строительная механика и конструкции. - Воронеж: ВГТУ, 2022. - №2 (33). - С. 26-39.
5. Матченко Н.М. Определяющие соотношения изотропных разносопротивляющихся сред. Ч. 2. Нелинейные соотношения [Текст] / Н.М. Матченко, Л.А. Толоконников, А.А. Трещёв // Изв. РАН. МТТ. - 1999. - № 4. - С. 87-95.



УДК 539.375

## ЧАСТИЧНЫЙ КОНТАКТ БЕРЕГОВ ТРЕЩИНЫ В СТРИНГЕРНОЙ ПЛАСТИНЕ С КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ

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

Тонкие пластины с отверстиями являются широко используемым элементом конструкций. При этом отверстия создают повышенную концентрацию напряжений в пластине и зарождение или развитие трещин следует ожидать с поверхности отверстия. Усиление пластины ребрами жесткости способствует смыканию берегов трещины [1]. Рассмотрим прямолинейную трещину, исходящую из контура кругового отверстия стрингерной пластины, берега, которой вошли в контакт.

Пусть имеется бесконечная тонкая пластина с круговым отверстием радиуса  $R$ . Пластина является упругой, изотропной и подкреплена поперечными упругими стрингерами. На бесконечности пластина подвергается однородному растяжению вдоль стрингеров. Принимаем, что стрингеры не подвергаются изгибу и при деформации их толщина не меняется. Из контура отверстия исходит прямолинейная трещина вдоль оси абсцисс. Полагаем, что в зоне трещины, примыкающей к вершине, между берегами происходит взаимодействие. Это взаимодействие моделируем связями между берегами трещины (силами сцепления). Физическая природа связей между берегами (сил сцепления) зависит от материала пластины, размеров трещины и зоны взаимодействия (концевой зоны).

Стрингеры приклепаны к пластине в точках  $z = \pm(2m+1)L \pm iny_0$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ ) с постоянным шагом по всей их длине (рис. 1). Их действие заменяется эквивалентными сосредоточенными силами  $P_{mn}$ , приложенными в точках соединения пластины и стрингеров. Силы  $P_{mn}$  заранее неизвестны.

В рассматриваемом случае берега трещины частично вошли в контакт (рис. 1). Контур кругового отверстия и берега трещины вне концевой зоны свободны от внешних усилий. В зоне контакта  $[l_2, l_1]$  возникают нормальные напряжения  $\sigma_y = q(x)$ . Величина контактных напряжений  $q(x)$ , сил сцепления  $p(x)$  и размер контактной зоны подлежат определению в процессе решения задачи.

Граничные условия рассматриваемой задачи имеют вид:  
на контуре отверстия -

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

на берегах трещины -

$$\begin{aligned} \sigma_y - i\tau_{xy} &= 0 & \text{при } y = 0, \quad R \leq |x| < l, \\ \sigma_y - i\tau_{xy} &= p(x) & \text{при } y = 0, \quad l \leq x < l_2, \\ \sigma_y - i\tau_{xy} &= q(x) & \text{при } y = 0, \quad l_2 \leq x \leq l_1. \end{aligned} \quad (2)$$

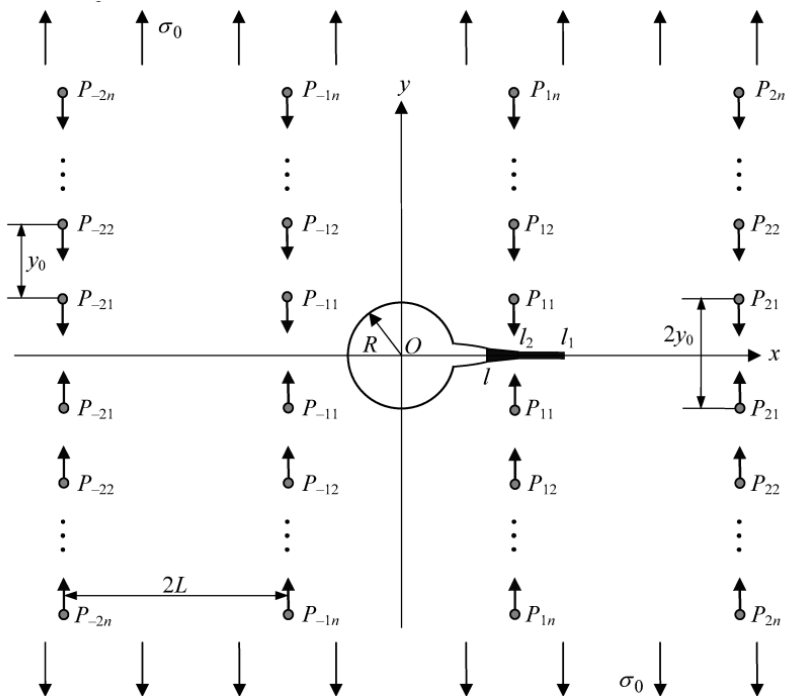


Рис. 1. Расчетная схема задачи о контакте берегов трещины в стрингерной пластине с отверстием

Для перемещений раскрытия трещины имеем условия:

$$\begin{aligned} v^+(x, 0) - v^-(x, 0) &= C(x, p(x))p(x) \quad l \leq x < l_2, \\ v^+(x, 0) - v^-(x, 0) &= 0 \quad l_2 \leq x \leq l_1. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $C(x, p(x))$  - эффективная податливость связей, зависящая от их натяжения.

На основании формул Колосова-Мусхелишвили [2] и граничных условий на контуре отверстия и берегах трещины (1)-(2) задача сводится к определению двух аналитических функций  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  из условий

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

$$\Phi(t) + \overline{\Phi(t)} + t\Phi'(t) + \Psi(t) = \begin{cases} 0 & R \leq |x| < l \\ p(x) & l \leq x < l_2 \\ q(x) & l_2 \leq x \leq l_1 \end{cases} \quad (5)$$

где  $\tau = Re^{i\theta}$ ,  $t$  - аффикс точек берегов трещины.

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 стрингерной пластине

$$\begin{aligned} \Phi_0(z) &= \frac{1}{4}\sigma_0 - \frac{i}{2\pi h(1+\kappa)} \sum'_{m,n} P_{mn} \left[ \frac{1}{z - mL + iny_0} - \frac{1}{z - mL - iny_0} \right], \\ \Psi_0(z) &= \frac{1}{2}\sigma_0 - \frac{i\kappa}{2\pi h(1+\kappa)} \sum'_{m,n} P_{mn} \left[ \frac{1}{z - mL + iny_0} - \frac{1}{z - mL - iny_0} \right] + \\ &+ \frac{i}{2\pi h(1+\kappa)} \sum'_{m,n} P_{mn} \left[ \frac{mL - iny_0}{(z - mL - iny_0)^2} - \frac{mL + iny_0}{(z - mL + iny_0)^2} \right]; \end{aligned} \quad (7)$$

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

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

$$\Phi_1(z) = \frac{1}{2\pi} \int_R^{l_1} \frac{g(t)}{t - z} dt, \quad \Psi_1(z) = \frac{1}{2\pi} \int_R^{l_1} \left[ \frac{1}{t - z} - \frac{t}{(t - z)^2} \right] g(t) dt, \quad (8)$$

где

$$g(x) = \frac{2\mu}{1+\kappa} \frac{d}{dx} [v^+(x, 0) - v^-(x, 0)];$$

$\mu$  - модуль сдвига материала пластины.

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

$$\Phi_2(\tau) + \overline{\Phi_2(\tau)} - [\overline{\tau}\Phi_2'(\tau) + \Psi_2(\tau)]e^{2i\theta} =$$

$$= -\Phi_*(\tau) - \overline{\Phi_*(\tau)} + e^{2i\theta} [\overline{\Phi'_*(\tau)} + \Psi_*(\tau)], \quad (9)$$

$$\Phi_*(\tau) = \Phi_0(\tau) + \Phi_1(\tau), \quad \Psi_*(\tau) = \Psi_0(\tau) + \Psi_1(\tau).$$

Для решения определения потенциалов  $\Phi_2(z)$  и  $\Psi_2(z)$  используется решением Н.И.Мухелишвили [2].

Требую, чтобы функции (6) удовлетворяли краевому условию (5) на берегах трещины, получаем сингулярное интегральное уравнение относительно  $g(x)$ :

$$\frac{1}{\pi} \int_R^{l_1} \frac{g(t)}{t-x} dt + \frac{1}{\pi} \int_R^{l_1} K(t,x)g(t)dt = f_0(x) + f_1(x) + p_*(x), \quad (10)$$

В полученное сингулярное интегральное уравнение (10) входят неизвестные величины сосредоточенных сил  $P_{mn}$  ( $m=\pm 1, \pm 2, \dots; n = \pm 1, \pm 2, \dots$ ), сил сцепления  $p(x)$  и контактных напряжений  $q(x)$ .

Используя закон Гука, для определения величин сосредоточенных сил  $P_{mn}$  получаем бесконечную линейную систему уравнений

$$P_{mn} = \frac{E_s F}{2ny_0} \Delta v_{mn} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots; n = \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (11)$$

где  $E_s$  - модуль Юнга материала стрингера;  $F$  - площадь поперечного сечения стрингера;  $2ny_0$  - расстояние между точками крепления;  $\Delta v_{mn}$  - взаимное смещение точек крепления, равное удлинению соответствующего участка стрингера.

Так как напряжения в пластине ограничены, решение сингулярного интегрального уравнения (10) следует искать в классе всюду ограниченных функций. Для построения решения сингулярного интегрального уравнения используем метод прямого решения сингулярных уравнений [3, 4]. Переходя к безразмерным переменным, решение представим в виде

$$g(\eta) = \sqrt{1-\eta^2} g_0(\eta),$$

где  $g_0(\eta)$  - ограниченная функция.

Использование квадратурных формул [3, 4] позволяет уравнение (10) свести к системе  $M+1$  алгебраических уравнений с  $M$  неизвестными  $g_0(\tau_1), \dots, g_0(\tau_m)$ :

$$\sum_{m=1}^M \frac{g^0(\tau_m)}{M+1} \sin^2 \frac{\pi m}{M+1} \left[ \frac{1}{\tau_m - \eta_r} + K(\tau_m, \eta_r) \right] = \pi F_*(\eta_r), \quad (12)$$

$$F_*(\eta_r) = \begin{cases} f(\eta_r) & R \leq |x| < l \\ f(\eta_r) + p(\eta_r) & l \leq x < l_2 \\ f(\eta_r) + q(\eta_r) & l_2 \leq x \leq l_1 \end{cases},$$

Здесь  $\tau_m = \cos \frac{\pi m}{M+1}$ ;  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  $\eta_r = \cos \frac{2r-1}{2(M+1)}$ ;  $r = 1, 2, \dots, M+1$ .

Так как решение сингулярного интегрального уравнения (10) ищется в классе всюду ограниченных функций, то оно существует при выполнении дополнительного условия (условия разрешимости краевой задачи) [2]. Выполнение дополнительного условия обеспечивает полученная алгебраическая система из  $M+1$  уравнений (12), служащая для определения неизвестных  $g_0(\tau_1), g_0(\tau_2), \dots, g_0(\tau_m)$  и  $l_2$ .

В правую часть системы (12) входят неизвестные значения сил сцепления  $p(\eta_r)$  и контактных напряжений  $q(\eta_r)$  в узловых точках, принадлежащих соответственно зонам  $[l, l_2]$  и  $[l_2, l_1]$ . Неизвестные силы сцепления и контактное напряжение, возникающее на берегах трещины, определяются из условия (3). Запишем его для производной раскрытия смещений берегов трещины

$$\frac{1+\kappa}{2\mu} g(x) = \frac{d}{dx} [C(x, p(x))p(x)] \quad l \leq x < l_2, \quad (13)$$

$$\frac{1+\kappa}{2\mu} g(x) = 0 \quad l_2 \leq x \leq l_1. \quad (14)$$

Требую выполнения условия (13) в узловых точках, содержащихся в зонах  $[l, l_2]$ , получаем недостающие уравнения для определения приближенных значений сил сцепления  $p(\tau_m)$  в узловых точках. Также, требуя выполнения условия (14) в узловых точках, содержащихся в зонах  $[l_2, l_1]$ , получаем уравнения для определения приближенных значений контактного напряжения  $q(\tau_m)$  в узловых точках.

Построенные алгебраические системы связаны между собой, и их совместное решение позволяет определить значения искомой функции  $g(x)$  в узловых точках, сил сцепления в связях  $p(x)$ , контактных напряжений  $q(x)$ , величины сосредоточенных сил  $P_{mn}$  и размер контактной зоны трещины. Из-за неизвестного размера зоны контакта  $l_2$  полученная алгебраическая система оказалась нелинейной и решалась методом последовательных приближений.

Библиографический список

1. Мирсалимов, В.М. Некоторые задачи конструкционного торможения трещин / В.М. Мирсалимов // Физ.-хим. механика материалов. - 1986. - Т. 22, №1. - С. 84-88.
2. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. - М.: Наука, 1966. - 707 с.
3. Панасюк, В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацышин. - Киев: Наукова думка, 1976. - 443 с.
4. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. - М.: Наука, 1987. - 256 с.

УДК: 624.21:624.042

**РАСЧЕТ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ  
С ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТОЙ  
НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ  
С УЧЕТОМ СДВИГОВОЙ ЖЕСТКОСТИ**

Подлесных И.С., Гриднев С.Ю.

*ВГТУ, г. Воронеж, Россия*

Статья посвящена совершенствованию методики расчёта напряженно-деформированного состояния (НДС) разрезного сталежелезобетонного пролётного строения при неравномерном нагреве от воздействия солнечной радиации за счет учета сдвиговой жесткости между главными балками и плитой, а также в слоях дорожной одежды.

Достоверность получаемых результатов НДС пролетных строений при силовых и температурных воздействиях напрямую зависит от точности принятой расчетной схемы. В настоящее время при расчете пролетных строений обычно не учитывают возникающие сдвиговые усилия между главными балками и плитой, в слоях дорожной одежды, а также неравномерный нагрев элементов от воздействия солнечной радиации. Это является особенно важным, учитывая произвольный характер пространственного деформирования пролетного строения. Поэтому решаемая в такой постановке задача по совершенствованию методики расчета пролетных строений остается актуальной.

Расчетам сталежелезобетонных пролетных строений с учетом податливости соединения стальных балок с железобетонной плитой посвящены статьи [1-3, 6]. Предложен алгоритм расчета однопролётных и неразрезных многопролётных балок мостовых сооружений с учетом

податливости сдвигового соединения. Авторами выполнены исследования [4, 5], посвященные анализу влияния солнечной радиации на НДС сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста, в которых показана необходимость её учета при расчетах.

Главной задачей данного исследования являлось выполнение сравнительного расчета НДС пролетного строения при воздействии солнечной радиации с целью выявления особенностей перераспределения напряжений в зависимости от типа моделирования соединения между главными балками и плитой, а также в слоях дорожной одежды.

В комплексе ЛИРА-САПР построены две конечно-элементные (КЭ) модели сталежелезобетонного пролетного строения:

1. с жесткими связями в соединении главных балок и железобетонной плиты, а также в слоях дорожной одежды;
2. с податливыми упорами между главными балками и железобетонной плитой, а также между слоями дорожной одежды (рис.1).

В КЭ модели учтено неравномерное распределение температуры по высоте поперечного сечения сталежелезобетонного пролетного строения от воздействия солнечной радиации. Расчет выполнен для случая, при котором нагрев от солнечной радиации воспринимает одна из главных балок и верхний слой дорожной одежды.

В результате расчета получены поля напряжений элементов пролетного строения для двух типов моделирования связей и выполнен их сравнительный анализ. В табл. 1 представлено сравнение максимальных напряжений в элементах пролетных строений для двух типов расчетных схем при учете солнечной радиации.

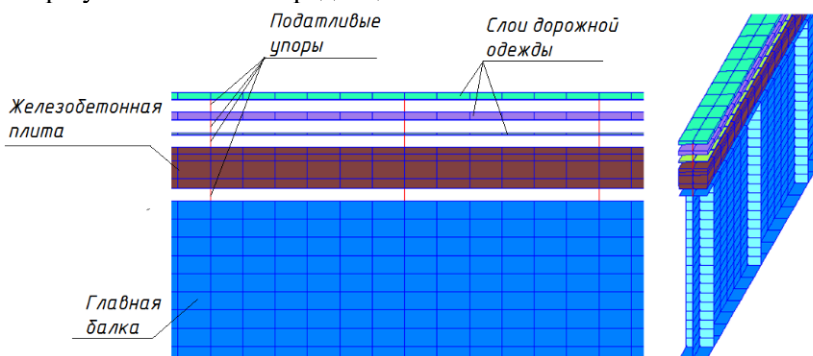


Рис. 1 КЭ модель сталежелезобетонного пролетного строения с податливыми упорами

Таблица 1. Сравнение максимальных напряжений в элементах пролетного строения

Элемент пролетного строения	Податливые связи	Жесткое соединение
Главная балка на солнце Б1 ( $\sigma_y$ , МПа)	<b>35,7</b>	25,3
Главная балка в тени Б2 ( $\sigma_y$ , МПа)	<b>38,4</b>	35,8
Железобетонная плита ( $\sigma_x$ , МПа)	5,43	<b>13,8</b>
Верхний слой дорожной одежды ( $\sigma_x$ , МПа)	0,842	<b>0,901</b>

Отмечено, что напряжения в главных балках выше при использовании податливых связей, а в плите и верхнем слое дорожной одежды напряжения выше при жестких связях.

Таким образом, при учете сдвиговой жесткости происходит перераспределение напряжений в элементах пролетных строений. Поэтому при расчете пролетных строений на различные нагрузки, в том числе на воздействие солнечной радиации, необходимо учитывать сдвиговую жесткость между главными балками и плитой, а также в слоях дорожной одежды с целью получения достоверной картины НДС.

#### Библиографический список

1. Козлов, А.В. Расчет сталежелезобетонных мостов с учетом сдвига плиты по верхнему поясу балки / А. В. Козлов // Строительная механика и конструкции. - 2018. - №4(19). - С.64-71.
2. Козлов, А.В. Расчет сталежелезобетонных мостов с учетом податливости сдвигового соединения железобетонной плиты со стальной балкой / А. В. Козлов, А.С. Егорычев // Дороги и мосты. - 2019. - № 41. - С. 111-128.
3. Козлов, А. В. Механическое взаимодействие железобетонной плиты и стальной балки в пролетах мостовых сооружений / А. В. Козлов, В. А. Козлов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: А43 сб. тр. Международной научно конференции, Воронеж, 11-13 ноября 2019 г. - Воронеж: изд-во «Научно-исследовательские публикации». - 2020. - С. 1377-1385.
4. Гриднев С. Ю., Подлесных, И. С. Влияние солнечной радиации на сохранность верхнего слоя дорожной одежды сталежелезобетонного пролётного строения // Актуальные проблемы строительства,



строительной индустрии и промышленности: сборник материалов XIX Международной научно-технической конференции». - 2018. - С. 34-36.

5. Подлесных И.С., Гриднев С.Ю., Барченкова Н.А. Анализ влияния солнечной радиации на напряженно-деформированное состояние стале-железобетонного пролетного строения автодорожного моста // Интернет журнал «Транспортные сооружения», 2018 №2, <https://t-s.today/PDF/12SATS218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS218

6. Yeremin, V. G. Analytical expressions, taking into account the shift between the concrete and steel structural elements of bridges in continuous multi-span beams / V. G. Yeremin, A. V. Kozlov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. - 2020. - Issue №.1 (45). - P. 98-110.

УДК: 24.012.45/.46

## **К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОТ ВЗРЫВА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПЛОСКУЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ РАМУ**

Прохорова А.В., Строченов Р.Д.  
*ТулГУ, г. Тула, Россия*

В последние годы при выполнении исследований строительных конструкций и конструктивных систем все больше внимания уделяется обеспечению их конструктивной безопасности. Эта тема имеет высокую актуальность и важное общественное значение, так как до сих пор многие вопросы в этой области остаются нерешенными. С развитием индустриализации и постоянным увеличением воздействий природного и техногенного характера на здания и сооружения, решение задач по обеспечению их безопасности усложняется.

В результате взрывов возникают особенно тяжелые повреждения, поэтому проблема моделирования взрывных воздействий на здания и сооружения требует дополнительного внимания. Известно немало случаев террористических атак на здания с постоянным пребыванием большого количества людей. При этом террористы обычно нацеливаются на культовые и общественные здания и используют зажигательные устройства, чтобы унести максимальное количество жизней и нанести значительный ущерб имуществу. Первоначальные жертвы вызваны прямым поражением в результате взрыва, но последующее обрушение элементов конструкции может значительно увеличить общее количество пострадавших.

Анализ случаев террористических атак показывает, что здания, на которые нацелены террористы, в основном представляют собой каркасные сооружения из железобетона, спроектированные и построенные без

учета их уязвимости к подобным событиям. Такие инциденты, как взрывы в городе Лахор в 2009/2010 годах и в иностранных посольствах в Багдаде в 2010 году, дополнительно указывают на важность изучения реакции строительных конструкций на взрыв в ближней зоне.

На данный момент в свободном доступе нет методического руководства по оценке уязвимости зданий к взрыву в ближнем поле. Доступная информация в основном относится к военному сектору, который недоступен широкому кругу проектировщиков или не подходит для общественных зданий. В связи с этим существует необходимость в разработке соответствующих методов и руководств, которые позволят инженерам-строителям оценивать и проектировать строительные конструкции, уязвимые к взрывам.

Для проведения исследования была выбрана семиэтажная железобетонная порталная рама с шестью отсеками. Высота колонн в пределах этажа 4,1 м, длины балок 7 м и 5,4 м. Конструкция представляет собой многоэтажную железобетонную раму, рассчитанную на восприятие только гравитационных нагрузок.

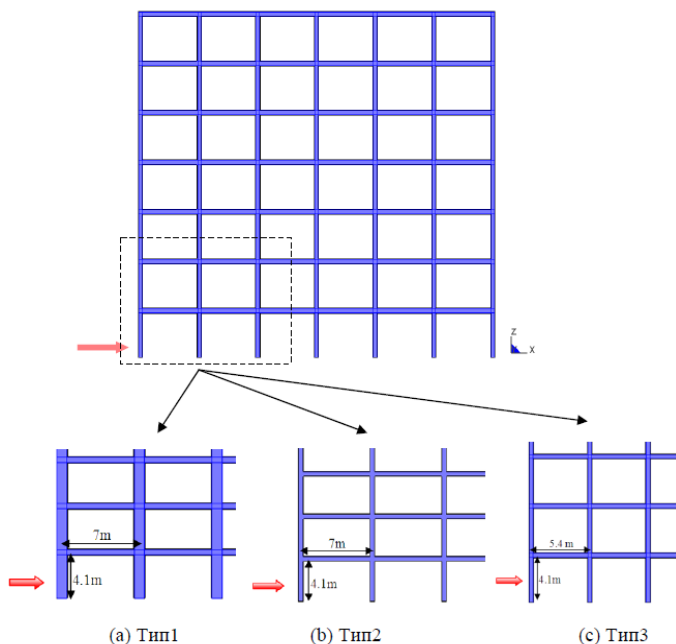


Рис. 1. Типы рам, выбранные для исследования

Параметры модели были подобраны исходя из ограничения времени вычислений и емкости численной модели для обеспечения достаточной

степени точности. Принятые структурные модели имеют разные размеры сечений элементов, чтобы включить в исследование типичные размеры конструкций многоэтажных зданий (см. рис. 1). Стрелками на схемах отмечено направление приложения давления взрыва. В таблице 1 приведены геометрические характеристики сечений элементов конструкций для каждого типа модели. Принятые размеры колонн наиболее часто используются в семиэтажных зданиях, при этом уязвимые колонны могут обеспечить некоторую устойчивость к взрыву.

Продольное армирование колонн составляло 2% от общей площади поперечного сечения для каждого типа рамы, для балок - 1,4% от общей площади поперечного сечения, поперечная арматура диаметром 10 мм расположена с шагом 150 мм для колонн и балок. Характеристики материалов, следующие: прочность бетона на сжатие 40 МПа, предел текучести продольной и поперечной арматурной стали соответственно 500 МПа и 300 МПа. Все колонны закреплены в фундаменте с учетом предотвращения поступательного и вращательного движения в основании.

Таблица 1. Геометрические параметры элементов рам

Тип модели	Колонны			Балки		
	Высота $L_k$ , м	Высота сечения (мм)	Ширина сечения (мм)	Длина $L_b$ , м	Высота сечения (мм)	Ширина сечения (мм)
1	4,1	1000	1000	7	600	600
2	4,1	500	500	7	450	400
3	4,1	400	450	5,4	450	300

Арматурная сталь задавалась в виде двухузловых конечных элементов линии Хьюза-Лю, а бетон - в виде трехмерных восьмиузловых сплошных шестигранных элементов. Размер конечных элементов принят из оптимальных условий сходимости и точности получаемых результатов.

Для описания нелинейного поведения бетона в условиях больших скоростей деформации и давления существует множество моделей материала. При этом критериями выбора модели являются учет скорости деформации в условии динамического нагружения, наличие в модели механизма разрушения и минимальный набор входных параметров. Таким требованиям соответствуют модель Karagozian&Case (KCC) [1,2]. Для арматурной стали использовалась модель Plastic Kinematic.

Предполагалось, что арматурная сталь и бетон идеально скреплены без какого-либо проскальзывания. Исследование было успешно выполнено с использованием программного пакета LS DYNA с нелинейными параметрами материала.

Для установления параметров взрывной нагрузки использовались эмпирические уравнения Кингери-Булмаш, автоматизированные в математической модели детонации взрывчатого вещества, описанной в работе [3]. Для упрощения профиля взрывной волны в расчетах предполагалось линейное уменьшение избыточного давления. Дистанция противостояния составляла 10 м, а результаты оценивались по масштабируемому расстоянию, рассчитанному для каждого случая [4]. Шесть вариантов взрывной нагрузки были выбраны путем изменения веса заряда со 100 кг до 600 кг в тротиловом эквиваленте.

Задание гравитационной нагрузки было выполнено перед приложением взрывных нагрузок к моделям рам. Величина гравитационных нагрузок, которые должны быть приложены к конструкции, была получена с помощью итеративного процесса, чтобы максимальное напряжение бетона из-за учитываемых расчетных нагрузок не превышало 25% эксплуатационной несущей способности [5].

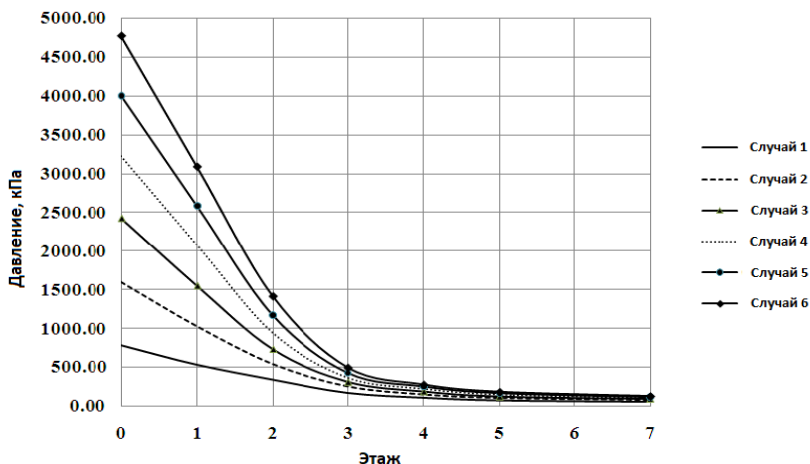


Рис. 2. Изменение давления взрыва в зависимости от этажа

Было вычислено изменение давления взрыва в зависимости от этажа для каждого варианта приложенной нагрузки и отражено на графике (см. рис. 2). При проведении численного анализа было подробно рассмотрено влияние взрыва на железобетонную раму и распространение повреждений для всех заданных случаев, а также определена область

воздействия взрывного давления. Для оценки уровня повреждений структурных компонентов использовались эффективные диаграммы пластичности материала с применением цветовой палитры. Результаты показали, что высокоимпульсные взрывы вызывают локальные повреждения структурных компонентов до значительной глобальной деформации во всей конструкции. Было выявлено, что прямое давление взрыва оказывает неблагоприятное воздействие главным образом на нижние этажи здания. Оно пропорционально весу заряда и расстоянию до точки внешнего взрыва.

На рисунке 3 проиллюстрирована реакция рамы типа 2 на воздействие, вызванное взрывом заряда массой 600 кг в тротиловом эквиваленте в течение 100 мс. Рама была подвергнута критическому повреждению, которое привело к прогрессирующему обрушению всей конструкции. В течение 50 мс наземная колонна потеряла несущую способность, арматурная сетка потеряла целостность. Область влияния взрыва распространялась на весь первый отсек и три этажа 2 отсека.

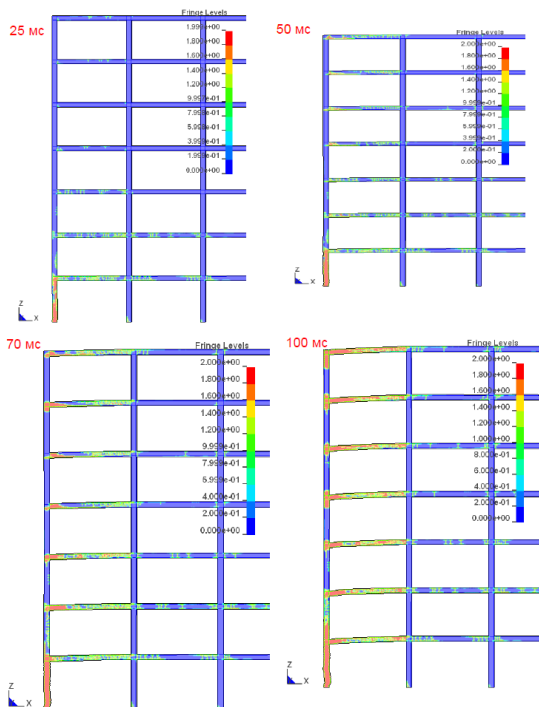


Рис. 3. Распространение повреждений в раме со временем

По результатам проведенных расчетов сделаны следующие выводы:

1) зона повреждения была ограничена определенным числом этажей и отсеков в непосредственной близости от взрыва;

2) определение области воздействия взрыва позволяет при помощи специального проектирования отдельного набора конструкций избежать прогрессирующего обрушения;

3) критерии ущерба, основанные на перемещениях, не указывали на фактические условия повреждения в критической зоне, за исключением обстоятельства прогрессирующего обрушения;

4) в качестве эффективного параметра при оценке реакции на взрывное воздействие можно использовать податливость бетона и арматуры;

5) для выявления достоверной реакции структуры на моделируемое воздействие необходимы трехмерные исследования, позволяющие учитывать все механизмы и траектории нагрузки.

Анализируя вышеизложенное, можно заключить, что для решения задачи обеспечения конструктивной безопасности и живучести многоэтажных монолитных железобетонных зданий относительно доступным и эффективным методом является компьютерное моделирование с использованием объемных конечных элементов и дискретной арматуры с нелинейными параметрами материала. В результате проведения подобных исследований можно получить достоверные параметры реакции конструкций на аварийные воздействия, которые будут полезны для формирования исходных данных при проектировании устойчивых конструктивных систем.

#### Библиографический список

1. Slavik T.A Coupling of Empirical Explosive Blast Loads to ALE Air Domains in LS-DYNA. 7th European LS-DYNA Conference Salzburg Austria. 2009.

2. Wu, Youcai, John E Crawford, and Joseph M Magallanes. 2012. "Performance of LS-DYNA Concrete Constitutive Models." 12th LS-DYNA User's Conference. Dearborn, MI.

3. Wu, Youcai, John E Crawford, Shengrui Lan, and Joseph M Magallanes. 2014. "Validation of concrete constitutive models through blast responses." 13th LS-DYNA International Conference. Dearborn, MI.

4. FEMA 426, 2003, Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Buildings, Risk Management Series, US department of Homeland Security, Washington, USA

5. Shi Y., Hao H., and Li Z.X., 2008, Numerical Derivation of Pressure-Impulse Diagrams for Prediction of RC Column Damage to Blast Loads, International Journal of Impact Engineering, Volume 35, P. 1213-1227

6. Remennikov A., 2003, A Review of Methods for Predicting Bomb Blast Effects on Buildings, Journal of Battlefield Technology. Volume 6, P. 5-10

7. Муйземнек А.Ю., Богач А.А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учебное пособие. / - Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. - 106 с.

8. Саламахин Т.М. Разрушение взрывом элементов конструкций. / М.: ВИА, 1961. 275 с.

УДК 624.042.8

**РАЗРАБОТКА  
ОПТИМАЛЬНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА  
ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
КОНСТРУКТИВНО-НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ  
УПРУГО-ОПЕРТЫХ СИСТЕМ**

Раводин И.В., Гриднев С.Ю., Скалько Ю.И.  
*ВГТУ, г. Воронеж, Россия*

Упруго-опертые конструктивно-нелинейные балочные системы могут быть использованы в качестве расчетных схем при моделировании динамического поведения целого ряда линейных объектов в строительстве и машиностроении. Особенностью таких систем является изменение расчетной схемы при замыкании зазоров и включении в работу новых связей. К конструктивно-нелинейным упруго-опертым системам относятся многопролетные мостовые сооружения и балки крановых путей, выполненные с применением резинометаллических опор, трубопроводы, прокладываемые на просадочных или сильно сжимаемых грунтах. Аналогичные расчетные схемы используются в расчётах переправ и наплавных мостов с ограничителями хода, которые позволяют преодолевать тяжелой технике водные преграды (рис.1).

Используемые методы динамического расчета конструктивно-нелинейных систем имеют ряд недостатков и требуют дальнейшего развития [1]. В то же время в научно-технической литературе и нормативных документах отсутствуют практические рекомендации по выбору оптимальных параметров и их соотношений для упруго-опертых балочных систем с односторонними связями при движущейся нагрузке. Эффективным подходом к исследованию поведения сложных динамических систем является выбор рациональной математической модели, построение

численного алгоритма и разработка на его основе программного комплекса для выполнения параметрических исследований.

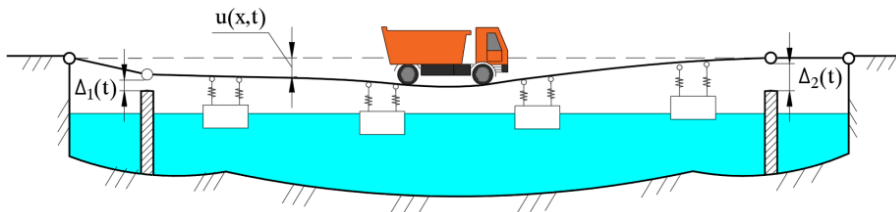


Рис. 1. Пример конструктивно-нелинейной динамической системы - наплавной мост неразрезной системы с ограничительными опорами

При численном моделировании изгибных колебаний упруго-опертых балочных систем часто используется та или иная модификация классического метода Галеркина. Идея данного метода состоит в том, что искомая функция представляется в виде суммы линейно независимых базисных функций. При этом базисные функции определены одним выражением на всей области решения и принимают на границе те же значения, что и искомая функция. Дополнительные трудности при реализации метода Галеркина для рассматриваемой математической модели связаны с тем, что по концам балочной системы размещены ограничительные опоры. В ненагруженном состоянии между балкой и опорами имеется зазор и по концам балки реализуются «свободные граничные условия». При колебаниях под действием движущейся силы зазор на одном из концов балки может замкнуться. В этом случае на конце балки реализуются условия «фиксированной границы», то есть происходит одномоментное изменение граничных условий. Это приводит к необходимости менять базисные функции в процессе решения уравнений модели в зависимости от опирания концов балки на ограничительные опоры.

Часто проблему смены граничных условий решают таким искусственным приемом, как замена в модели ограничительных опор - упругими опорами с очень высоким коэффициентом жесткости. Такой прием не всегда является удовлетворительным, поскольку появление в модели упругих связей с очень высокой жесткостью приводит к вычислительной неустойчивости при использовании глобальных функций для аппроксимации. Рассмотрим подход к решению дифференциальных уравнений в частных производных с разрывными граничными условиями путем сведения их к системе обыкновенных уравнений с использованием функций Крылова [2] и заменой ограничительных опор - упругими



связями большой жесткости. Расчетная схема динамической системы представлена на рис. 2.

В [3] авторами рассмотрены особенности моделирования конструктивно-нелинейных колебаний недеформируемого стержня со свободными концами. Полное движение деформируемой упруго-опертой балки является суммой следующих движений: движения центра масс, вращение вокруг центра масс, как твердого тела, изгибного движения балки.

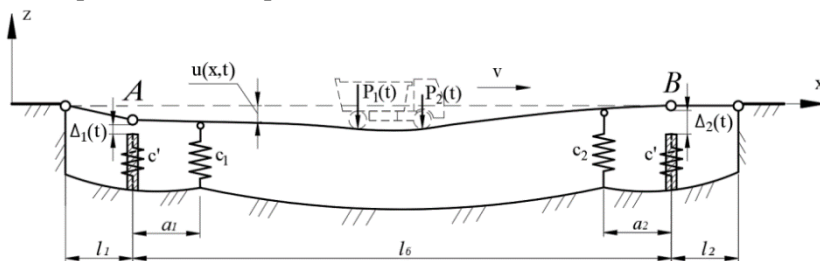


Рис. 2. Расчетная схема

С использованием метода Галеркина разработаны математическая модель и вычислительный алгоритм колебаний упруго-опертой деформируемой балки под действием движущейся нагрузки в среде Wolfram Mathematica. С помощью данной программы выполнена серия вычислительных экспериментов. В расчетах приняты следующие параметры динамической системы:

$$EI = 8,64 \times 10^5 \text{ м} \times \text{м}^2; m = 0,888 \text{ м} / \text{м}; l_b = 42,5 \text{ м};$$

$$l_1 = l_2 = 4 \text{ м}; a_1 = a_2 = 4 \text{ м}; c_1 = c_2 = 120 \text{ м} / \text{м};$$

$$P(t) = 10 \text{ мс}; v = 4 \text{ м} / \text{с}.$$

На рис. 3 представлен график полных вертикальных перемещений концов упруго-опертой балки с ограничительными опорами жесткостью  $c' = 1000 \text{ тс/м}$  и зазором  $\Delta = 0,1 \text{ м}$ .

Ограничительные опоры включаются в работу после замыкания зазора установленного зазора. Однако, при значительном увеличении жесткости упругих связей, моделирующих реальные ограничительные опоры, решение получить не удастся. Именно аппроксимация изгибных колебаний балки глобальными функциями приводит к вычислительной неустойчивости при резком включении ограничительных опор, поэтому рассмотрим изгибные колебания свободно-опертой балки с ограничительными опорами, установленными в локальной зоне максимальных перемещений, т.е. по концам балки.

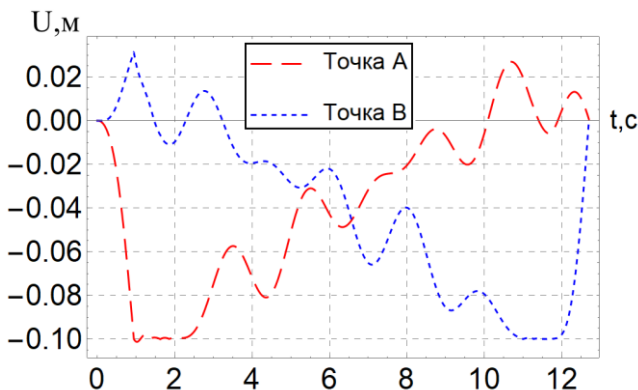


Рис. 3. Перемещения концов балки от динамической нагрузки

На рис. 4 показан график вертикальных изгибных колебаний левого конца балки при варьировании жесткости ограничительных опор. При увеличении жесткости опор в решении возникают ошибки, которые накапливаются со временем и приводят к вычислительной неустойчивости.

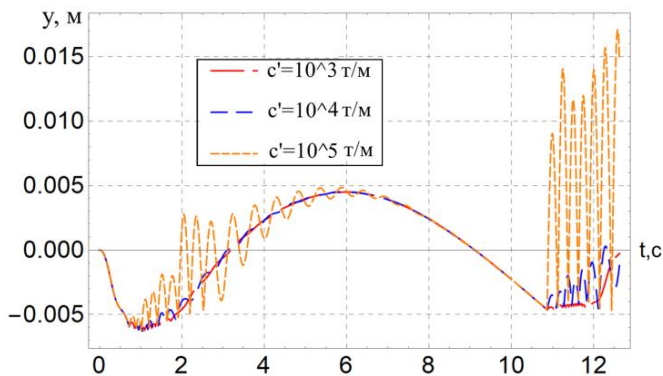


Рис. 4. Изгибные колебания левого конца балки ( $\Delta = 0,005$  м)

При построении математической модели предполагалось, что базисные функции для аппроксимации решения определены одним выражением по всей длине балки. Альтернативный метод заключается в разбиении балки на ряд элементов и построении аппроксимации кусочным образом, т.е. отдельно для каждого элемента. Авторами разработан вычислительный алгоритм с использованием кусочно-линейных функций, который включает граничные условия в уравнения модели и не требует подчинения базисных функций граничным условиям [4]. Построенная вычислительная модель реализована в среде Matlab и верифицирована с

использованием лабораторной установки для конструктивно-нелинейных колебаний шарнирно-опертой балки [5].

На рис. 5 представлены графики колебаний левого конца балки (точка А) с ограничительными опорами, полученные двумя различными способами: в Wolfram Mathematica с использованием глобальных функций; в системе Matlab с применением кусочно-линейной аппроксимации.

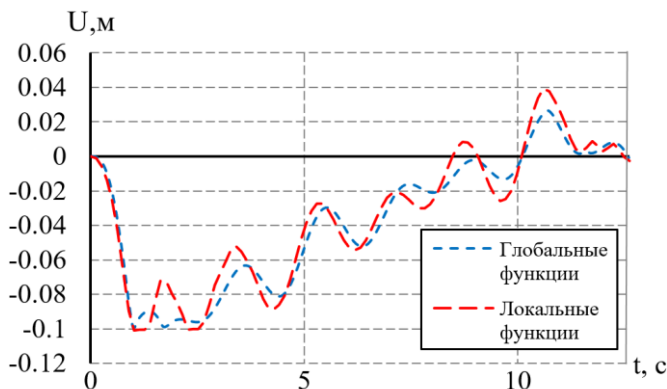


Рис. 5. Полные вертикальные колебания точки А ( $\Delta = 0,1\text{ м}$  ( $\Delta = 0,1\text{ м}$ )).

Графики колебаний показывают хорошее совпадение по частоте и амплитуде колебаний. Однако, при резком включении ограничительных опор, алгоритм на глобальных функциях ведет себя значительно менее устойчиво. Увеличение жесткости опор или уменьшение величины зазора приводит к тому, что решение «разваливается».

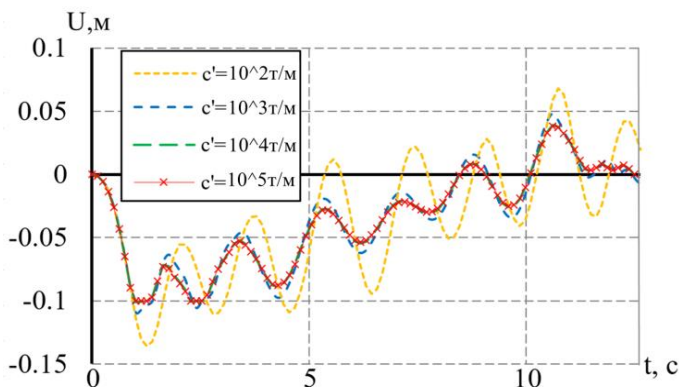


Рис. 6. Полные вертикальные колебания точки А при варьировании жёсткости ограничительных опор

Использование кусочно-линейной аппроксимации, напротив, позволяет выполнять расчет представленной динамической системы с широким диапазоном параметров. На рис. 6 показаны графики колебаний левого свободного конца балки при варьировании жесткости упругих связей, моделирующих ограничительные опоры.

Увеличение жесткости упругих связей, для достижения требуемых параметров конструкции приводит к вычислительной неустойчивости при использовании глобальных функций для построения аппроксимации. Авторами разработана математическая модель с применением аппарата обобщенных функций, которая включает граничные условия в уравнения модели и не требует подчинения базисных функций граничным условиям и, следовательно, не требует изменения базиса в процессе решения модели. Данный подход к построению модели имеет большое практическое значение для моделирования динамического поведения конструктивно-нелинейных динамических систем.

#### Библиографический список

1. Раводин, И.В. Анализ моделей и методов исследования поведения конструктивно-нелинейных систем / И.В. Раводин, С.Ю. Гриднев // Сб. мат. XVIII междунар. науч.-техн. конф. - Тула: ТГУ. - 2022. - С. 113-117.
2. Бабаков, И.М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. - 4-е изд., испр. - М.: Дрофа, 2004. - 592 с.
3. Гриднев, С.Ю. Моделирование колебаний упругоопертой динамической системы с ограничителями хода / С.Ю. Гриднев, Ю.И. Скалько, И.В. Раводин, В.В. Янаева // Строительная механика и конструкции. - Воронеж: ВГТУ. - 2019. - № 1(14). - С. 108-117.
4. Gridnev, S. Simulation of vibrations of a continuously elastic supported rod with varying boundary conditions under the action of a movable load / S. Gridnev, Yu. Skalko, I. Ravodin, V. Yanaeva // XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering. - Rostov-on-Don, 2018 - 8 p.
5. Ravodin, I. Verification of the modeling results of oscillations of an elastic-supported system with displacement limiters under moving load / I. Ravodin, S. Gridnev, Y. Skalko, V. Safronov, Thuy Van Tran Thi // Australian J. of Str. Eng. - 2023, DOI: 10.1080/13287982.2023.2214414.

УДК 623.072.3.004.121

## **СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ БАЛОК НЕПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

Сафронов В.С., Барченкова Н.А., Киселев Д.А.  
*ВГТУ, г. Воронеж, Россия*

Существенным недостатком железобетонных конструкций является низкая прочность обычного бетона на растяжение, поэтому с целью увеличения несущей способности используется армирование бетона равномерно-распределенными в его объеме мелкогабаритными волокнами (фибрами) из различных материалов: полимеров, керамики, стали и т.п. [1-2]. Для проектирования фибробетонных конструкций в настоящее время используются специальные нормативные документы [3-4], которые основаны на детерминированных подходах из-за отсутствия достаточного количества экспериментальных исследований. Совершенствование теории расчета фибробетонных конструкций в первую очередь может осуществляться на современных положениях теории надежности строительных конструкций [5]. Такие исследования в вероятностной постановке выполнены в Воронежском ГТУ применительно к сталефибробетонным балкам прямоугольного поперечного сечения [6]. При этом была использована методика нелинейного деформационного расчета и отвечающие нормативным рекомендациям [3-4] кусочно-линейные диаграммы деформирования для растянутой и сжатой зон нормальных сечений железобетонной балки с одиночной рабочей арматурой и стальными фибрами, равномерно распределенными по объему балки.

В настоящей статье исследования, описанные нами в публикации [6], развиваются применительно к сталефибробетонным балкам таврового и трапециoidalного поперечного сечения (рис. 1). Для сопоставления с результатами, полученными в работе [6], на рисунке приведены размеры и характеристики материалов, включая прямоугольное поперечное сечение.

Достоверные данные о напряженно-деформированном состоянии в нормальных сечениях сталефибробетонных балок получают с учетом рекомендуемого нормативного документа СП 360.1325800.2017 [4] кусочно-линейной диаграммы деформирования (рис.2). Растяжение фибробетона представляется тремя линейными участками в виде возрастающей и ниспадающей ветвей. В действующем нормативном документе СП 360.1325800.2017 предлагается два варианта диаграмм, отличающихся расположением ниспадающих участков. Выбор вида диаграммы

растяжения фибробетона для прочностных расчетов также определяется в зависимости от процентного содержания стальных волокон.



Рис. 1. Поперечные сечения железобетонных балок с дисперсным армированием и с одиночной ненапрягаемой арматурой

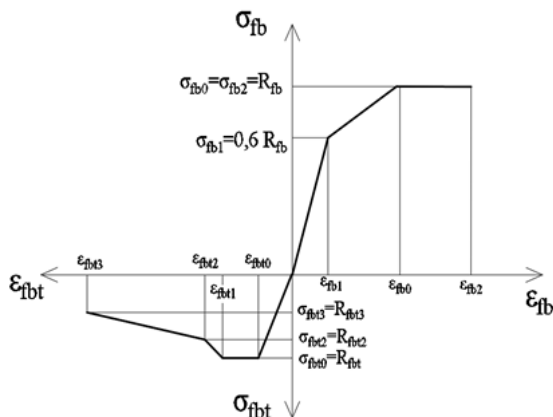


Рис. 2. Диаграмма деформирования сталефибробетона с использованием приведенных в СП 360.1325800.2017 обозначений

Особенностью приведенной диаграммы деформирования сталефибробетона является повышенное сопротивление материала при действии растягивающих напряжений.

Исследование надежности для конкретных неслучайных размеров конструкции и армирования железобетонной балки со стальной фиброй выполним с использованием предположений о нормальном распределении действующих нагрузок и прочностных характеристик сталефибробетона и ненапрягаемой стержневой арматуры.

Для описания изменчивости прочностных характеристик материалов, а также изменчивости действующих нагрузок примем нормальные

законы распределения с параметрами, соответствующими нормативной обеспеченности  $P=0,95$ , приведенных в действующих документах нормативных сопротивлений сталефибробетона, ненапрягаемой стержневой арматуры. При этом с целью изучения влияния разброса прочностных характеристик материалов железобетонных балок со стальной фиброй и рабочей ненапрягаемой стержневой арматурой обычно [7-8] варьируются коэффициенты вариации параметров деформирования сталефибробетона  $v_R$  и стержневой ненапрягаемой арматуры  $v_s$ .

Коэффициент вариации сталефибробетона, $v_R$	Процент содержания дисперсного армирования, $\mu_{fv}$ , %				
	0	0,5	1	1,5	2
	Логарифмический показатель надежности, $\rho$				
0,08	2,704	3,808	4,143	4,322	4,427
0,13	2,712	3,729	4,128	4,197	4,391
0,18	2,808	3,639	3,702	3,851	3,893
0,23	2,768	3,283	3,316	3,377	3,409

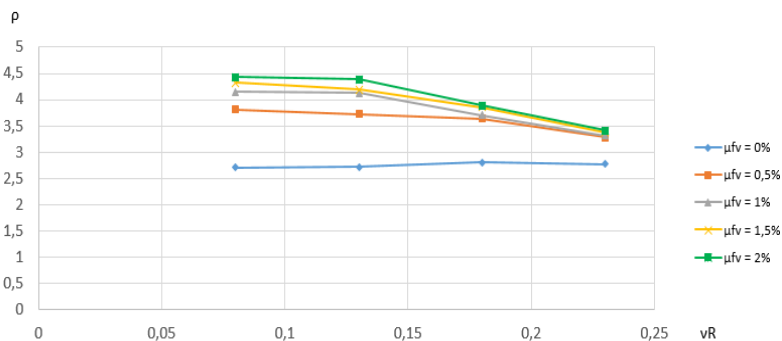


Рис. 3. Зависимости логарифмического показателя надежности  $\rho$  балки таврового сечения

от коэффициента вариации деформативности сталефибробетона

Вычислительный алгоритм для определения логарифмического показателя надежности подробно нами описан в публикации [6] для аналогичных исследований сталефибробетонной балки с прямоугольным поперечным сечением. Результаты статистических расчетов для балки таврового поперечного сечения с полкой в нижней зоне представлены на рис.3. Различными цветами изображены графики изменения логарифмического показателя надежности при разных процентах  $\mu_{fv}$  содержания фибры. В расчетах коэффициент вариации стержневой арматуры принят постоянным и

равным величине  $v_s=0,08$ . Синим цветом на рисунке показаны графики для надежности балки без фибрового армирования.

Из проведенных графиков видно, что максимальный эффект от армирования бетона стальными фибровыми волокнами происходит при минимальных процентах армирования. Этот же факт отмечался в публикации [6] и для белок прямоугольного поперечного сечения.

Результаты аналогичных численных исследований для балки трапецидального поперечного сечения представлены в виде таблицы и графиков изменения логарифмического показателя от величины  $\mu f_v$  на рис. 4.

Коэффициент вариации сталефибробетона, $vR$	Процент содержания дисперсного армирования, $\mu f_v$ , %				
	0	0,5	1	1,5	2
	Логарифмический показатель надежности, $\rho$				
0,08	3,167	4,407	4,705	4,988	5,14
0,13	3,175	4,356	4,645	4,908	5,024
0,18	3,205	4,135	4,381	4,694	4,857
0,23	3,148	3,832	4,066	4,158	4,321

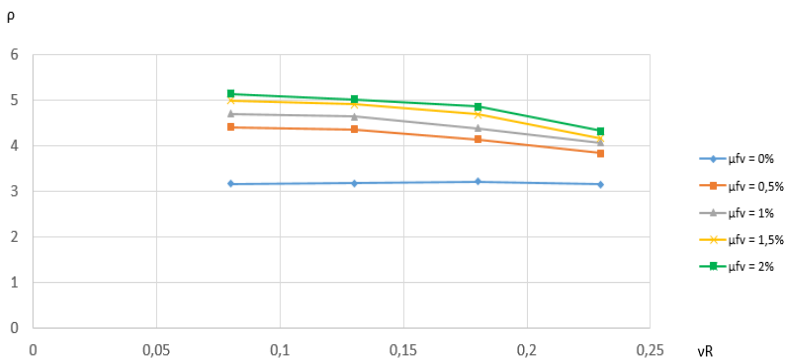


Рис. 4. Зависимости логарифмического показателя надежности  $\rho$  балки трапецидального поперечного сечения от коэффициента вариации деформативности сталефибробетона

На приведенном рисунке различие в надежности балок при разных процентах армирования бетон фиброй является более заметным. Это зависит от различия между верхней и нижней сторонами трапеции, определяющей ширину растянутой зоны балки.

По результатам выполненных исследований сделаны следующие выводы:

- Разработана и апробирована методика, алгоритм и программа деформационного расчета несущей способности и



вероятностного расчета надежности железобетонных балок с дисперсным армированием в соответствии с положениями теории надежности.

- Несущая способность и надежность железобетонных балок без дисперсного армирования значительно ниже, чем у балок с дисперсным армированием. Увеличение содержания стальных волокон приводит к незначительному росту несущей способности и надежности.
- Форма поперечного сечения существенно влияет на эффект изменения параметров надежности от применения для целей увеличения несущей способности стальных волокон в бетонной матрице конструкции.

#### Библиографический список

1. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. - М.: / НИИЖБ Госстроя СССР. 1987.-148 с.
2. Лысенко Е.Ф., Гетун Г.В. Проектирование сталефиброжелезобетонных конструкций. - Киев: УМК ВО, 1989 - 184 с.
3. СП 52-104-2006\*. Свод правил по проектированию и строительству: сталефибробетонные конструкции (к СНиП 52-01-2003). - М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2010. - 63 с.
4. СП 360.1325800.2017. Свод правил по проектированию и строительству: сталефибробетонные конструкции (к СНиП 52-01-2003). - М.: ФГУП «Стандартинформ», 2018. - 70 с.
5. Лычев А.С. Вероятностные методы расчета строительных элементов и систем: учеб пособие. - М.: АСВ, - 2008. - 184 с.
6. Сафронов В.С., Кисилев Д.А. Вероятностная оценка надежности нормального сечения изгибаемой железобетонной балки со стальной фиброй // Строительная механика и конструкции. 2023. -№ 1(36). С. 93-105.
7. Сафронов В.С., Доманов Д.И. Применение теории риска для оценки вероятности трещинообразования при стесненном кручении железобетонных мостовых балок // В сборнике: Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов. Сб. статей по материалам 7-й межд. научн. конф: в двух томах. 2013. С. 31-38.
8. Сафронов В.С., Петреня Е.Н., Петранин А.А., Степанов С.Д. Алгоритм расчета реконструируемых плитно-балочных конструкций, усиленных накладной плитой. Известия высших учебных заведений. Строительство. 1998. № 11-12 (479-480). С. 31-35.

УДК 624.042.1

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ,  
ИСПЫТЫВАЮЩИХ КОСОЙ ИЗГИБ,  
СОГЛАСНО НОРМАМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ЕВРОКОДУ**

Судакова И.А., Куравская Е.М.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Целью работы является анализ и сравнение методов расчета железобетонных конструкций, испытывающих косой изгиб, согласно нормам проектирования Российской Федерации и Еврокоду.

Ниже будут представлены основные различия при проектировании и сборе нагрузок железобетонного пилона жилого многоэтажного здания.

Таблица 1. Классы бетона и сопротивление бетона в соответствии с СП 63.13330.2018 и EN 1992-1-1

СП	Еврокод
Класс бетона: В25, где 25, МПа - кубиковая прочность бетона.	Класс бетона: С20/25, где 20, МПа - кубиковая прочность бетона $f_{ck.cube}$ ; 25, МПа - нормативная цилиндрическая прочность бетона на сжатие $f_{ck}$
Нормативные значения сопротивления бетона (В25) сжатию (призменная прочность) $R_{bn} = 18,5 \text{ МПа}$ и растяжению $R_{bmn} = 1,55 \text{ МПа}$	Нормативные значения сопротивления бетона (С20/25) сжатию (цилиндрическая прочность) $f_{ck} = 20 \text{ МПа}$ и растяжению $f_{ctk0,05} = 1,5 \text{ МПа}$
Расчетные значения сопротивления бетона осевому сжатию $R_b$ и осевому растяжению $R_{bt}$ определяют по формулам: $R_b = R_{bn} / \gamma_b$ , $R_{bt} = R_{bmn} / \gamma_{bt}$ $\gamma_b = 1,3$ , $\gamma_{bt} = 1,5$ .	Расчетные значения сопротивления бетона сжатию $f_{cd}$ и растяжению $f_{ctd}$ определяют по формулам: $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$ $f_{ctd} = f_{ctk0,05} / \gamma_c$ $\gamma_c = 1,5$
$R_b = 14,5 \text{ МПа}$ $R_{bt} = 1,05 \text{ МПа}$	$f_{cd} = 13,5 \text{ МПа}$ $f_{ctd} = 1,0 \text{ МПа}$

Стоит обратить внимание на то, что значения нормативного сопротивления на осевое сжатие (цилиндрическая прочность) по [5] выше значений нормативного сопротивления на осевое сжатие (призменная прочность) по [7], но при этом расчетные значения ниже.

Таблица 2. Коэффициенты надежности по нагрузке в соответствии с СП 20.13330.2016 и Еврокодом EN 1990

СП	Еврокод
для равномерно распределенных нагрузок: $\gamma_f = 1,3$ при полном нормативном значении менее 2,0кПа; $\gamma_f = 1,2$ при полном нормативном значении 2,0 кПа и более. для снеговой нагрузки $\gamma_f = 1,4$ . для ветровой нагрузки $\gamma_f = 1,4$ . для веса строительных конструкций и грунтов согласно п.7.2 СП 20.13330.2016	для постоянных нагрузок $\gamma_G = 1,35$ для временных нагрузок $\gamma_c = 1,5$

Однако, [1] допускает использование национальных приложений для определения значений коэффициентов надежности по нагрузке в отдельно взятой стране.

Стоит обратить внимание, что значения коэффициентов сочетания нагрузок в соответствии с [1] ( $\psi$  при основных сочетаниях нагрузок) значительно меньше чем в [6]. Это корректируется коэффициентами надежности по нагрузке.

Согласно [4], ветровую нагрузку можно определять как ветровое давление на поверхность  $w_e$  или ветровое усилие  $F_{w,e}$ . В предложенной работе выполнено сравнение ветрового давления.

Согласно [7] расчеты бетонных и железобетонных конструкций следует производить по предельным состояниям первой и второй предельной группы.

Прочность пилона обеспечивается несущей способностью бетона и арматуры, установленной в продольном направлении.

Таблица 3. Сочетания нагрузок в соответствии с СП 20.13330.2011 и Еврокодом EN 1990

СП	Еврокод
<p>Для первой и второй групп предельных состояний:</p> <p>Основное сочетание нагрузок, состоящее из постоянных, длительных и кратковременных:</p> $C_m = P_d + (\psi_{11}P_{11} + \psi_{12}P_{12} + \psi_{13}P_{13} + \dots) + (\psi_{11}P_{11} + \psi_{12}P_{12} + \psi_{13}P_{13} + \dots)$ <p>где <math>P_d</math> - постоянная нагрузка;  <math>P_{11}</math> - длительная нагрузка;  <math>P_{1i}</math> - кратковременная нагрузка</p> <p>Коэффициенты сочетаний для длительных нагрузок: <math>\psi_{11} = 1</math> (основная нагрузка), <math>\psi_{12} = \psi_{13} = \dots = 0,95</math> (остальные нагрузки).          Коэффициенты сочетаний для кратковременных нагрузок:  <math>\psi_{11} = 1</math> (основная нагрузка),  <math>\psi_{12} = 0,9</math> (вторая нагрузка),  <math>\psi_{13} = \psi_{14} \dots = 0,7</math> (остальные нагрузки).</p> <p>Особое сочетание нагрузок, состоящее из постоянных, длительных, кратковременных и одной из особых нагрузок:</p> $C_s = C_m + P_s$ <p>при этом <math>\psi_{11} = \psi_{12} \dots = 0,8</math></p>	<p>Для первой группы предельных состояний:</p> <p>Основное сочетание нагрузок:</p> $\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} G_{k,i}$ <p>Особое сочетание нагрузок:</p> $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{2,i} G_{k,i}$ <p>Для второй группы предельных состояний:</p> $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} G_{k,i}$ <p>где <math>\gamma_{G,i}</math> - коэффициент надежности по нагрузке (постоянная нагрузка);  <math>\gamma_p</math> - коэффициент надежности по нагрузке (нагрузка от предварительного напряжения); <math>\gamma_{Q,i}</math> - коэффициент надежности по нагрузке (временная нагрузка);  <math>G_{k,j}</math> - постоянная нагрузка; <math>G_{k,i}</math> - остальные временные нагрузки;  <math>P</math> - нагрузка от предварительного напряжения;  <math>Q_{k,1}</math> - основная временная нагрузка;  <math>\psi_0, \psi_1, \psi_2</math> - коэффициенты сочетания нагрузок (в зависимости от назначения здания, типа нагрузки)  <math>A_d</math> - особая нагрузка</p>

Таблица 4. Снеговые и ветровые нагрузки в соответствии с EN 1991-1 и в соответствии с СП 20.13330.2011

СП	Еврокод
<p>Снеговая нагрузка:</p> $S_0 = c_e c_t \mu S_g$ <p>где <math>\mu</math> коэффициент формы, учитывающий переход от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие;</p> <p><math>c_e</math> - коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов;</p> <p><math>c_t</math> - термический коэффициент;</p> <p><math>S_g</math> - нормативное значение веса снегового покрова на 1 м горизонтальной поверхности земли.</p>	<p>Снеговая нагрузка:</p> $s = \mu_i C_e C_t S_k$ <p>где <math>\mu_i</math> коэффициент формы снеговых нагрузок;</p> <p><math>C_e</math> коэффициент окружающей среды;</p> <p><math>C_t</math> температурный коэффициент;</p> <p><math>S_k</math> характеристическое значение снеговых нагрузок на грунт.</p>
<p>Ветровая нагрузка:</p> $W = W_m + W_g$ $W_m = w_0 \cdot k(z_0) \cdot c$ <p>где <math>k(z_0)</math> коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления;</p> <p><math>w_0</math> нормативное значение ветрового давления Пульсационная составляющая равна</p> $W_g = W_m \cdot \xi(z_0) \cdot v_0$ <p>где <math>\xi(z_0)</math> коэффициент пульсации давления ветра;</p> <p><math>v_0</math> коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра</p>	<p>Ветровая нагрузка:</p> $w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$ <p>где <math>q_p(z_e)</math> пиковое значение скоростного напора ветра;</p> <p><math>c_{pe}</math> аэродинамический коэффициент внешнего давления</p> $q_p(z_e) = c_e(z) \cdot q_b$ <p>где <math>q_b</math> скоростной напор (нормативное значение ветрового давления);</p> <p><math>c_e(z)</math> общий высотный коэффициент</p>

На рисунке 1 изображены силы, действующие на пилон. Этот рисунок можно разложить на простые схемы (рис.2).

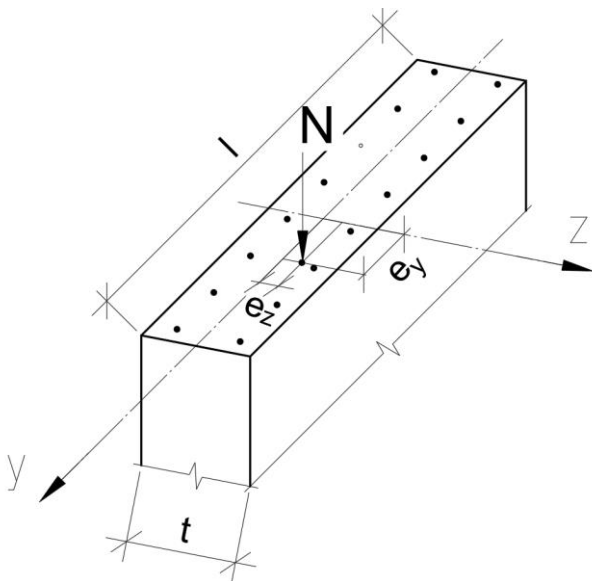


Рис. 1. Схема приложения нагрузки при косом внецентренном сжатии с бимоментом

При загрузении горизонтального сечения по рис. 1 перенос  $N$  сопровождается появлением моментов  $M_y$  и  $M_z$ , а также бимомента

$$M_y = N \cdot e_y; M_z = N \cdot e_z; T = N e_y e_z. \quad (1)$$

Тогда условие прочности принимает вид:

$$\frac{N}{A} \left( 1 + \frac{6e_y}{l} + \frac{6e_z}{t} + \frac{36e_y e_z}{lt} \right) \leq \frac{N_c}{A}. \quad (2)$$

Рассматривая уравнения (1) и (2), совместно получим следующее условие прочности:

$$N \leq \frac{N_y N_z}{N_c}, \quad (3)$$

где  $N_c$  - предельная сжимающая сила, которую может воспринять горизонтальное сечение пилона при центральном ее приложении.

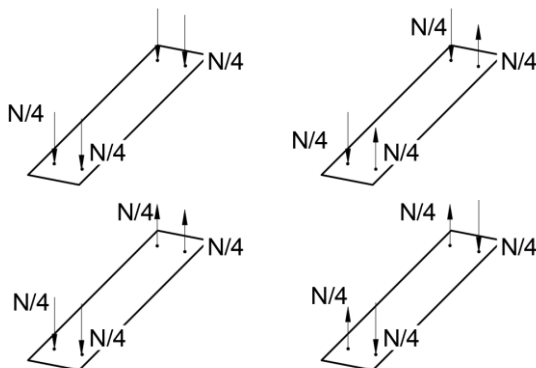


Рис. 2. Схема приложения нагрузок при косом внецентренном сжатии с бимоментом

Предельные усилия  $N_y, N_z, N_c$  определяют по СП63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции»:

$$N_c = \alpha R_b A; N_y = \alpha R_b A_y; N_z = \alpha R_b A_z, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий вид бетона;  $A_y, A_z$  - площадь сжатой зоны бетона при загрузении с соответствующим эксцентриситетом  $e_y$  или  $e_z$ .

$$A_y = t \cdot l \left( 1 - \frac{2e_y \eta_y}{l} \right), A_z = t \cdot l \left( 1 - \frac{2e_z \eta_z}{t} \right) \quad (5)$$

где  $\eta_y, \eta_z$  коэффициенты продольного изгиба

$$\eta_y = 1; \eta_z = 1 / \left( 1 - \frac{N}{N_{cr}} \right), \quad (6)$$

где  $N_{cr}$  - условная критическая сжимающая сила, приводящая к потере устойчивости стенки, определяемая по п.8.1.15 СП63.13330.2018

Согласно Еврокоду EN2, целью расчета конструкций является определение распределения внутренних сил и моментов или напряжений, относительных деформаций и перемещений во всей конструкции или ее части.

В [5] не указан метод, которым можно было бы воспользоваться для расчета колонн, подверженных двухосному изгибу. Кодекс ограничивается только изложением основных принципов. Решение задачи выполняется с помощью двух подходов.

Первый подход - основан на наблюдениях, согласно которым форму графика взаимодействий  $M_x - M_y$  можно представить в виде суперэллипса; Суперэллипс описывается уравнением следующего вида:

$$x^a + y^a = k . \quad (7)$$

Для описания поверхности взаимодействия используется следующее уравнение:

$$\left( M_{Edx} / M_{Rdx} \right)^a + \left( M_{Edy} / M_{Rdy} \right)^a = 1 \quad (8)$$

Чтобы определить, насколько близка нагрузка, при которой раздробляется элемент, удобно использовать отношение  $\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}$  в EN 1992-1-1

указывается взаимосвязь этого показателя и величины  $a$ . Промежуточные значения можно получить при помощи интерполяции.

$N_{Rd}$  - это нагрузка, при которой колонна будет раздроблена. Она определяется следующим образом:

$$N_{Rd} = A_c f_{cd} + A_s f_{yd} . \quad (9)$$

Сложность этого метода, с точки зрения практического применения, заключается в том, что он не может использоваться при прямом проектировании, поскольку определить  $N_{Rd}$  можно только тогда, когда известна площадь арматуры. Следовательно, это итерационный метод.

В нормах Великобритании BS 8110 используется значительно менее сложный, но менее точный метод. Проектирование осуществляется по увеличенному одноосному моменту, который учитывает действие изгиба по двум осям. Такой одноосный момент получают при помощи одного из уравнений:

$$\begin{aligned} \text{если } \frac{M_x}{h'} > \frac{M_y}{b'} , \text{ то } M'_x &= M_x + \frac{\beta h' M_y}{b'} , \\ \text{если } \frac{M_x}{h'} < \frac{M_y}{b'} , \text{ то } M'_y &= M_y + \frac{\beta b' M_x}{h'} , \end{aligned}$$

где  $M_x, M_y$  - расчетные моменты по осям  $x$  и  $y$  соответственно;  $M'_x$  и  $M'_y$  - расчетные одноосные моменты, по которым осуществляется проектирование сечения;  $b'$  и  $h'$  - расчетная высота. Коэффициент  $\beta$  в BS 8110 определяется как функция  $N / bhf_{ck}$ . На основании  $f_{ck}$ , его можно получить с помощью формулы:



$$\beta = 1 - N / bhf_{ck} (0,3 < \beta < 1,0). \quad (10)$$

Огромное преимущество этого метода - его простота. Однако, этот подход является достаточно приближенным.

В процессе расчета железобетонного пилона, подверженному косому изгибу, были получены результаты, приведенные в таблице 5.

Таблица 5. Результаты расчетов

Наименование	СП 63.13330.2018	EN 1992-1-1-2009	Разница, %
Продольная сила $N$ , кН	2670,4	3618,7	26,2%
Изгибающий момент вдоль оси $x$ $M_x$ , кН·м	2,14	3,14	25,3%
Изгибающий момент вдоль оси $y$ , кН	38,05	51,0	25,4%
Армирование, мм <sup>2</sup>	1072	1164	7,9%

В результате анализа полученных данных обнаружено, что требуемое количество арматуры при расчете по нормам РФ меньше, чем требуемое количество арматуры при расчете по нормам EN. Повышенный расход суммарной арматуры по нормам EN обусловлен большими значениями нормативных нагрузок и коэффициентами надежности по нагрузке.

#### Библиографический список

1. EN 1990. Eurocode 0: Basis of structural design.
2. EN 1991-1-1. Eurocode 1: Actions sur les structures Partie 1-1: Actions generales - Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation batiments.
3. EN 1991-1-3. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads.
4. EN 1991-1-4. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions
5. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
6. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*.
7. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва: Изд-во стандартов, 2012. 356 с.

УДК 539.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЗДАНИЕ С ДВУСКАТНОЙ КРЫШЕЙ

Теличко В.Г., Ванян М.Р.  
ТулГУ, г. Тула, Россия

Прежде чем заниматься численным расчётом, необходимо было получить решение, согласованное с СП, поэтому задача была решена вручную.

В документе [3] предлагается рассчитывать нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия по следующей формуле:

$$S_0 = c_e c_t \mu S_g, \quad (1)$$

где значения  $c_e$ ,  $c_t$  и  $S_g$  определяются по таблицам или рассчитываются по прописанным алгоритмам, а значение  $\mu$  либо берётся по стандартным схемам, либо получается в результате эксперимента в аэродинамической трубе.

В качестве тестовой задачи была выбрана геометрия по схеме Б.1 (Б), вариант 2 (здание с двускатным покрытием без ходовых мостиков или аэрационных устройств по коньку покрытия). В схеме присутствует один параметр: угол наклона крыши  $\alpha$ , от которого зависит величина  $\mu$ . Так, при  $\alpha > 60^\circ$   $\mu = 0$  (снег не накапливается), при  $15^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$  используется приведённая в приложении эпюра, при  $\alpha < 15^\circ$   $\mu = 1$ . Заметим, что для  $40^\circ < \alpha \leq 60^\circ$  значение отсутствует.

Для геометрии были приняты следующие габариты:

- длина  $l$ : 10 м;
- ширина  $b$ : 8 м;
- высота  $h$ : 6 м;
- угол наклона  $\alpha$ :  $30^\circ$ .

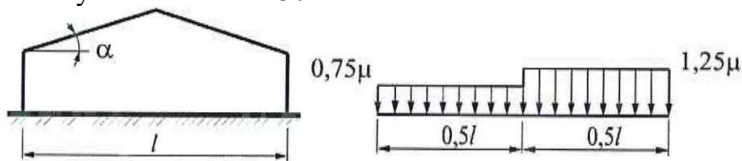


Рис. 1. Схема Б1 б) и вариант 2 эпюры коэффициента перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие из СП 20.13330.2016

Для определения  $S_g$  (нормативное значение веса снегового покрова на  $1 \text{ м}^2$  горизонтальной поверхности земли) было принято взять IV снеговой район:

$S_g = 2,0$  (в нём расположен, в частности, город Санкт-Петербург - это будет использовано нами в численном расчёте).

Определение  $c_e$  (учёт сноса снега с покрытия под действием ветра или иных факторов) зависит от того, защищено ли здание от прямого воздействия ветра либо застройкой, либо географией. В этом случае принимается  $c_e = 1,0$ , в противном - рассчитывается по формуле:

$$c_e = (1,2 - 0,4\sqrt{k})(0,8 + 0,002l_c), \quad (2)$$

где  $k$  принимается по таблице, а  $l_c$  - характерный размер покрытия, в нашем случае равный 9,6. Поскольку высота здания  $h$  меньше его поперечного размера  $d$ , эквивалентная высота равна 6 м. Поскольку для данного значения строчки в таблицы нет, величина была рассчитана интерполяцией (для типа местности В), что дало 0,53. В таком случае  $c_e = 0,744$ .

Значение  $c_z = 1,0$  ввиду отсутствия повышенного тепловыделения и прочих связанных с образованием талой воды факторов. Таким образом, значение  $S_{0,л} = 1,116 \text{ кПа}$  для левой половины эпюры (наветренная сторона сооружения) и  $S_{0,п} = 1,86 \text{ кПа}$  - для правой (подветренная сторона).

Перейдём к численному решению задачи. В объёме  $40 \times 38 \times 15 \text{ м}$  рассматривается обтекание здания размерами  $10 \times 8 \times 6 \text{ м}$  двухфазным потоком (где первичная фаза - газ, вторичная - твёрдые частицы, обе фазы в эйлеровой постановке), скорость которого на источнике имеет логарифмический профиль, в течение 50 мин с шагом по времени 1 с. Снеготложения моделируются использованием модели уноса-отложения.

В данной задаче плотность вторичной фазы равна  $300 \text{ кг/м}^3$ .

Из конечнообъёмной модели образуется аэродинамический домен в соответствии с рисунком 2. Поскольку начальная скорость потока (и, соответственно, начальная скорость трения) неизвестны, необходимо было как провести серию дополнительных стационарных расчётов, так и рассмотреть несколько случаев с различными её значениями.

Отдельные серии расчётов проводились для подбора начальной скорости потока (с вычислением соответствующей ей начальной скорости трения). Вычисления показали, что задача достаточно чувствительна к повышению скорости и понижению доли снега: при достижении некоторых критических отметок снегоперенос становится нелинейным и уже не выходит на стационарный режим.

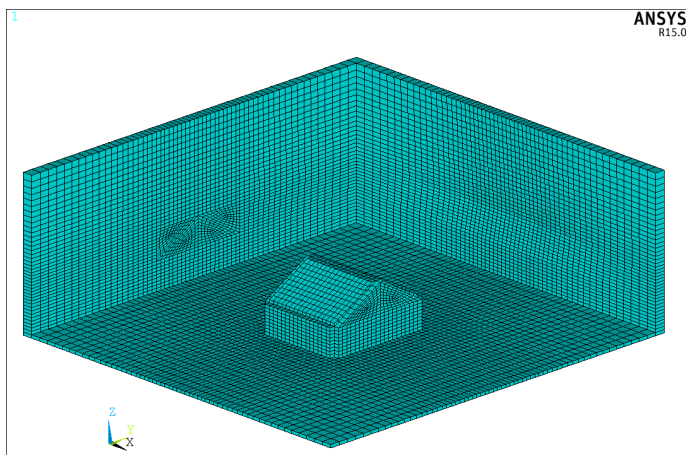


Рис. 2. Срез наружного слоя расчётной сетки в ANSYS Mechanical, изометрия. Количество узлов модели - 143157, ячеек - 134400.

Значение для скорости ветра по СП было вычислено с помощью карты районирования территории РФ по ветровому давлению (Приложение Е, №2). Существует следующая зависимость между давлением  $w_0$  и скоростью ветра  $v$  [3]:

$$w_0 = 0,43v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{w_0}{0,43}}. \quad (3)$$

Полученное значение  $v$  было использовано нами в качестве  $u_0$ . Также с помощью этой формулы из логарифмического профиля была получена величина начальной скорости трения  $u_*^0$ :

$$u_*^0 = \ln^{-1} \left( \frac{z}{z_0} \right) k \sqrt{\frac{w_0}{0,43}} \Big|_{z=15}. \quad (4)$$

Санкт-Петербург находится во II ветровом районе, которому соответствует давление  $w_0 = 300$  Па, что даёт величину  $u_0 = 26.41$  м/с. Отметим, что, согласно розе ветров Санкт-Петербурга (рис. 3), скорости такого порядка редки, но не исключительны, однако полученное значение мы будем считать близким к экстремальному.

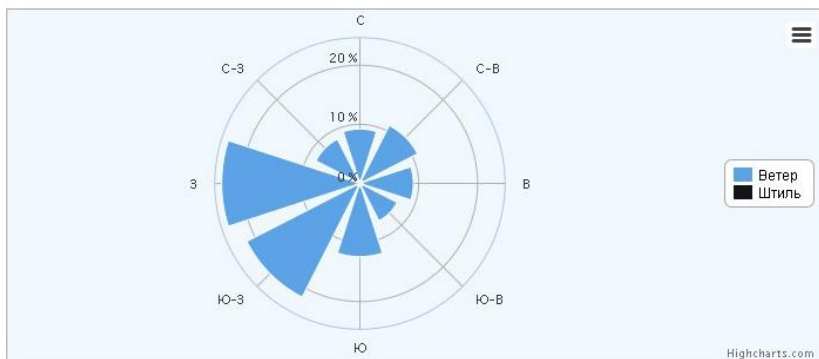


Рис. 3. Роза ветров Санкт-Петербурга [2].

Также для расчётов были выбраны значения скорости 4 м/с и 9,3 м/с.

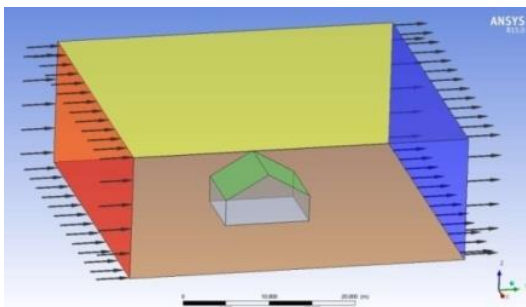


Рис. 4. Схема аэродинамического домена для исследования образования снеговых мешков при обдувании здания по направлению оси Y

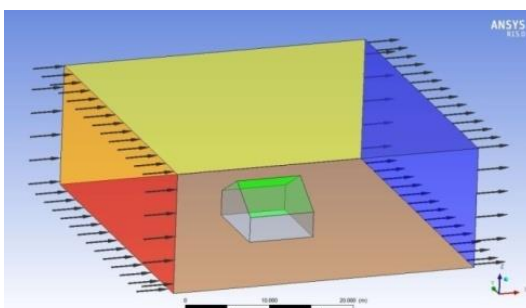


Рис. 5. Схема аэродинамического домена для исследования образования снеговых мешков при обдувании здания по направлению оси X

Моделирование формы снегоотложений проводилось при помощи нестационарного расчёта с использованием схем второго порядка точности для достижения более аккуратных результатов.

По итогам расчёта были получены смещения узлов сетки, вызванные наносом или уносом снега, по которым затем строилась новая геометрия и булево вычиталась из исходной с помощью ANSYS Workbench (модули DesignModeler и Meshing), что позволяло получить формы снегоотложений.

В целом можно говорить, что картина рассчитанных снегоотложений согласуется с приводимыми в СП данными о распределении снега по геометрии покрытия, несмотря на расхождение по абсолютным значениям.

Давление от мешков на горизонтальную проекцию покрытия рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{\gamma V g}{F}, \quad (5)$$

где  $V$  - объём снега,  $F$  - площадь горизонтальной проекции.

Затем полученные нагружения комбинируются при помощи, усреднённой почетырёх направлениям розы ветров в одно на каждую половину покрытия:

$$\begin{pmatrix} S_{front} \\ S_{back} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{Yf} & S_{Xr} \\ S_{Yb} & S_{Xl} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E & W \\ N & S \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Приведём некоторые иллюстрации для случая  $u_0 = 26.41$  м/с.

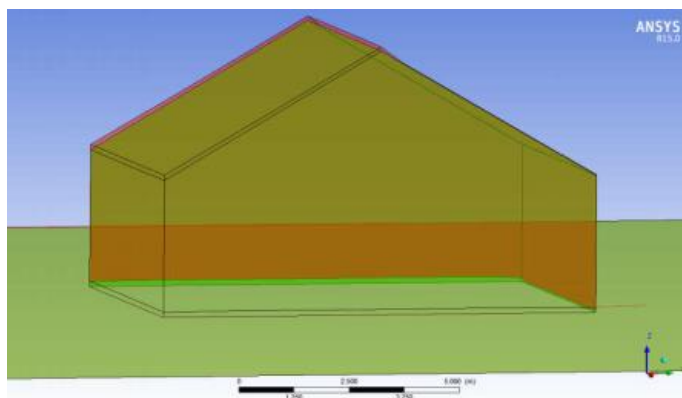


Рис. 6. Новая геометрия, наложенная на исходную, для случая обдувания в направлении  $Y$

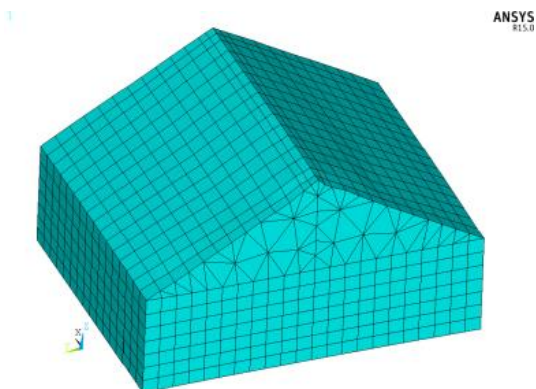


Рис. 7. Геометрия здания со снегоотложениями для случая обдувания в направлении оси X, полученная путём последовательного обхода узлов сетки элементов с созданием геометрических оболочек

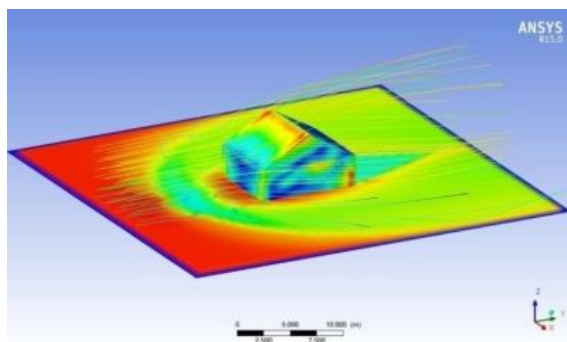


Рис. 8. Линии тока вокруг здания при обдувании в направлении оси Y с визуализированными снегоотложениями и значениями напряжения сдвига на стенках и крыше в  $t = 3000$  с.

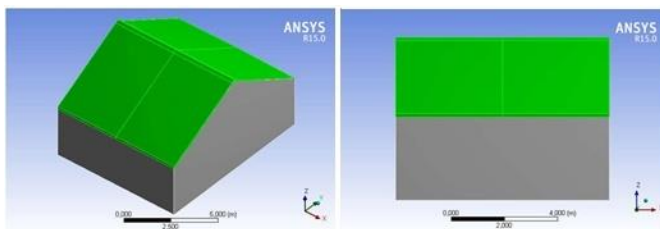


Рис. 9. Формы снеговых мешков, изометрия (слева) и вид спереди (справа).

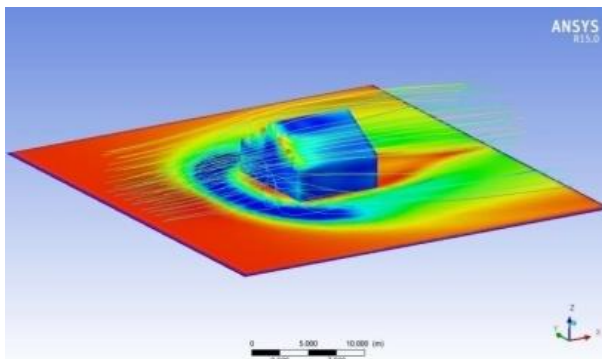


Рис. 10. Линии тока вокруг здания при обдувании в направлении оси X с визуализированными снегоотложениями и значениями напряжения сдвига на стенках и крыше в  $t = 3000$  с.

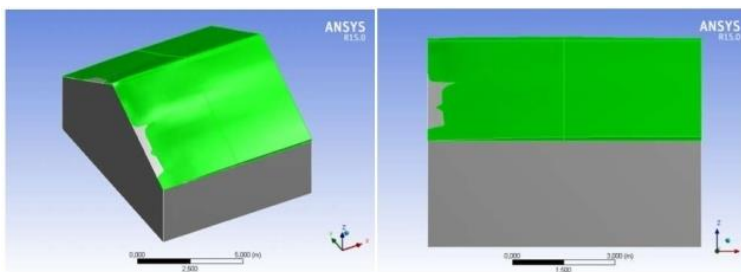


Рис. 11. Формы снеговых мешков, изометрия (слева) и вид спереди (справа)

#### Библиографический список

1. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Пособие по вычислительной аэрогидродинамике. - М.: АСВ, 2017. - 714 с.
2. Роза ветров Санкт-Петербурга. URL: [https://www.meteoblue.com/en/weather/forecast/modelclimate/stpetersburg\\_russia\\_498817](https://www.meteoblue.com/en/weather/forecast/modelclimate/stpetersburg_russia_498817)
3. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия
4. ANSYS® Fluent, Release 15, Help System, Theory Guide, ANSYS, Inc.
5. ASCE. Wind tunnel testing for buildings and other structures. - American Society of Civil Engineers, 2012.
6. ASCE 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.



УДК 539.32, 681.5

## **К РЕШЕНИЮ СВЯЗАННОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В РЕАЛЬНОЙ РАСЧЕТНОЙ ПРАКТИКЕ**

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

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

В современной практике инженерного проектирования и проведения расчетов активно используются различные программные комплексы, реализующие метод конечных элементов (МКЭ), такие как ЛИРА-САПР, SCAD, STARK ES и другие, которые позволяют с достаточно высокой точностью моделировать поведения различных сооружений из композитных материалов в условиях механических и температурных воздействий.

Однако, для учёта (с применением МКЭ) особенностей действительной работы конструкций, выполненных из материалов с «усложнёнными» свойствами, необходимо, по-видимому, использование универсального программного обеспечения, типа пакетов прикладных программ ANSYS, SAP 2000 или COMSOL [1, 2], включающих в себя опции для прямого учета экспериментальных данных, позволяющих пользователю напрямую осуществить ввод полученных в ходе экспериментальной работы диаграмм деформирования материалов в среду пакета САПР [2].

В качестве сооружения, воспринимающего механические и температурные воздействия предлагается рассмотреть такой класс сооружений, который обладал бы формой оболочки вращения и при этом значимым градиентом температуры по толщине стенки, и при этом широко использовался на практике. Указанным требованиям соответствуют следующие распространенные типы сооружений: дымовые трубы, радиорелейные башенные опоры и грануляционные башни. Рассмотрим указанные типы сооружений подробнее.

Железобетонные дымовые трубы с появлением скользящей и переставной опалубки стали широко применяться в строительстве для отвода газов от котельных электростанций и заводов, а также от различных тепловых агрегатов заводов черной и цветной металлургии, химической промышленности и других. Предельная температура газов, при которой применяются трубы из обычного бетона, не превышает 200°C на внутренней поверхности трубы (бетона). Монолитные трубы могут иметь цилиндрическую форму с минимальным диаметром выходного отверстия до 3,6 м. Несмотря на известный перерасход бетона, применение цилиндрических труб малых и средних диаметров высотой до 50-60 м

оказывается обычно эффективным благодаря меньшей стоимости и большей скорости процесса их возведения [3].

Железобетонные башенные опоры систем телевидения и радиовещания предназначены для установки на определенной высоте различных антенн связи и размещения другого радиотехнического оборудования. Основные достоинства: малая площадь застройки, возможность размещения вблизи жилых массивов, удобная эксплуатация. Цилиндрическая форма ствола с постоянной величиной наружного диаметра характерна для радиорелейных башен высотой до 100 м. Диаметры цилиндрических стволов назначаются равными  $1/7-1/14$  их высоты (диаметр в пределах от 4 до 8,5 м). Толщину стенок цилиндрических стволов рекомендуется принимать не менее 150...250 мм. Стволы возводят из бетона марки М300-М400, армируют меридиональной и кольцевой арматурой классов А400 и А300. При расчете конструкций ствола учитываются, в том числе, температурные воздействия, обусловленные солнечной радиацией от одностороннего нагрева ствола, а также разностью температуры воздуха внутри и снаружи башни, причём учитываются летний и зимний режимы эксплуатации [3].

Грануляционная башня, используемые при производстве N-, NP-, NPK-удобрений и известково-аммиачной селитры, представляет собой железобетонный корпус диаметром 10-20 м и высотой до 120 м, в котором наверху размещено оборудование, необходимое для приема плава и хлорида калия, их смешения и разбрызгивания, а внизу - окна для забора воздуха и устройство для выгрузки гранул. При производстве NPK-удобрений перед подачей на разбрызгиватель плав азот- и фосфорсодержащих компонентов смешивают с нагретым и классифицированным хлоридом калия. Температуру плава в сборниках и смесителях поддерживают постоянной. Например, процесс гранулирования высококонцентрированного плава аммиачной селитры осуществляется в полном объеме грануляционной башни диаметром 12 м. Высота полета гранул - 30 м. Охлаждение гранул аммиачной селитры производится до температуры не выше 50°C [4].

В работе предлагается рассмотреть модельную задачу определения напряжений и перемещений замкнутой цилиндрической оболочки из железобетона, опертой с одного торца, при сложном термомеханическом нагружении, приняв в качестве исходных данных расчёт ствола дымовой трубы [5].

Верификацию получаемых результатов предлагается выполнять, в том числе, путём сравнения с уже апробированной моделью,

учитывающей эффекты связанные с разносопротивляемостью (чувствительностью к виду напряженного состояния) в условиях температурного воздействия, предложенной в работах Трещёва А.А., Теличко В.Г., Делягина М.Ю. [6-11].

Выполнение данной работы подтверждает практическую значимость исследований, показывает применимость для инженерных задач, математических моделей, основанных на теории материалов чувствительных к виду напряженного состояния при решении связанных термомеханических задач.

#### Библиографический список

1. ANSYS Structural Analysis Guide. - Ansys Inc., 2009.
2. Лозовой, И.А. Средства автоматизированного проектирования и анализа механических и тепловых процессов конструкций РЭС / И.А. Лозовой, О.Ю. Макаров, С.Ю. Сизов, А.В. Турецкий // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. - №5. - С. 4-6.
3. Железобетонные конструкции: Спец. курс. Учеб. пособие для вузов / В. Н. Байков и др. - 3-е изд. перераб. - М.: Стройиздат, 1981. - 767 с.
4. ИТС 2-2019 Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. - М.: Бюро НДТ, 2019. - 825 с.
5. Кричевский, А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. - М.: Стройиздат, 1984. - 148 с.
7. Трещёв, А.А. Напряжённо-деформированное состояние тонких прямоугольных пластин из разносопротивляющихся материалов в условиях термосилового нагружения / А.А. Трещёв, А.А. Петров, В.Г. Теличко // Изв. ТулГУ. Технические науки. - 2008. - № 1. - С. 110-117.
8. Петров, А.А. Поперечный изгиб тонких прямоугольных пластин из разносопротивляющихся материалов в условиях термомеханического нагружения / А.А. Петров, В.Г. Теличко, А.А. Трещёв // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. - 2009. - № 1 (6). - С. 172-178.
9. Трещёв, А.А. Анализ определяющих соотношений для нелинейных изотропных разносопротивляющихся материалов в задачах термоупругости / А.А. Трещёв, В.Г. Теличко, Д.С. Чигинский // Изв. ТулГУ. Технические науки. - 2011. - № 2. - С. 547-555.
10. Трещёв, А.А. Связанная задача термомеханического изгиба тонких прямоугольных пластин из изотропных разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещёв, В.Г. Теличко, Д.С. Чигинский // Изв. ТулГУ. Технические науки. - 2011. - № 2. - С. 494-502.

11. Трещёв, А.А. Термоупругий потенциал деформации для нелинейных материалов, находящихся в условиях термомеханического нагружения / А.А. Трещёв, В.Г. Теличко, Д.С. Чигинский [и др.] // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. - 2012. - № 4 (14). - С. 66-74.

12. Делягин, М.Ю. Применение МКЭ для решения связанных задач термоупругости нелинейных материалов, чувствительных к виду напряженного состояния / М.Ю. Делягин, В.Г. Теличко, А.А. Трещев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11-1. - Тула: ТулГУ. 2014. - С. 317-326.

УДК 539.32, 681.5

**РЕШЕНИЕ СВЯЗАННОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ  
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ИЗГИБА  
ДЛЯ ТОНКОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ  
ИЗ НЕЛИНЕЙНОГО ИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА  
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS**

Чигинская И.А., Теличко В.Г., Чигинский Д.С.  
*ТулГУ, г. Тула, Россия*

В настоящее время в строительной отрасли широкое применение находят материалы, отличительной особенностью которых является зависимость физико-механических характеристик от вида напряжённого состояния, которые были названы материалами с «усложненными» свойствами (разносопротивляющимися материалами или материалами чувствительными к виду напряженного состояния) [1]. С момента становления теории разносопротивляющихся материалов, относящегося к началу шестидесятых годов двадцатого столетия, разными авторами было предложено большое количество разнообразных моделей и определяющих соотношения [1-10]. Большая их часть базировалась на грубых гипотезах и имела ограниченное практическое применение.

В качестве наиболее непротиворечивой и универсальной теории деформирования разносопротивляющихся материалов можно рассматривать теорию [1, 2], которая в свою очередь послужила основой для большого количества работ. В частности, в исследовании [2] была показана важность учёта связанности полей напряжений и температуры при расчёте элементов конструкций, выполненных из разносопротивляющихся материалов: в работе [11] - для пластин, в [12] - для оболочек.

Однако, в работе [11] рассмотрен частный случай задания поля температуры в виде граничные условия первого рода - распределение температуры на поверхностях элементов конструкций в любой момент

времени. Дополнение имеющегося решения [12] возможностью учёта граничных условий третьего рода в виде температуры среды, окружающей элемент конструкции, и закона теплообмена между поверхностью элемента и окружающей средой, позволит существенно расширить сферу применения предложенных решений на более широкий класс задач конвективного теплообмена.

Вместе с этим, в течение последних десятилетий активно исследуются вопросы связанной термоупругости, базирующиеся на численном моделировании в специализированных конечно-элементных пакетах, а их функционал непрерывно совершенствуются. Например, в программном комплексе ANSYS в настоящее время реализована возможность учёта нелинейной работы материалов посредством задания экспериментальных диаграмм деформирования, в том числе отличающихся при растяжении и сжатии [13].

Однако, применение новых программных инструментов требует оценки получаемых результатов (верификации) посредством проведения параллельных расчетов с использованием независимо разработанных программных средств и сравнительный анализ полученных результатов.

В работе используя разработанную в [12] программу, на основе теории [2] на базе объемных конечных элементов (КЭ) в форме тетраэдра с учётом воздействия температуры и задания граничных условий третьего рода, проведена верификация опции ANSYS [13], позволяющей учесть эффект различной нелинейной работы материала при растяжении и сжатии в рамках решения связанной нестационарной задачи термомеханического изгиба тонкой прямоугольной пластины из изотропного разносопротивляющегося материала.

Решение задачи данного класса представляет интерес для механики деформируемого твёрдого тела, поскольку послужит развитием теории разносопротивляющихся материалов и позволит в дальнейшем использовать рассматриваемую опцию ANSYS для расчёта тонких пластин из разносопротивляющихся материалов в условиях термомеханического нагружения.

Рассмотрена задача об определении напряжённо-деформированного состояния тонкой пластины, имеющей размеры в плане  $0,5 \times 0,3$  м и толщину  $0,035$  м (рис. 1), жёстко закреплённой по контуру. Моделируется размещение пластины между двумя средами. Начальная температура пластины принимается равной  $298$  К, температура верхней и нижней сред, соответственно,  $373$  К и  $323$  К. Нагрев пластины реализован посредством задания условий конвективного теплообмена между поверхностями пластины и окружающей средой. Помимо перепада температур, на верхнюю

поверхность пластины также прикладывается равномерно распределённая механическая нагрузка интенсивностью от 0 до 1,25 МПа. В качестве материала пластины принят конструкционный графит АРВ [14].

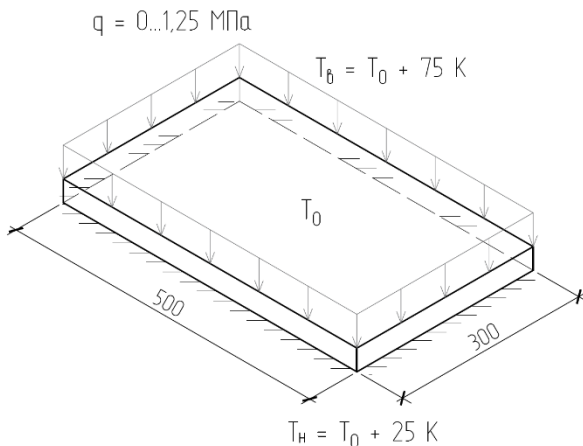


Рис. 1. Прямоугольная пластина

Для верификации рассматриваемой опции ANSYS в работе проводится сравнение результатов расчёта с результатами расчёта аналогичной задачи в программе, разработанной в [12] на основе теории А.А. Трещёва и Н.М. Матченко [1, 2] на базе объёмных изопараметрических конечных элементов в форме тетраэдра с учётом температурного воздействия. Проводится количественная оценка факторов, приводящих к различиям в полученных результатах. С этой целью в работах [11, 12] авторы рассматривал следующую форму термодинамического потенциала Гиббса, состоящую из квазилинейной, нелинейной и термомеханической частей. В полном объеме методика расчета изложена в работах [12].

Применение вариационного принципа к уравнению движения и уравнению сохранения теплового потока в сочетании с определяющими уравнениями термоупругости дает матричное уравнение конечных элементов, компоненты которого вычисляются по аналогии с элементами в форме тетраэдра [13]. Методология учета связанности в программе ANSYS приведена в руководстве [13].

В данной работе для решения связанной нестационарной задачи термомеханического изгиба прямоугольной пластины в программном комплексе ANSYS был использован конечный элемент SOLID226 [13]. Геометрия, расположение узлов и система координат данного элемента показаны на рис. 2.

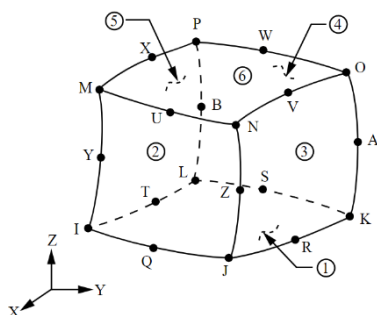


Рис. 2. КЭ в форме параллелепипеда с 20 узлами

Для реализации эффекта различного деформирования материала при растяжении и сжатии в программном комплексе ANSYS в работе используется опция TB,EXPE (таблицы экспериментальных данных) [13]. Данная опция позволяет осуществить ввод диаграмм деформирования материала ( $\epsilon$ - $\sigma$ ) численно, задав значения деформаций и соответствующих напряжений. Например, по экспериментальным данным для одноосного растяжения и одноосного сжатия материала. В настоящей работе таким материалом принят конструкционный графит АРВ [14]. На рис. 3 показан результат ввода диаграмм деформирования указанного графита при растяжении и сжатии, оформленных посредством соответствующего интерфейса программного комплекса ANSYS.

Таким образом, в работе проведено сравнение следующих моделей:

- Модель №1 - расчет выполнен в программном комплексе ANSYS, с учетом различной нелинейной работы материала при растяжении и сжатии с учётом температуры и механического нагружения;
- Модель №2 - расчет выполнен в системе ANSYS, с учетом различной нелинейной работы материала при растяжении-сжатии с учётом только механического нагружения;
- Модель №3 - расчет выполнен в системе ANSYS, с учётом одинаковой нелинейной работы материала при растяжении-сжатии с учётом температуры и механического нагружения;
- Модель №4 - расчет выполнен в отдельной программе, разработанной в [12], с использованием теории нелинейных разносопротивляющихся изотропных материалов А.А. Трещёва и Н.М. Матченко [2] с учётом температуры и механического нагружения;
- Модель №5 - расчет выполнен в системе ANSYS, с учётом различной нелинейной работы материала при растяжении-сжатии с учётом температуры и механического нагружения (конечный элемент в форме тетраэдра);

- Модель №6 - расчет выполнен в системе ANSYS, с учётом различной нелинейной работы материала при растяжении-сжатии с учетом температуры и механического нагружения (диаграмма деформирования принята в соответствии с аппроксимациями А.А. Трещёва и Н.М. Матченко [2]).

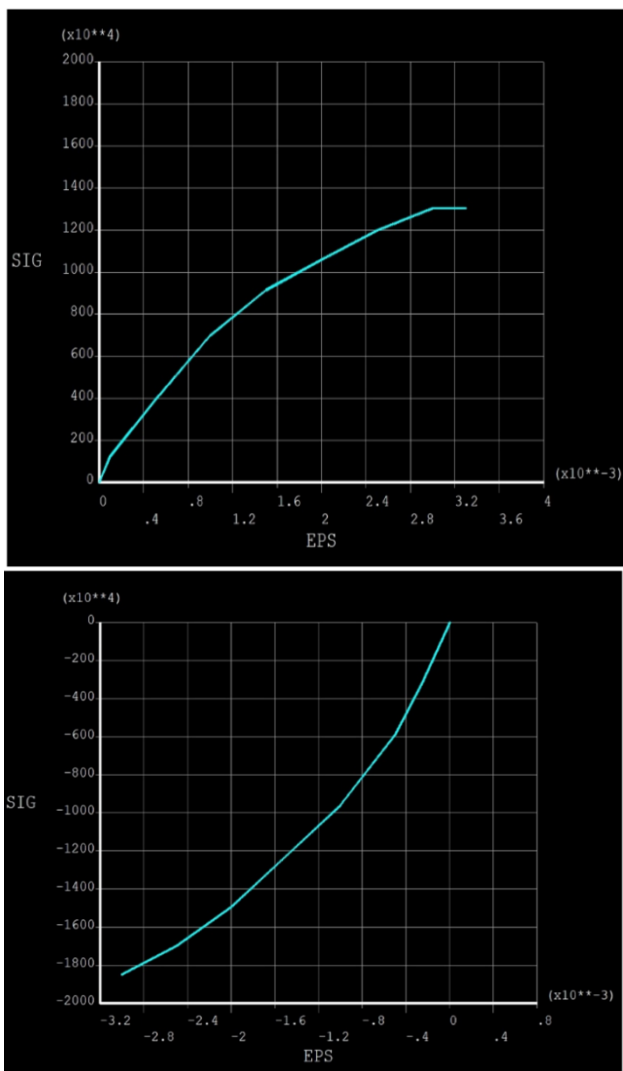


Рис. 3. Диаграммы деформирования графита АРВ при одноосном растяжении и одноосном сжатии в интерфейсе ANSYS (сверху показана диаграмма растяжения, а снизу - сжатия)



Некоторые характерные результаты расчёта по шести моделям показаны на рис. 4-7.

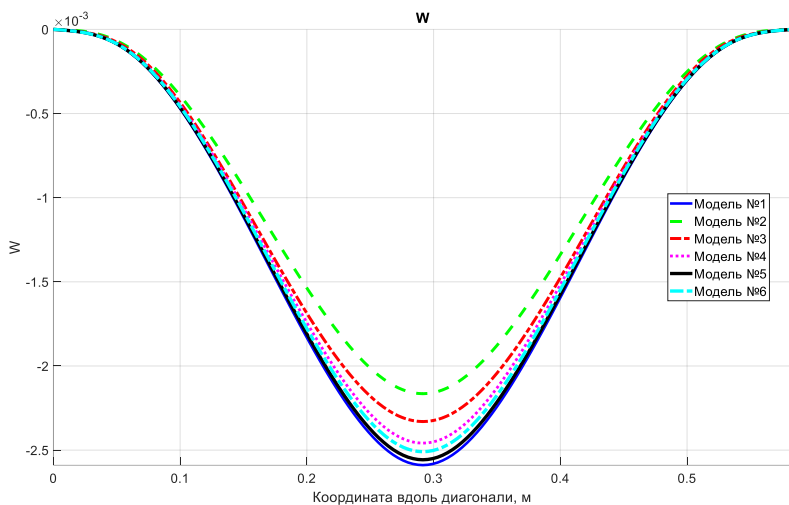


Рис. 4. Распределение прогибов срединной поверхности пластины по диагонали

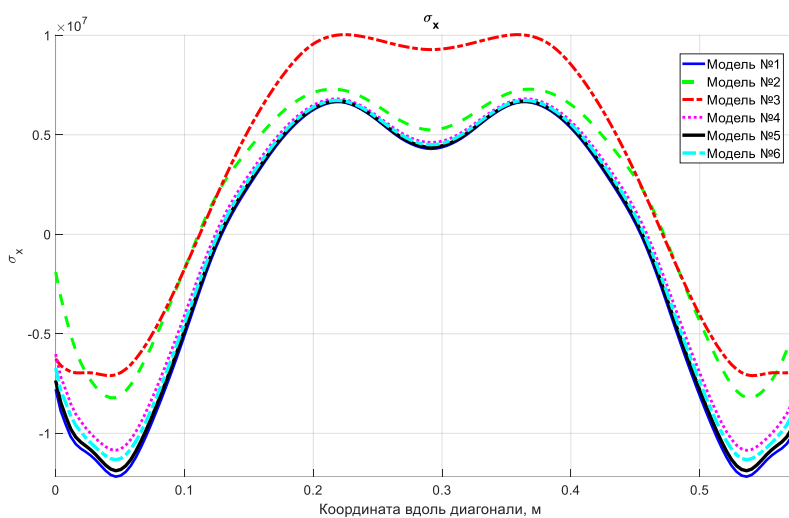


Рис. 5. Распределение напряжений  $\sigma_x$  на нижней поверхности пластины по диагонали

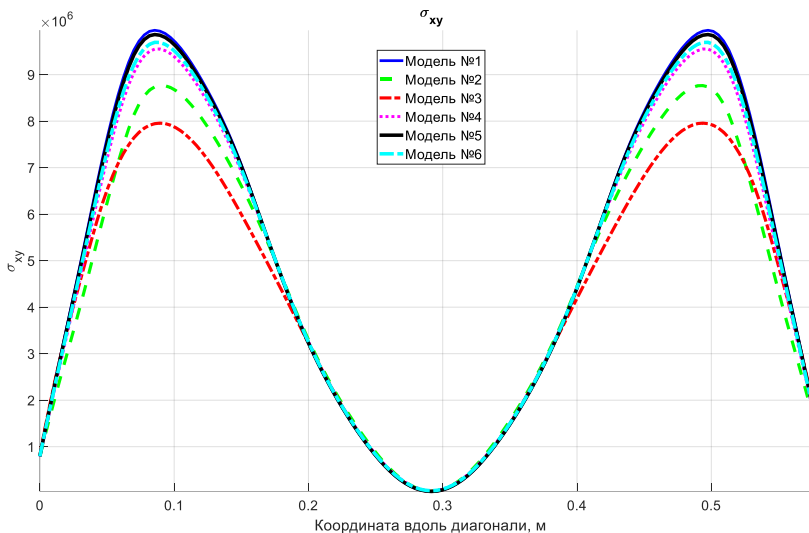


Рис. 6. Распределение напряжений  $\sigma_{xy}$  на верхней поверхности пластины по диагонали

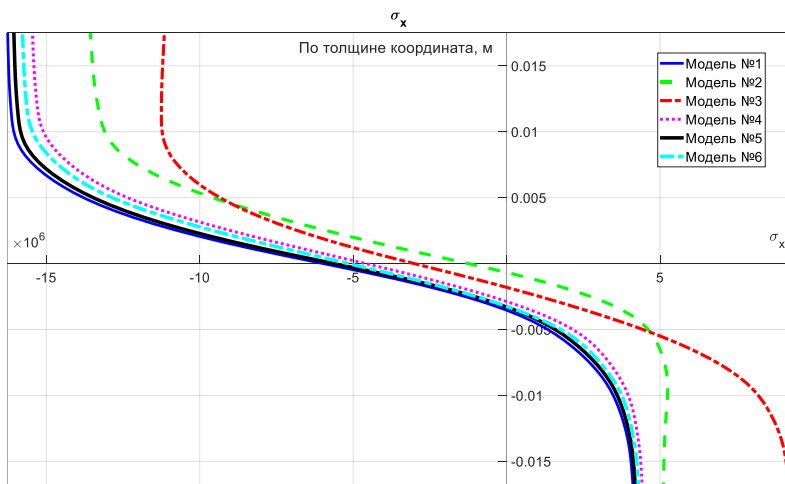


Рис. 7. Распределение напряжений  $\sigma_x$  по толщине в центре пластины

Расхождение результатов расчёта на рис. 4-7 при использовании предлагаемой в работе опции ANSYS и решения аналогичной задачи в программе, разработанной в [12], не превосходит 12% в величине

нормальных напряжений на поверхности пластины и 4% в величине касательных напряжений, а также 5 % в величине прогиба.

При этом, использование в предлагаемой модели КЭ в форме тетраэдра оказывает незначительную поправку на получаемые результаты в пределах 2%. Задание в качестве исходных данных аппроксимаций диаграмм деформирования, построенных по определяющим соотношениям [1, 2] даёт поправку, не превышающую 7% в величинах нормальных напряжений на нижней поверхности пластины.

Решена связанная термомеханическая задача изгиба тонкой прямоугольной пластины, выполненной из изотропного разнсопротивляющегося материала, методом конечных элементов посредством программного комплекса ANSYS. Решение указанной задачи выполнено с учётом задания граничных условия третьего рода в виде температуры среды, окружающей пластину, и закона теплообмена между поверхностью пластины и окружающей средой.

Полученные в работе результаты демонстрируют важность учёта эффекта разнсопротивляемости, а также эффекта температурного воздействия при рассмотрении связанной нестационарной задачи термомеханического изгиба тонкой прямоугольной пластины.

#### Библиографический список

1. Матченко, Н.М. Теория деформирования разнсопротивляющихся материалов. Определяющие соотношения / Н.М. Матченко, А.А. Трещёв. - Тула: ТулГУ, 2000. - 149 с.
2. Матченко, Н.М. Теория деформирования разнсопротивляющихся материалов. Прикладные задачи теории упругости / Н.М. Матченко, А.А. Трещёв // Прикладные задачи теории упругости. - М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2004. - 211 с.
3. Авхимков, А.П. О плоской задаче разномодульной теории упругости / А.П. Авхимков // Доклады 9-й науч.-техн. конф. инж. факультета Ун-та дружбы народов им. Патриса Лумумбы. - 1974. - С. 39-43.
4. Агахи, К.А. К теории пластичности материалов, учитывающей влияние гидростатического давления / К.А. Агахи, В.Н. Кузнецов // Упругость и неупругость. - М.: МГУ, 1978. - Вып. 5. - С. 46-52.
5. Амбарцумян, С.А. К разномодульной теории упругости / С.А. Амбарцумян, А.А. Хачатрян // Инж. журнал МГТ. - 1966. - № 6. - С. 64-67.
6. Бертяев, В.Д. Вариант построения теории упругости разнсопротивляющихся тел / В.Д. Бертяев, Л.А. Толоконников // Механика и прикладная математика. - Тула: Приокс. кн. изд-во, 1989. - С. 4-7.

7. Бригадиров, Г.В. Вариант построения основных соотношений разномодульной теории упругости / Г.В. Бригадиров, Н.М. Матченко // Изв. АН СССР. МТТ. - 1971. - № 5. - С. 109-111.

8. Быков, Д.Л. О некоторых соотношениях между инвариантами напряжений и деформаций в физически нелинейных средах // Упругость и неупругость. - М.: МГУ, 1971. - Вып. 2. - С. 114-128.

9. Гаврилов, Д.А. Зависимости между напряжениями и деформациями для квазилинейного разномодульного тела / Д.А. Гаврилов // Проблемы прочности. - 1979. - № 9. - С. 10-12.

10. Золочевский, А.А. К тензорной связи в теориях упругости и пластичности анизотропных композитных материалов, разносопротивляющихся растяжению и сжатию / А.А. Золочевский // Механика композитных материалов. - 1985. - № 1. - С. 53-58.

11. Чигинский Д.С. Связанная задача термоупругости для тонких пластин из изотропных разносопротивляющихся материалов: дис. канд. техн. наук: 01.02.04. - ТулГУ, Тула, 2012 - 182 с.

12. Делягин М.Ю. Связанные термомеханические задачи для оболочечных конструкций из нелинейных материалов: дис. канд. техн. наук: 01.02.04. - ТулГУ, Тула, 2015 - 200 с.

13. Ansys Inc. Documentation for Release 2021 R1.

14. Березин, А.В. Деформируемость и разрушение изотропных графитовых материалов / А.В. Березин, В.И. Строков, В.Н. Баранов // Конструкционные материалы на основе углерода. - М.: Металлургия, 1976. - Вып. П. - С. 102-110.

УДК 539.3

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСНОВАНИЯ ИЗ ОРТОТРОПНЫХ СЛОЕВ С УЧЕТОМ ИХ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ПСЕВДОНЕОДНОРОДНОСТИ**

Трещев А.А., Бесстрашнов Д.О.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Важной задачей повышения эффективности строительства является совершенствование методов проектирования оснований и фундаментов, затраты на устройство которых может достигать до 20-30% от общей стоимости возведения зданий и сооружений. Сложность инженерно-геологической обстановки площадок строительства, уникальность и масштабность современных сооружений (АЭС, ТЭС, установки на шельфе и других), повышение технологических нагрузок и этажности зданий требуют максимально полного и эффективного учета реальных физико-механических

свойств и особенностей работы деформируемых оснований, что возможно обеспечить только при использовании новейших достижений в области механики грунтов и методов вычислительной механики.

Согласно работам [1-3], анизотропные (ортотропные) грунты и породы широко распространены в коре и в верхней мантии Земного шара. Кроме того, они проявляют свойство дилатации и демонстрируют чувствительность своих физико-механических характеристик к виду напряженного состояния (свойство разносопротивляемости) [4-7]. Многие исследователи не без основания считают, что все грунты (преимущественно не скальные породы), обладают в той или иной степени анизотропией механических свойств с учетом того, что при своем формировании в прошлые геологические эпохи они в той или иной мере испытывали механические нагрузки, сформировавшие неоднородное и анизотропное (ортотропное) напряженное состояние. В целом, важно отметить, что анизотропия в грунтах - скорее правило, чем исключение. К грунтам, у которых она ярко выражена, относятся ленточные глинистые отложения, лёссы и лёссовидные грунты, торфянистые, мерзлые, солонцеватые и некоторые другие разновидности. Наведенная анизотропия (ортотропия) присуща многим полускальным и скальным породам в силу преимущественной ориентации минералов и свойств текстуры породы (слоистость, полосчатость и т. п.), трещиноватости, наличия дефектов структуры и др.

Перечисленные особенности деформирования и работы деформируемых оснований при расчете и проектировании пространственных конструкций зданий и сооружений могут быть учтены только с привлечением аппарата общей трехмерной теории с использованием всей совокупности компонент напряжений и деформаций [8]. Поэтому, необходим комплексный подход к решению поставленной задачи. Основой такого подхода могут служить специальные конечные элементы (КЭ), построенные на базе стандартных объемных, но учитывающие особенности аппроксимации геометрии и перемещений по толщине [8, 9].

Традиционными методами моделирования конструкций на упругом основании являются: клавишная модель Винклера с одним коэффициентом постели; модель уравнивания внешних нагрузок и отпора грунта; модель упругого основания по контуру плиты с использованием объемных КЭ; модель линейно-деформируемого основания (ЛДО) с использованием объемных КЭ; модель ЛДО с промежуточным Винклеровским слоем с использованием объемных КЭ; модель Пастернака с применением законтурных элементов для учета распределительной способности основания за контуром основания. Как показал анализ наиболее распространенных моделей грунтового основания, все они в той или

иной степени не отражают реальную работу упругого основания. Наиболее близки к эксперименту и практике оказываются модели, основанные на трехмерной модели теории упругости в сочетании с учетом нелинейных свойств работы грунтов [4, 5, 8], что выгодно отличает их от моделей ЛДО и схожих с ними. Кроме того, модели на объемных элементах обладают большей наглядностью как при анализе деформированного состояния, так и при анализе напряжений в основаниях [9, 10].

Численные эксперименты, проведенные авторами актуального исследования [4, 5, 9], показали, что для рассматриваемого класса задач (моделирование многослойного деформируемого основания) наиболее целесообразно применять изопараметрический, четырехузловой конечный элемент в форме тетраэдра, с тремя поступательными степенями свободы в узле. Соответственно, авторы разработали новую модифицированную версию конечно-элементной модели, построенную на базе объемного изопараметрического элемента в форме тетраэдра с 3-мя поступательными степенями свободы в узле [5], использующего положения общей трехмерной нелинейной теории упругости [10, 11].

Очевидно, что здания, имея фундамент, опираются на многослойной грунтовое основание с различными физико-механическими характеристиками слоев. В актуализированных нормах по проектированию оснований и фундаментов СП22.13330.2016 и в предыдущих версиях СНиПа это непременно учитывается. При этом расчеты основания проводятся в предположении механической изотропности или неоднородности по толщине каждого слоя. Однако эксперименты, проводимые с грунтами, зачастую демонстрируют проявление свойств структурной ортотропии в сочетании с деформационной анизотропией. Обычно при расчетах оснований этот факт не учитывается, что не всегда оправдано. Поэтому здесь предпринята попытка разработки математической модели деформирования слоистого основания с учетом структурной ортотропии свойств всех слоев их деформационной анизотропии при его нагружении недеформируемым штампом, интерпретирующим жесткую подошву массивного фундамента. Деформационная анизотропия представлена как общеизвестный факт зависимости свойств грунтов от вида напряженного состояния [3]. Для постулирования уравнений состояния ортотропной деформационно-неоднородной среды слоев принята модель, сформулированная в рамках нормированного пространства напряжений, связанного с главными осями ортотропии и полученная на основе потенциала деформаций [12]:

$$e_{ii} = C_{iii}\sigma_{ii} + C_{ijj}\sigma_{jj} + C_{ikk}\sigma_{kk}; \quad \gamma_{ij} = C_{ijj}\tau_{ij} \quad \text{при } i \neq j \quad (1)$$

где

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

Здесь:  $\alpha_{ij}$  - нормированные напряжения в пространстве главных осей ортотропии;  $\sigma_{ij}$  - 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.

$$\begin{aligned}
 A_{kkk} &= (1/E_k^+ + 1/E_k^-) / 2; B_{kkk} = (1/E_k^+ - 1/E_k^-) / 2; \\
 A_{ijj} &= -(v_{ij}^+ / E_j^+ + v_{ij}^- / E_j^-) / 2; B_{ijj} = -(v_{ij}^+ / E_j^+ - v_{ij}^- / E_j^-) / 2; \\
 A_{ijj} &= 1/G_{ij}; v_{ij}^+ / E_j^+ = v_{ji}^+ / E_i^+; v_{ij}^- / E_j^- = v_{ji}^- / E_i^-.
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $E_i^\pm, v_{ij}^\pm, G_{ij}$  - модули упругости и коэффициенты поперечной деформации вдоль соответствующих главных осей ортотропии и модули сдвига в главных плоскостях.

Традиционно основание моделируется деформируемым полупространством с дискретно определяемой лишь его дневной поверхностью без ограничений среды по трем осям. Однако, при учете усложнений физических уравнений, для разработки математической модели слоистого основания, рациональным представляется использования метода конечных элементов. В данном случае необходимо использовать объемные элементы. При этом МКЭ оперирует с дискретными строго ограниченными областями, то есть модель основания должна строго определить ограничения на размеры выделенной из полупространства дискретной области. Подобные ограничения определяются несколькими последовательными расчетами разноразмерных областей по трем осям с окончательным ограничением для расчета. При этом ограничения зависят от размеров областей приложения нагрузки и определяются таким образом, что последующие увеличения размеров дискретной области никоим образом не будет сказываться на результатах расчета, то есть, когда получаемые перемещения и напряжения будут стабилизированы на всех границах.

Здесь принята область, образованная семью слоями с отличающимися свойствами, приведенная на рис. 1, 2, и ограниченная в зависимости от величины нагрузки и от размеров площадки её приложения. Нагружение осуществлялось жестким штампом с равномерным её

распределением по его подошве. Рассмотрим задачу о давлении на полупространство. В качестве геометрической модели примем прямую призму, с размерами в плане в десять раз большими соответствующих размеров зоны давления (рис. 1). При таком соотношении разница в параметрах НДС с точным решением задачи теории упругости о слоистом полупространстве является незначительной. Исходные данные для расчета принимались следующие: размеры в плане  $20000 \times 5000$  мм, по высоте 7 слоев по 2000 мм, размер зоны давления  $2000 \times 500$ . Механические характеристики материалов заимствованы из работы [4] и приведены в таблице 1. Интенсивность равномерно распределенной нагрузки  $q$  принималась равной 700 кПа.

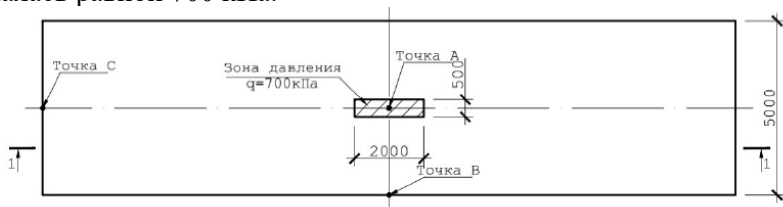


Рис.1. План полупространства

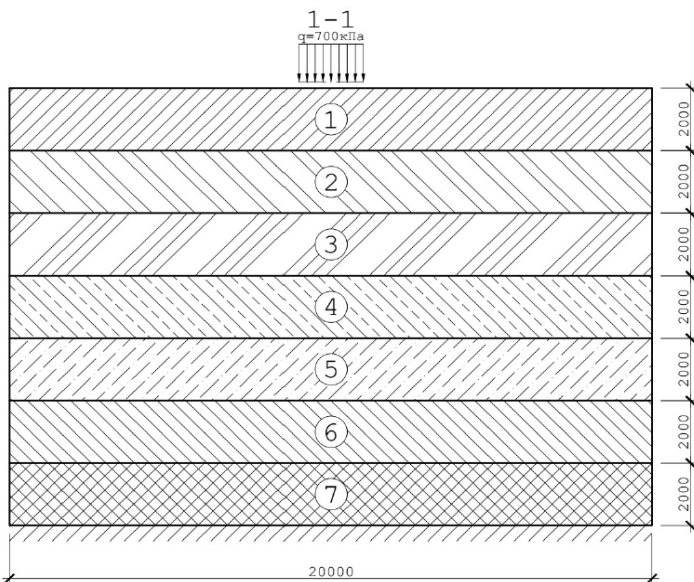


Рис. 2. Разрез полупространства



Таблица 1. Механические характеристики слоев полупространства

Номер слоя	Механические характеристики (все модули упругости в МПа, коэффициенты Пуассона (коэффициенты поперечной деформации) в долях единицы)								
	$E_1^+$	$E_1^-$	$E_2^+$	$E_2^-$	$E_3^+$	$E_3^-$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
1	15,62	31,25	9,95	29,85	9,35	27,45	7,99	7,71	7,11
	$V_{12}^+$	$V_{12}^-$	$v_{13}^+$	$V_{13}^-$	$v_{23}^+$	$V_{23}^-$	–	–	–
	0,38	0,32	0,37	0,32	0,37	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	10,69	8,34	8,49
	$V_{12}^+$	$V_{12}^-$	$v_{13}^+$	$V_{13}^-$	$v_{23}^+$	$V_{23}^-$	–	–	–
	0,33	0,25	0,33	0,25	0,33	0,25	–	–	–
3	$E_1^+$	$E_1^-$	$E_2^+$	$E_2^-$	$E_3^+$	$E_3^-$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
	26,67	80	23,65	70,95	20,15	60,45	20,33	18,76	18,26
	$V_{12}^+$	$V_{12}^-$	$v_{13}^+$	$V_{13}^-$	$v_{23}^+$	$V_{23}^-$	–	–	–
	0,27	0,2	0,27	0,2	0,22	0,17	–	–	–
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	3,97	3,62	3,02
	$V_{12}^+$	$V_{12}^-$	$v_{13}^+$	$V_{13}^-$	$v_{23}^+$	$V_{23}^-$	–	–	–
	0,27	0,23	0,27	0,23	0,25	0,25	–	–	–
5	$E_1^+$	$E_1^-$	$E_2^+$	$E_2^-$	$E_3^+$	$E_3^-$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
	40,2	120,6	30,45	91,35	22,15	66,45	25,53	21,78	18,75
	$V_{12}^+$	$V_{12}^-$	$v_{13}^+$	$V_{13}^-$	$v_{23}^+$	$V_{23}^-$	–	–	–
	0,42	0,32	0,42	0,32	0,42	0,35	–	–	–
6	$E_1^+$	$E_1^-$	$E_2^+$	$E_2^-$	$E_3^+$	$E_3^-$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
	20,25	60,75	16,95	50,85	16,43	49,25	14,58	14,35	12,59
	$V_{12}^+$	$V_{12}^-$	$v_{13}^+$	$V_{13}^-$	$v_{23}^+$	$V_{23}^-$	–	–	–
	0,3	0,24	0,3	0,24	0,35	0,3	–	–	–
7	$E_1^+$	$E_1^-$	$E_2^+$	$E_2^-$	$E_3^+$	$E_3^-$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
	9,55	28,65	8,95	26,85	6,95	20,85	7,48	6,59	6,02
	$V_{12}^+$	$V_{12}^-$	$v_{13}^+$	$V_{13}^-$	$v_{23}^+$	$V_{23}^-$	–	–	–
	0,25	0,22	0,25	0,22	0,31	0,31	–	–	–

Реализация этой модели ввиду нелинейности уравнений состояния выполнялась методом переменных параметров упругости итерационно. В остальном, что, несомненно, является преимуществом, расчетная процедура практически не отличается от классического МКЭ, базирующегося на объемных элементах в форме тетраэдра [10], один из которых приведен на рис.3.

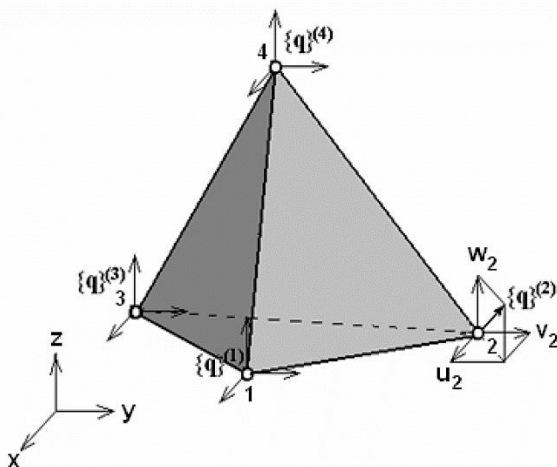


Рис. 3. Конечный элемент в виде тетраэдра

В данном ключе была сформулирована математическая модель многослойного условного полупространства с воздействием на него жестким штампом. При этом слои образованы ортотропными структурами, которые чувствительны к виду напряженного состояния.

При расчете слоистого деформируемого полупространства с применением усовершенствованных соотношений [12] разница составила:

- для вертикальных перемещений: до 5% к определяющим соотношениям [4], до 11,5% к соотношениям С.А. Амбарцумяна - А.А. Хачатряна, до 15% к теории К.В. Берга - Д.Н. Редди и до 25% при использовании усредненных характеристик материала;

- для горизонтальных перемещений: до 25% к определяющим соотношениям [4], до 36% к соотношениям С.А. Амбарцумяна - А.А. Хачатряна, до 81% к теории К.В. Берга - Д.Н. Редди и до 118% при использовании усредненных характеристик материала;

- для нормальных напряжений: до 2,5% к определяющим соотношениям [4], до 20% к соотношениям С.А. Амбарцумяна - А.А. Хачатряна, до 25% к теории К.В. Берга - Д.Н. Редди и до 36% при использовании усредненных характеристик материала;

- для нормальных напряжений: до 5% к определяющим соотношениям [4], до 25% к соотношениям С.А. Амбарцумяна - А.А. Хачатряна, до 35% к теории К.В. Берта - Д.Н. Редди и до 45% при использовании усредненных характеристик материала.

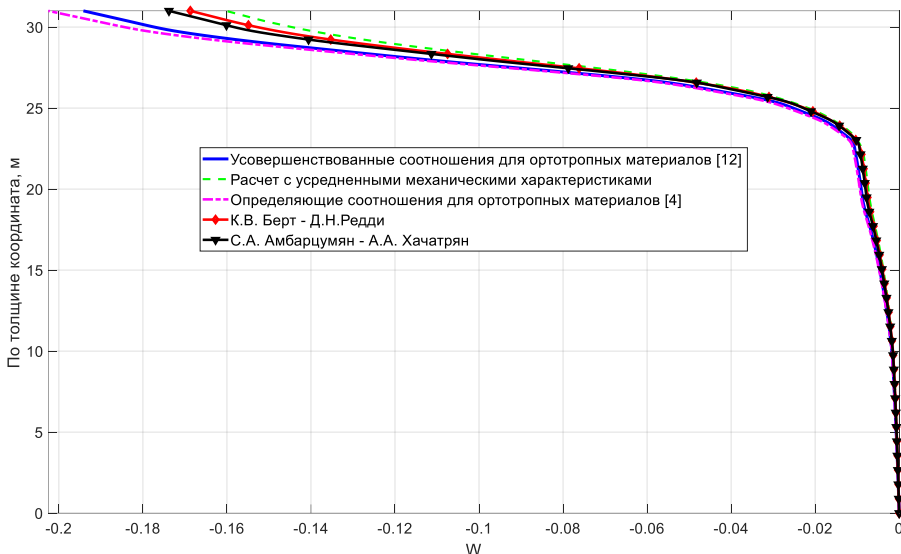


Рис.4. Изменение вертикальных перемещений по толщине в точке А

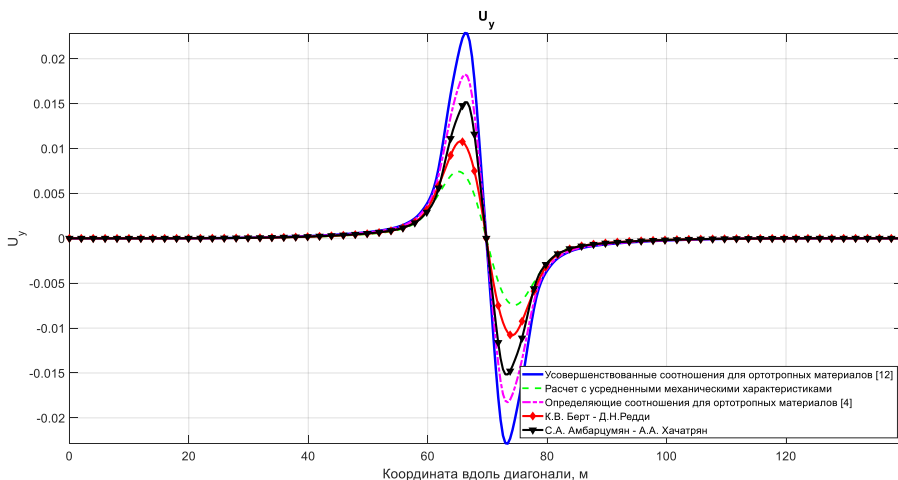
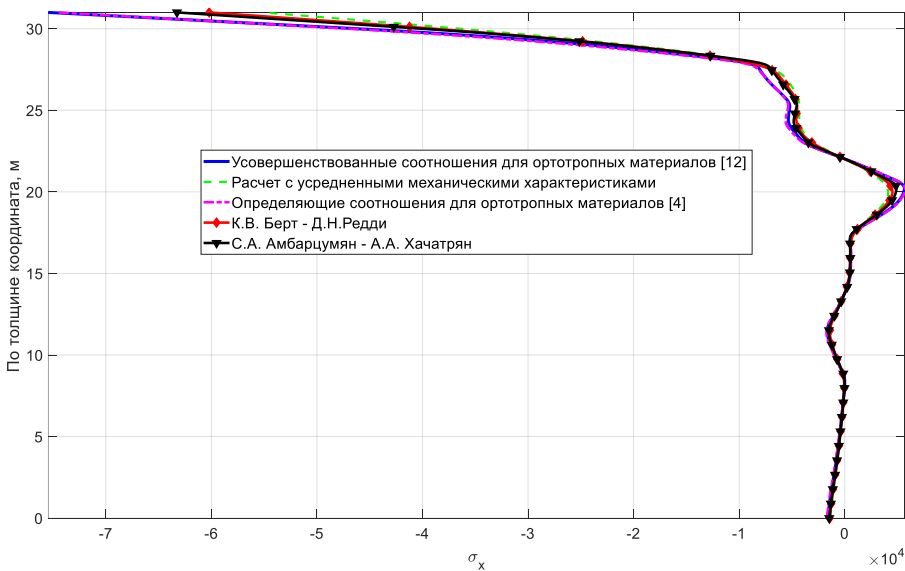
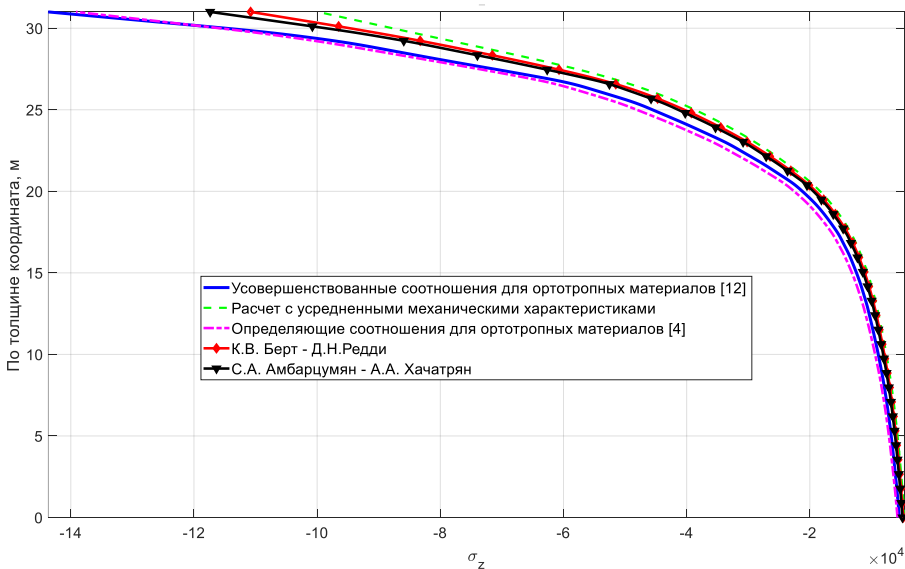


Рис. 5. Изменение горизонтальных перемещений по диагонали вдоль оси симметрии на поверхности полупространства через точку А

Рис. 6. Изменение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в точке АРис. 7. Изменение напряжений  $\sigma_z$  по толщине в точке А

Конкретные расчеты с использованием разработанной модели позволяют утверждать, что учет двойной анизотропии слоев основания

вскрывают заметные погрешности традиционных подходов по определению параметров его НДС. Так использование модели полупространства из нескольких слоев разносопротивляющихся ортотропных материалов показало, что предлагаемый подход, основанный на положениях трехмерной теории упругости и определяющих соотношениях [12] вполне адекватен и обладает рядом преимуществ над многими теориями [6, 7, 12] благодаря повышенной точности и удобству использования метода конечных элементов [4]. Также показано, что при проведении расчетов пренебрежение учетом явления разносопротивляемости может привести к значительным погрешностям в определении параметров напряженно-деформированного состояния слоистого полупространства.

#### Библиографический список

1. Вялов С.С. Вопросы теории деформируемости связанных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1966. №3. С. 1-4.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. - 447 с.
3. Бугров А.К. Анизотропные грунты и основания сооружений. / А.К. Бугров, Голубев А.И. // СПб.: Недра, 1993. - 245 с.: ил.
4. 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.
5. Теличко, В.Г., Ходорович П.Ю. К расчету оснований методом конечных элементов // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. в 2 ч. Ч. 1. С. 341-347.
6. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А.Трещев // РААСН, ТулГУ. - М.: Изд-во ТулГУ, 2008. - 264 с.
7. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения. М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. 326 с.
8. 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. Вып. 9 2004. С. 54-64.
9. 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.

10. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. / С.Ф. Клованич // Библиотека журнала "Світгеотехніки", 9-ый выпуск. - Запорожье: Издательство журнала "Світгеотехніки", 2009. - 400 с.: ил. - Библиогр. в конце кн. - ISBN 978-966-7732-72-2.

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

12. 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.

13. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости / С.А. Амбарцумян // М.: Наука, 1982. - 320 с.

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

УДК 539.3

## **ПОЛУЧЕНИЕ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ МАТЕРИАЛОВ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К ВИДУ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Трещев А.А., Лапшина М.А.  
*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Рассмотрим тонкостенную пространственную систему, состоящую из четырех пластинок постоянной толщины (см. рис. 1), образующую в поперечном сечении замкнутый четырехугольный контур с прямыми неизменяемыми углами. Такие призматические оболочки находят применение, например, в качестве резервуаров, поэтому полагаем, что оболочка находится под действием внутреннего гидростатического давления.

Расчетная схема призматической оболочки показана на рис. 1. Ось  $x$  направлена по высоте оболочки, ось  $y$  направлена вдоль ее периметра.

Так как каждая из граней оболочки представляет собой пластинку со сложными граничными условиями сопряжения на гранях, то к этой расчетной схеме применима модель, приведенная далее.

Рассмотрим упругое равновесие прямоугольной однослойной пластины, отнесенной к декартовой системе координат. В произвольной точке этой пластины одна из плоскостей упругой симметрии параллельна срединной плоскости пластины в недеформируемом состоянии. Таким образом, для построения геометрических и статических соотношений будем использовать гипотезы, предложенные С.П. Тимошенко [1]:

- 1) нормальное к срединной плоскости перемещение  $w$  не зависит от координаты  $x_3$  ( $e_3=0$ );
- 2) нормаль к срединной плоскости после деформации поворачивается на угол  $\psi$ , относительно оси  $x_1$  и  $\psi_2$  относительно оси  $x_2$ ;
- 3) при определении параметров напряженного состояния влиянием нормальных напряжений  $\sigma_3$  пренебрегаем.

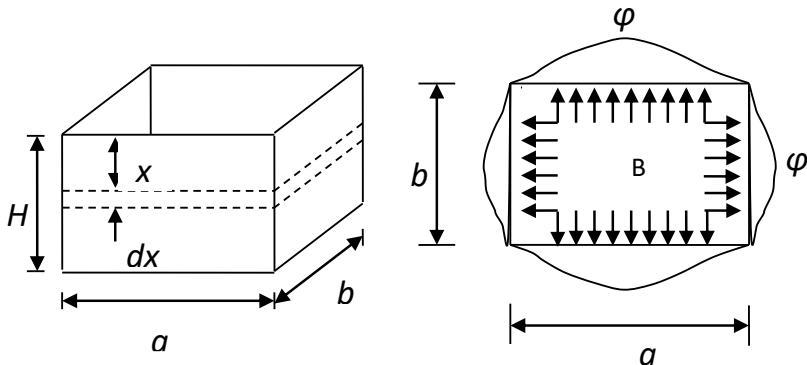


Рис.1. Расчетная схема призматической оболочки

Примем, что пластина нагружена нормально приложенной равномерно распределенной нагрузкой  $q$ . Вертикальную ось  $x_3$  направим вверх. При решении рассматриваемой задачи в рамках геометрически линейной теории вводятся следующие технические гипотезы:

$$\begin{aligned}
 U_1(x_1, x_2, x_3) &= u_1(x_1, x_2) + x_3 \psi_2(x_1, x_2); \\
 U_2(x_1, x_2, x_3) &= u_2(x_1, x_2) - x_3 \psi_1(x_1, x_2); \\
 U_3(x_1, x_2, x_3) &= w(x_1, x_2),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $u_k$  - горизонтальные перемещения в срединной поверхности,  $\psi_1, \psi_2$  - углы поворота срединной поверхности относительно соответствующих осей,  $\psi_1 = w_{,2} - \gamma_{23}$ ,  $\psi_2 = -w_{,1} + \gamma_{13}$ ;  $w$  - прогибы срединной поверхности.

Учитывая, что деформирование исходных пластин происходит при малых прогибах, связь между деформациями и перемещениями с учетом принятых гипотез представим в виде:

$$\begin{aligned}
 e_{11} &= u_{1,1} + x_3 \psi_{2,1}; \quad e_{22} = u_{2,2} - x_3 \psi_{1,2}; \quad e_{33} = 0; \quad \gamma_{12} = u_{1,2} + u_{2,1} + x_3 (\psi_{2,2} - \psi_{1,1}); \\
 \gamma_{13} &= \psi_2 + w_{,1}; \quad \gamma_{23} = -\psi_1 + w_{,2}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\gamma_k$  - деформации поперечного сдвига.

В работе [2] на основе анализа многочисленных экспериментальных данных по деформированию анизотропных разносопротивляющихся сред [3-11] были предложены нелинейные потенциальные соотношения между деформациями и напряжениями для ортотропных материалов в виде:

$$W=W_1+W_2+W_3+\dots, \quad (3)$$

где  $W=W(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}\tau_{21}, \tau_{23}\tau_{32}, \tau_{31}\tau_{13}, \tau_{12}\tau_{23}\tau_{31})$ ;  $W_n$  - однородный многочлен степени  $n+1$  по компонентам напряжений, комбинация которых принята в строгом соответствии и классом ортотропии и по известным правилам [12],  $n=1,2,3\dots$

Для физических квазилинейных материалов имеем:

$$W_1=A_1\sigma_{11}^2+A_2\sigma_{22}^2+A_3\sigma_{33}^2+A_4\sigma_{11}\sigma_{22}+A_5\sigma_{22}\sigma_{33}+A_6\sigma_{33}\sigma_{11}+ \\ +A_7\tau_{12}\tau_{21}+A_8\tau_{23}\tau_{32}+A_9\tau_{31}\tau_{13}, \quad (4)$$

где  $A_k$  - являются функциями нормированного напряжения.

Зависимость между деформациями и напряжениями, вытекающая из потенциала  $W_1$  (4) с учетом принятых выше гипотез можно представить в следующем виде:

$$\{e\}=[A]\{\sigma\}, \quad (5)$$

где

$$\{e\}=\begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}; [P]=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{16} & 0 & 0 \\ & P_{22} & P_{26} & 0 & 0 \\ & & P_{66} & 0 & 0 \\ & \text{sim} & & P_{44} & 0 \\ & & & & P_{55} \end{bmatrix}; \{\sigma\}=\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{Bmatrix};$$

$$P_{11}=(A_{1111}+L_{1111}\alpha_{11})+0,5L_{1111}\alpha_{11}[\alpha_{22}^2+\alpha_{33}^2+2(\alpha_{12}^2+\alpha_{23}^2+\alpha_{31}^2)]-0,5(L_{2222}\alpha_{22}^3+L_{3333}\alpha_{33}^3)+ \\ +(1-\alpha_{11})[L_{1122}\alpha_{22}(\alpha_{22}^2+\alpha_{33}^2+2(\alpha_{12}^2+\alpha_{23}^2+\alpha_{31}^2))+L_{1133}\alpha_{33}-L_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22}+\alpha_{33})];$$

$$P_{12}=A_{21}=A_{1122}+L_{1122}(\alpha_{11}+\alpha_{22});$$

$$P_{16}=A_{61}=A_{1133}+L_{1133}(\alpha_{11}+\alpha_{33});$$

$$P_{22}=(A_{2222}+L_{2222}\alpha_{22})+0,5(L_{2222}\alpha_{22}[\alpha_{11}^2+\alpha_{33}^2+2(\alpha_{12}^2+\alpha_{23}^2+\alpha_{31}^2)]-0,5(L_{1111}\alpha_{11}^3+L_{3333}\alpha_{33}^3)+ \\ +(1-\alpha_{22})L_{2233}\alpha_{33}(\alpha_{11}+\alpha_{33}^2+2(\alpha_{12}^2+\alpha_{23}^2+\alpha_{31}^2)))[L_{1133}\alpha_{33}]-L_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11}+\alpha_{33}));$$



$$\begin{aligned}
 P_{26} &= A_{62} = A_{2233} + L_{2233} (\alpha_{22} + \alpha_{33}); \\
 P_{66} &= A_{1212} - (L_{1111} \alpha_{11}^3 - L_{2222} \alpha_{22}^3 + L_{3333} \alpha_{33}^3) - 2L_{1122} \alpha_{11} \alpha_{22} (\alpha_{11} + \alpha_{22}) - 2L_{2233} \alpha_{22} \alpha_{33} (\alpha_{22} + \alpha_{33}) - \\
 &\quad - 2L_{1133} \alpha_{11} \alpha_{33} (\alpha_{11} + \alpha_{33}); \\
 P_{44} &= A_{1313} - (L_{1111} \alpha_{11}^3 - L_{2222} \alpha_{22}^3 + L_{3333} \alpha_{33}^3) - 2L_{1133} \alpha_{11} \alpha_{33} (\alpha_{11} + \alpha_{33}) - 2L_{1122} \alpha_{11} \alpha_{22} (\alpha_{11} + \alpha_{22}) - \\
 &\quad - 2L_{2233} \alpha_{22} \alpha_{33} (\alpha_{22} + \alpha_{33}); \\
 P_{55} &= A_{2323} - (L_{1111} \alpha_{11}^3 - L_{2222} \alpha_{22}^3 + L_{3333} \alpha_{33}^3) - 2L_{2233} \alpha_{22} \alpha_{33} (\alpha_{22} + \alpha_{33}) - 2L_{1133} \alpha_{11} \alpha_{33} (\alpha_{11} + \alpha_{33}) - \\
 &\quad - 2L_{1122} \alpha_{11} \alpha_{22} (\alpha_{11} + \alpha_{22}).
 \end{aligned}$$

Составляющие константы тензора  $A_{ijklm}$  и  $L_{ijklm}$  - материальные константы, определяемые через компоненты тензора четвертого ранга: модуль упругости и коэффициент Пуассона, полученные из опытов на осевое растяжение и сжатие в главных осях анизотропии, а также через модули сдвига, полученные из опытов на сдвиг во взаимно ортогональных плоскостях ортотропии (знаки «плюс» соответствуют растяжению, «минус» - сжатию);  $\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S$  - нормированные напряжения в главных осях ортотропии материала, ( $i, j=1, 2, 3$ );  $S = \sqrt{\sigma_{ij} \sigma_{ij}} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2\tau_{12}^2 + 2\tau_{23}^2 + 2\tau_{13}^2}$  - норма тензорного пространства;  $\alpha_{ij} \alpha_{ij} = \alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + \alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{13}^2 = 1$  - условие нормировки тензорного пространства [4, 6, 7, 13-16].

В соответствии с принятыми гипотезами, учитывая, что по толщине пластины пренебрегаем давлением слоев друг на друга, будем считать, что нормальные напряжения  $\sigma_{33} = 0$ . Тогда имеем:

$$\{\sigma\} = [B]\{e\}, \quad (6)$$

где  $B_{ij}$  - жесткости, зависящие от вида напряженного состояния и степени нагружения,  $[B] = [A]^{-1}$ .

Уравнения равновесия прямоугольной пластины в ортогональной системе координат представим следующим образом:

$$\begin{aligned}
 N_{11,1} + N_{12,2} = 0; \quad N_{12,1} + N_{22,2} = 0; \quad M_{11,1} + M_{12,2} = Q_1; \quad M_{12,1} + M_{22,2} = Q_2; \\
 Q_{1,1} + Q_{2,2} = q(x_1, x_2). \quad (7)
 \end{aligned}$$

Интегральные характеристики напряженного состояния определяются традиционным образом через интегрирование характерных

напряжений по толщине пластины по правилам, соответствующим характеру действующих усилий:

$$N_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} dx_3; M_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} x_3 dx_3; Q_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{ij} dx_3, \quad (i,j=1,2) \quad (8)$$

Связь между вектором обобщенных сил  $\{M\}$  и вектором обобщенных деформаций срединной поверхности пластины  $\{\varepsilon\}$  примет вид:

$$\{M\} = [D]\{\varepsilon\}; \quad (9)$$

где

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \end{Bmatrix}; [D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} & K_{14} & K_{15} & K_{11} & K_{12} & K_{16} \\ & D_{22} & D_{26} & K_{24} & K_{25} & K_{12} & K_{22} & K_{26} \\ & & D_{66} & K_{64} & K_{65} & K_{16} & K_{26} & K_{65} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{14} & C_{24} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{15} & C_{25} & C_{65} \\ & & \text{sim} & & & C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ & & & & & & C_{22} & C_{26} \\ & & & & & & & C_{66} \end{bmatrix}; \{E\} = \begin{Bmatrix} \psi_{2,1} \\ -\psi_{1,2} \\ \psi_{2,2} - \psi_{1,1} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \\ u_{1,1} \\ u_{2,2} \\ u_{1,2} + u_{2,1} \end{Bmatrix}; \quad (10)$$

$$C_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{km} dx_3; K_{km} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{km} x_3 dx_3; D_{pq} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{km} x_3^2 dx_3$$

где  $i,j=1, 2, 4, 5, 6$ ;  $k,m=1, 2, 4, 5, 6$ ;  $p,q=1, 2, 6$ .

Заметим, что интегральные жесткостные характеристики  $C_{ij}$ ,  $K_{km}$ ,  $D_{pq}$  не могут быть получены непосредственно, так как параметры  $B_{km}$  не являются наперед заданными функциями от  $x_3$ , а зависят от напряженного состояния. Однако интегралы можно вычислять приближенно, разбив пластину по толщине на ряд фиктивных слоев. В целях упрощения фиктивные слои можно принять одинаковыми по толщине.

#### Библиографический список

1. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. - М.: Наука, 1966. - 636 с.
2. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведенной чувствительностью к виду напряженного

состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещев. - Москва - Тула: РААСН - ТулГУ, 2016. - 328 с.

3. Schmueser D.W. Nonlinear Stress-Strain and Strength Response of Axisymmetric Bimodulus Composite Material Shells / D.W. Schmueser // AIAA Journal. - 1983. - Vol. 21. - №12. - P. 1742 - 1747.

4. Reddy L.N. On the Behavior of Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / L.N. Reddy, C.W. Bert // ZAMM. - 1982. - Vol. 62. - № 6. - P. 213 - 219.

5. Jones R.M. A Nonsymmetric Compliance Matrix Approach to Nonlinear Multimodulus Orthotropic Materials / R.M. Jones // AIAA Journal. - 1977. - Vol. 15. - № 10. - P. 1436 - 1443.

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

7. Jones R.M. Bucleing of Stiffened Multilayered Circular Shells with Different Orthotropic Moduli in Tension and Compression / R.M. Jones // AIAA Journal. - 1971. - Vol. 9. - № 5. - P. 917 - 923.

8. Крегерс А.Ф. Нелинейная ползучесть тканевого стеклопластика при некоторых видах сложного напряженного состояния / А.Ф.Крегерс, Р.Д.Максимов, Р.П.Турциньш // Механика полимеров. - 1973. - №2. - С. 212-218.

9. Амелина, Е.В. О нелинейном деформировании углепластиков: эксперимент, модель, расчет / Е.В.Амелина [и др.] // ИВТ СО РАН: Вычислительные технологии. - 2015. - Т. 20. - №5. - С. 27-52.

10. 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.

11. Shafigullin, L.N. Development of the recommendations on selection of glass-fiber reinforced polyurethanes for vehicle parts / L.N. Shafigullin, A.A. Bobrishev, V.T. Erofeev, A.A. Treshchev, A.N. Shafigullina // International Journal of Applied Engineering Research. - 2015. - Vol. 10. - №23. - PP 43758-43762

12. Грин А. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды / А.Грин, Дж.Адкинс. - М.: Мир, 1965. - 456 с.

13. Трещев, А.А. Нелинейные определяющие соотношения для ортотропных разносопротивляющихся материалов / А.А.Трещев // Сборник материалов XVIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности». - Тула: ТулГУ. - 2017. - С. 180 - 184

14. Трещев, А.А. Потенциальная зависимость между деформациями и напряжениями для ортотропных физически нелинейных материалов / А.А.Трещев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. - Орел: ОГУ. - 2017. - № 4-1 (324). - С. 71-77

15. Трещев А.А. Удельная дополнительная работа деформирования ортотропных физически нелинейных материалов / А.А.Трещев, Ю.А.Монастырев, В.Д.Чибрикина // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 13-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики*. - Тула: ТулГУ, 2017. - Т. 2. - С. 208 - 212

16. Jones, R.M. Material for nonlinear Deformation / R.M. Jones, D.A.R. Nelson // *AIAA Journal*. - 1976. - Vol. 14. - № 6. - P. 709-716.

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

18. Теличко, В. Г. Гибридный конечный элемент для моделирования пространственных машиностроительных конструкций с усложненными свойствами / В. Г. Теличко, А. А. Трещев // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. - 2004. - № 1. - С. 61-65.

19. Теличко, В. Г. Гибридный конечный элемент для расчета плит и оболочек с усложненными свойствами / В. Г. Теличко, А. А. Трещев // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. - 2003. - № 5(533). - С. 17-23

20. Теличко, В. Г. Математическая модель расчета многоэтажных зданий из монолитного железобетона / В. Г. Теличко, Н. В. Золотов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. - 2017. - № 2(322). - С. 18-25

УДК 539.3

### **МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ, ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ МАТЕРИАЛА С ДВОЙНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ**

Трещев А.А., Селезнев И.Р.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Работа многих строительных конструкций реализуется совместно с упругим основанием (фундаменты зданий и сооружений, трубопроводы на грунтовом основании и др.). В настоящее время в качестве конструкционных материалов распространено применение полимеров и композитов, обладающих структурной, деформационной, а, во многих случаях, двойной анизотропией.

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние пологой сферической оболочки с центральным отверстием (рис. 1). Главные радиусы кривизны срединной поверхности оболочки в пределах ее плана постоянны, геометрия срединной поверхности оболочки отождествляется с геометрией на плоскости. Главные кривизны оболочки равны  $k_1=k_2=k=1/R$ . [6].

Оболочка принята достаточно тонкой, чтобы использовать традиционные для подобных задач гипотезы Кирхгофа-Лява:

1) нормаль к срединной поверхности после деформации остается перпендикулярной к этой поверхности в деформированном состоянии;

2) при определении параметров напряженного состояния влиянием нормальных напряжений  $\sigma_z$  можно пренебречь.

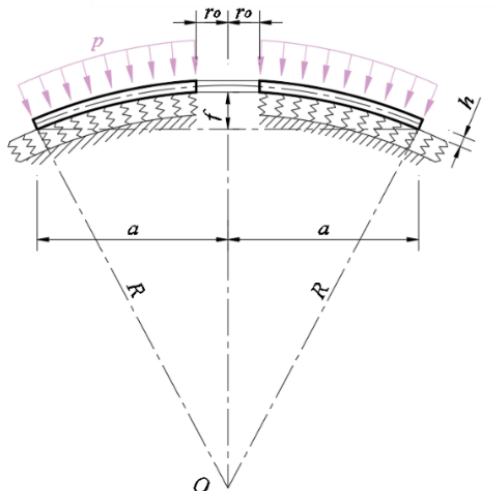


Рис.1. Схема оболочки

Радиус оболочки в плане  $a$  (м), стрела подъема  $f$  (м) и толщина  $h$  (м). Срединная поверхность оболочки является частью сферы, характеризуемой радиусом  $R$  (м). В центре оболочки присутствует отверстие радиусом  $r_0$  (м). Оболочка нагружена равномерно распределенной нагрузкой  $p$  (МПа).

Согласно теории пологих оболочек, кинематические соотношения для рассматриваемой оболочки:

а) компоненты деформации в срединной поверхности, согласно теории Т. Кармана [1]:

$$\varepsilon_r = u_r - kw; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} - kw, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$  - удлинения;  $u, w$  - радиальные перемещения и прогибы;  $k$  - главная кривизна оболочки;  $r$  - радиальная координата;

б) компоненты изгибной деформации:

$$\chi_r = -w_{,rr}; \quad \chi_\theta = -\frac{w_{,r}}{r}; \quad (2)$$

в) компоненты тензора деформаций через параметры деформации  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$  и кривизны  $\chi_r, \chi_\theta$  срединной поверхности:

$$e_r = \varepsilon_r + z\chi_r; \quad e_\theta = \varepsilon_\theta + z\chi_\theta, \quad (3)$$

где  $z$  - вертикальная координата, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки.

Подставляя в (3) соотношения (1) и (2), получим компоненты тензора деформаций через перемещения и прогибы:

$$e_r = u_{,r} - kw - zw_{,rr}; \quad e_\theta = \frac{u_r}{r} - kw - z\frac{w_{,r}}{r}. \quad (4)$$

В качестве физических зависимостей использованы определяющие уравнения деформирования материалов с двойной анизотропией, основанные на экспериментальных данных по деформированию анизотропных разносопротивляющихся сред, предложенные в работе А.А. Трещева и соавторов [9].

При совпадении осей сферической системы координат с главными осями анизотропии и с учётом принятых гипотез физические зависимости записываются в виде:

$$\begin{aligned} e_r &= K_{11}\sigma_r + K_{12}\sigma_\theta \\ e_\theta &= K_{21}\sigma_r + K_{22}\sigma_\theta \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} K_{11} &= (A_{1111} + B_{1111}\alpha_r) + 0,5B_{1111}\alpha_r(1 - \alpha_r^2) - B_{2222}\alpha_\theta^3 + \\ &\quad + B_{1122}\alpha_\theta(1 - \alpha_r^2 - \alpha_r\alpha_\theta); \\ K_{12} &= K_{21} = A_{1122} + B_{1122}(\alpha_r + \alpha_\theta); \\ K_{22} &= (A_{2222} + B_{2222}\alpha_\theta) + 0,5[B_{2222}\alpha_\theta(1 - \alpha_\theta^2) - B_{1111}\alpha_r^3] + \\ &\quad + B_{1122}\alpha_r(1 - \alpha_\theta^2 - \alpha_r\alpha_\theta). \end{aligned} \quad (6)$$

где  $A_{kkkk}, B_{kkkk}, A_{ijij}, B_{ijij}$  - постоянные, зависящие от модулей упругости и коэффициентов поперечной деформации материала;  $\alpha_r = \sigma_r/S, \alpha_\theta = \sigma_\theta/S$

- нормированные напряжения;  $S = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2}$  - модуль вектора полных напряжений.

Преобразуем физические зависимости (5) и вынесем все нелинейные члены отдельно:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= C_{11}e_r + C_{12}e_\theta; \\ \sigma_\theta &= C_{12}e_r + C_{22}e_\theta;\end{aligned}\tag{7}$$

где  $C_{11} = K_{22}/\Delta$ ;  $C_{12} = -K_{12}/\Delta$ ;  $C_{22} = -K_{11}/\Delta$ ;  $\Delta = K_{11}K_{22} - K_{12}^2$ .

Выражения для усилий и моментов через напряжения:

$$\begin{aligned}N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r dz; & N_\theta &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta dz; \\ M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz; & M_\theta &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta z dz.\end{aligned}\tag{8}$$

Подставляя напряжения (7) в выражения усилий (8) и учитывая компоненты тензора деформаций (4), запишем выражения для усилий и моментов через перемещения:

$$\begin{aligned}N_r &= -w_{,rr} F_{11} - kw_r D_{11} - kw_r D_{12} + u_r D_{11} - \frac{w_{,r} \cdot F_{12}}{r} + \frac{u_r D_{12}}{r}; \\ N_\theta &= -w_r k D_{22} - w_{,rr} F_{12} - kw_r D_{12} - \frac{w_{,r} \cdot F_{22}}{r} + u_r D_{12} + \frac{u_r D_{22}}{r}; \\ M_r &= -w_{,rr} P_{11} - kw_r F_{11} - kw_r F_{12} + u_r F_{11} - \frac{w_{,r} \cdot P_{12}}{r} + \frac{u_r F_{12}}{r}; \\ M_\theta &= -w_r k F_{22} - w_{,r} P_{12} - kw_r F_{12} - \frac{w_{,r} \cdot P_{22}}{r} + u_r F_{12} + \frac{u_r F_{22}}{r};\end{aligned}\tag{9}$$

где  $D_{ij} = \int C_{ij} dz$ ;  $F_{ij} = \int C_{ij} z dz$ ;  $P_{ij} = \int C_{ij} z^2 dz$ .

Принимая за основу те или иные определяющие соотношения, мы не вносим изменений в соотношения статико-геометрической природы. Поэтому остаются справедливыми положения и зависимости теории анизотропных оболочек [10]. Внутренние усилия и моменты приводятся к срединной поверхности  $z=0$ , и при условии  $zk \ll 1$  уравнения равновесия для пологих сферических оболочек принимают вид:

$$\begin{aligned}M_{r,r} - M_{\theta,r}/r + 2M_{r,r}/r + k(N_r + N_\theta) + N_r w_{,rr} &= -q; \\ N_{r,r} + (N_r - N_\theta)/r - k[M_{r,r} + (M_r - M_\theta)/r] &= 0.\end{aligned}\tag{10}$$

В качестве модели упругого основания примем упругую модель Винклера [12]. Согласно этой модели, зависимость между реактивным

отпором основания и осадкой его поверхности предполагается линейной и записывается в виде функции:

$$r_{on} = k_w w_r, \quad (11)$$

где  $r_{on}$  - интенсивность реакции упругого основания,  $k_w$  - коэффициент отпора основания (коэффициент постели),  $w_r$  - величина прогиба.

Тогда, с учетом упругого основания, полная интенсивность нагрузки на оболочку определяется суммой давлений:

$$q = p - r_{on} = p - k_w w_r, \quad (12)$$

где  $p$  - нагрузка на оболочку (МПа),  $r_{on}$  - интенсивность реакции упругого основания (МПа),  $k_w$  - коэффициент отпора основания (МН/м<sup>3</sup>),  $w_r$  - величина прогиба (м).

С учетом выражения (12), уравнения равновесия (10) для рассматриваемой полой сферической оболочки на упругом основании примут вид:

$$\begin{aligned} M_{r,r} - M_{\theta,r}/r + 2M_{,r}/r + k(N_r + N_{\theta}) + N_r w_{,r} &= -p + k_w w; \\ N_{r,r} + (N_r - N_{\theta})/r - k[M_{r,r} + (M_r - M_{\theta})/r] &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Подставляя выражения для усилий и моментов (9) в уравнения равновесия (13), получаем систему разрешающих дифференциальных уравнений в частных производных относительно прогибов и радиальных перемещений:

$$\begin{aligned} & -k w_{,rr} F_{12} - k w_r F_{,1212} + (2w_{,rr} P_{12}/r - w_{,rrr} P_{12} - 2w_{,rr} P_{,12} - 2w_{,r} P_{,1212} + \\ & + u_{,rr} F_{12} + u_r F_{,1212})/r + 2w_{,r} w_{,rr} F_{,11} + w_{,r} w_{,rrr} F_{,11} - k w_r F_{,1111} - k w_{,r} F_{11} - \\ & - 2k w_{,r} F_{,12} - 2k w_{,r} F_{,11} + \{2u_{,r} F_{,12} + [2w_{,r} P_{,12} - 2u_{,r} F_{12} - 2u_r F_{,12} + (2u_r F_{12} - \\ & - 2w_{,r} P_{12})/r]/r\}/r + w_{,rr}^2 F_{11} + k[-w_{,rr} F_{11} - k w D_{11} + 0,5w_{,rr}^2 D_{11} - 2k w_r D_{12} + u_r D_{11} - \\ & - (w_{,r} F_{12} + u_r D_{12} - w_{,r} F_{22} + u_r D_{22})/r - k w_r D_{22} - w_{,rr} F_{12} + 0,5w_{,r}^2 D_{12} + u_r D_{12}] + \\ & + w_{,rr} [w_{,rr} F_{11} - k w_r D_{11} + 0,5w_{,rr}^2 D_{11} + k w_r D_{12} + u_r D_{11} - (w_{,r} F_{12} + u_r D_{12})/r] - \\ & - w_{,rrr} P_{11} - 2w_{,rrr} P_{,11} - w_{,rr} P_{,1111} + 0,5w_{,r}^2 F_{,1111} + u_{,rr} F_{11} + u_r F_{,1111} - \\ & - \{-k w_{,rr} F_{22} - k w_r F_{,22} - w_{,rrr} P_{12} - w_{,rr} P_{,12} - k w_{,r} F_{12} - k w_r F_{,12} + w_{,r} w_{,rr} F_{12} \\ & + 0,5w_{,r}^2 F_{,12} + u_{,r} F_{12} + u_r F_{,12} + \\ & + [u_{,r} F_{22} + u_r F_{,22} - w_{,rr} P_{22} - w_{,r} P_{,22} - (u_r F_{22} + w_{,r} P_{22})/r]/r\}/r + \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & + \left\{ 2 \cdot [w_{,rrr} P_{11} - w_{,rr} P_{,11} - w_{,r} F_{11} - kw_r F_{,11} + w_{,r} w_{,rr} F_{11} \right. \\
 & + 0,5w_{,r}^2 F_{,11} - kw_{,r} F_{12} - kw_r F_{,12} + u_{,r} F_{11} + u_r F_{,11} + w_{,r} P_{12}/r^2 - \\
 & \left. - (w_{,rr} P_{12} - w_{,r} P_{,12} + u_{,r} F_{12} + u_r F_{,12} + u_r F_{12}/r) / r \right\} / r + \\
 & \quad + 2u_{,r} F_{,11} - k_w w_r = -p; \\
 & -w_{,rrr} F_{11} - w_{,rr} F_{,11} - kw_{,r} D_{11} - kw_r D_{,11} + w_{,r} w_{,rr} D_{11} + \\
 & \quad + 0,5w_{,r}^2 D_{11} - kw_{,r} D_{12} - kw_r D_{,12} + u_{,r} D_{11} + u_r D_{,11} + \\
 & \quad + [u_{,r} D_{12} + u_r D_{,12} - w_{,rr} F_{12} - w_{,r} F_{,12} + (w_{,r} F_{12} - u_r D_{12}) / r] / r + \\
 & \quad + [-w_{,rr} F_{11} - kw_r D_{11} + 0,5w_{,r}^2 + u_{,r} D_{11} + kw_r D_{12} + kw_r D_{22} + \\
 & + w_{,rr} F_{12} - 0,5w_{,r}^2 D_{12} - u_r D_{12} + (w_{,r} F_{22} - w_{,r} + u_r D_{12} - u_r D_{22}) / r] / r - \\
 & \quad - k \left\{ -w_{,rrr} P_{11} - w_{,rr} P_{11} - kw_{,r} F_{11} - kw_r F_{,11} + w_{,r} w_{,rr} F_{11} + \right. \\
 & \quad + 0,5w_{,r}^2 F_{,11} - kw_{,r} F_{12} - kw_r F_{,12} + u_{,r} F_{11} + u_r F_{,11} + \\
 & \quad + [u_{,r} F_{12} + u_r F_{,12} - w_{,rr} P_{12} - w_{,r} P_{,12} + (w_{,r} P_{12} - u_r F_{12}) / r] / r + \\
 & \quad \left. + [w_{,rr} P_{11} - kw_r F_{11} + 0,5w_{,r}^2 F_{11} + u_r F_{11} + (u_r F_{12} + w_{,r} P_{22} - u_r F_{22} - w_{,r} P_{12}) / r + \right. \\
 & \quad \left. + kw_r F_{22} + w_{,rr} P_{12} - 0,5w_{,r}^2 F_{12} - u_r F_{12} \right\} / r = 0.
 \end{aligned} \tag{14}$$

При дополнении полученной системы уравнений граничными условиями наиболее просто получить решение используя численные методы, например, метод конечных разностей [3].

#### Библиографический список

1. Karman, Th. Festigkeitsprobleme in Maschinenbau. Enzyklopadie der Mathematischen Wissenschaften. Bd IV. Mechanik, Teilband 4, Hft 3, Art 27, Punkt 8. Ebene Flatten. Leipzig: B. G. Teubner. - 1910. - S. 311-385.
2. 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. Vol. 481 (2019) UNSP012014. - DOI: 10.1088/ 1757-899X/481/1/012014. - pp. 1 - 7.
3. Варвак П. М., Варвак Л.П. Метод сеток в задачах расчета строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1977. 154 с.
4. Власов, В.З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев. - М.Физматгиз, 1960. - 491 с.

5. Грин А. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды / А. Грин, Дж. Адкинс. - М.: Мир, 1965. - 456 с.

6. Доннел, Л.Г. Балки, пластины и оболочки / Л.Г. Доннел - М.: Наука, 1984. - 440 с.

7. 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. - Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. - №4. Часть 4. - С. 1740-1742.

8. 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.

9. Трещев А.А., Завьялова Ю.А., Лапшина М.А., Гвоздев А.Е., Кузовлева О.В., Крупицын Е.С. Математические определяющие уравнения деформирования материалов с двойной анизотропией. Чебышевский сборник. 2021;22(4):370-384.

10. Трещев, А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещев. - М.: НИИСФ РААСН; Тула: ТулГУ, 2007. - 160 с.

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

12. Черкасов, И.И. Механические свойства грунтовых оснований / И.И. Черкасов. - М.: Науч-техн. изд-во Автотрансиздат, - 1958. - 156 с.

УДК 539.3

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ  
ИЗ МАТЕРИАЛА С ДВОЙНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ,  
ПОКОЯЩЕЙСЯ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ**

Трещев А.А., Теличко В.Г., Селезнев И.Р.  
*Тулский государственный университет, г. Тула, Россия*

В рамках апробации разработанной математической модели деформирования тонкой пологой сферической оболочки на упругом основании с учетом двойной анизотропии и ее программной реализации была

решена осесимметричная задача теории упругости, описывающая напряжённо-деформированное состояние оболочки, покоящаяся на упругом основании, с центральным отверстием, выполненная из ортотропного разносопротивляющегося материала. Оболочка нагружена внешним давлением в предположении малых прогибов.

В качестве физических зависимостей использованы определяющие уравнения деформирования материалов с двойной анизотропией, основанные на экспериментальных данных по деформированию анизотропных разносопротивляющихся сред, предложенные в работе А.А. Трещева и соавторов [8].

Структурная анизотропия ограничена классом ортотропных материалов. Потенциал деформаций ограничен квазиквадратичным разложением для данного класса анизотропии.

Уравнения равновесия для пологих сферических оболочек приняты согласно теории анизотропных оболочек [9]:

$$\begin{aligned} M_{r,r} - M_{\theta,r}/r + 2M_{r,r}/r + k(N_r + N_{\theta}) + N_r w_{,rr} &= -q; \\ N_{r,r} + (N_r - N_{\theta})/r - k[M_{r,r} + (M_r - M_{\theta})/r] &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В качестве модели упругого основания принята упругая модель Винклера [11].

С учетом упругого основания, полная интенсивность нагрузки на оболочку определяется суммой давлений:

$$q = p - r_{on} = p - k_w w_r \quad (2)$$

где  $p$  - нагрузка на оболочку (МПа),  $r_{on}$  - интенсивность реакции упругого основания (МПа),  $k_w$  - коэффициент отпора основания (МН/м<sup>3</sup>),  $w_r$  - величина прогиба (м).

С учетом выражения (2), уравнения равновесия (1) для рассматриваемой полой сферической оболочки на упругом основании примут вид:

$$\begin{aligned} M_{r,r} - M_{\theta,r}/r + 2M_{r,r}/r + k(N_r + N_{\theta}) + N_r w_{,rr} &= -p + k_w w; \\ N_{r,r} + (N_r - N_{\theta})/r - k[M_{r,r} + (M_r - M_{\theta})/r] &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя выражения для усилий и моментов в уравнения равновесия (3), получаем систему разрешающих дифференциальных уравнений в частных производных относительно прогибов и радиальных перемещений:

$$\begin{aligned}
 & -kw_{,rr} F_{12} - kw_r F_{,1212} + (2w_{,rr} P_{12}/r - w_{,rrr} P_{12} - 2w_{,rr} P_{,12} - 2w_r P_{,1212} + \\
 & \quad + u_{,rr} F_{12} + u_r F_{,1212})/r + 2w_r w_{,rr} F_{,11} + w_r w_{,rrr} F_{,11} - \\
 & \quad - kw_r F_{,1111} - kw_{,rr} F_{11} - 2kw_r F_{,12} - 2kw_r F_{,11} + \\
 & + \left\{ 2u_r F_{,12} + [2w_r P_{,12} - 2u_r F_{12} - 2u_r F_{,12} + (2u_r F_{12} - 2w_r P_{12})/r]/r \right\} /r + \\
 & \quad + w_{,rr}^2 F_{11} + k \left[ -w_{,rr} F_{11} - kw D_{11} + 0,5w_{,rr}^2 D_{11} - 2kw_r D_{12} + u_r D_{11} - \right. \\
 & - (w_r F_{12} + u_r D_{12} - w_r F_{22} + u_r D_{22})/r - kw_r D_{22} - w_{,rr} F_{12} + 0,5w_r^2 D_{12} + u_r D_{12} \left. \right] + \\
 & + w_{,rr} \left[ w_{,rr} F_{11} - kw_r D_{11} + 0,5w_{,rr}^2 D_{11} + kw_r D_{12} + u_r D_{11} - (w_r F_{12} + u_r D_{12})/r \right] - \\
 & - w_{,rrr} P_{11} - 2w_{,rrr} P_{,11} - w_{,rr} P_{,1111} + 0,5w_r^2 F_{,1111} + u_{,rr} F_{11} + u_r F_{,1111} - \\
 & - \left\{ -kw_{,rr} F_{22} - kw_r F_{,22} - w_{,rrr} P_{12} - w_{,rr} P_{,12} - kw_r F_{12} - kw_r F_{,12} + \right. \\
 & \quad + w_r w_{,rr} F_{12} + 0,5w_r^2 F_{,12} + u_r F_{12} + u_r F_{,12} + \\
 & \left. + [u_r F_{22} + u_r F_{,22} - w_{,rr} P_{22} - w_r P_{,22} - (u_r F_{22} + w_r P_{22})/r] \right\} /r + \\
 & \quad + \left\{ 2 \cdot [w_{,rrr} P_{11} - w_{,rr} P_{,11} - w_r F_{11} - kw_r F_{,11} + w_r w_{,rr} F_{11} \right. \\
 & + 0,5w_r^2 F_{,11} - kw_r F_{12} - kw_r F_{,12} + u_r F_{11} + u_r F_{,11} + w_r P_{12}/r^2 - \\
 & \quad \left. - (w_{,rr} P_{12} - w_r P_{,12} + u_r F_{12} + u_r F_{,12} + u_r F_{12}/r) \right\} /r + \\
 & \quad + 2u_r F_{,11} - k_w w_r = -p; \\
 & -w_{,rrr} F_{11} - w_{,rr} F_{11} - kw_r D_{11} - kw_r D_{11} + w_r w_{,rr} D_{11} + \\
 & \quad + 0,5w_r^2 D_{11} - kw_r D_{12} - kw_r D_{,12} + u_r D_{11} + u_r D_{11} + \\
 & + [u_r D_{12} + u_r D_{,12} - w_{,rr} F_{12} - w_r F_{12} + (w_r F_{12} - u_r D_{12})/r]/r + \\
 & \quad + [-w_{,rr} F_{11} - kw_r D_{11} + 0,5w_r^2 + u_r D_{11} + kw_r D_{12} + kw_r D_{22} + \\
 & + w_{,rr} F_{12} - 0,5w_r^2 D_{12} - u_r D_{12} + (w_r F_{22} - w_r + u_r D_{12} - u_r D_{22})/r]/r - \\
 & - k \left\{ -w_{,rrr} P_{11} - w_{,rr} P_{11} - kw_r F_{11} - kw_r F_{,11} + w_r w_{,rr} F_{11} + \right. \\
 & \quad + 0,5w_r^2 F_{,11} - kw_r F_{12} - kw_r F_{,12} + u_r F_{11} + u_r F_{,11} + \\
 & \left. + [u_r F_{12} + u_r F_{,12} - w_{,rr} P_{12} - w_r P_{,12} + (w_r P_{12} - u_r F_{12})/r] \right\} /r + \\
 & + \left[ w_{,rr} P_{11} - kw_r F_{11} + 0,5w_r^2 F_{11} + u_r F_{11} + (u_r F_{12} + w_r P_{22} - u_r F_{22} - w_r P_{12})/r + \right. \\
 & \quad \left. + kw_r F_{22} + w_{,rr} P_{12} - 0,5w_r^2 F_{12} - u_r F_{12} \right] /r \Big\} = 0.
 \end{aligned} \tag{4}$$

где  $D_{ij}, F_{ij}, P_{ij}$  - функции, зависящие от принятых физических зависимостей для ортотропных материалов [8].

В качестве тестовой задачи для апробации разработанной математической модели была рассчитана оболочка толщиной  $h = 0,05$  м; радиусом в плане  $a = 1,5$  м; стрелой подъема  $f = 0,4$  м, радиусом отверстия  $r_0 = 0,25$  м. Средняя поверхность оболочки является частью сферы, характеризуемой радиусом  $R = 3$  м. Форма и размеры оболочки показаны на рисунке 1.

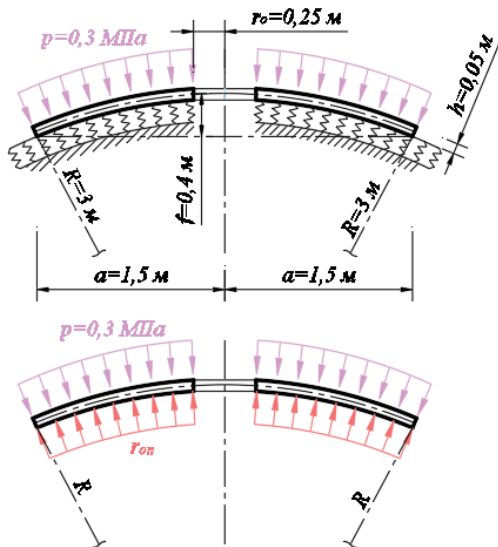


Рис. 1. Схема оболочки

Для решения полученной системы разрешающих дифференциальных уравнений в частных производных относительно прогибов и радиальных перемещений использован метод конечных разностей [3], наиболее просто реализуемый численный метод для данной задачи.

Для построения конечно-разностной схемы радиус оболочки при помощи 200 точек разбит на 199 отрезков. В рамках проведенной конечно-разностной аппроксимации производных получены конечно-разностные аналоги для центральных, контурных и предконтурных точек, и, затем, подставлены в систему дифференциальных уравнений с учетом узлов сетки, образуя тем самым систему линейных алгебраических уравнений.

Для решения тестовой задачи полученная система уравнений дополняется граничными условиями. Края центрального отверстия и внешнего контура принимаются свободными, поэтому в крайних точках центрального отверстия и по внешнему контуру изгибающий момент, продольное усилие и поперечная равны нулю:

$$N_r = 0; M_r = 0; Q_r = 0; \quad (5)$$

В качестве материала оболочки принят стеклопластик со следующими механическими характеристиками [10]: модули упругости -  $E_1^+ = 140$  ГПа,  $E_1^- = 70$  ГПа,  $E_2^+ = 280$  ГПа,  $E_2^- = 140$  ГПа; коэффициенты поперечной деформации -  $\nu_{12}^+ = 0,2$ ,  $\nu_{12}^- = 0,3$ . При нагружении оболочки принято внешнее давление, равное 0,3 МПа.

Оболочка покоится на упругом основании с коэффициентом постели, равным  $125$  МН/м<sup>3</sup>.

Решение произведено с помощью пакета прикладных программ MATLAB. На основе полученных данных построены графики прогибов и напряжений на нижней и верхней поверхности оболочки.

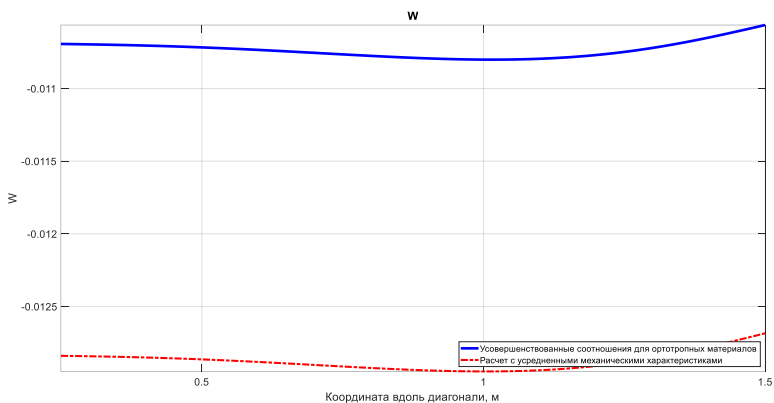


Рис. 2. Вертикальные перемещения в срединной плоскости оболочки

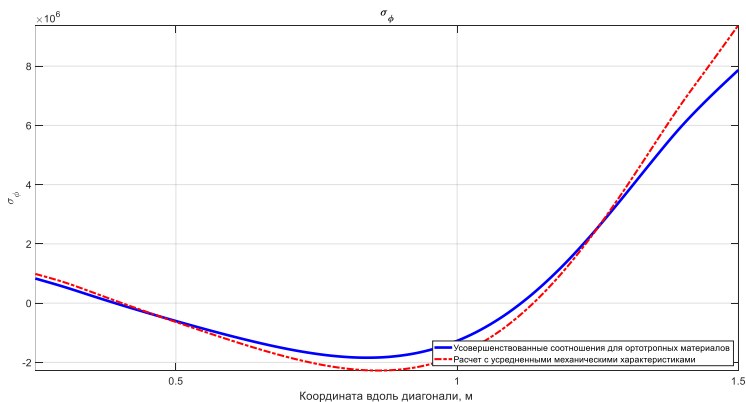


Рис. 3. Напряжения  $\sigma_\theta$  на нижней поверхности оболочки

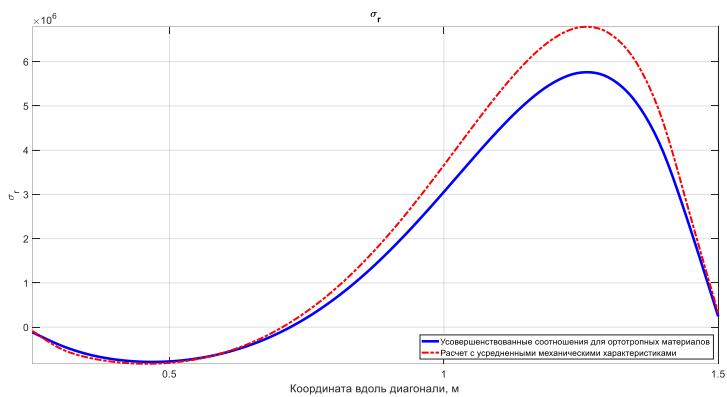


Рис. 4. Напряжения  $\sigma_r$  на нижней поверхности оболочки

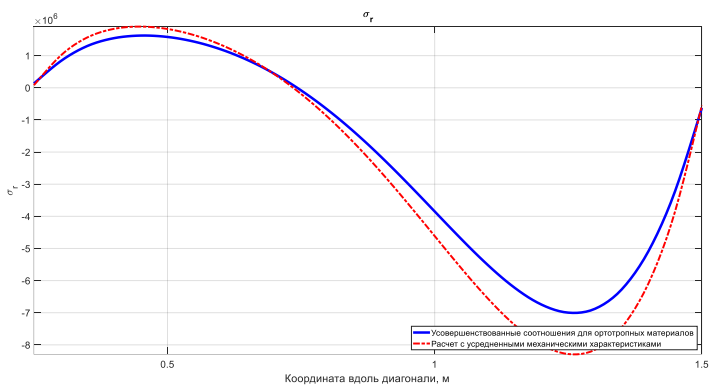


Рис. 5. Напряжения  $\sigma_r$  на верхней поверхности оболочки

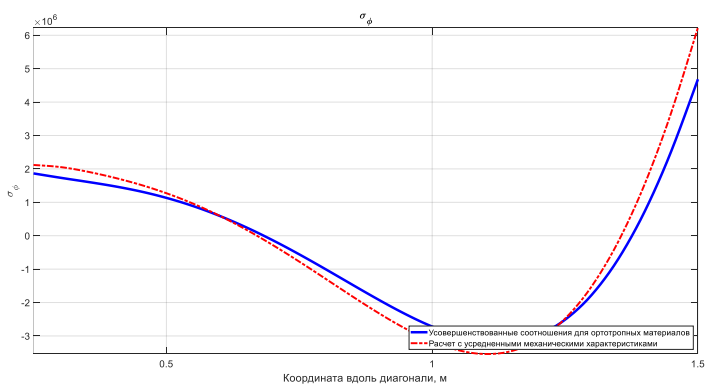


Рис. 6. Напряжения  $\sigma_\phi$  на верхней поверхности оболочки

На приведенных графиках полученные результаты представлены совместно с результатами для теории без учета разносопротивляемости материала. На рисунке 2 приведен график распределения вертикальных перемещений срединной поверхности оболочки. Расхождение между результатами расчёта по используемым усовершенствованным соотношениям [8] и результатами расчёта с усредненными модулями на растяжение/сжатие достигают 27,5 %.

Графики распределения радиальных и окружных напряжений на нижней поверхности оболочки приведены на рисунках 3 и 4. Уточнение результатов расчета с использованием усовершенствованных соотношений составляет до 17 %.

На рисунках 5 и 6 приведены графики распределения радиальных и окружных напряжений на верхней поверхности оболочки. Уточнение результатов расчёта в этом случае составляет до 15%.

Основным выводом, сделанным на основе анализа полученных результатов, можно назвать появление существенной погрешности при использовании усредненных характеристик материала, по сравнению с решением, полученным с использованием усовершенствованных соотношений для ортотропных материалов [8].

#### Библиографический список

1. Karman, Th. Festigkeitsprobleme in Maschinenbau. Enzyklopadie der Mathematischen Wissenschaften. Bd IV. Mechanik, Teilband 4, Hft 3, Art 27, Punkt 8. Ebene Flatten. Leipzig: B. G. Teubner. - 1910. - S. 311-385.
2. 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. Vol. 481 (2019) UNSP012014. - Doi: 10.1088/1757-899X/481/1/012014. - pp. 1 - 7.
3. Варвак П. М., Варвак Л.П. Метод сеток в задачах расчета строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1977. 154 с.
4. Власов, В.З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев. - М.Физматгиз, 1960. - 491 с.
5. Доннел, Л.Г. Балки, пластины и оболочки / Л.Г. Доннел - М.: 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. - Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. - №4. Часть 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., Завьялова Ю.А., Лапшина М.А., Гвоздев А.Е., Кузовлева О.В., Крупицын Е.С. Математические определяющие уравнения деформирования материалов с двойной анизотропией. Чебышевский сборник. 2021;22(4):370-384.

9. Трещев, А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещев. - М.: 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. - М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. - 328 с.

11. Черкасов, И.И. Механические свойства грунтовых оснований / И.И. Черкасов. -М.: Науч-техн. изд-во Автотрансиздат, - 1958. - 156 с.

УДК 539.3: 624.012

## **ОРТОТРОПИЯ И НЕЛИНЕЙНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННО С ПРИОБРЕТАЕМОЙ ПСЕВДОНЕОДНОРОДНОСТЬЮ ИЗГИБАЕМЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН СРЕДНЕЙ ТОЛЩИНЫ**

Трещев А.А., Ющенко Н.С.  
*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Интенсивное развитие строительной отрасли вызвало необходимость создания новых строительных материалов, особенностью которых является высокая прочность и жесткость при минимальной массе. К таким материалам относятся полимеры, композиты с использованием волокон бора, базальта и графитов. С другой стороны снижения массы используемых материалов при одновременном повышении деформационно-прочностных показателей конструкции в целом можно добиться путем использования эффективного очертания пространственных элементов. Использование композитных стеклопластиков и графито-пластиков наряду с повышением жесткости и прочности конструкций создает предпосылки к увеличению их долговечности благодаря высоким показателям коррозионной стойкости. Однако указанные материалы обладают определенными структурными особенностями, с которыми «не справляются» традиционные расчетные модели. К таким особенностям

относятся структурная ортотропия, физическая нелинейность особого рода и зависимость деформационно-прочностных свойств от вида напряженного состояния, которую можно трактовать как деформационную анизотропию или наведенную псевдонеоднородность [1 - 19].

Отмеченные особенности вызвали к жизни новую ветвь механики, основой которой послужил ряд моделей специальных уравнений состояния, определяющих поведение материалов, обладающих анизотропией двоякого рода [4, 8, 20 - 27]. Модели уравнений были сформулированы как в квазилинейной, так и в нелинейной формах. При этом нелинейные уравнения не гарантируют более высокую точность соответствия теоретических расчетов экспериментальным данным по отношению к квазилинейным. Все зависит от механизма учета влияния сложного вида напряженного состояния на параметры тензора податливостей, заложенного в этих моделях. Поэтому, оценивая недостатки различных теорий, нами были предложены уравнения состояния для ортотропных материалов с наводимой деформационной анизотропией, построенные с использованием нормированного пространства напряжений, в квазилинейном [28 - 30] и нелинейном представлениях [31]. Там же продемонстрированы преимущества и высокая точность введенных соотношений.

Здесь рассматривается построение математической модели поперечного изгиба прямоугольных нетонких пластин, для которых свойства двоякой анизотропии учитывается нелинейными определяющими соотношениями [31].

Для оценки напряженно-деформированного состояния ортотропной пластины средней толщины в соответствии с механической моделью С.П.Тимошенко геометрические соотношения представим в виде:

$$\begin{aligned} U_1(x_1, x_2, x_3) &= u_1(x_1, x_2) + x_3 \psi_2(x_1, x_2); \\ U_2(x_1, x_2, x_3) &= u_2(x_1, x_2) + x_3 \psi_1(x_1, x_2); \\ U_3(x_1, x_2, x_3) &= w(x_1, x_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_1, x_2$  - оси декартовой системы координат, привязанные к срединной плоскости пластины;  $x_3$  - перпендикулярная ось к срединной плоскости;  $u_1(x_1, x_2)$  - продольные перемещения в срединной плоскости;  $w$  - перемещения ортогональные к срединной плоскости (прогибы);  $\psi_1(x_1, x_2) = w_{,2} - \gamma_{23}$ ,  $\psi_2(x_1, x_2) = w_{,1} - \gamma_{13}$  - углы поворота поперечных сечений пластины или срединной поверхности относительно указанных индексами осей;  $\gamma_{13}, \gamma_{23}$  - поперечные сдвиги в соответствующих сечениях пластины.

В соответствии с установленными перемещениями и с правилами правой системы координат, используемой в МКЭ, определим относительные деформации произвольной точки пластины следующим образом:

$$e_{11} = u_{1,1} + x_3 \psi_{2,1}; \quad e_{22} = u_{2,2} + x_3 \psi_{1,2}; \quad e_{12} = u_{1,2} + u_{2,1} + x_3 (\psi_{2,2} - \psi_{1,1});$$

$$e_{33} = 0; \quad \gamma_{13} = w_{,1} + \psi_{2}; \quad \gamma_{23} = w_{,2} - \psi_{1}; \quad \gamma_{13} = \psi_2 + w_{,1}; \quad \gamma_{23} = -\psi_1 + w_{,2}. \quad (2)$$

Матричное уравнение связи тензоров деформаций и напряжений с учетом упрощений типа С.П.Тимошенко (2) для ортотропных материалов с нелинейной зависимостью жесткостных свойств от вида напряженного состояния согласно предложенным в работе [31] определяющим соотношениям можно принять в виде:

$$\{e\} = [P]\{\sigma\}, \quad (3)$$

где

$$\{e\} = \begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}; \quad [P] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & P_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & P_{66} & 0 & 0 \\ & sim & & P_{44} & 0 \\ & & & & P_{55} \end{bmatrix}; \quad \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{Bmatrix};$$

$$P_{11} = A_{1111}(\sigma_i) + B_{1111}(\sigma_i)\alpha_{11}; \quad P_{22} = A_{2222}(\sigma_i) + B_{2222}(\sigma_i)\alpha_{22};$$

$$P_{12} = A_{1122}(\sigma_i) + B_{1122}(\sigma_i)(\alpha_{11} + \alpha_{22}); \quad P_{66} = C_{1212}(\sigma_i);$$

$$P_{44} = C_{2323}(\sigma_i); \quad P_{55} = C_{1313}(\sigma_i);$$

где  $A_{ijkl}(\sigma_i)$ ,  $B_{ijkl}(\sigma_i)$ ,  $C_{ijkl}(\sigma_i)$  - нелинейные жесткостные функции от интенсивности напряжений, зависящие от свойств ортотропного материала;

$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + 3(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)}$  - интенсивность напряжений с учетом модельных упрощений;  $\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S$  - упрощенного нормированные

напряжения;  $S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + 2(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)}$  - норма тензорного пространства напряжений с учетом упрощений;  $(i, j = 1, 2)$ .

Нелинейные материальные функции  $A_{ijkl}(\sigma_i)$ ,  $B_{ijkl}(\sigma_i)$ ,  $C_{ijkl}(\sigma_i)$ , фигурирующие в уравнениях (3), для процесса деформирования композита «углеродное волокно-углерод AVCO Mod 3a» устанавливаются по результатам обработки экспериментов по растяжению и сжатию в главных осях ортотропии, а также на сдвиг в главных плоскостях, которые

получены в работе [31]. Все виды экспериментально установленных диаграмм для данного композита заимствованы из публикаций [8, 15, 16]. С учетом модельного упрощения задачи материальные функции можно представить в виде:

$$\begin{aligned} A_{kkkk}(\sigma_i) &= 0,5[1/E_k^+(\sigma_i) + 1/E_k^-(\sigma_i)]; \\ B_{kkkk}(\sigma_i) &= 0,5[1/E_k^+(\sigma_i) - 1/E_k^-(\sigma_i)]; \\ A_{kkmm}(\sigma_i) &= -0,5[v_{km}^+(\sigma_i)/E_k^+(\sigma_i) + v_{km}^-(\sigma_i)/E_k^-(\sigma_i)]; \quad (4) \\ B_{kkmm}(\sigma_i) &= -0,5[v_{km}^+(\sigma_i)/E_k^+(\sigma_i) - v_{km}^-(\sigma_i)/E_k^-(\sigma_i)]; \\ C_{ppq}(\sigma_i) &= 1/G_{pq}(\sigma_i); \quad (k, m = 1, 2); \quad (p, q = 1, 2, 3), \end{aligned}$$

где

$$E_k^\pm(\sigma_i) = a_k^\pm + m_k^\pm \sigma_i + n_k^\pm \sigma_i^2; \quad G_{pq}(\sigma_i) = g_{pq} + p_{pq} \sigma_i + q_{pq} \sigma_i^2;$$

$v_{km}^\pm(\sigma_i) = \lambda_{km}^\pm + \beta_{km}^\pm \sigma_i + \mu_{km}^\pm \sigma_i^2;$   $E_k^\pm(\sigma_i)$ ,  $G_{pq}(\sigma_i)$ ,  $v_{km}^\pm(\sigma_i)$  - нелинейные аналоги модулей упругости, сдвига и коэффициентов поперечной деформации ортотропного тела в направлениях главных материальных осей и соответствующих плоскостей (знаком «+» обозначены характеристики, соответствующие осевому растяжению, а знаком «-» - осевому сжатию), являющиеся функциями интенсивности напряжений;  $a_k^\pm$ ,  $m_k^\pm$ ,  $n_k^\pm$ ,  $\lambda_{km}^\pm$ ,  $\beta_{km}^\pm$ ,  $\mu_{km}^\pm$ ,  $g_{pq}$ ,  $p_{pq}$ ,  $q_{pq}$  - константы алгебраических полиномов, полученные аппроксимацией данных экспериментов (методом наименьших квадратов) по деформированию композита, которые приведены в работе [31].

Обращение матричного уравнения (3) позволяет установить следующие зависимости:

$$\{\sigma\} = [T]\{e\}, \quad (5)$$

где  $[T] = [P]^{-1}$  - матрица жесткостей, зависящих от вида напряженного состояния и уровня нагружения.

Учитывая, что механическое поведение конструкций не зависит от физической природы материала, из которого они изготовлены, в рамках модели С.П.Тимошенко статические уравнения изгиба пластин представимы в виде:

$$\begin{aligned} N_{11,1} + N_{12,2} &= 0; \quad N_{12,1} + N_{22,2} = 0; \quad M_{11,1} + M_{12,2} = Q_1; \\ M_{12,1} + M_{22,2} &= Q_2; \quad Q_{1,1} + Q_{2,2} = q(x_1, x_2), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$N_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} dx_3; \quad M_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} x_3 dx_3; \quad Q_k = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{k3} dx_3; \quad (i, j, k = 1, 2), \quad (7)$$

$h$  - толщина пластины.

Уравнение связи вектора обобщенных усилий  $\{M\}$  с обобщенными деформациями, получаемыми срединной поверхностью пластины после интегрирования напряжений (5) по правилам (7) с учетом геометрических зависимостей (2), определится следующим образом:

$$\{M\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (8)$$

где

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \end{Bmatrix}; \quad [D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} & K_{14} & K_{15} & K_{11} & K_{12} & K_{16} \\ & D_{22} & D_{26} & K_{24} & K_{25} & K_{12} & K_{22} & K_{26} \\ & & D_{66} & K_{64} & K_{65} & K_{16} & K_{26} & K_{65} \\ & & & J_{44} & J_{45} & J_{14} & J_{24} & J_{46} \\ & & & & J_{55} & J_{15} & J_{25} & J_{65} \\ & & & & & J_{11} & J_{12} & J_{16} \\ & & & & & & J_{22} & J_{26} \\ & & & & & & & J_{66} \end{bmatrix}; \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \psi_{2,1} \\ -\psi_{1,2} \\ \psi_{2,2} - \psi_{1,1} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \\ u_{1,1} \\ u_{2,2} \\ u_{1,2} + u_{2,1} \end{Bmatrix};$$

$$J_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} T_{km} dx_3; \quad K_{km} = \int_{-h/2}^{h/2} T_{km} x_3 dx_3; \quad D_{pq} = \int_{-h/2}^{h/2} T_{km} x_3^2 dx_3, \quad (9)$$

где  $i, j = 1, 2, 4, 5, 6$ ;  $k, m = 1, 2, 4, 5, 6$ ;  $p, q = 1, 2, 6$ .

Очевидно, что жесткостные параметры пластины  $J_{ij}$ ,  $K_{km}$ ,  $D_{pq}$  (9) аналитически неопределимы, так как компоненты матрицы  $[T]$  не являются известными функциями координаты  $x_3$ , а нелинейно зависят от характера, степени нагружения конструкции и от вида напряженного состояния, реализуемого в конкретной точке тела пластины. Поэтому для получения результатов интегрирования пластину необходимо условно разделить по толщине на ряд фиктивных слоев в таком количестве, чтобы была обеспечена необходимая точность расчетов. Было принято 21 слой одинаковой толщины (достаточно 13 слоев). Однако интегралы можно вычислять приближенно, разбив пластину по толщине на ряд

фиктивных слоев. В целях упрощения фиктивные слои можно принять одинаковыми по толщине. Интегрирование рекомендовано выполнять численно методом Симпсона.

В расчетной модели представим пластину сеткой плоских конечных элементов с разбивкой по толщине на ряд фиктивных слоев. Жесткостные параметры в рамках конкретного конечного элемента будем определять в центре каждого фиктивного слоя и распространять их на весь его объем. Во избежание появления «паразитных жесткостей» при изгибе ортотропных пластин при использовании изопараметрических конечных элементов с учетом поперечных сдвигов здесь были приняты гибридные элементы, основанные на функционале, обоснованном в работах P.Tong и T.T.H.Pian [32, 33]. Впервые, по-видимому, гибридная формулировка простейших гибридных элементов была осуществлена в работах R.D.Cook [34, 35]. Полная оригинальная формулировка всех уравнений и матриц, свойственных треугольным и прямоугольным гибридным элементам с пятью степенями свободы в узле, основанном на указанном функционале с использованием нелинейных определяющих зависимостей типа (8) подробно обсуждалась в работах [36 - 39]. Кроме того, в этих же работах проведена оценка сходимости конечно-элементных моделей с учетом разбиения на фиктивные слои. Учитывая, что ортотропный материал пластины обладает ярко выраженной физической нелинейностью, зависящей от вида напряженного состояния, при решении использовалась процедура метода переменных параметров упругости в сочетании с пошаговым нагружением малыми величинами поперечной нагрузки.

Апробация рассмотренной конечно-элементной модели осуществлена применительно к поперечному изгибу сплошной прямоугольной пластины со следующими габаритными размерами:  $a \times b \times h = 1 \times 0,75 \times 0,075$  м, где  $a$  и  $b$  - размеры пластины в плане, а  $h$  - ее толщина, которая принималась в соответствии с классификацией пластин средней толщины при  $h = b/10$ . Поперечная нагрузка, приложенная к верхней плоскости пластины, соответствует равномерно распределенной интенсивностью  $q$ , возрастающей от 0 до 1,45 МПа. Опираение пластины принято в виде жесткого защемления по всему контуру. Пластина в плане покрывалась сеткой прямоугольных конечных элементов размерностью  $16 \times 16$ , при этом, как указывалось выше, в каждом КЭ по толщине выделялся 21 фиктивный слой. В качестве материала пластины принимался ортотропный композит «углеродное волокно-углерод AVCO Mod 3a», деформационно-прочностные характеристики которого зависят от вида напряженного состояния [8, 15, 16, 31].

Граничные условия на контуре пластины формируются путем присвоения нулевых значений подмножеству вектора узловых перемещений ансамбля КЭ, характерному для конкретного опирания или закрепления. Это подмножество перемещений генерируется в ответ на указание последовательности узлов ансамбля и номеров перемещений согласно принятой их нумерации внутри узла. Для жесткого защемления пластины обнулялись на контуре узловые перемещения, характеризующие следующие параметры:  $u_1 = 0$ ;  $u_2 = 0$ ;  $w = 0$ ;  $\psi_1 = 0$ ;  $\psi_2 = 0$ . Процесс приложения нагрузки осуществляется путем задания вектора узловых сил для указанной области ансамбля, которая, в принципе, допускает сведение к силе, приложенной к одному узлу (сосредоточенная сила в точке).

На базе принятой конечно-элементной модели была разработана пошагово-итерационная процедура, реализованная на алгоритмическом объектно-ориентированном языке высокого уровня C++, с применением среды разработки Visual C++ фирмы Microsoft. Количество итераций по методу переменных параметров упругости устанавливалось автоматически при достижении разницы в величинах напряжений между смежными приближениями не более 0,01%, система алгебраических уравнений МКЭ решалась методом Гаусса.

Ниже приведены графические зависимости полученных характерных результатов для расчетных величин. Предварительно была рассмотрена тенденция сходимости МКЭ в зависимости от густоты сетки элементов и дискретизации пластины по толщине. Выбранные параметры были приведены выше.

Характерные результаты расчета поперечного изгиба жестко защемленной по всему контуру ортотропной прямоугольной пластины, выполненной из композита AVCO Mod 3a, представлены на рис. 1 - 4. При этом рис. 1 и 2 демонстрируют зависимость максимальных прогибов и моментов от уровня интенсивности поперечной нагрузки, а рис. 3 и 4 характеризуют распределение расчетных величин прогибов вдоль осей симметрии пластины по длинной и короткой сторонам при фиксированном значении нагрузки  $q=1,45$  МПа. При выполнении расчетов по рассматриваемой модели с использованием уравнений (3) - (5) производилось сравнение результатов, получаемых благодаря применению различных вариантов определяющих соотношений для деформационно анизотропных материалов, предложенных Р.М. Джонсом и Д.А.Р. Нельсоном [15 - 17], К.В. Бертом и Д.Н. Редди [8 - 14], С.А. Амбарцумяном [24] и А.А. Золочевским [23], а также без учета их разносопротивляемости.

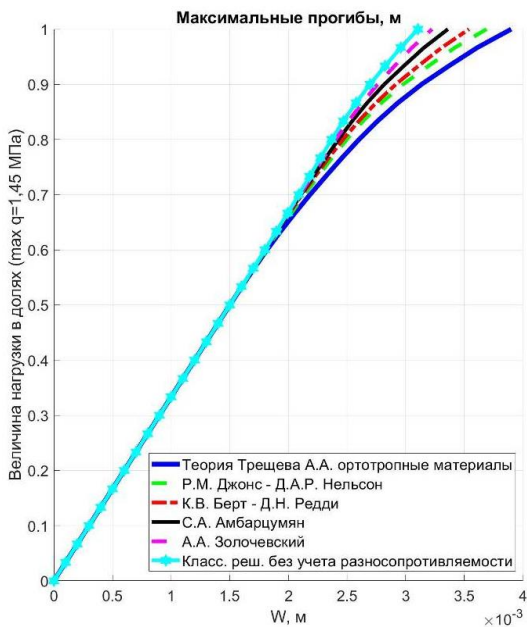


Рис. 2. Влияние величины интенсивности нагрузки на максимальные прогибы

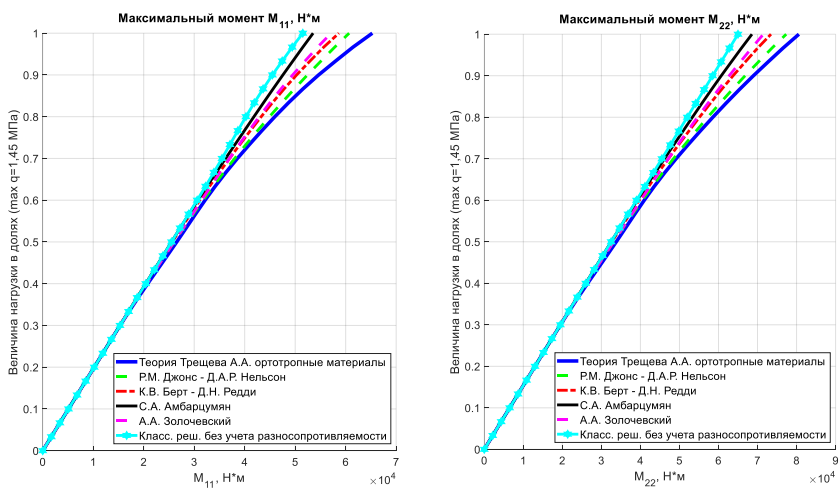


Рис. 3. Влияние величины интенсивности нагрузки на максимальные моменты



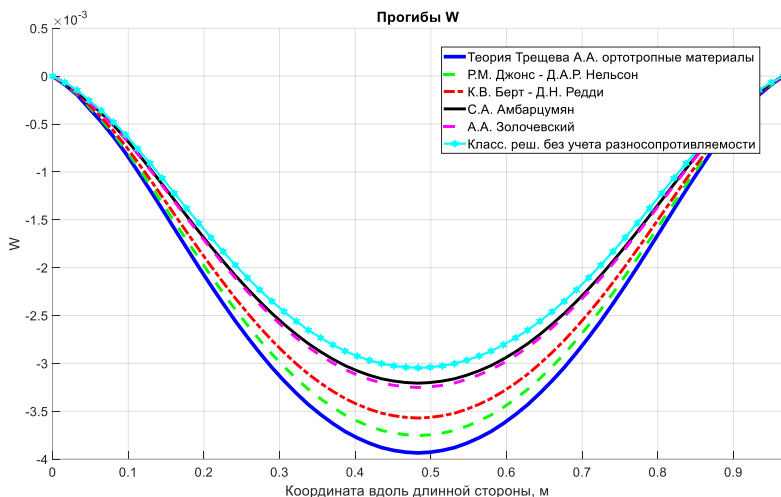


Рис. 4. Распределение прогибов  $w$  вдоль длинной стороны пластины

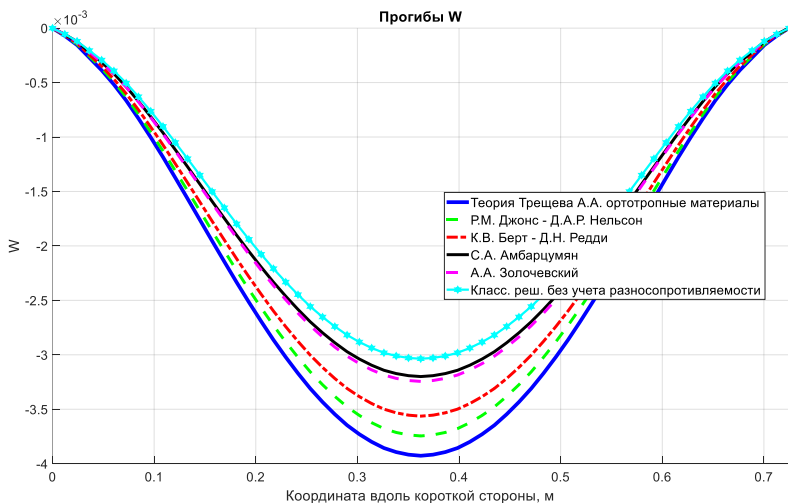


Рис. 5. Распределение прогибов  $w$  вдоль короткой стороны пластины

Для более наглядного численного сравнения результатов расчета пластины вдоль длинной стороны, получаемых по различным вариантам уравнений состояния ортотропных материалов, деформационные характеристики которых зависят от вида напряженного состояния, с оценкой погрешности классической теории приведены в табл. 1.

Анализ результатов расчета прямоугольной жестко защемленной пластины, обладающей структурной ортотропией, осложненной нелинейной зависимостью жесткостных свойств материала от вида напряженного состояния, позволяет утверждать, что учёт подобных особенностей дает возможность значительно уточнить результаты деформационно-прочностного расчета конструкции (погрешность результатов, получаемых по классической теории упругости ортотропных материалов, представлена в табл. 1 и на рис. 1 - 4). Кроме того, результаты расчета пластины по предложенной модели не противоречат, а лишь уточняют решения, вытекающие из других теорий благодаря особенности более гибкого учета нелинейных свойств материала, что подтверждено рис. 1 - 4.

Анализируя полученные результаты расчета ортотропной пластины средней толщины при поперечном нагружении и жестком защемлении по контуру с учетом приобретаемой в процессе деформирования неоднородности распределения механических свойств с учетом физической нелинейности, позволяет утверждать, что все это ведет к изменению научных мировоззрений при оценке состояний конструкций. Это объясняется особенностью ранее не учитываемых свойств материалов пространственных конструкций, которое определяется кардинальным их отличием от классических нелинейно упругих, хотя и в рамках структурной ортотропии.

Таблица 1. Результаты расчета пластины по различным моделям

Модели решения Результаты	Классическое решение	Предложенная модель	R.M. Jones, D.A.R. Nelson	C.W. Bert, J.N. Reddy	A.A. Золочевский	C.A. Амбарцумян
Прогиб $w$ , $m \cdot 10^{-3}/\%$	3,1	3,9/ 25,8%	3,75/ 21%	3,55/ 14,5%	3,25/ 4,8%	3,2/ 3,2%
Напряжение $\sigma_{11}$ в центре, МПа/%	19	23/ 21%	22/ 15,8%	21/ 10,5%	20/ 5,3%	19,5/ 2,6%
Напряжение $\sigma_{22}$ в центре, МПа/%	36	46/ 27,8%	44/ 22,2%	42/ 46,7%	38/ 5,6%	37/ 2,8%
Момент $M_{11}$ , кН·м/%	-18	-22/ 22,2%	-21,7/ 20,6%	-21,5/ 19,4%	-20,8/ 15,6%	-18,3/ 1,7%
*Момент $M_{22}$ , (вдоль короткой стороны) кН·м/%	-30	-40/ 33,3%	-38/ 26,7%	-37/ 23,3%	-36/ 20%	-34/ 13,3%

Очевидно, что в результате проведенных расчетов выявлены явные погрешности в определении параметров НДС традиционной нелинейной теории деформирования ортотропных пластин. При этом, как естественный фактор, обнаружено нелинейное распределение напряжений по толщине.

#### Библиографический список

1. Розе А.В. Трехармированные тканые материалы / А.В.Розе, И.Г.Жигулин, М.Н.Душин // *Механика полимеров*. - 1970. - №3. - С. 471-476.
2. Каргин В.А. Энциклопедия полимеров / В.А.Каргин. - М.: Советская энциклопедия. - 1977. - Т. 3. - 1152 с.
3. О нелинейном деформировании углепластиков: эксперимент, модель, расчет / Е.В. Амелина и др. // *ИВТ СО РАН: Вычислительные технологии*. - 2015. - Т. 20. - №5. - С. 27-52.
4. 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.
5. Калинка Ю.А. Исследование физико-механических свойств хаотически наполненных стеклопластиков / Ю.А.Калинка, С.М.Боровикова // *Механика полимеров*. - 1971. - №3. - С. 411-415.
6. Development of the recommendations on selection of glass-fiber reinforced polyurethanes for vehicle parts / L.N. Shafigullin, A.A. Bobrishev, V.T. Erofeev, A.A. Treshchev, A.N. Shafigullina // *International Journal of Applied Engineering Research*. - 2015. - Vol. 10. - No. 23. - P. 43758-43762.
7. Production of Sulfur Composite Materials from Sulfur Containing Waste for Construction Applications / A.A. Yusupova, R.T. Akhmetova, A.A. Treshchev, A.A. Bobrishev, L.N. Shafigullin, G.R. Shayakhmetova // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. - 2016. July-August. - RJPBCS 7(4). - P. 1411-1419.
8. Bert C.W. Models for Fibrous Composite with Different Properties in Tension and Compression / C.W. Bert // *Transaction of the ASME*. - 1977. - Vol. 99 H. - Ser. D. - No. 4. - P. 344-349.
9. Bert C.W. On the Behavior of Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / C.W. Bert, L.N.R eddy // *ZAMM*. - 1982. - V. 62. - № 6. - P. 213 - 219.
10. Bert C.W. Bending of Thick Rectanqular 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.

11. 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.
12. Reddy J.N. Nonlinear bending of bimodular-material plates / J.N. Reddy, W.C. Chao // J. Solids a. Structures. - 1983. - Vol. 19. - N 3. - p. 229 - 237.
13. Hsu Y.S. Thermoelasticity of Circular Cylindrical Shells Laminated of Bimodulus Composite Materials / Y.S. Hsu, C.W. Bert, J.N. Reddy // Journal of Thermal Stresses. 1981. Vol. 4. No. 2. Pp. 155-177.
14. Reddy J.N. Thermal bending of think rectangular plates of bimodulis composite materials / J.N. Reddy, C.W. Bert, Y.S. Hsu, V.S. Reddy // Journal Mach. Eng. Sci. - 1980. - Vol. 22. - No. 6. - P. 297-304.
15. Jones R.M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Material / R.M. Jones // AIAA Journal. - 1980. - V. 18. - № 8. - P. 995 - 1001.
16. Nelson D.A. Theoretical and experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite / D.A. Nelson, R.M. Jones // AIAA Journal. - 1976. - V. 14 - №10. - P. 1427-1435.
17. 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.
18. Tabaddor F. Two-Dimenshional Bi-Linear Ortotrtptic Elastic Materials / F. Tabaddor // Journal of Composite Materials. - 1969. - Vol. 3. - P. 725-727.
19. Мкртчян Р.Е. Закон упругости для слоистого материала, разносопротивляющегося деформациям растяжения и сжатия / Р.Е.Мкртчян // Механика полимеров. - 1978. - №2. - С. 199-203.
20. Ломакин Е.В. Соотношения теории упругости для анизотропного тела, деформационные характеристики которых зависят от вида напряженного состояния / Е.В.Ломакин // Изв. АН СССР. МТТ. - 1983. - №3. - С. 63-69.
21. Ramana Murthy P.V. Finite Element Analysis of Laminated Anisotropic Beams of Bimodulus Materials / P.V. Ramana Murthy, K.P. Rao // Computers and Structures. - 1984. - Vol. 18. - No. 5. - P. 779-787.
22. Schmueser D.W. Nonlinear Stress-Strain and Strength Response of Axisymmetric Bimodulus Composite Material Shells / D.W. Schmueser // AIAA Journal. - 1983. - V. 21. - №12. - P. 1742 - 1747.
23. Золочевский А.А. Напряженно-деформированное состояние в анизотропных оболочках из разномодульных композитных материалов / А.А.Золочевский // Механика композитных материалов. - 1986. - №1. - С. 166-168.

24. Амбарцумян С.А. Основные уравнения и соотношения разномодульной теории упругости анизотропного тела / С.А.Амбарцумян // Изв. АН СССР. МТТ. - 1969. - №3. - С. 51-61.

25. Нгуен Ш.Т. Идентификация параметров квадратичной модели упругого анизотропного материала / Ш.Т.Нгуен, Д.В.Христич // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я.Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. - 2021. - № 3(49). - С. 3-11.

26. Нгуен Ш.Т. Нелинейные модели упругости ортотропного материала / Ш.Т.Нгуен // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я.Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. - 2021. - № 4(50). - С. 25-32.

27. Khristich D.V. Determining the type of initial anisotropy of elastic material from a series of experiments / D.V. Khristich, S.T. Nguyen // IPO Conference Series: Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - Vol. 1479. - 012139. - 12 p.

28. Трещев А.А. Вариант модели деформирования ортотропных композитных материалов / А.А.Трещев, Ю.А.Завьялова, М.А.Лапшина / Эксперт: Теория и практика (Научно-практический журнал). - Тольятти: АНО «Институт судебной строительно-технической экспертизы» - 2020. - №3(6). - С. 62 - 68.

29. 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.

30. Трещев А.А. О концентрации напряжений в композитных материалах / А.А.Трещев // Известия вузов. Строительство. - 2021. - №11. - С. 120 - 133.

31. Nonlinear mathematical model of relation of second-rank tensors for composite materials / A.A. Treshchev, A.E. Gvozdev, N.S. Yushchenko, A.A.Kalinin / Chebyshevskii sbornik. - 2022. - Vol. 23. - No. 3. - P. 224 - 237.

32. Tong P. A variation principle and the convergence of a finite-element method based on assumed stress distribution / P. Tong, T.H.H. Pian // Int. J. Solids Struct. - 1969. - P. 463-472.

33. Pian T.H.H. Derivation of element stiffness matrices by assumed stress distribution / T.H.H. Pian // AIAA Journal. - 1967. - Vol 5. - P. 1332-1336.

34. Cook R.D. Two hybrid elements for analysis of thick thin and sandwich plates / R.D. Cook // Int. J. Num. Meth. Engng. - 1972. - Vol. 5. - P. 277-288.

35. Cook R.D. Some quadrilateral "hybrid" finite elements / R.D. Cook, J.K. Al-Abdulla // AIAA Journal. - 1969. - Vol. 7. - N. 11. - P. 2184-2185.

36. Артемов А.Н. Поперечный изгиб железобетонных плит с учетом трещин / А.Н.Артемов, А.А.Трещев // Изв. вузов. Строительство. - 1994. - №9 - 10. - С. 7-12.

37. Теличко В.Г. Гибридный конечный элемент для расчета плит и оболочек с усложненными свойствами / В.Г.Теличко, А.А.Трещев // Известия вузов. Строительство. - 2003. - № 5.- С. 17-23.

38. Теличко В.Г. Гибридный конечный элемент для моделирования пространственных машиностроительных конструкций с усложненными свойствами / В.Г.Теличко, А.А.Трещев // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. - 2004. - № 1.- С. 61-65.

39. Трещев А.А. Теория деформирования пространственных железобетонных конструкций / А.А.Трещев, В.Г.Теличко - М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2019. - 386 с.

## СЕКЦИЯ «ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

УДК 691.32

### **ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА И ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ В БЕТОНАХ**

Барковская С.В., Рябов Г.Г., Воронин Д.С., Гаврюшина Д.О.,  
Голубева П.И., Кудряшов З.Ю., Кузин А.А., Леончев А.А.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Мелкозернистые бетоны очень удобны для определения порогов эффективности действия добавок в виду того, что нет необходимости выполнения больших объемов замесов бетонных смесей, включающих крупный заполнитель. Таким образом, на мелкозернистых бетонах можно провести отсеивающие эксперименты, а для выявления действия добавки на свойства тяжелого бетона принимаются уже более узкие диапазоны введения добавки.

В ходе прохождения Проектной практики одной бригадой студентов 4-го года обучения бакалавриата направленности «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» выполнялся первоначальный этап: определение порогов эффективности действия двух видов суперпластификаторов на мелкозернистых бетонах и выбор наиболее эффективного из них для дальнейшей работы с составами тяжелого бетона.

Исследовалось влияние на свойства мелкозернистых бетонов следующих добавок: Полипласт ПК тип S (суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров) и BASF Master Glenium 133 (суперпластифицирующая добавка, являющаяся модифицированным эфиром поликарбоксилата). Помимо этого, в работе использовались следующие материалы: портландцемент класса ЦЕМ I 32,5Н с активностью 32,8 МПа, песок с модулем крупности 2,3 (группа средний).

В ходе исследований изготавливали мелкозернистые бетонные смеси с соотношением цемент: песок 1:3. Составы отформовывались равноподвижные, с подвижностью, рекомендуемой для мелкозернистых бетонов [1] - расплыв на встряхивающем столике 170 мм. Изготавливались образцы-балочки размером 4 × 4 × 16 см. Для сравнительного исследования определялись следующие свойства: средняя плотность мелкозернистого бетона, прочность на растяжение при изгибе, а также прочность

при сжатии. Определение прочностных показателей производилось на образцах после 28-ми суток нормального твердения.

Следует отметить следующую особенность, выявленную при работе с данными видами добавок: пластифицирующие свойства обеих добавок проявляются при длительном перемешивании мелкозернистой бетонной смеси (не менее 10 минут), т.е. выявление недостаточного распыла на встряхивающем столике не всегда свидетельствовало о недостаточном количестве воды. На основании этого было принято для всех составов время перемешивания 12 минут для обеспечения равных условий испытаний.

В таблице 1 приведены результаты исследований влияния добавок - суперпластификаторов на свойства мелкозернистых бетонов.

Таблица 1 - Результаты определения порога эффективности добавок BASF Master Glenium 133 и Полипласт ПК тип S на мелкозернистом бетоне

Количество добавки, % от массы цемента	Снижение расхода воды, %	Средняя плотность образцов, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности в возрасте 28-ми суток н.у. твердения	
			на растяжение при изгибе	при сжатии
контрольный состав	0	2175	4,9	31,6
<b>BASF Master Glenium 133</b>				
0,3	9,8	2213	6,2	34,6
0,6	13,9	2289	6,9	38,6
0,9	18,0	2285	8,4	38,6
1,2	20,2	2286	8,4	36,5
1,5	24,3	2110	7,6	36,1
<b>Полипласт ПК тип S</b>				
0,3	8,0	2266	7,3	32,0
0,6	10,0	2274	6,5	37,4
0,9	16,0	2310	7,6	38,1
1,2	24,2	2350	7,5	38,6
1,5	24,0	2305	6,9	34,2

По результатам, приведенным в таблице 1, оптимальным диапазоном введения добавки BASF Master Glenium 133 по прочностным показателям является 0,6 - 1,2 % от массы цемента. При введении данного расхода добавки в бетонную смесь, по сравнению с контрольным бездобавочным составом, расход воды снизился на 13 - 20%, прочность на растяжение при изгибе увеличилась на 40 - 60 %, прочность на сжатие увеличилась на 15 - 22 %. В случае с добавкой Полипласт ПК тип S оптимальным диапазоном введения добавки является 0,9 - 1,2% от массы



цемента. Снижение расхода воды в мелкозернистых бетонных смесях составило 16 - 24% от контрольного бездобавочного состава.

Для дальнейшей работы с тяжелыми бетонами была выбрана добавка BASF Master Glenium 133.

Вторая бригада студентов, используя результаты, полученные на мелкозернистых бетонах, проводила исследования о степени влияния добавки-суперпластификатора в составе тяжелого бетона, проводя сравнительный анализ прочностных свойств бетона с рядовыми заполнителями и бетона, заполнители которого были подготовлены. Подготовка заполнителей заключалась в промывке песка и щебня.

Чистота заполнителей оказывает большое влияние на прочность бетона [2]. Пылевидные и глинистые частицы создают на поверхности зерен заполнителя пленку, которая препятствует сцеплению их с цементным камнем. Прочность бетона снижается, иногда на 30 - 40%. Целью данного этапа исследований было определение возможного увеличения прочности на сжатие тяжелого бетона при условии применения суперпластификатора и подготовленных заполнителей.

Таблица 2 - Результаты определения влияния действия добавки ПАВ в бетонах на рядовых заполнителях и подготовленных

Заполнители	Количество добавки, % от массы цемента	В/Ц	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>		Предел прочности при сжатии, МПа	
			28 суток	ТВО	28 суток	ТВО
рядовые	0	0,51	2300	2280	20,0	21,2
	0,6	0,46	2324	2336	25,8	29,6
	0,9	0,47	2382	2380	32,4	34,6
	1,2	0,44	2390	2370	33,0	36,8
подготовленные	0	0,49	2350	2320	20,5	21,0
	0,6	0,43	2400	2390	36,8	36,9
	0,9	0,41	2410	2425	37,4	37,5
	1,2	0,40	2420	2423	38,0	37,9

При проведении исследований использовались те же материалы, что и при проведении испытаний на мелкозернистых бетонах. В качестве крупного заполнителя применяли известняковый щебень смеси фракций 5 - 20мм, марки по дробимости 600. Изготавливались бетонные смеси марки по осадке конуса П1. Удобоукладываемость смесей регулировалась расходом воды до получения марки контрольного (бездобавочного) состава, т.е. по ГОСТ 7473 ОК = (1 - 4 см). Для оценки прочности на

сжатие изготавливались образцы-кубы с ребром 10 см. Формовалось по 6 образцов с каждого состава для оценки прочности после 28 суток нормальных условий твердения и прочности на сжатие после ТВО. Результаты проведенных исследований приведены в таблице 2.

По результатам испытания тяжелых бетонов с применением добавки BASF Master Glenium 133 на рядовых и подготовленных заполнителях видно, что подготовка заполнителей приводит к более стабильному росту прочности на сжатие. Прочности на сжатие образцов после ТВО и образцов испытанных в возрасте 28 суток нормальных условий твердения у составов на подготовленных заполнителях отличается незначительно. Подготовка заполнителей также сказывается на проявлении водоредуцирующей способности добавки в более полной мере.

#### Библиографический список

1. Баженов Ю.М. Технология и свойства мелкозернистых бетонов: учеб. пособие // Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, Р.Б. Ергешев. - Алматы: КазГосИНТИ, 2000. - 195с.

2. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник // Ю.М. Баженов - М.: Изд-во АСВ, 2011. - 528 стр.

УДК 620.16

### **ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КАРБОНАТНОГО БЕТОНА**

Белов В.В., Куляев П.В., Баркая Т.Р.

*ТверьГТУ, г. Тверь, Россия*

Рассмотрена зависимость механического поведения карбонатного бетона от скорости деформации. Установлено, что в основе этой зависимости лежат два различных физических механизма: процесс разрушения, влияющий на скорость образования трещин и вязкоупругие деформации неповрежденной (не разрушенной) цементной пасты. Показано, что при анализе различных аспектов механизма разрушения следует учитывать трещинообразование для простых и карбонатных бетонов с учетом влияния скорости деформации. Выявлено, что для полной картины разрушения этих бетонов механизм образования трещин должен быть включен в анализ различных аспектов морфологии сечений образцов и проявления признаков роста трещин.

Получение эффективных мелкозернистых карбонатных бетонов (МЗКБ) с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами связано с необходимостью изучения механических свойств

этих бетонов на разных уровнях воздействия [1, 2]. В МЗКБ присутствует так называемая матрица, состоящая из цементного раствора, различных добавок и жесткого скелета из заполнителя. Снижение уровня деформаций МЗКБ сводится к реализации процессов [3] выравнивания гидратации за счет более равномерного распределения частиц цемента в объеме МЗКБ; физического вытеснения воды из воздушных и капиллярных микропор и частичного перевода ее в гелевую область.

Правильные дозирование, степень дисперсности и технология введения добавок ведут к снижению деформаций МЗКБ, делая последние более прочными и стойкими к агрессивным средам [4].

В статьях [5-7] представлены современные исследования МЗКБ с минеральными добавками и рассмотрено влияние разнообразных факторов на его физико-механические свойства. Деформативность при ползучести является не менее важным параметром, определяющим эксплуатационные характеристики МЗКБ [8]. На них влияют такие факторы, как водотвердое отношение, размер заполнителя, тонкость помола вяжущего, влажность, возраст бетона к моменту приложения нагрузки и сама величина нагрузки [9-11].

Влияние таких параметров, как структура, состав бетона, процентное содержание пластифицирующих и минеральных добавок, освещено в работах, где, помимо прочего, отмечается влияние известнякового тонкодисперсного наполнителя на реологические и технологические свойства бетона [12-14].

Методика оценки долговечности бетонов на композиционном вяжущем рассмотрена в статье [15].

Таким образом, анализ опубликованных работ, как приведенных выше, так и других по данной теме, показывает, что при разработке технологии МЗКБ особое внимание уделяется повышению прочности, морозостойкости, стойкости к циклическим нагрузкам и истиранию (например, при получении дорожных конструкций), что не всегда возможно реализовать при существующих методах проектирования композиций МЗКБ и технологиях производства. Особенно это касается задачи повышения трещиностойкости данных бетонов. Таким образом, необходимо совершенствовать научные методы и способы повышения эксплуатационно-технологических свойств МЗКБ, прежде всего их трещиностойкости и долговечности.

В процессе нагружения в бетонах при ударных и длительных нагрузках, как и при длительных статических, скорость деформации изменяется для различных стадий: возникновения трещин, распространения

трещин и после разрушения. В целом это зависит от динамических свойств бетона, времени воздействия и ряда других факторов.

В табл. 1 приведены составы смеси для обычного мелкозернистого и карбонатных бетонов. Карбонатный наполнитель был измельчен до удельной поверхности  $350 \text{ м}^2/\text{кг}$ . В процессе испытаний на образцах-балках размером  $10 \times 10 \times 40 \text{ см}$ , выполненных из обычного и карбонатного бетона, оценивали деформации для различной нагрузки.

Таблица 1. Составы и свойства обычного (производственного) и опытного бетонов

Компоненты бетона и свойства	Составы бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$		
	Производственный состав мелкозернистого бетона	МЗКБ № 1	МЗКБ № 2
Цемент	650	336	472
Песок	1 460		
Заполнитель из отсева дробления известняка	-	1 528	1 528
Вода	286	333	295
Молотый известняк	-	336	200
СП-1 (сухой)	-	2,52	5,04

Следующее устройство (рис. 1) использовали для мгновенных и длительных испытаний. Гидравлический пресс применяли в качестве испытательной установки для оценки уровня мгновенных и устойчивых деформаций. Ступенчатая предварительная нагрузка для мгновенных и длительных испытаний составляла 500 Н. Электрические датчики измеряли начало трещины. Электроизмеритель наклеен на участки контрольных деформаций (в нижней части испытательных балок).

В эксперименте под ударной нагрузкой применяли чуть более длинные образцы-балки из железобетона обычного и карбонатного составов. Арматура состояла из основных стержней класса А300, продольных стержней диаметром 12 мм и поперечных диаметром 8 мм.

В ходе оценивания эффекта деформации при ударе использовали специальное устройство для сброса (рис. 2). Ударный испытательный стенд представлял собой наконечник-груз весом 100 Н со средней скоростью приложения удара 0,2 секунды. Для измерения мгновенных и устойчивых деформаций использовался измерительный мостик. Рычаг вместе с грузом-

наконечником фиксировался защелкой с застезжкой, которая при нажатии отпускала рычаг и вызывала ударное воздействие на образец. Высота подъема рычага соответствовала чувствительности электрических датчиков для фиксации момента трещины, дальнейшее развитие которой контролировалось с помощью фото- и видеофиксации. Электрические тензометры были подсоединены к тензоэлектрическому измерительному прибору с гальванометром постоянного тока по параллельной цепи.



Рис. 1. Испытательное устройство с образцом и электрическим измерителем для определения мгновенных и длительных напряжений

В табл. 2 показаны характеристики разрушения карбонатного бетона в сравнении с обычным бетоном по периодам приложения нагрузки. Некоторые деформации ползучести включены в полную величину деформаций, образующих трещины в результате действия длительной нагрузки. Уровень трещинообразующих деформаций зависит от длительности приложения нагрузки. В целом для карбонатного бетона этот уровень несколько выше, чем для простого бетона (см. табл. 2). Чем больше продолжительность действия нагрузки, тем для обычного бетона

медленнее растут значения трещинообразующих деформаций, особенно в случае кратковременной нагрузки с одинаковым шагом нагрузки.

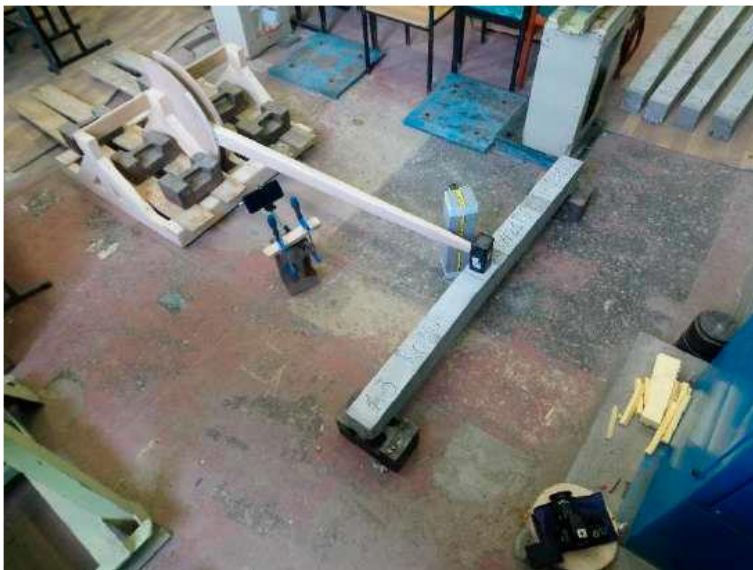


Рис. 2. Испытательное устройство для измерения ударных напряжений

Таблица 2. Влияние вида нагрузки и длительности нагружения на трещинообразующие деформации для обычного и карбонатного бетонов (МЗКБ)

Условия нагружения		Трещинообразующие деформации, $10^{-3}$		
Вид нагрузки	Время	Обычный бетон	МЗКБ №1	МЗКБ №2
Ударная	20 мкс	2,1	2,6	2,4
Кратковременная	1 час	2,9	5,2	3,0
Длительная	7 суток	3,2	5,6	3,3

Для карбонатного бетона значения деформаций растрескивания при увеличении продолжительности нагрузки возрастают незначительно, при этом к ним добавляются пластические деформации ползучести. Карбонатный тонкоизмельченный наполнитель создает пластичные зоны, демпфирующие ход трещинообразующих деформаций. В верхней части канала трещины карбонатных бетонов больше площадь накопления упругой деформации, чем в обычных бетонах, так как добавка с карбонатным наполнителем и суперпластификатором охватывает микро- и мезозоны канала трещины в бетоне.

Изменение величины трещинообразующей деформации влияет и на картину трещины. Для обычного бетона это раскол с большой основной трещиной, а для карбонатного - формирование кластера с микротрещинами.

На заключительном этапе образцы нагружались до разрушения с трещиной, развивающейся перпендикулярно продольной оси образца (оба конца балки опирались на шарниры). На стадии развития трещин не было разрушений по наклонным участкам, в отличие от обычного бетона, который показал известную картину разрушения. На рис. 3 представлен фрагмент процесса разрушения образца карбонатного бетона.



Рис. 3. Картина разрушения образца карбонатного бетона

На рис. 4 показано разрушение образца карбонатного бетона состава № 2 (МЗКБ № 2). В отличие от обычного бетона, который разрушается хрупко с минимальными значениями трещинообразующих деформаций, образцы на карбонатном бетоне разрушаются постепенно, имея большую площадь пластичности в верхней части основной трещины, которая ограничивает изменения трещинообразующих деформаций. Для обычного бетона эти участки являются менее пластичными, что снижает значения трещинообразующих деформаций.



Рис. 4. Процесс разрушения контрольного образца карбонатного бетона (а) и одна из его половин с шероховатой развитой поверхностью после разрушения (б)

На половине образца после испытания (рис. 4б) проявляются узловые включения частиц наполнителя в мягкой матрице карбонатного микронаполнителя. Эта шероховатая развитая поверхность является результатом вязкопластичных внутренних мезо- и микросмещений, сопровождающих процесс разрушения. Все они задерживают образование трещин в карбонатных бетонах. Поверхности разрушения в обычном бетоне являются более гладкими, что иллюстрирует меньшее сопротивление процессу развития трещин этого бетона по сравнению с карбонатными бетонами.

**Выводы.** Карбонатный наполнитель пластифицирует цементную матрицу и окружающие агрегатные зоны и укрепляет контактные зоны между цементным камнем и заполнителем, способствует образованию микропластичных зон, поглощая удар и устойчивую энергию, тем самым увеличивая полные трещинообразующие деформации и делая карбонатный бетон более стойким к ударным нагрузкам.

Установлено, что замена 50 % цемента измельченным известняком в бетонной смеси способствует сокращению локальных факторов напряжения, которые влияют на поведение бетона при разрушении. Между наполнителем и связующим сформирована более однородная и прочная композитная структура. Это повышает трещиностойкость карбонатного бетона и его динамическую прочность, что приводит к повышению эффективности и улучшению физико-механических свойств карбонатного бетона. За счет изменяющейся объемной пластической деформации матрицы объемное деформационное сглаживание композитной микроструктуры улучшает механические характеристики карбонатного



бетона, особенно в долгосрочной перспективе, без значительных потерь технологических свойств на начальном этапе.

Более высокая устойчивость карбонатного бетона к трещинообразованию во многом обусловлена лучшей упаковкой частиц внутри бетонной матрицы и уменьшением пористости. Данные факторы вызывают перенос микротрещин из воздушных и капиллярных областей в микрзоны и распад мезотрещин на внутренние микроструктурные ядра, лишение композитной структуры микропластических энергозатратных областей. В итоге карбонатный бетон становится менее хрупким, чем обычный.

#### Библиографический список

1. Белов В.В., Смирнов М.А. Новые принципы определения состава высококачественного бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. 2008. Вып. 13. С. 341-346.

2. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Бальков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок // Строительные материалы. 2016. № 9. С. 68-72.

3. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н., Никоненко Н.И., Мельников А.В. Повышение свойств композиционных строительных материалов введением минеральных микронаполнителей // Стройпрофиль: строительные технологии и бетоны. 2012. № 2. С. 26-30.

4. Применение карбонатных добавок в цементных составах для гидроизоляционных и реставрационных работ зданий и сооружений / А.А. Плагин [и др.] // Сборник научных трудов Института строительства и архитектуры МГСУ. 2011. С. 224-227.

5. Schutter G.De. Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete // 36th conference on our world in concrete & structures: recent advances in the technology of fresh concrete', proceedings. Ghent: Ghent University. 2011. P. 49-54.

6. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры // Строительство и реконструкция. 2015. № 5. С. 167-174.

7. Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И., Полубарова Ю.В. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 3 (675). С. 14-22.

8. Белов В.В., Субботин С.Л., Куляев П.В. Прочностные и деформативные свойства бетонов с карбонатными микронаполнителями // Строительные материалы. 2015. № 3. С. 25-29.

9. Бальков А.С., Низина Т.А, Макарова Л.В. Разработка составов высокопрочных мелкозернистых бетонов на природном и техногенном заполнителях и критериев оценки их эффективности // Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016): Сборник тезисов конференции. Казань: КазГАСУ. 2016. С. 19.

10. Chaid R., Jauberthiel R., Boukhaled A. Effet de l'ajout calcairesur la durabilite des betons // *Lebanese Science Journal*. 2010. V. 11. № 1. P. 91-103.

11. Desnerck P., Schutter G. De., Taerwe L. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers // *Structural concrete*. 2012. V. 13. № 2. P. 95-101.

12. Хозин В.Г., Сибгатуллин И.Р., Хохряков О.В., Красникова Н.М. Производство ЦНВ из техногенных отходов - эффективный путь решения экологических и сырьевых проблем // *Строительные материалы*. 2012. № 6. С. 190-192.

13. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов. Омск: СибАДИ. 2011. 461 с.

14. Использование композиционных вяжущих для повышения долговечности бетонной брусчатки / В.С. Лесовик [и др.] // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 4. С. 52-54.

15. Методика прогноза механических параметров бетонов методом численного моделирования / В.Т. Ерофеев [и др.] // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXI международного симпозиума имени А.Г. Горшкова*. Москва: ООО «ТРП». 2015. Т. 2. С. 29-31.

УДК 665.73

## **КОМПОЗИЦИОННАЯ МАССА АНГОВОВ ДЛЯ ОБЛИЦОВОЧНОЙ КЕРАМИКИ**

Леончев А.А., Рябов Г.Г.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Целью данной работы является разработка составов композиционных масс ангобов из числа некондиционного сырья для улучшения внешнего вида керамических изделий и достижения высокой архитектурной выразительности керамического черепка.

Ангоб - это тонкий слой (не более 0,25 мм) глиняной суспензии требуемого цвета совместно с добавками, после обжига приобретающий твердость [1 - 4]. Если облицовочный кирпич, изготавливаемый из местных глин, не удовлетворяет по цвету архитекторов, то требуемый цвет

можно получить с помощью ангоба. Ангоб позволяет также усилить естественный цвет глины. Дешевле обходятся ангобы из местных глин. Использование одной и той же глины для облицовочного и основного слоев сырца исключает возникновение напряжений и отслоения ангоба, так как общая усадка и коэффициент температурного линейного расширения (КТЛР) их одинаковы. Ангобы должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать равномерно распределенный тонкий слой однородной окраски без натеков и трещин; плотность должна быть в пределах 1,3 - 1,4 г/см<sup>2</sup> в зависимости от состава;
- обладать высоким сцеплением с основным черепком, поэтому величины воздушной и огневой усадки, а также КТЛР облицовочного кирпича и основной массы должны быть близки;
- морозостойкость не менее 25 циклов;
- водопоглощение не более 14%.

При сушке и обжиге ангобированный кирпич следует укладывать на плашок лицевыми сторонами друг к другу с зазором 1 - 2 см для предохранения лицевых сторон от воздействия дымовых газов.

Обжиг ангобированного кирпича ведется по более мягкому режиму, чем обычного. Общий срок обжига должен быть увеличен на 4...6 ч.

Основной проблемой применения ангоба является его дорогостоящие компоненты. С целью получить недорогой и качественный состав, нами разработаны составы композиционного ангоба, удовлетворяющих этим требованиям.

Составы ангоба создавались с учетом глин, присутствующих на территории Тульской области. Вводимые пигменты выбирались путем опробования различных их образцов. Составы ангобов представлены в табл. 1.

Ввод в составы боя стекла в малом количестве способствует хорошему спеканию слоя, повышению морозостойкости и лучшему сцеплению данного слоя с массой керамического изделия.

Созданные ангобы соответствуют требованиям, предъявляемым к ним, по физико-механическим показателям:

- получен равномерно распределенный тонкий слой однородной окраски без натеков и трещин с плотностью 1,4 г/см<sup>2</sup>;
- морозостойкостью 50 циклов;
- водопоглощением 12%;
- практически одинаковыми коэффициентами температурного линейного расширения черепка и ангоба.

Таблица 1. Составы ангобов.

№ п/п	Состав ангоба	Содержание (г) на 100г сухого вещества	Цвет ангоба
1	Глина Новомосковская (сито 0,315)	50	Светло-рыжий
	Кварцевый песок (сито 0,315)	40	
	Молотое стекло (сито 0,315)	10	
2	Глина Новомосковская (сито 0,315)	70	Рыжий
	Молотое стекло (сито 0,315)	25	
	Пигмент зеленый	5	

Благодаря удовлетворительным физико-механическим свойствам и низкой цене компонентов, полученные ангобы могут широко применяться на кирпичных заводах. Применение разработанных ангобов может повысить архитектурный вид керамических изделий, замаскировать трещины и известняковые высолы на поверхности изделий.

#### Библиографический список

1. Мороз, И. И. Технология строительной керамики / И. И. Мороз. - Киев: Вища школа, 1980. - 381 с.
2. Волженский, А.В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов / А.В. Волженский, И.А. Иванов, В.Н. Виноградов. - М.: Стройиздат, 1984. - 255 с.
3. Книгина, Г. И. Лабораторные работы по технологии строительной керамики и искусственных пористых заполнителей. Учеб. пособие для студентов вузов по специальности «Производство строительных изделий и конструкций» / Г.И. Книгина, Э.Н. Вершинина, Л.Н. Таули. - М.: Высшая школа, 1985. - 223 с.
4. Соколов, Э.М. Геоэкологические принципы использования вторичных ресурсов / Э.М. Соколов, Н.М. Качурин, Г.Г. Рябов. - Москва - Тула: Изд-во «Гриф и К<sup>о</sup>» 2000. - 360 с.

УДК 661.2

## ТЕХНОЛОГИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Медведева Г.А.<sup>1</sup>, Юсупова А.А.<sup>2</sup>, Бараева Л.Р.<sup>2</sup>, Ахметова Р.Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КГАСУ, <sup>2</sup>КНИТУ, г. Казань, Россия

Среди современных проблем, стоящих перед мировым сообществом, наиболее актуальной является проблема ухудшения качества среды обитания человека. Она носит глобальный характер и связана с устойчивым ростом промышленного производства, который сопровождается увеличением количества промышленных отходов.

Разработка технологий сульфидных композиционных материалов актуальна ввиду того, что указанные композиции обладают рядом ценных свойств - прочностью, стойкостью к истиранию, водонепроницаемостью, устойчивостью к агрессивным средам и т.д. [1-2]. Производство сульфидных композиционных материалов с применением дешевой серы становится экономически обоснованным [3-6]. Широкую возможность для изготовления сульфидных композиционных материалов открывают золошлаковые отходы ТЭЦ, которые также являются доступным, дешевым и недефицитным сырьем. Высокая плотность и прочность камня, вяжущего на основе золошлаковых отходов ТЭЦ позволяют получать материалы, эксплуатируемые в агрессивных средах [7-9].

Основной характеристикой атома серы, существенно определяющей особенности процессов образования, типы химической связи и физико-химические свойства сульфидных фаз, является его способность выступать и как донор, и как акцептор. Акцепторная способность вызвана стремлением к достройке оболочки до конфигурации  $s^2p^6$  присущей инертным газам и отвечающей минимальной энергии. Эта особенность атома серы обуславливает значительную долю ионной связи Me-S во многих сульфидах, а также образование атомами серы ковалентных групп  $S_n$ , что, в частности, определяет склонность к образованию полисульфидных фаз, полимерной серы. Полимерная сера обладает рядом преимуществ по сравнению с кристаллической серой. К ним можно отнести высокую устойчивость к агрессивным средам, высокую ударную прочность, отсутствие термических усадочных деформаций в композициях и т.д. [10].

Интересным с точки зрения научных исследований и практического применения являются серные материалы с использованием металлосодержащих соединений, таких как сульфид железа (пирит). Применение его в качестве модификатора позволит, на наш взгляд, получить

полимерную серу, а, следовательно, повысить механическую и ударную прочность изделий за счет образования новых связей.

В работе ставилась задача использовать золошлаковые отходы и пирит для получения сульфидного композиционного материала с высокими физико-механическими свойствами за счет химического взаимодействия компонентов, возможной сшивки серных цепочек и образования полисульфидов.

В работе использовались следующие материалы:

- сера - отход Нижнекамского нефтеперерабатывающего завода. По химическому составу эти отходы содержат 99,9% серы, т.е. практически представляют собой товарный продукт;

- пирит  $\text{FeS}_2$  (сульфид железа), широко распространённый природный минерал, является попутным продуктом добычи некоторых цветных металлов, в том числе, золота;

- строительный песок (ГОСТ 8736-93. Песок для строительных работ);

- золошлаковые отходы ТЭЦ-2 г. Казани следующего состава (масс. %):

$\text{SiO}_2$	47,7-52,2	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	21,24-25,28
$\text{CaO} + \text{MgO}$	4,3	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,2-5,9
$\text{R}_2\text{O}$	1,84-19,03	$\text{SO}_3$	0,2

Для более детального исследования золошлаковые отходы ТЭЦ методом рассева были разделены на зольную и шлаковую составляющие. В работе использовалась зольная составляющая с размером частиц менее 1 мм. Образцы сульфидных композиций готовились путем горячего смешения исходных компонентов при различном времени выдержки (30 и 60 минут). Далее указанные смеси направлялись на формирование образцов заливкой в формы размером 2х2х6 см (виброукладка) или пресованием при стандартном давлении 120 кг/см<sup>2</sup> цилиндров 2х2 см. Полученные материалы испытывались на физико-механические показатели согласно ГОСТ 10180-90 и исследовались методами физико-химического анализа- рентгенографического анализа (рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 с  $\text{Cu K}_\alpha$  - излучением), электронно-парамагнитного резонанса (прибор РЭ-1306), дифференциально-термического анализа (дериватограф Q-1500D системы Паулик, Паулик, Эрдеи). Ударная прочность образцов оценивалась на маятниковом копре.

Известно, что инертная в обычных условиях сера становится реакционно-способной в щелочных средах, в присутствии нуклеофильных и электрофильных реагентов [10]. Пирит- полисульфид железа с тетраэдрически координированной серой и длиной связи S-S 217 пм, т.е. способен проявлять электронодонорные свойства. Предполагалось, что использование в качестве

модифицирующей добавки пирита позволит повысить реакционную активность серы и она сможет вступить в химическое взаимодействие с компонентами наполнителя и добавкой, т.е. будет способствовать повышению прочности образцов. Проведенными исследованиями установлено, что прочностные свойства сульфидных композиционных материалов на золошлаковых отходах повышаются лишь при незначительных количествах  $\text{FeS}_2$  (до 2% масс). Избыток пирита понижает прочностные свойства материала из-за возникающей неоднородности. Происходит некоторое расслаивание образцов вследствие разности в плотностях (плотность серы  $2,1 \text{ г/см}^3$ , пирита  $-5 \text{ г/см}^3$ ). При введении пирита наблюдается значительное повышение прочности - примерно в 1,3 раза.

Оптимальным количеством добавки является 1-2%  $\text{FeS}_2$ . Водопоглощение этих образцов не превышает 1%, что соответствует требованиям ГОСТа. Таким образом, рекомендуемая композиция имеет состав (масс. %):

серосодержащие отходы-	37-39,5
золошлаковые отходы-	60-57,5
пирит	2-3

Свойства материала в сопоставлении с ближайшим литературным аналогом приведены в таблице 1:

Таблица 1. Свойства материала

Количество пирита	Свойства				
	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_{изг}$ , МПа	Удельная ударная вязкость	Плотность ( $\rho$ ), $\text{г/см}^2$	Водопоглощение, W, %
0,0	29	5,1	45	2,5	0,6
0,5	41	5,8	52	2,64	0,2
1,0	46	7,2	57	2,7	0,16
2,0	43	6,8	56	2,69	0,17
3,0	39	6,4	54	2,57	0,18
5,0	30	5,8	49	2,45	0,25
Аналог	20 - 26	3 - 3,5	37 - 40	2,3 - 2,4	0,8-0,9

Разработанный материал обладает высокой устойчивостью к агрессивным средам. Так, коэффициент устойчивости в 5%  $\text{HCl}$  составляет 0,977, в 5%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - 0,962; 5%  $\text{CaCl}_2$  - 0,995; 5%  $\text{NaCl}$  - 0,986; 5%  $\text{MgSO}_4$  - 0,975.

Исследованиями методом парамагнитного резонанса (рис. 1) установлено, что в сере при температуре  $180^\circ\text{C}$  содержится значительное количество парамагнитных центров, т. е. чрезвычайно реакционно-

активных свободных радикалов, которые исчезают при добавлении в расплав серы модифицирующей добавки пирита.

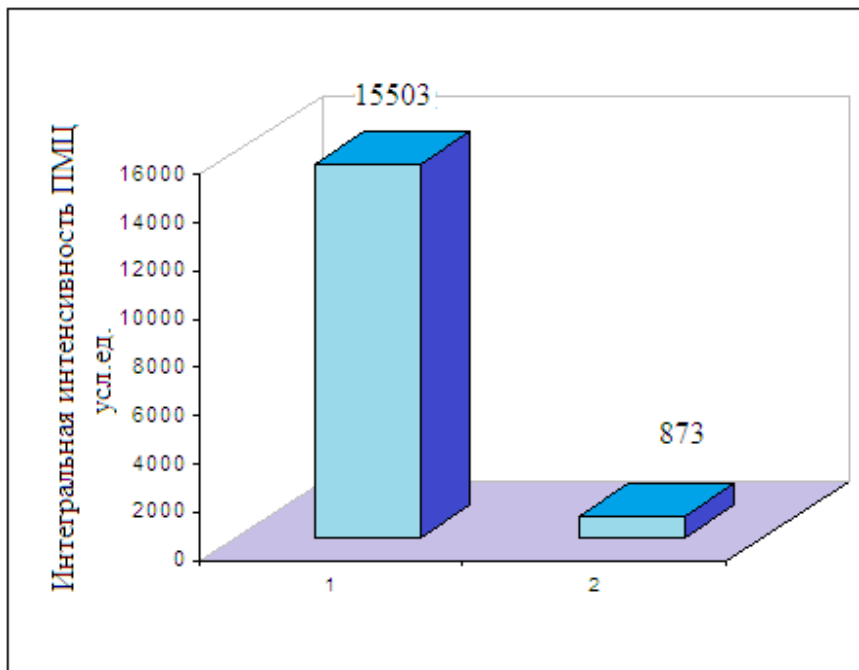


Рис. 1. Результаты исследований ЭПР для образцов серы, термообработанной при 180°C (1) и сульфидных композиций с добавкой пирита (2).

Это также указывает на вероятное химическое взаимодействие компонентов с возможным образованием полимерной модификации серы, объясняющее повышение механической прочности образцов. Следует отметить, что при использовании модифицирующих добавок значительно повышалась ударная прочность образцов (в 1,2 раза), что также свидетельствует в пользу образования полимерной серы.

На химическое взаимодействие между компонентами в системе и возможное образование полимерной серы указывает увеличение доли аморфной фазы на рентгенограмме образца, модифицированного пиритом. Степень кристалличности образца уменьшается на 33%.

ИК- спектроскопическими исследованиями установлено, что в образце сульфидного композиционного материала с добавкой тонкомолотого наполнителя (пирита) наблюдается появление новых полос



поглощения в области  $506 - 422 \text{ см}^{-1}$ , что можно объяснить образованием новых сульфидных связей (полисульфидов).

На дифференциально-термических кривых (рис. 2) отмечается различие в термическом поведении образцов исходных веществ и композиции (несовпадение температурных интервалов эндо- и экзоэффектов), что указывает на различный химический состав. Тепловые эффекты серы, пирита и композиции на их основе различны по природе, имеют различные температурные интервалы, т.е. третья композиция является продуктом взаимодействия исходных компонентов.

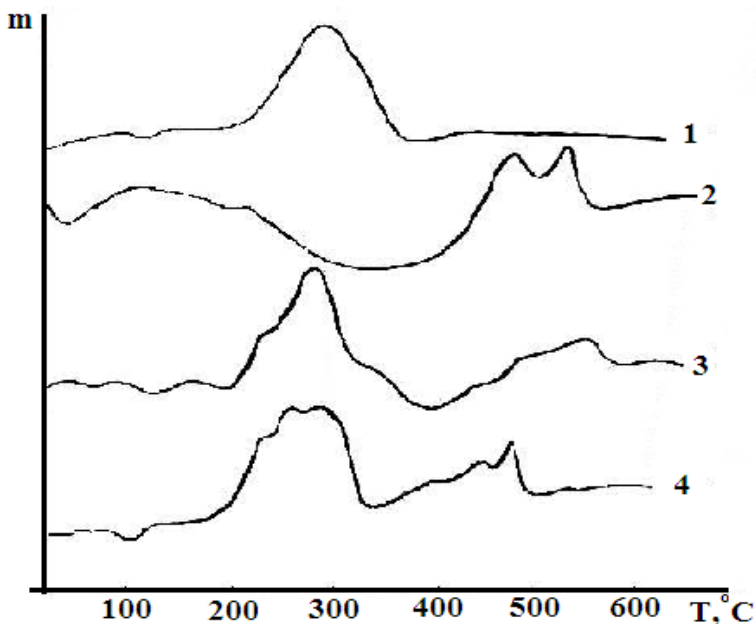


Рис. 2. Дифференциально-термические кривые образцов серы (1), пирита (2), нетермообработанной композиции серы и пирита (3) и термообработанной при  $180^\circ\text{C}$  (4).

Для выяснения механизма возможного взаимодействия между компонентами в системе и оценки влияния сульфида железа на активацию разрыва серных колец были проведены квантово-химические исследования (методом функционала плотности в программе Priroda c, базисом 3z.bas, включающим p- и d-орбитали на атомах) системы сера-сульфид железа. Поскольку при температуре  $180^\circ\text{C}$  в расплаве присутствует шестиатомная сера, расчеты проводились для циклической шестиатомной серы.

На рис. 3 представлена схема присоединения пирита к циклу  $S_6$  с образованием  $FeS_8$ .

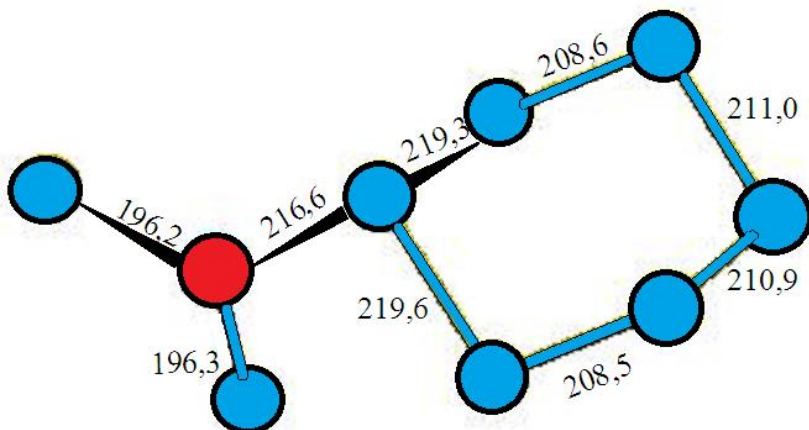


Рис. 3. Схема присоединения  $FeS_2$  к циклу  $S_6$  (сульфид железа  $FeS$ )

Установлено, что присоединение пирита к молекуле серы приводит к снижению энергии связи в серном цикле на 62,6 кДж/моль. Связь сера-сера разрывается и вытягивается с 210,5 пм до 219,6 пм. Реакция протекает экзотермически ( $\Delta H = 237,4$  кДж/моль) с образованием прочной ковалентной связи. Энергия связи железо-сера составляет 237,76 кДж/моль, длина связи 216,6 пм. При этом двухвалентное железо становится трехвалентным. Можно предположить, что происходит образование полисульфидов железа различной степени конденсации, возможно, сшитой структуры, которые будут способствовать формированию плотного и однородного материала с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Таким образом, как показали квантово-химические расчеты присутствие пирита будет способствовать ослаблению связей в серных циклах, раскрытию серного кольца и образованию полисульфидов железа с прочными ковалентными связями. Эти факторы и будут определять получение прочного и химически стойкого материала.

**Выводы.** Таким образом, разработан сульфидный композиционный материал на основе золошлаковых отходов ТЭЦ, модифицированный сульфидом железа (пиритом) с высокими физико-механическими свойствами (прочность при сжатии и при изгибе (при введении пирита) повышается в 1,3 раза; удельная ударная вязкость повышается в 1,2 раза; водопоглощение понижается в 3 раза). Высокие прочностные свойства обусловлены предполагаемым химическим взаимодействием

компонентов и образованием сульфида, возможно, сшитой структуры. Разработанный материал может использоваться в качестве плиток, полов, тротуарных и бордюрных камней, в производстве агрессивных материалов.

#### Библиографический список

1. Баженов Ю.М. Бетонополимеры. - М.: Стройиздат, 1983. - 472 с.
2. Королев Е.В., Прошин А.П., Хрулев В.Т. Строительные материалы на основе серы. - Пенза-Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2003. - 372 с.
3. Ахметова Р.Т., Медведева Г.А., Строганов В.Ф. Влияние активирующих добавок хлоридов металлов в пропиточных технологиях при утилизации отходов теплоэнергетики // Фундаментальные исследования. - 2014. - № 11/4. - С. 739-743.
4. Ахметова Р.Т., Медведева Г.А., Строганов В.Ф. Ресурсосберегающие технологии серных бетонов из техногенных отходов // Фундаментальные исследования. - 2015. - № 2/22. - С. 4861-4866.
5. Юсупова А.А., Ахметова Р.Т., Хацринов А.И. Повышение водостойких свойств композиционных материалов пропиткой в модифицированном серном расплаве // Вестник Казанского технологического университета. - 2011. - №17. - С. 102-106.
6. Порфирьева Р.Т. Разработка научных основ малоотходных технологий переработки серы и ее соединений в сульфиды и полисульфиды. - диссерт. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. - Казань, 2006. - 267 с.
7. Карнаухов Ю.П., Шарова В.В., Подвольская Е.Н. Вяжущие на основе отвалной золошлаковой смеси и жидкого стекла из кремнезема // Строительные материалы. - 1998. - №5. - С. 12-13.
8. Ананьев В.М., Левченко В.Н. Использование золы-уноса в качестве добавки при производстве тяжелого бетона // Известия ВУЗов. Строительные материалы. - 2006. - № 11. - С. 32-33.
9. Медведева Г.А., Ахметова Р.Т., Юсупова А.А. Утилизация золошлаковых отходов ТЭЦ при изготовлении серных бетонов в присутствии хлорида фосфора // Современные наукоемкие технологии, ИД «Академия Естествознания». - М.: - 2018. - № 11. - С. 43-47.
10. Патуроев В.В. Полимербетоны. - М.: Стройиздат, 1987. - 286 с.

УДК 620.193.8: 666.972.16: 66.018.8

## ПОВЫШЕНИЕ БИОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ БЕТОНА ПОСРЕДСТВОМ ВВЕДЕНИЯ ДОБАВОК

Румянцева В.Е.<sup>1,2</sup>, Коновалова В.С.<sup>1</sup>, Нармания Б.Е.<sup>3</sup>,  
Промзелева Е.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИГПУ, <sup>2</sup>ИПСА ГПС МЧС России, г. Иваново, Россия

<sup>3</sup>НИУ МГСУ, г. Москва, Россия

В результате биокоррозии происходят увеличение пористости бетона [1-6] и ускорение диффузионных процессов в нем, что способствует развитию коррозионной деструкции [7-11].

Введение гидрофобизирующей добавки стеарата кальция в цементную смесь при изготовлении бетона снижает водопоглощение, уменьшает пористость и повышает прочность цементного камня (табл. 1). Повышение плотности за счет снижения пористости способствует замедлению проникновения агрессивной среды вглубь цементного камня бетона и торможению развития коррозионных процессов [12-15].

Нитраты металлов добавляются в бетон для ингибирования коррозии стальной арматуры, возникающей в результате воздействия поступающих к ее поверхности через бетонное покрытие агрессивных веществ [16-18]. Добавки нитратов металлов не изменяют физико-механические характеристики цементного камня бетона (табл. 1).

Таблица. 1. Характеристики цементного камня с добавками ингибиторов и гидрофобизатора в количестве 0,5 масс. %

Характеристика	Вид добавки						
	Без добавки	Стеараткальция	KNO <sub>3</sub>	NaNO <sub>3</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2065	2432	2062	2060	2063	2066	2068
Водопоглощение, %	6,20	4,51	6,18	6,21	6,20	6,18	6,19
Пористость, %	11,7	8,3	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Прочность на сжатие, МПа	49,78	58,18	49,91	49,76	49,84	49,89	49,85

Характеристики цементного камня после 6 месяцев воздействия грибов *Aspergillusniger* приведены в табл. 2. У образцов цементного камня бетона с

добавками ингибиторов потеря прочности через 6 месяцев воздействия грибковых микроорганизмов составила 10 %, а у образцов цементного камня без ингибирующих добавок - 14 %. При грибковой коррозии гидрофобизированных образцов прочность снизилась на 4 %.

Таблица 2. Характеристики цементного камня с добавками ингибиторов и гидрофобизатора в количестве 0,5 масс. % после 6 месяцев грибковой коррозии

Характеристика	Вид добавки						
	Без добавки	Стеараткальция	$KNO_3$	$NaNO_3$	$Ca(NO_3)_2$	$Zn(NO_3)_2$	$Mg(NO_3)_2$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2020	2414	2026	2025	2024	2024	2022
Водопоглощение, %	8,89	4,50	8,21	8,26	8,25	8,24	8,26
Пористость, %	15,3	8,3	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
Прочность на сжатие, МПа	42,81	55,85	44,92	44,78	44,86	44,90	44,87

Водопоглощение гидрофобизированного цементного камня бетона после воздействия грибковых микроорганизмов не изменилось, а у образцов без добавок увеличилось в 1,4 раза, а с добавками нитратов - в 1,3 раза. Аналогичным образом изменилось пористость образцов в результате грибковой коррозии.

Из табл. 3 видно, что совместное введение стеарата кальция и нитратов металлов оказывает такое же действие, как объемная гидрофобизация без добавления ингибиторов.

Таблица 3. Характеристики цементного камня с добавками ингибиторов и стеарата кальция в количестве 0,5 масс. % после 6 месяцев грибковой коррозии

Характеристика	Вид добавки				
	$KNO_3$	$NaNO_3$	$Ca(NO_3)_2$	$Zn(NO_3)_2$	$Mg(NO_3)_2$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2413	2415	2414	2413	2412
Водопоглощение, %	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Пористость, %	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Прочность на сжатие, МПа	55,9	55,86	55,88	55,9	55,87

В результате объемной гидрофобизации цементного камня происходит улучшение эксплуатационных характеристик бетона, что должно повысить его коррозионную стойкость. Введение стеарата кальция в количестве 0,5 масс. % в цементную смесь на стадии изготовления бетона снижает степень коррозионного повреждения цементного камня при грибковой коррозии.

Поскольку нитраты щелочных и щелочноземельных металлов в большей степени применяются для ингибирования коррозии стальной арматуры при эксплуатации железобетона в сильно агрессивных средах [19-21], в комплексной добавке они могут оказывать вспомогательное действие в тех частях цементного камня, где гидрофобизация отсутствует или снижена в результате неравномерного распределения добавки из-за недостаточного перемешивания бетона или структурообразования.

#### Библиографический список

1. Чеснокова, Т.В. Моделирование процесса биоразрушения бетона на предприятиях текстильной промышленности / Т.В. Чеснокова, В.Е. Румянцева, С.А. Логинова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2020. - № 1 (385). - С. 206-212.
2. Влияние микроорганизмов на физикомеханические свойства бетона / К.Б. Строкин, Д.Г. Новиков, В.С. Коновалова, Н.С. Касьяненко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. -2021. -№ 10. -С. 90-98.
3. Строганов, В.Ф. Биоповреждение строительных материалов /В.Ф. Строганов, Е.В.Сагадеев// Строительные материалы. -2015. -№ 5. -С. 5-9.
4. Chromková, I. Influence of Biocorrosion on Concrete Properties/ I. Chromková, R. Čechmánek // Key Engineering Materials. - 2018. - Vol. 760. - Pp. 83-90.
5. Review on the influence of biological deterioration on the surface properties of building materials: Organisms, materials, and methods/ C. Ferrari, G. Santunione, A. Libbra, A. Muscio, E. Sgarbi, C. Siligardi, G.S. Barozz // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. - 2015. - Vol.10. - Issue 1. - Pp. 21-39.
6. Study on the effect of *Thiobacillus intermedius* bacteria on the physico-mechanical properties of mortars of ordinary portland cement / O.M. Munyao, J.K. Thiong'o, J.W. Muthengia, D.K. Mutitu, R. Mwirichia, G. Muriithi, J.M. Marangu //Heliyon. - 2020. - Vol. 6. - Issue 1.-e03232.
7. Федосов, С.В. Исследование процессов массопереноса при биокоррозии бетона / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, С.А. Логинова // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования раасн по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли

российской федерации в 2020 году: сборник научных трудов РААСН: в 2 томах. Том 2. -М.: Издательство АСВ, 2021. - С. 299-303.

8. Strokin, K.B. Forecasting the durability of reinforced concrete under conditions of microbiological corrosion/ K.B. Strokin, D.G. Novikov, V.S. Konovalova//E3S Web Conferences. - 2021. - Vol. 274. - P. 04003.

9. Kaushal, V. Investigation of Microbiologically Influenced Corrosion of Concrete in Sanitary Sewer Pipes and Manholes: Field Surveys and Laboratory Assessment / V. Kaushal, M. Najafi //Advances in Environmental and Engineering Research. - 2022. - Vol.3. - Issue 2. - P. 027.

10. Hamilton, M.A. Evaluation of Microbially-Influenced Degradation of Massive Concrete Structures/ M.A. Hamilton, R.D. Rogers, R. Veeh // MRS Online Proceedings Library. - 1995. - Vol. 412. - Pp. 469-474.

11. On the impact of algae on accelerating the biodeterioration/biocorrosion of reinforced concrete: a mechanistic review / R. Javaherdashti, H. Nikraz, M. Borowitzka, N. Moheimani, M. Olivia // European Journal of Scientific Research. - 2009. - Vol. 36. - Issue 3. - Pp. 394-406.

12. Обеспечение стойкости бетона в условиях агрессивной среды / Б.Г. Ключко, С.А. Бычков, В.А. Момот, А.А. Кушвид, Д.В. Горидько, В.В. Пунагин// Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. - 2004. -№ 4. - С. 188-191.

13. The role of colmatation in liquid corrosion of hydrophobized concrete / S.V. Fedosov, V.E. Rummyantseva, V.S. Konovalova, A.S. Evsyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - Vol. 896. - P. 012096.

14. Баженов, Ю.М.Технология бетона / Ю.М. Баженов. - М.: Изд-во АСВ, 2011. - 524 с.

15. Степанова, В.Ф. Долговечность бетона / В.Ф. Степанова. - Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. - 124 с.

16. Добавки в бетон / В.С. Рамачандран [и др.]; под ред. В.С. Рамачандрана; Перевод с англ. Т.И. Розенберг, С.А. Болдырева; под ред. А.С. Болдырева, В.Б. Ратинова. - М.: Стройиздат, 1988. - 570 с.

17. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов. - М.: Стройиздат, 1973. - 207 с.

18. Румянцева В.Е., Коновалова В.С. Влияние ингибиторов, вводимых в бетоны, на коррозию стальной арматуры железобетонов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2016. № 1 (59). С. 29-34.

19. Rummyantseva, V.E. The Reinforced Concrete Reinforcement Corrosion Degradation Inhibition with Nitrates of Alkali and Alki-Earth Metals /

V.E. Rumyantseva, V.S. Konovalova // Materials Science Forum. - 2020. - Vol. 1011. - Pp. 72-78.

20. Steel corrosion inhibition by calcium nitrate in halide-enriched completion fluid environments / S. Dong, E.C. La Plante, X. Chen, M. Torabzadegan, M. Balonis, M. Bauchy, G. Sant //npj Materials Degradation. - 2018. - Vol.2. - Article no. 32.

21. Montes-Garcia, P. Eficacia de inhibidores de nitrito de calcio (CNI) en concreto agrietado / P. Montes-Garcia, H.Z. López-Calv, T.W. Bremner //Revista Ingeniería de Construcción. - 2009. - Vol. 24. - No. 3. - Pp. 233-244.

УДК 691

## **УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ ГИПСОВЫХ ЛИТЫХ ДЕКОРАТИВНЫХ ПЛИТОК**

Сергеева С.Б.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Отделочные материалы в строительстве - это строительные материалы, применяемые в целях повышения эксплуатационно - эстетических качеств зданий и сооружений. Среди отделочных материалов выделяют облицовочные материалы, обладающие большой стойкостью и повышающие долговечность и архитектурно - эстетические качества зданий.

В современном строительстве применяют отделочные материалы из природного камня, стекла, керамики, алюминия и его сплавов, дерева, полимерных материалов, лаков и красок, цветных строительных растворов и бетонов, других материалов.

В последнее время в качестве отделочного материала широко применяют гипсовые литые плитки. Они пригодны для отделки кирпичных и каменных стен в жилых, культурно - бытовых и общественных зданиях.

Гипс является природным минералом, который использовался в строительстве с древних времен еще египтянами.

Химическая формула гипса - дегидрат сульфата кальция. Добывают природный гипс в карьерах, далее подвергают обжигу и далее путем помола превращают в порошок, который и является сырьем для изготовления изделий.

Популярность плитки из гипса обусловлена следующими достоинствами:

- гипс широко встречается в природе, довольно прост в переработке, поэтому не является дорогостоящим материалом;

- плотность изделий имеет невысокую плотность и можно получить тонкие изделия;



- простой монтаж на любую поверхность при помощи клея или жидких гвоздей;

- природный гипс в процессе эксплуатации может регулировать климат в помещении, то есть поглощать лишнюю влагу и отдавать при ее уменьшении;

- гипс имеет один из самых низких уровней радиоактивности 29 Бк/кг и является экологичным материалом, не влияющим на здоровье людей и животных;

- гипс легко обрабатывается и при необходимости можно подрезать неровности литья;

- материал является негорючим и длительно выдерживает высокие температуры 600-700С<sup>0</sup>, выделяя влагу, которая препятствует распространению огня;

- гипсовые изделия обладают теплоизолирующими и звукоизолирующими свойствами;

- плитка, используемая для внутренней отделки, может прослужит 15-20 лет;

- гипс набирает прочность быстро, но сроки схватывания можно регулировать, вводя специальные добавки;

- гипс интересен тем, что, расширяясь, хорошо заполняет форму и при желании можно создать рельеф любой поверхности, а вводя красители он может имитировать природный камень.

Есть у гипса и недостатки:

- материал не водостойкий;

- материал хрупкий;

- выдерживает нагрев до 70 градусов по Цельсию без изменения свойств;

- поверхность изделий необходимо покрывать лаками, чтобы защитить от влаги и пыли.

Для улучшения свойств гипса в состав вводят добавки, как правило, это пластификаторы, гидрофобизаторы и армирующие волокна, которые увеличивают прочность изделий на изгиб.

Целью исследования являлось получение искусственного мрамора из гипса с улучшенными физико - механическими свойствами.

Для выполнения экспериментов был взят по самой низкой ценовой категории гипс строительный для внутренних работ марки Г-4 Самарского гипсового комбината, соответствующего ГОСТ 125-2018.

В качестве комплексной добавки был выбран преобразователь гипса СВВ - 500, производимый ООО «Эмульсия», г. Челябинск. Как отмечает

производитель, эта добавка улучшает свойства гипса по всем параметрам. В состав преобразователя входят пластификатор, пеногаситель, активатор гипса. Работать с водогипсовой смесью с применением преобразователя намного удобнее, повышается текучесть раствора, увеличивается время его жизни. Добавка увеличивает прочность и пластичность водогипсовой смеси, улучшая качество отливаемой поверхности. Рекомендуемая дозировка СВВ - 500 составляет 1 - 4% от массы сухого гипса. Соответственно, чем больше ввести добавки, тем выше будет прочность изделия, смесь станет более текучей, уменьшится количество пузырей. Изделия из гипса, декоративный кирпич, формы для кирпича из гипса получатся крепкие. Также можно использовать колер для гипса, пигмент для гипса, чтобы придать изделию нужный цвет.

В проводимых экспериментах для придания изделиям более белого цвета использовался диоксид титана, а для придания рисунка серого мрамора использовался сухой краситель железо-оксидный пигмент черного цвета.

Для повышения прочности гипсовых поверхностей или изделий рекомендуется вводить в раствор специальные добавки. Это полимерная фибра, различные виды клея (КМЦ, ПВА, костный клей), известь - пушонка, бура, жидкое стекло [2].

Для эксперимента был выбран клей «Бустилат М-20», производимый ООО «Лакра Синтез». Московская область, Ногинский район, г. Старая Купавна.

В состав клея входят: водная дисперсия ПВА, пластификатор, гидроксипропилцеллюлоза, мел, консервант, пеногаситель, модификатор реологии.

Как отмечает производитель, этот клей обладает высокой прочностью склеивания, после высыхания образует эластичную пленку. Клей «Бустилат М-20» предназначен для приклеивания синтетических ворсовых ковров, линолеума на тканевой основе, полимерных и керамических облицовочных плиток, декоративной пленки (клеенки) на бумажной и тканевой основе на бетон, асбоцементные и древесноволокнистые плиты, деревянную основу и штукатурку с последующей эксплуатацией внутри помещений с нормальной влажностью.

В источнике [1] рекомендуется для получения искусственного мрамора использовать клей столярный плиточный в количестве 4% и через мешковину пропитывать гипсовую смесь, насыпанную в форму, клеевым раствором до полного насыщения и появления воды на поверхности смеси.

Пропитка гипсовой смеси клеевым раствором через мешковину не дала желаемый результат. Структура изделий получалась неоднородной, даже с применением вибрирования.

Поэтому было решено получать изделия методом литья без вспомогательных приспособлений.

Для формования изделий использовались два вида форм: резиновые формы фигурные и полиуретановые шестиугольные в виде пчелиных сот. Гибкий материал этих форм позволил легко распалубивать изделия, не повреждая их.

Были изготовлены балочки размером 40x40x160мм для определения прочности и водопоглощения образцов гипсовой смеси с добавками и без добавок.

Проводился анализ сравнения физических, механических и эстетических свойств плиток, изготовленных по двум составам.

В табл. 1 приведен состав замесов для изготовления плитки и балочек.

В табл. 2 показаны физико-механические свойства гипсовых составов.

Таблица. 1. Состав замесов для изготовления плитки

Составы	Вода, мл/кг	СВВ-500, %	Бустилат М-20, %	Диоксид титана, %	Железо-оксидный пигмент, %
С добавками	700	3	5	6	5
Без добавок	700	-	-	6	5

Таблица 2. Физико - механические свойства гипсовой смеси

Составы	Водопоглощение, %	Начало схватывания, мин	Конец схватывания, мин	Прочность при сжатии, через 2 часа, МПа	Коэфф. размягчения
С добавками	0,11	15,5	20	6,2	0,88
Без добавок	0,19	6,5	10,5	6	0,66

Были изготовлены пробные образцы плиток с применением клея «Бустилат М-20» и без него.

Смесь гипсовой смеси без добавок получалась недостаточно подвижной для формования плиток методом литья. С введением добавок в количестве, указанном в табл. 1, смесь приобретала нужную консистенцию.

Добавка СВВ-500 продлила сроки схватывания и дала возможность получить хорошие литые изделия без пор и раковин на поверхности (рис. 1).

Использование клея придало поверхностям изделий более гладкий и блестящий поверхностный слой, то есть поверхность плиток стала более эстетичной и не требующей покрытие лаком.



Рис. 1. Отделочные плитки из искусственного мрамора

Прочность гипсового камня на сжатие с добавками получилась почти одинаковой с разницей в 3,3%. Это связано с тем, что количество воды не менялось с изначальной задумкой эксперимента.

Плитка, изготовленная с добавками, имеет водопоглощение по массе на 42% меньше, чем без добавок, и коэффициент размягчения равный 0,88 говорит о водостойкости полученных изделий (табл. 2).

Таким образом, введение в гипсовую смесь добавки СВВ-500, клея «Бустилат М-20» и красящих пигментов, позволяет получить отделочные гипсовые плитки повышенной водостойкости и более высокой декоративности с имитацией искусственного мрамора.

#### Библиографический список

1. Лабораторный практикум по технологии отделочных, теплоизоляционных и гидроизоляционных материалов: Учеб. пособие для вузов по спец. «Производство строит. изделий и конструкций» / В.Н. Соков, Ю.В. Лабзина, Г.П. Федосеев. - М.: Высш. шк., 1991. - 112 с.: ил.
2. <https://uznayoremonte.ru/materialyi/kak-sdelat-krepkiy-gips-ili-tehnologiya-i-reczeptura-proizvodstva-dekorativnogo-kamnya-i-3d-panelej/>

УДК 691.32

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОКАЛЬЦИТА В СОСТАВЕ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА**

Соловьева И.Е., Барковская С.В., Хрунов Е.Е.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Мелкозернистый бетон, не содержащий щебень, актуален для применения тонкостенных и густоармированных конструкций, а также его можно использовать для изготовления железобетонных конструкций в районах, где отсутствуют щебень и гравийно-песчаная смесь. Свойства такого бетона определяются теми же факторами, что и обычного бетона. Однако особенностями являются большая однородность, высокое содержание цементного камня, отсутствие жесткого скелета, а также повышенная пористость и удельная поверхность твердой фазы.

Зависимость прочности мелкозернистого бетона (МЗБ) при В/Ц отношении прямолинейна и снижение расходов цемента приводит к снижению прочностных показателей. Малое содержание портландцемента приводит к тому, что смесь становится менее удобоукладываемой и удобообрабатываемой, хуже уплотняется, а плотность и прочность постепенно уменьшаются. Это ситуации для В/Ц до 0,3. При В/Ц = 0,4 и выше наивысшая прочность может быть достигнута при определенном оптимальном соотношении между цементом и песком. В таких составах превышение расхода цемента выше оптимального повышает количество избыточной воды, что, соответственно, увеличивает пористость и понижает прочность [1].

Также при приготовлении мелкозернистых бетоном и уплотнении их вибрированием в смесь вовлекается определенное количество воздуха, который распределяется по всему объему смеси в виде мельчайших пузырьков. Вовлечение воздуха может достигать 6% [2], что также повышает пористость и снижает прочностные показатели. Также на повышение пористости и снижение прочностных показателей мелкозернистого бетона влияет и тот факт, что песок обладает более высокой пустотностью, чем смесь песка и щебня и снижение количества цементного теста веден к его нехватке для обмазки зерен песка и заполнения всех пустот.

Таким образом, одним из направлений повышения качества мелкозернистых бетонов является снижение пористости и уплотнение структуры, что влечет за собой и повышение прочностных показателей. Традиционно введение добавок ПАВ (пластификаторов и суперпластификаторов) снижает расход воды в мелкозернистых бетонных смесях без снижения подвижности. Смеси получаются более литыми, соответственно пористость

готового бетона снижается, а прочностные показатели повышаются. Ещё одним направлением уплотнения структуры бетона может служить введение микронаполнителей (микрокальцита, микрокарбоната и др.) в состав смесей. Микронаполнители позволяют снизить расход цемента без снижения количества цементного теста для обмазки зерен мелкого наполнителя.

В данной работе исследуется возможность применения в качестве микронаполнителя микрокальцита. Микрокальцит - это минеральный наполнитель, полученный измельчением мрамора, это порошок белого цвета с содержанием карбоната кальция до 97%. Микрокальцит уже нашел широкое применение, например, в высокопрочных бетонах в качестве окрашивающего заполнителя, при производстве плитки этот наполнитель используется как безусадочный заполнитель.

На основе ранее проведенных отсеивающих экспериментов в составах мелкозернистого бетона использовалась добавка - суперпластификатор BASF Master Polyheed 4004 в оптимальном количестве 0,6% от массы цемента. Помимо этого, в работе использовались следующие материалы: портландцемент класса ЦЕМ I 32,5Н с активностью 32,8 МПа, песок с модулем крупности 2,2 (группа средний), микрокальцит (помол до остатка на сите №008 - 3,9%).

В ходе исследований изготавливали мелкозернистые бетонные смеси с соотношением цемент: песок 1:3. Составы отформовывались равноподвижные, с подвижностью, рекомендуемой для мелкозернистых бетонов [1] - расплыв на встряхивающем столике 170 мм. Изготавливались образцы-балочки размером 4 × 4 × 16 см.

Следует отметить, что мрамор обладает очень низкой водопотребностью (до 0,7%) и микрокальци, полученный из мрамора, достаточно слабо, вне зависимости от дозировки, влиял на изменение водопотребности смеси.

В таблице 1 приведены сравнительные результаты определения водопотребности смеси, средней плотности бетона и прочностных показателей МЗБ без введения ПАВ, мелкозернистого бетона с добавкой BASF Master Polyheed 4004 (ДПЛ в таблице 1) и мелкозернистых бетонов с введением в состав добавки BASF Master Polyheed 4004 и различного количества микрокальцита (МК в таблице 1). Испытания образцов проводились в возрасте 28 суток н.у. твердения.

По результатам, приведенным в таблице, видно, что введение микрокальцита в состав мелкозернистых бетонов:

1) повышает плотность структуры материала (рост средней плотности составил от 4 до 6% по сравнению с составами без микрокальцита);

2) не влияет на изменение водопотребности бетонной смеси (В/Ц отношение снижено только за счет введения суперпластификатора в состав мелкозернистой бетонной смеси);

3) повышает прочностные показатели мелкозернистого бетона.

Таблица 1 - Результаты испытаний мелкозернистых бетонов

Компоненты, части или % от массы цемента				В/Ц	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа	
цемент	песок	ДПЛ	МК			на растяжение при изгибе	при сжатии
1	3	-	-	0,50	2175	4,9	31,2
1	3	0,6	-	0,36	2216	5,1	33,5
1	3	0,6	5	0,36	2305	5,6	40,0
1	3	0,6	10	0,37	2290	6,3	40,4
1	3	0,6	15	0,36	2243	6,0	38,4

Оптимальным является количество введения микрокальцита 10 % от массы портландцемента. Рост предела прочности на растяжение при изгибе составил 2,4 - 28,6%, предела прочности при сжатии 20,6 - 29,5% по сравнению с составами без микрокальцита.

#### Библиографический список

1. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник // Ю.М. Баженов - М.: Изд-во АСВ, 2011. - 528 стр.
2. Баженов Ю.М. Технология и свойства мелкозернистых бетонов: учеб. пособие // Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, Р.Б. Ергешев. - Алматы: КазГосИНТИ, 2000. - 195с.

УДК 674.815

### **ВЛИЯНИЕ НАТРИЯ ДВУУГЛЕКИСЛОГО НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСНО-НАПОЛНЕННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА**

Ярцев В.П., Данилов В.М.  
ТГТУ, г. Тамбов, Россия

Вслед за экономическими трендами развитых стран, в развивающихся странах, также наблюдается тенденция на снижение ресурсоёмкости промышленности, которая положительно сказывается на

экологической обстановке и повышает эффективность труда [1-3]. При этом применяемые меры не должны снижать качество выпускаемой продукции [4]. К такой идеологии максимального энергосбережения также относятся вопросы по переработке отходов, образующихся в ходе обработки древесины [5]. Относительно крупные отходы лесозаготовительных предприятий уже давно массово применяют в строительной отрасли [6]. Так, например древесную стружку в дальнейшем применяют при производстве ДСП, ОСП и т.п. материалов. Опилки, образующиеся в ходе распиловки чаще всего так и остаются невостребованным отходом и являются дополнительным обременением по решению их утилизации.

Полимерные материалы, получаемые на основе эпоксидных смол, отличаются высокой стойкостью к агрессивным средам, а также обладают качественными физико-механическими характеристиками. Поэтому вариант, рассматривающий добавление в такой полимерный композит древесных пеллет, получаемых в ходе экструзии опилок, может одновременно снизить стоимость конечного материала, а также закрыть вопрос по утилизации опилок.

В последнее время в строительстве жилых, а также малогабаритных коммерческих сооружений преобладает применение деревянных конструкций. Чаще всего встречается каркасная схема, ввиду экономичности и вариативности при проектировании и реконструкции [7]. Зачастую в качестве отделочного материала таких каркасов применяют различные древесные плиты. Характеристики таких материалов широко изучены, а следовательно, появляется необходимость в поиске новых материалов и разработке новых рецептов с последующим изучением характеристик этих материалов [8-10].

Композитный материал представляет собой смесь следующих компонентов: связующим выступает эпоксидная смола, наполнителем - кварцевый песок и пеллеты, полученные в ходе экструзии опилок. Количественное соотношение компонентов определялось методом математического планирования. Математическое планирование реализовано как трехфакторный план. Факторами соответственно, здесь выступают связующая эпоксидная смола ( $z_1$ ), наполнитель кварцевый песок ( $z_2$ ) и наполнитель пеллеты ( $z_3$ ). Целевыми функциями являются прочность на сжатие и на изгиб. При этом выполняется равенство:  $z_1+z_2+z_3=1$ . В этом исследовании рассматривались четыре уровня: 0; 0,333; 0,5; 1.

Целью данной работы является определение влияния натрия двууглекислого на эксплуатационные прочностные характеристики ранее не изучаемого



древесного композита, состоящего из эпоксидной смолы, древесных пеллет и песка. Для этого решаются следующие задачи:

- определение прочностных характеристик после 7-дневного воздействия натрия двууглекислого;
- определение прочностных характеристик после 14-дневного воздействия натрия двууглекислого;
- сравнение прочностных характеристик с результатами без воздействия агрессивных сред.

Принципиальную схему получения древесно-наполненного композита можно описать следующим образом:

1. Этап подготовки связующего и наполнителя (в разогретую смолу до температур 50...60 °С внедряется отвердитель).
2. Этап смешивания (связующее смешивается с наполнителем, в заранее определенном соотношении).
3. Этап укладки смеси в формы.
4. Этап термической обработки (при температуре 100 °С в течение 2 часов).
5. Этап охлаждения (до комнатной температуры).
6. Этап извлечения готового материала из формы.
7. Этап выдержки (набор прочности в течение 10 суток).

Готовые образцы выполнялись в двух форм-факторах. Балки с геометрическими размерами 20×20×120 мм для определения прочности на изгиб ( $R_{изг}$ , МПа). Кубы с геометрическими размерами 20×20×20 мм для определения прочности на сжатие ( $R_{сж}$ , МПа). Испытания на прочность образцов проводилось по методике ГОСТ 10180-2012.

Для определения прочности композита образцы разрушаются путем статического разрушения при постоянной скорости нагрузки. Усилия, которые приводят к началу процесса разрушения фиксируются. Затем вычисляется напряжение при этих усилиях.

Испытания на сжатие проводились с применением пресса ПГМ-500МГ4. Предел прочности при сжатии определялся следующим методом: кубообразные образцы с размерами 20×20×20 мм размещались так, чтобы их боковые грани были соосны с пластинами, а упоры надежно прилегали к грани образца. Испытания на поперечный изгиб проводились с применением шестипозиционного стенда. Образцы с размерами 20×20×120 мм помещались на опоры пролетом 100 мм, так чтобы с каждой стороны оставалось по 10 мм. Затем образцы постепенно нагружались в середине пролета вплоть до наступления критической фазы, а именно разрушения.

В ходе предыдущего исследования были получены результаты прочности на сжатие и изгиб для древесно-наполненного композита без внешних воздействий [11, 12]. Результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Прочностные характеристики композита без внешних воздействий

Поз.	Факторы			$R_{сж.}$ , МПа	$R_{изг.}$ , МПа
	$z_1$ (эпоксидная смола)	$z_2$ (песок)	$z_3$ (пеллеты)		
1	1	0	0	70.5	23.9
2	0	1	0	80.7	21.9
3	0	0	1	65.7	7.9
4	0.5	0.5	0	57.2	18.3
5	0.5	0	0.5	64.6	15.1
6	0	0.5	0.5	66.0	13.2
7	0.333	0.333	0.333	77.4	12.8

Графические результаты представлены на рисунках 1 и 2.

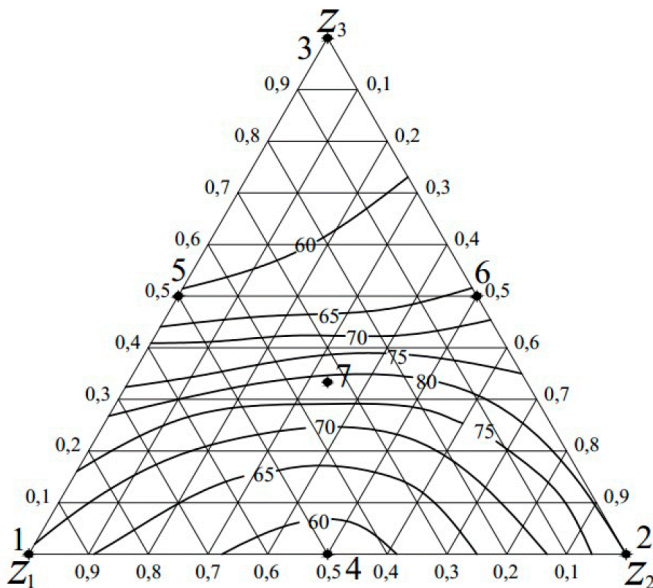


Рис. 1. Прочность на сжатие  $R_{сж.}$ , МПа полимерных образцов в зависимости от содержания компонентов в координатах псевдофакторов: смола ( $z_1$ ), песок ( $z_2$ ), пеллеты ( $z_3$ )

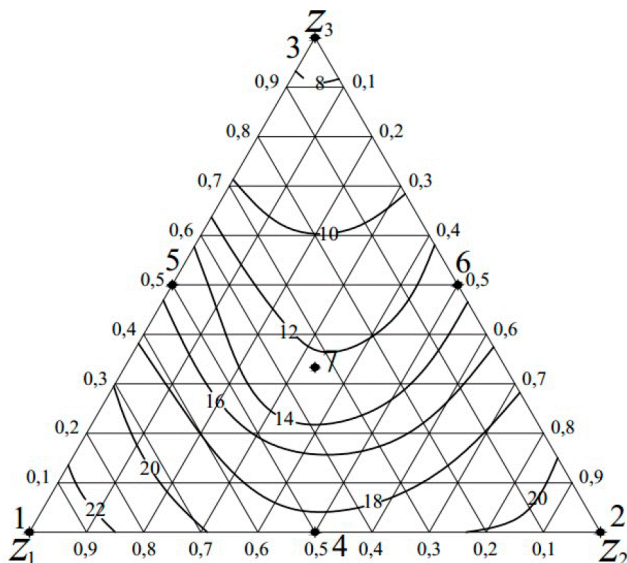


Рис. 2. Прочность на изгиб  $R_{изг}$ , МПа полимерных образцов в зависимости от содержания компонентов в координатах псевдофакторов: смола ( $z_1$ ), песок ( $z_2$ ), пеллеты ( $z_3$ )

Для изучения влияния натрия двууглекислого на прочностные характеристики древесно-наполненного композита образцы выдерживались в течение 7 суток и 14 суток под воздействием 35 % раствора натрия двууглекислого. Результаты испытаний приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Прочностные параметры для композита (7 суток воздействия натрия двууглекислого)

Поз.	Факторы			$R_{сж}$ , МПа	$R_{изг.}$ , МПа
	$z_1$ (эпоксидная смола)	$z_2$ (песок)	$z_3$ (пеллеты)		
1	1	0	0	78.3	23.1
2	0	1	0	87.0	20.1
3	0	0	1	51.8	8.9
4	0.5	0.5	0	82.3	19.3
5	0.5	0	0.5	59.4	14.7
6	0	0.5	0.5	65.6	15.9
7	0.333	0,333	0.333	70.5	15.9

Как видно из таблицы, самое высокое значение прочности при изгибе после 7 суток воздействия составляет 23,1 МПа для точки №1. До воздействия раствора максимальное значение также было в точке №1. Значения при этом не сильно различаются. Самая низкая прочность на изгиб получена для рецептуры с преобладающим количеством пеллет в точке №3. До воздействия ситуация была такая же.

Самое высокое значение прочности при сжатии после 7 суток воздействия находится в точке №2 с преобладающим количеством песка. До воздействия ситуация была такая же. Наименьшее значение находится в точке №3 с преобладающим количеством пеллет. До воздействия наименьшее значение находилось в точке №4. Таким образом очевидно, что жидкая агрессивная среда в первую очередь ухудшает характеристики древесного компонента.

Таблица 3. Прочностные параметры для композита (14 суток воздействия натрия двууглекислого)

Поз.	Факторы			R <sub>сж.</sub> , МПа	R <sub>изг.</sub> , МПа
	z <sub>1</sub> (эпоксидная смола)	z <sub>2</sub> (песок)	z <sub>3</sub> (пеллеты)		
1	1	0	0	78.4	20.1
2	0	1	0	79.1	21.7
3	0	0	1	52.7	8.7
4	0.5	0.5	0	85.8	21.3
5	0.5	0	0.5	73.9	13.1
6	0	0.5	0.5	79.8	16.9
7	0.333	0.333	0.333	73.8	16.1

Как видно из таблицы ситуация с выдержкой в течение 14 суток аналогична с выдержкой в течение 7 суток. Никаких резких изменений в характере разрушений не наблюдается. Как и предполагалось агрессивная среда в первую очередь значительно ухудшает характеристики древесного наполнителя, в частности, но в общем древесно-наполненный композит демонстрирует высокое сопротивление 35 % раствору натрия двууглекислому. Вследствие впитывания и набухания пеллет их несущая способность неминуемо падает, в сравнении с образцами, где преобладает песок и эпоксидная смола. Ввиду этого применение предлагаемого древесно-наполненного композита целесообразно в конструкциях с наименьшим воздействием влаги, например внутренняя отделка. Также проблему может решить добавление в рецептуру гидрофобных добавок.

Библиографический список

1. Леонович, А. А. Древесноплитные материалы специального назначения / А. А. Леонович. - Изд.: Лань, 2019. - 160 с.
2. Stisiak, M. Friction and Shear Properties of Pine Biomass and Pellets / M. Stisiak, M. Molenda, M. Banda, J. Horabik, J. Wiacek, P. Parafiniuk, J. Ways, M. Gancarz, E. Gondek, A. Lisowski, T. Oniszczyk // MDPI. - №13 (3567), 2020.
3. Kaliyan, N. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass / N. Kaliyan, R. V. Morey // Bioresour. Technol. - №101, 2010. - P. 1082-1090.
4. Дубоделова, Е. В. Особенности технологии топливных пеллет из древесины лиственных пород / Е.В. Дубоделова, Н.А. Сычева, И.А. Хмызов, Т.А. Снопкова, Т.В. Соловьева // Труды БГТУ. №4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. - №4(151), 2012.
5. Шаяхметов, А. Х. Сравнительные характеристики пеллет из лугзи подсолнечника и древесных пеллет / А.Х. Шаяхметов, А.Л. Тимербаева, Р.В. Борисова // Вестник технологического университета. - №2(18), 2015.
6. Сериков, Е. А. Древесина - перспективный материал для строительства уникальных зданий и сооружений / Е.А. Сериков // Известия ростовского государственного строительного университета. - Т.2. - №20, 2015. - С. 70-75.
7. Рогожина, А. В. Развитие и анализ основных технологий малоэтажного строительства из материалов на основе древесины / А.В. Рогожина // Жилищное строительство. - №12, 2019. - С. 35-39.
8. Беличенко, М. Ю. Строительство многоэтажных зданий на основе древесины / М.Ю. Беличенко, Л.Р. Ахметова, В.А. Дроздов // Проблемы современной науки и инновации. - №12, 2016. - С. 31-38.
9. Чиберев, О. В. Изменение модуля деформации опилок и коры при уплотнении / О.В. Чиберев, В.А. Кацадзе // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - Т. 3. - №2-2(13-2), 2015. - С. 372-375.
10. Леонович, О. К. Биоогнезащита древесины в строительстве / О.К. Леонович // Архитектура и строительство. - №3, 2009. - С. 34-35.
11. Новикова, Н. О. Влияние заполнителя древесно-наполненного полимерного композита на прочность при изгибе / Н.О. Новикова, В.П. Ярцев // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. - №5(21), 2018.
12. Новикова, Н. О. Древесно-наполненный композит на основе эпоксидной смолы / Н.О. Новикова, В.П. Ярцев // Вестник ТГТУ. - №25(1), 2019. - С. 142-148.

## **СЕКЦИЯ «ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ОБСЛЕДОВАНИЕ И УСИЛЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ»**

УДК 69.059.324.3

### **ПРОБЛЕМЫ УСИЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Андронов А.М.  
*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Усиление строительных конструкций необходимо в результате реконструкции, технического перевооружения объектов и вследствие выявленного экспертизой физического износа, вызванного эксплуатационными факторами и сверхнормативными воздействиями [2], которые приводят к снижению несущей способности элементов конструкций и к снижению их долговечности. Усиление конструкций невозможно проводить без тщательного визуального обследования существующего сооружения или его наиболее ответственных узлов [1, 2]. Проведение диагностики необходимо для определения фактических геометрических и физических параметров конструкций.

Для усиления металлических конструкций используется идентичный для железобетонных способ - увеличение поперечного сечения, а также обетонирование металлических конструкций, устройство дополнительных связей, ребер и распорок. Для прикрепления применяются сварные или болтовые соединения. Существенные достоинства данного метода имеют и свои недостатки, такие как увеличение веса конструкции, технологическая трудоемкость и сложность монтажа, что приводит к временному ограничению технологических процессов производства, а также к нарушению режима эксплуатации сооружения во время проведения работ по усилению, в частности, при усилении конструкций объектов транспортной инфраструктуры.

Анализ опубликованной литературы показал, что количество исследований, в которых рассматривается вопрос усиления металлических конструкций композитными материалами довольно ограниченны [4-6] из-за малого количества экспериментов, результаты которых не всегда стабильны. Поведение конструкций, усиленных композитными материалами, относительно широко описываются в зарубежных источниках [7-11]. Также нет каких-либо положений по технологии и контролю качества производства работ при усилении конструкций этими материалами.

Главными достоинствами композитных материалов являются высокие упруго-прочностные характеристики, малый вес, устойчивость к коррозии, технологичность, стойкость и выносливость к воздействию внешних агрессивных сред. Немаловажными преимуществами композитов являются легкость транспортировки и изготовления конструкций необходимых габаритов уже на месте выполнения работ по усилению, а также возможность усиления пластин и оболочек различной кривизны.

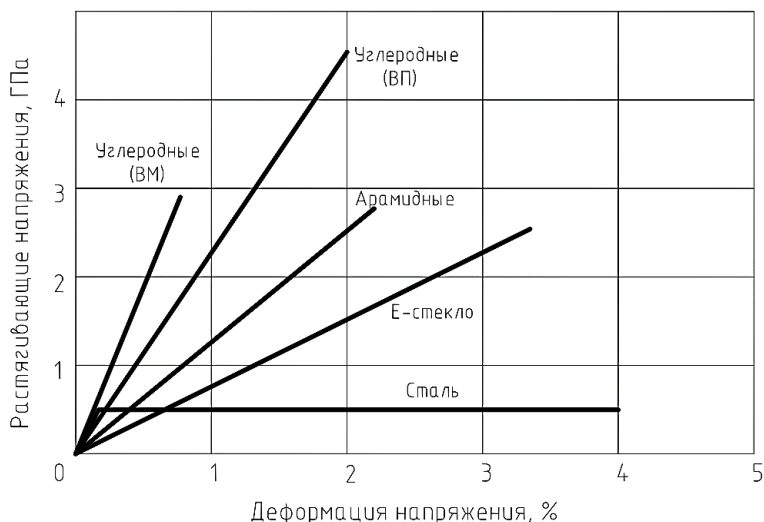
Механические свойства композитных материалов зависят от типа и химического состава применяемых волокон; их ориентации и распределения в поперечном сечении полосы, а также соотношения волокон и полимеротвердителя в полимерном пакете. Механические характеристики, применяемых в строительстве волокон приведены в табл. 1 [3]. Приведенные в таблице типы сеток имеют линейную диаграмму деформирования (рис.1), поэтому для моделирования поведения армопластиков используется закон Гука с учетом того, что композиты обычно являются ортотропными материалами. Армирование полимерными материалами в ряде случаев не имеют альтернативы даже несмотря на их высокую дороговизну. К примеру, углеволокно по характеристикам прочности и сопротивлению усталости в разы превосходит сталь, поэтому решение об усилении стержневых растягиваемых и изгибаемых элементов конструкций композитными материалами должно быть экономически обосновано.

Наиболее распространенным и дешевым в строительстве композитным материалом считаются стеклопластики. Главный недостаток стеклопластиков - большая плотность и низкий модуль упругости. Близкие им по происхождению базальтовые волокна имеют схожие, но сильно нестабильные механические свойства.

Углеродные волокна были созданы в качестве замены стеклянных волокон, но уже с увеличенными прочностными характеристиками. В зависимости от режима термообработки и структуры исходного сырья, конечное волокно имеет различную структуру и механические свойства. Углеродные волокна непрерывно совершенствуются, повышается их прочность и жесткость, увеличивается ассортимент и, что немаловажно - себестоимость. Один из перспективных путей снижения цены таких волокон - использование нефтяных основ в качестве исходного сырья. Углеродные волокна и композиты из таких материалов имеют глубокий черный цвет и хорошо проводят электричество, что также расширит области их применения.

Таблица 1. Механические характеристики волокон композитных материалов

Тип волокон	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^6$ Па	Степень удлинения, %	Плотность, т/м <sup>3</sup>
Углерод высокопрочный	3400 - 3900	200 - 250	1,5 - 2,5	1,75 - 1,95
Углерод высокомодульный	2900 - 4000	300 - 700	0,45 - 1,2	1,75 - 1,95
Арамид высокопрочный	3500	75	4,6	1,4
Стекловолокно	21 - 88	30 - 48	2,0 - 5,3	2,5-2,7

Рис. 1. Диаграмма деформирования  $\sigma$ - $\epsilon$  для композиционных материалов

При использовании сеток из армопластиков необходимо учитывать остаточную несущую способность и жесткость усиливаемых элементов. Предварительное напряжение элементов внешнего армирования значительно повышает его эффективность и сферы его применения.

**Вывод.** Композитные материалы имеют огромный потенциал в качестве усиления не только для железобетонных, но и металлических конструкций. Россия входит в четверку мировых лидеров в области производства композитных материалов, и в условиях жесткой санкционной политики стран, для



которых производились эти материалы на экспорт, пренебрегать их использованием опрометчиво. Первым шагом к широкому применению композитных материалов станет создание нормативной базы по усилению металлических конструкций полимерными материалами.

#### Библиографический список

1. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М., 2007.
2. Гроздов В.Т., Татаренко В.Н. Реконструкция зданий и сооружений, техническое обследование, испытание и усиление строительных конструкций. СПб., 2004.
3. Наумова Г.А., Овчинников И. Г., Снарский С.В. Расчет трубопроводных конструкций с эксплуатационными повреждениями. Волгоград. Научное издание. ВолгГАСУ, 2009. 184 с
4. Чернявский В.Л., Хаютин Ю.Г., Аксельрод Е.З., Клевцов Н.В., Фаткуллин Н.В. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. М. 2006. 60 с.
5. Бокарев С.А., Иванов А.А., Смердов Д.Н., Яшнов А.Н., Жильцов П.Д., Максименков П.Е. Инновационные методы усиления конструкций мостов. СибГУПС и ООО Главгросстрой. Новосибирск. 2008. 38 с.
6. Залесов А.С., Зенин С.А., Пащанин А.А., Кудинов О.В. Рекомендации по расчету усиления железобетонных конструкций системой внешнего армирования из полимерных композитов FibARM. М. НИИЖБ. 2012. 29 с.
7. Al-Saidy, A.H, Klaiber, F.W. and Wipf, T.J. (2004), "Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates," ASCE Journal of Composites for Construction, 8, pp. 163-172.
8. Angus, C.C., Cheng, J.J. and Yam, C.H. "Study of the Tensile Strength of CFRP/Steel Double Lap Joints," Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Canada. 2004.
9. de Bruyne, N.A. (1944), "The Strength of Glued Joints", Aircraft Engineering, 16, 115-118, 140.
10. Frauenberger, A., Liu, X., Meyyappan, L., Mata, J., Gupta, T., Silva, P.F., Dagli, C.H., Pottinger, H.J., Nanni, A. and Marianos, W.N. Jr. (2003), "FRP Repair and Health Monitoring of Railroad Steel Bridges", CIES Report 03-44, University of Missouri, Rolla.
11. Gillespie, J. W., Mertz, D. R., Edberg, W. M., Ammar, N., Kasai, K., and Hodgson, I. C. 1996. Rehabilitation of Steel Bridge Girders through Applications of Composite Materials. In Proc., 28th International SAMPE Technical Conference, November 4-7.

УДК 69.01

## **МОДУЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ЛСТК, КАК СПОСОБ ПОПУЛЯРИЗАЦИИ ДАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ В МАЛОЭТАЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Батырев К.Г.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Технология строительства на основе легких стальных тонкостенных конструкций была изобретена в Канаде и затем была заимствована строителями в Северной Америке.

Возведение зданий на основе стального каркаса заслуженно является главной технологией в Европе, так как представляет собой симбиоз экономической эффективности, экологичности и эстетики. Например, в США и Великобритании по некоторым данным на ЛСТК приходится 65-68% построенных объектов. В Европе до 15% всех малоэтажных домов возводят по этой технологии.

А вот в России технологии ЛСТК применяют в «малоэтажке» крайне мало. У нас в гражданском строительстве конструкции из ЛСТК используются при возведении жилых малоэтажных домов, коттеджей, мансард, однако в сравнении с другими строительными материалами ЛСТК у нас пока мало востребованы и в общем объеме домостроительных технологий занимают не более 6%.

В последнее время у нас в стране эта прогрессивная технология все же стала применяться при строительстве объектов социального назначения. Сегодня по технологии ЛСТК строятся дома по программе переселения из ветхого и аварийного жилья и при строительстве военных городков. Хорошо зарекомендовала себя эта технология в северных и сейсмоактивных районах.

Причина столь низкой популярности конструкций из ЛСТК в малоэтажном, а особенно в индивидуальном жилищном строительстве обусловлена рядом причин, среди которых особо можно выделить следующие.

Первая и, пожалуй, главная из них - экономическая, которая проявляется в том, что стоимость строительства из таких конструкций для конечного потребителя не является такой уж низкой, как это было задумано изначально. В России уже давно сложилась довольно-таки парадоксальная ситуация, при которой стоимость строительства не сильно зависит от используемого материала. Повлиять на данную ситуацию застройщик не может, решение возможно лишь на государственном уровне. А раз нет ощутимой разницы, застройщики отдадут предпочтение традиционным, проверенным временем технологиям.

Вторая причина - несоответствие качества продукции. Данная причина так же характерна почти исключительно для России. Часто, с целью дополнительного обогащения, «предприимчивые» владельцы заводов металлоконструкций нарушают стандарты качества производимых изделий, занижая реальные характеристики продукции в погоне за низкой стоимостью. Такое качество не будет соответствовать заявленным характеристикам. Стандартный, типичный случай - уменьшение толщины профиля и слоя цинка, что отрицательно влияет на качество и надежность будущего строения. Этот недостаток застройщик может обойти стороной, доверив проектирование, изготовление и строительство проверенным предприятиям с положительной репутацией на рынке услуг ЛСТК, хотя, как правило, и за счет значительного увеличения стоимости.

Третья причина - человеческий фактор. Не только изготовление, но и монтаж любого сооружения из лёгких стальных тонкостенных профилей и профилированного листа по технологии ЛСТК должно осуществляться профессиональными рабочими. И вот здесь, по большому счету, возможно всего три варианта - заказ у производителя ЛСТК сборки «под ключ», привлечение наемной силы в лице сторонних организаций и бригад либо самостоятельное строительство.

Первый вариант - строительство «под ключ», практически на 100% обеспечивает приемлемое качество, экономит драгоценное время и не менее ценные нервы. Профессионалы умеют строить быстро и качественно, и за ними не нужен тотальный контроль. Но далеко не каждый может себе позволить обратиться в известную, зарекомендовавшую себя фирму.

Второй вариант является неизбежным компромиссом. За строителями нужен постоянный контроль, к тому же сохраняется вероятность нарваться на тот самый пресловутый «человеческий фактор».

Как показывает статистика, большинство частных застройщиков выбирают частично или полностью самостоятельное строительство (сюда же можно отнести мелких и индивидуальных предпринимателей, выполняющих строительство хозспособом). Но наши самостройщики не имеют опыта работы с ЛСТК в отличие от традиционных для России материалов (различные каменные материалы, дерево, черный металл), часто не умеют работать с чертежами и, в результате, даже имея заводской «домокомплект» при его сборке допускают серьёзные, порой фатальные, ошибки.

Частично или полностью решить данную проблему способна технология возведения зданий из стеновых панелей, выполненных в свою очередь по технологии ЛСТК.



- поскольку масса панелей обычно не превышает 100 кг, их монтаж возможен «вручную» без использования тяжелой строительной техники (рис. 2);

- при наличии выровненного основания (фундамента), четко-выверенная геометрия панелей позволяет вести их монтаж без использования геодезических инструментов лишь с помощью строительного уровня, отвеса и разметочного шнура;

- значительно ускоряется процесс строительства;

- не требуются высококвалифицированные монтажники, специализирующиеся на сборке каркасов из ЛСТК.

Разумеется, данная технология имеет и свои недостатки, наиболее существенным из которых является ограничение на геометрию - возводимое (в данном случае точнее - собираемое) здание должно иметь относительно простую форму, состоящую из прямоугольных элементов. Но данному критерию, как правило, отвечают большинство возводимых малоэтажных зданий.

Следует так же отметить, что данная технология положительно зарекомендовала себя и при монтаже заполнения каркасов, в том числе монолитных, в многоэтажном строительстве (рис. 3).



Рис. 2 Монтаж стеновых панелей вручную

Застройщики ищут решения проблем по оптимизации затрат и сокращению сроков строительства. И в этом случае легкие стальные конструкции вне конкуренции.



Рис. 3 Заполнение монолитного каркаса стеновыми панелями из ЛСТК

Гарантию оптимального качества могут обеспечить промышленные способы изготовления элементов зданий в заводских условиях. Поэтому строительный процесс быть в большей мере сориентирован на предварительную цеховую сборку, модульные конструкции, перенос большинства технологических операций в заводские условия. При этом конструктивные элементы из ЛСТК, изготовленные промышленным методом, рентабельны и стабильно качественные. Они долговечны. Немаловажным аспектом является и экологичность - при демонтаже такие конструкции можно рассортировать и отправить на переработку, повторное использование бывших в употреблении металлоконструкций не допускается.

#### Библиографический список

1. Пособие по проектированию конструкций из стальных тонкостенных холодногнутых профилей. - М., 2019.
2. Пособие по проектированию строительных конструкций малоэтажных зданий из стальных холодногнутых оцинкованных профилей (ЛСТК) / АРСС. - Санкт-Петербург: Первый ИПХ, 2021.
3. СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования»;
4. СТО 82866678-2-06-2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых профилей и гофрированных листов. Правила проектирования и расчёта» / ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова» и ООО «Андромета». - М., 2016.
5. Москвин, В. Почему в России до сих пор мало востребованы технологии ЛСТК / В. Москвин // СТРОИТЕЛЬСТВО.RU Всероссийский

отраслевой интернет-журнал: электронный журнал. - URL: <https://rcmm.ru/tehnika-i-tehnologii/22464-pochemu-v-rossii-do-sih-por-malo-vostrebovany-tehnologii-lstk.html>. - Дата публикации: 12.05.2015.

6. Сам себе строитель - стоит ли "овчинка вычинки" // forumhouse: сайт. - URL: <https://www.forumhouse.ru/journal/articles/7997-sam-sebe-stroitel-stoit-li-ovchinka-vychinki> (дата обращения: 13.06.2023)

7. Стеновые панели из ЛСТК // house-keys. Товары для строительства и обустройства загородного дома: сайт. - URL: <https://house-keys.ru/statii-all/stenovye-panelei-iz-lstk/> (дата обращения: 13.06.2023)

8. Технология сборки стеновых панелей // СПЕЦПРОКАТ METALL.RU: сайт. - URL: <https://metall.ru/poleznaya-informatsiya/stati/tehnologiya-sborki-i-montazha-stenovykh-panelej-iz-lstk> (дата обращения: 13.06.2023)

УДК 624.042:624.954

## **ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СИЛОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЕВРОКОДУ 1 И НОРМАТИВАМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Кузнецов Е.Е.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

В ходе выполнения работ по обследованию промышленного предприятия одной из задач была проверка соответствия расчетов силосных сооружений завода по производству цемента требованиям национальным стандартам и сводов правил, а также оценка достоверности и достаточности результатов выполненных при проектировании расчетов.

Поставленная задача включала несколько разделов, каждый из которых представляет отдельный интерес (определение характеристик использованной стали, анализ применённой методики расчетов, оценка соответствия изготовления и монтажа силосов отечественным нормам). Например, в проектах силосов применена конструкционная углеродистая сталь марки Q235-D, поставляемая по Государственному стандарту КНР GB/T 700-2006 и было необходимо выполнить сравнение её механических характеристик, химического состава, структуры, а также эксплуатационных характеристик с соответствующими свойствами сталей, поставляемых по отечественному ГОСТ 27772-2015.

Особенность работы состояла в том, что предприятие возводилось европейскими инвесторами, по проекту, разработанному проектной организацией из Китайской Народной Республики. При этом расчет силосов выполнен по европейским нормативам. В частности, при сборе нагрузок

был применён немецкий DIN 1055-6-2005 «Воздействия на сооружения - Часть 6: Воздействие на силосохранилища и резервуары для жидкости», который в настоящее время заменён EN 1991-4:2006. «Еврокод 1: Воздействия на сооружения - Часть 4: Силосы, бункеры и резервуары» (далее - Еврокод 1, часть 4).

В 2010 году Еврокоды (Eurocodes) - европейские стандарты в области проектирования и строительства, были включены в доказательную базу «Технического регламента о безопасности зданий и сооружений», разработана «дорожная карта» по их внедрению: которая предусматривала формирование сводов правил (СП) на основе Еврокодов, и их адаптацию на национальном уровне. В 2010-2012 годах Минрегионом России совместно с национальными объединениями строителей, изыскателей и проектировщиков (НОСТРОЙ и НОПРИЗ) было переведено 58 Еврокодов и разработано столько же Национальных приложений. Эти приложения были зарегистрированы под номерами СП 167.1325800.2014 - СП 222.1325800.2014. Несмотря на ряд преимуществ (охват самых новых конструкций и материалов, участие в разработке специалистов многих стран, использование современных программных комплексов) система Еврокодов имеет и ряд ограничений их применения (по климатическим воздействиям, грунтовым условиям, типам сооружений, расходу материалов и т.п.), поэтому до сих пор в России не внедрена.

Ниже приводится сравнительный анализ нагрузок на конструкции силосов, определённых по EN 1991-4-2006 и российским нормативам. Причём рассмотрен только сбор временных нагрузок от веса хранимого сыпучего материала. Нагрузки от собственного веса элементов конструкций учитывались в программном обеспечении при создании конечно-элементной модели, и ничем не отличается от методики, принятой в отечественной практике, а снеговые и ветровые нагрузки не учитывались, так как силосы находятся внутри производственных помещений.

**Нормативная база.** При расчете силосов по отечественным нормативам используются Своды правил 43.13330.2012 «Сооружения промышленных предприятий»; 20.13330.2016. «Нагрузки и воздействия», а также «Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров». Для расчета силосных сооружений на предприятиях агропромышленного комплекса также применяется СП 108.13330.2012 «Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна».

При сборе нагрузок на силосы по Еврокоду применяется один нормативный документ - «Еврокод 1: Воздействия на сооружения - Часть 4:



Силосы, бункеры и резервуары», который содержит все необходимые данные для расчета, в том числе характеристики сыпучих материалов, коэффициенты надёжности по нагрузке, а также учтены требования к силосам, в которых хранятся вещества, способные образовывать взрывоопасные пыли.

**Термины и определения.** Согласно СП 43.13330.2011: бункера - саморазгружающиеся ёмкостные сооружения, предназначенные для кратковременного хранения и пересыпки сыпучих материалов, с высотой вертикальной части, не превышающей полуторного минимального размера в плане. То есть,  $h_2/d_2 < 1,5$  (см. Рис. 1).

Соответственно, силосы - ёмкостные сооружения с высотой вертикальной части, превышающей полуторную величину диаметра или меньшего размера в плане, т.е.  $h_2/d_2 \geq 1,5$ .

По Еврокод 1, часть 4: бункера - ёмкости для сыпучих материалов, которые по отношению высоты к диаметру подразделяют на:

- низкий бункер, при  $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$ ;
- бункер средней гибкости, при  $1,0 < h_c/d_c < 2,0$ ;
- силос (узкий бункер), при  $h_c/d_c \geq 2,0$  (см. рис. 2).

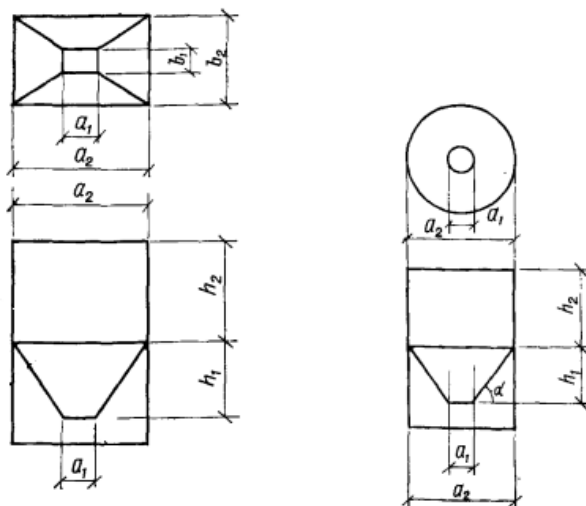


Рис. 1. Геометрические параметры пирамидально-призматических и конусно цилиндрических бункеров (рис. 1 и 2 «Руководства по расчету...»)

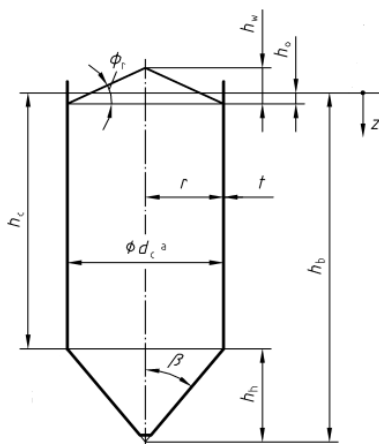


Рис. 2. Геометрические параметры силосов, бункеров  
(рис. 1.1 EN 1991-4-2011)

**Нагрузки на силосы.** Согласно п. 7.3.23 СП 43.13330.2011: при расчете силосов учитываются временные нагрузки от веса сыпучих материалов, части горизонтального давления и трения сыпучих материалов о стены силосов.

Согласно п. 3.2. Еврокод 1, часть 4 нагрузки определяются при максимальном уровне заполнения. При этом рассматриваются аналогичные основные случаи нагрузки, которые могут привести к разным предельным состояниям сооружения:

- горизонтальные нагрузки (перпендикулярные стенке);
- вертикальные нагрузки (за счет трения о стенку);
- максимальные вертикальные нагрузки на дно и воронку бункера.

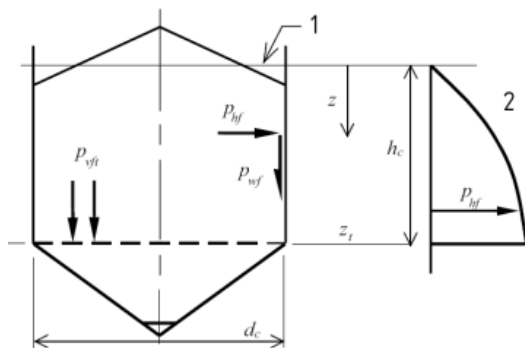


Рис. 3. Нагрузки на стены заполненного бункера  
(Рис. 5.1 EN 1991-4-2011)

Нормативное горизонтальное давление материала на стены силоса:  
- по СП:

$$p_h^n = \frac{\gamma^n \cdot p}{f^n} \cdot \left( 1 - e^{-\lambda \cdot f^n \cdot \frac{z}{p}} \right), \text{ где } \gamma^n - \text{ удельный вес сыпучего материала};$$

$f^n$  - коэффициент трения сыпучего материала о стенки;  $p = \frac{A}{u}$  - гид-

равлический радиус сечения ( $A$  и  $u$  - площадь и периметр поперечного сечения силоса);  $e$  - основание натуральных логарифмов;

$\lambda = \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi^n}{2} \right)$  - коэффициент бокового давления сыпучего матери-

ала, зависящий от угла внутреннего трения;  $z$  - расстояние от верха за-  
сыпки материала до днища.

- по Еврокод:

$$p_{hf}(z) = p_{h0} \cdot Y_J(z), \text{ где } p_{h0} = \gamma \cdot K \cdot z_0; z_0 = \frac{1}{K\mu} \cdot \frac{A}{U}; Y_J(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}}; \mu -$$

коэффициент трения сыпучего материала (соответствует  $f^n$ );  $K$  - ко-  
эффициент горизонтальной нагрузки (соответствует  $\lambda$ ).

Подставляя известные величины и заменяя  $\frac{A}{U} = p$ , получим:

$$p_{hf}(z) = \gamma \cdot K \cdot z_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \right) = \gamma \cdot K \cdot \frac{1}{K\mu} \cdot \frac{A}{U} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{z}{\frac{1}{K\mu} \cdot \frac{A}{U}}} \right) =$$

$$= \frac{\gamma \cdot p}{\mu} \cdot \left( 1 - e^{-K \cdot \mu^n \cdot \frac{z}{p}} \right), \text{ что соответствует } p_h^n = \frac{\gamma^n \cdot p}{f^n} \cdot \left( 1 - e^{-\lambda \cdot f^n \cdot \frac{z}{p}} \right) \text{ по СП.}$$

Нормативное вертикальное давление материала на днище силоса:  
- по СП:

$$p_v^n = \frac{p_h^n}{\lambda}.$$

- по Еврокод:

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{h0}}{K} Y_J(z).$$

Подставляя  $p_{h0} \cdot Y_J(z) = p_{hf}(z)$  получим:

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{hf}(z)}{K} \text{ что соответствует } p_v^n = \frac{p_h^n}{\lambda} \text{ по СП.}$$

Нормативное вертикальное давление материала на стены силоса за счет сил трения:

- по СП:

$$p_f^n = f \cdot p_h^n;$$

- по Еврокод:

$$p_{wf}(z) = \mu \cdot p_{h0} \cdot Y_J(z).$$

Подставляя  $p_{h0} \cdot Y_J(z) = p_{hf}(z)$  получим:

$$p_{wf}(z) = \mu \cdot p_{hf}(z), \text{ что соответствует } p_f^n = f \cdot p_h^n \text{ по СП.}$$

**Характеристики сыпучих материалов.** Основные характеристики сыпучих материалов, используемые в сборе нагрузок: объёмный вес  $\gamma$ , угол внутреннего трения  $\varphi$  и коэффициент внешнего трения по различным материалам  $f^n$  ( $\mu$ ).

Согласно СП 43.13330.2011 характеристики сыпучего материала должны приниматься по заданию на проектирование, или по справочным данным для конкретного материала.

Таблица 1. Свойства основных сыпучих материалов\*

Материал	Объёмный вес, т/м <sup>3</sup>	Угол внутреннего трения, град	Коэффициент внешнего трения о сталь
Цемент	1,3...1,6	27...40	0,30...0,65
	1,6	30	0,41...0,46
Песок	1,6	30...40	0,32...0,80
	1,4...1,6	36	0,38...0,48

\*) вверху указаны свойства по Приложению 2 в «Руководстве по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров»; внизу - по Приложению Е к Еврокод 1, часть 4.

Согласно Еврокод 1, часть 4 характеристики хранимых материалов должны определяться экспериментально, а при экономической нецелесообразности испытаний могут приниматься согласно данным для аналогичных материалов. При этом в Приложении С к Еврокод 1 подробно

описаны методики проведения испытаний для определения характеристик сыпучих материалов (удельного веса, коэффициента и угла трения о стенки; коэффициента горизонтальной нагрузки; сцепления и угла внутреннего трения; модуля упругости. Также в Приложении Е приведены характеристики наиболее распространённых сыпучих материалов.

В справочных таблицах приводятся верхние и нижние значения характеристик материалов и по основным материалам их свойства идентичны в отечественных и европейских нормах.

**Выводы.** Сравнивая методику сбора нагрузок на силосные сооружения по отечественным нормам и Еврокод, можно отметить:

1. Классификация ёмкостных сооружений для сыпучих материалов в основном идентична, однако в Еврокоде к силосам относятся сооружения с высотой вертикальной части, превышающей двойной минимальный размер в плане, а бункера подразделяются на низкие и средние;

2. Расчетные ситуации в обеих методиках одинаковы: рассматриваются симметричные нагрузки при максимальном заполнении ёмкости, а также воздействия при внецентренной загрузке и различных вариантах разгрузки;

3. Временные нагрузки от веса сыпучих материалов определяются при одинаковых расчетных схемах, по аналогичным формулам. При этом даже обозначения основных символов практически не отличаются;

4. Еврокод 1, часть 4 по сравнению с отечественными правилами является более специализированным документом, так как он полностью посвящен воздействиям на конкретный тип сооружений. В СП 43.13330.2011 «Сооружения промышленных предприятий» рассмотрены общие вопросы проектирования целого ряда различных конструкций, что вызывает необходимость использования дополнительной нормативной и справочной документации.

#### Библиографический список

1. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия: актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*: - М.: ФГУП «Стандартинформ». - 2018. - 73 с.

2. СП 43.13330.2011. Свод правил. Сооружения промышленных предприятий: актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85: - М.: ФАУ «ФЦС». - 2012. - 101 с.

3. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров\*: - М.: «Стройиздат». - 1983. - 200 с.

4. Терминологический словарь для национальных нормативных документов, реализующих Еврокоды. - М.: Национальное объединение проектировщиков. - 2014. - 173 с.

5. НСР ЕН 1991-4-2011. Еврокод 1: Воздействия на сооружения - Часть 4: Силосы, бункеры и резервуары: - М.: ОАО «НИЦ «Строительство». - 2011. - 141 с.

6. EN 1991-4 (2006). Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks (Еврокод 1: Воздействия на сооружения - Часть 4: Силосы и резервуары): Брюссель, Бельгия: Европейский комитет по стандартизации (CEN). - 2006. - 107 с.

7. DIN 1055-6-2005. Einwirkungen auf Tragwerke -Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter (Воздействия на сооружения - Часть 6: Воздействие на силосохранилища и резервуары для жидкости): - Берлин, ФРГ: Комитет по стандартизации строительства (NABau). - 2005. - 111 с.

УДК 624.271

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ И РАСЧЕТ УСИЛЕНИЯ МОСТОВ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ И СРАВНЕНИЕ С ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ**

Мамырев Е.Н.

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

Мостовые сооружения играют важную роль в инфраструктуре современного мира, поддерживают транспортную связь между различными территориями и обеспечивают экономический рост. Мостостроение в России имеет богатый опыт некоторые мостовые сооружения находятся в эксплуатации более двухсот лет. Однако за это время также успели многократно измениться требования к их грузоподъемности, сроку службы и эксплуатационным характеристикам.

Для сохранения сооружений в рабочем состоянии и обеспечения безопасности пропуска транспорта и пешеходов по действующим мостам, запроектированным под другие нагрузки, необходимо усиление несущих конструкций.

Кроме того, со временем конструкции мостового сооружения получают и накапливают повреждения, характер которых зависит от соблюдения норм эксплуатации и обслуживания сооружения, агрессивности воздействующих внешних факторов. Эти повреждения, в свою очередь, могут оказывать негативное влияние на грузоподъемность сооружения.

В качестве современного и перспективного метода усиления мостов будет рассмотрен метод усиления композиционными материалами путем наклеивания холстов материала на основе углеродных волокон на нижнюю растянутую грань балочных пролетных строений. Проведено сравнение с традиционными методами усиления.

**Устройство внешнего армирования из композиционных материалов** новый и перспективный способ усиления железобетонных конструкций, активно внедряемый за рубежом и в России. Для усиления железобетонных пролетных строений применяют композиционные материалы на основе углеродных волокон. Полимерными композиционными материалами, или фиброармированными пластиками, называют высокопрочные волокна, объединенные полимерной матрицей. За счет присутствия в полимерной матрице высокопрочных волокон осуществляется упрочнение композитов. Волокна композиционных материалов изготавливают из очень тонких непрерывных нитей диаметром 1...10 мкм, сплетенных между собой и создающих при этом определенную форму волокна.

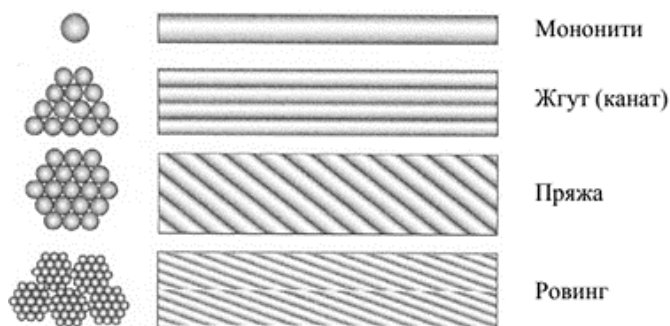


Рис. 1. Формы волокон композиционных материалов

В настоящее время в производстве используются различные формы волокон композиционных материалов:

- мононити основные нити диаметром около 10 мкм;
- жгут (канат) раскрученный пучок непрерывных нитей;
- пряжа закрученные нити и волокна, сформированные в неразрывный по длине канат;
- ровинг несколько прядей или канатов, собранных в параллельные пучки с незначительным скручиванием или без него.

**Метод приклейки швеллера** наряду с другими методами усиления путем развития сечения балок, внедрения внешнего арматурного каркаса этот способ часто применяется для повышения прочностных характеристик существующих пролетных строений.

Основными недостатками технологии усиления главных балок металлом являются:

- увеличение собственного веса усиливаемой конструкции, что - либо снижает эффективность самого усиления, либо может оказаться вовсе

недопустимым из-за недостаточной грузоподъемности прочих элементов, воспринимающих нагрузку от собственного веса усиливаемой конструкции;

- техническая невозможность размещения конструкции усиления в ограниченном пространстве (например, при обеспечении подмостового габарита); технологические проблемы в обеспечении связи элементов арматурных каркасов, шпренгельных конструкций и металлических профилей с усиливаемыми элементами;

- возможная потеря архитектурных показателей усиленной конструкции и сооружения в целом.



Рис. 2. Усиленное пролетное строение моста

Возможность усиления железобетонных пролетных строений изменением их расчетной схемы по сравнению с металлическими пролетными строениями крайне ограничена, так как для таких пролетных строений при изменении их статической схемы необходимо обеспечить совпадение знаков эксплуатационных эпюр внутренних усилий до и после усиления. Ниже приведены примеры усиления конструкций пролетного строения металлом.

**Сравнение свойств материалов.** Свойства композиционных материалов существенно отличаются от традиционного материала стали. В таблице приведены основные физические, прочностные и деформативные характеристики часто применяемых типов волокон полимерных композиционных материалов и арматурной стали класса А400.



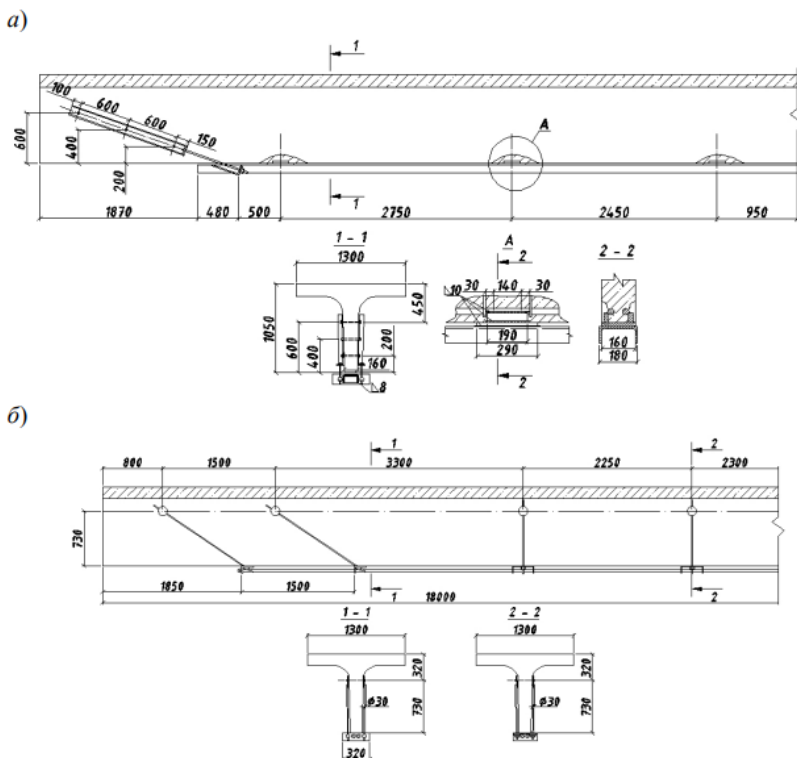


Рис. 3. Конструкция усиления главных балок пролетных строений металлом: а) приварка или приклейка швеллера; б) постановка дополнительных стержней рабочей арматуры

Таблица 1. Характеристики композитов и стали

Материал	Модуль упругости, ГПа	Нормативное растяжение осевому растяжению, МПа	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>
Стекловолокно	85...90	3500...4800	2,46...2,49
Углеволотно (высокоупругое)	390...760	2400...3400	1,85...1,9
Углеволотно (высокопрочное)	240...280	4100...5100	1,75
Арматура класса А400	205	390	7,8

Кроме того, конструкция усиления из композиционных материалов не изменяет габаритных размеров сечения, что крайне важно при усилении пролетных строений путепроводов.

Как показывают сметные расчеты, применение технологии усиления главных балок железобетонных пролетных строений с использованием композиционных материалов вместо металла приводит к существенному снижению стоимости капитального ремонта за счет небольших трудозатрат на выполнение усиления и относительно низкой общей стоимости применяемых материалов.

Таблица 2. Сравнение сметной стоимости производства работ

Способ усиления	Сметная стоимость СМР, тыс. руб.
Приклейка швеллера	365,959
Приварка швеллера	369,852
Постановка дополнительных внешних металлических стержней	388,288
Усиление с использованием полимерных композиционных материалов	195,376

Как видно из таблицы 2 применение технологии усиления главных балок железобетонных пролетных строений с использованием композиционных материалов вместо металла приводит к существенному снижению стоимости усиления, при этом экономический эффект только на одном искусственном сооружении может быть от 47 до 50%.

Усиление с использованием ПКМ и с использованием внешнего армирования металлом не отличаются в вопросах безопасности движения транспорта и пешеходов. Ни один из вариантов не выделяется сильным увеличением затрат на дальнейшую эксплуатацию сооружения.

При сравнении вариантов по техническому показателю рассматривались вопросы обеспечения прочности, устойчивости, жесткости элементов усиления. Оба варианта обеспечили необходимые прочностные характеристики.

Вариант со швеллером является более трудоемким в производстве, требует больше материальных ресурсов и видов работ для выполнения.

Вариант с композиционными материалами меньше сказывается на визуальном восприятии мостового сооружения и не ухудшает его архитектурных качеств.

Для примера был взят показательный случай ремонта автодорожного моста через реку Царёв, находящийся в городе Астрахань. Сооружение построено ориентировочно в 1982 году, состоит из шести балочных

пролетных строений, схема сооружения 33,6 м + 4 х 33,9 м + 33,6 м (полные длины пролетов).



Рис. 4. Вид моста через реку Царёв

При обследовании было выявлено множество дефектов, включая раскрытие трещин до 1,0 мм в балках пролета №6, а также сверхнормативное провисание балок пролета 6 до 157 мм.



Рис. 5. Раскрытие трещин до 1,0 мм в балках пролета №6



Рис. 6. Прогиб балок пролета №6 до 157 мм.

Был произведен расчет грузоподъемности, основанный на предельном моменте, который способна выдержать балка пролетного строения. Результаты показали недостаточную грузоподъемность, в связи с чем было принято решение об усилении пролетного строения.

При расчете усиленных конструкций следует ограничивать напряжения в композиционном материале предельной величиной, что предотвращает возможность разрушения бетонного основания, на которое нанесен ПКМ, или его возможное отслоение по контакту «клей бетон». Значение предельных напряжений в материале усиления, расположенном на нижней и боковых гранях балки, определяют, соответственно, по формулам:

$$\sigma_{fu} = k_f \sqrt{\frac{R_b E_{ft} b}{\Sigma t_f}} \leq 0,9 R_{ft};$$

$$\sigma_{fu2} = \sigma_{fu} \frac{h - d - x}{h - x},$$

$$\sigma_{fu} = 0,46 \sqrt{\frac{22,5 \cdot 230000}{5 \cdot 0,000167}} = 1145 \text{ МПа}, \quad (1)$$

$$\sigma_{fu2} = 1145 \frac{1,5 - 0,1 - 0,141}{1,5 - 0,141} = 1061 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $k_f$  коэффициент, учитывающий тип схемы усиления, принимаемый по табл. 4.1;  $R_b$  расчетная прочность бетона на сжатие, МПа;  $E_f$  модуль упругости композиционного материала, МПа;  $b$  единичная ширина полосы материала усиления,  $b = 1$  мм;  $t_f$  толщина одного слоя композиционного материала, мм;  $R_f$  расчетная прочность композиционного материала на растяжение, МПа;  $h$  высота главной балки, м;  $d$  высота полка U - образной облоймы композиционного материала, м;  $x$  высота сжатой зоны бетона, м.

Высоту сжатой зоны бетона усиленного таврового сечения определяют по формуле:

$$x = \frac{R_s A_s - R_{sc} A'_s + \sigma_{fu} (A_{f1} + A_{f2}) - 0,5(\sigma_{fu} - \sigma_{fu2}) A_{f2}}{R_b b}$$

$$x = \left( \frac{10525 \cdot 53,72 - 2150 \cdot 5 + 11450 \cdot (2,255 \cdot 10^4) -}{-0,5 \cdot (11450 - 10610) \cdot 0,835 \cdot 10^4} \right) \times \frac{1}{225 \cdot 197,6} = 12,81 \text{ см.} \quad (3)$$

где  $R_s, R_s$  расчетные сопротивления растянутой и сжатой арматуры соответственно, МПа;  $A_s, A'_s$  площади поперечного сечения растянутой и сжатой арматуры соответственно, м<sup>2</sup>;  $b_f'$  расчетная ширина плиты балки, м;  $h_f'$  приведенная толщина плиты балки, м;  $A_{f1}$  и  $A_{f2}$  площади поперечного сечения композиционного материала, расположенного на нижней и боковых гранях балки соответственно, м<sup>2</sup>;  $b$  расчетная ширина ребра балки, м.

При расчете нормального сечения следует проверить соотношение между относительной высотой сжатой зоны бетона  $\xi_f = x/h_0$  и ее граничным значением  $\xi_y$ , определяемым по формуле (4.4), при котором предельное состояние сжатого бетона наступает одновременно с достижением в композиционном материале предельного значения напряжений  $\sigma_f$ .

Граница сжатой зоны расположена в ребре балки, следовательно, предельный момент  $M^y$  определяется по формуле:

$$M^y = R_b b'_f x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma_{fu} A_{f1} a_s + \sigma_{fu2} A_{f2} \left( a_s - \frac{d}{2} \right) + 0,5(\sigma_{fu} - \sigma_{fu2}) \left( a_s - \frac{1}{3} d \right) A_{f2}.$$

$$M^y = 735 \text{ тс} \cdot \text{м.} \quad (4)$$

В результате расчетов пролетного строения с внедренным в него усилением предельный момент в сечении балки составил 735 т \* м, что оказалось больше изначальных значений (720 т \* м) на 15 т \* м позволило обеспечить достаточную несущую способность и безопасность движения для транспорта и пешеходов.

Библиографический список

1. СП 35.13330.2011. Свод правил мосты и трубы. М.: ОАО "ЦНИИС", 2011.
2. ОДМ 218.4.0252016. Методические рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. М.: РОСАВТОДОР, 2019.
3. Широков, Ю.М. Грузоподъемность железобетонных пролетных строений Забайкальской железной дороги / Ю.М.Широков, А.Н.Яшнов // Вопросы надежности и долговечности искусственных сооружений железнодорожного транспорта: межвуз. сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 1990. С. 1115.
4. Бокарев, С.А. Содержание искусственных сооружений с использованием информационных технологий / С.А.Бокарев, С.С.Прибытков, А.Н.Яшнов. М.: ГОУ «УМУ ЖДТ», 2008. 195 с
5. Слепец, В.А. Экспериментальные исследования работы железобетонных пролетных строений, усиленных полимерными композиционными материалами на основе углеродного волокна, по второй группе предельных состояний / В.А.Слепец // Научные труды общества железобетонщиков Сибири и Урала: материалы 14-й Сибирской конф. по железобетону. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2016. С. 117122.

УДК 624.21.09

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «СТЕНА В ГРУНТЕ»  
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
В СТЕСНЕННЫХ ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ**

Насонов С.И.

*ТИУ, г. Тюмень, Россия*

Стена в грунте - это метод возведения подземных или заглублённых сооружений, фундаментов, ограждений котлованов, подпорных стен, а также противодиффузионных завес с использованием при разработке грунта тиксотропного глинистого раствора [1].

Данная технология используется при возведении подземных частей и конструкций промышленных, энергетических и гражданских зданий, гидротехнических, транспортных, водопроводно-канализационных инженерных сооружений [2].

Основными признаками для классификации заглубленных сооружений и их конструкций являются назначение сооружения, объемно-планировочное конструктивное решение, примененные материалы.

По назначению заглубленные сооружения, возводимые методом «Стена в грунте», можно классифицировать следующим образом: Промышленные, Жилищно-гражданские, Транспортные, Гидротехнические. По конфигурации эти сооружения и конструкции разделяются на: Линейные, Линейно-протяженные, Сооружения колодезного типа с вертикальными стенами. По материалу наиболее распространены: Железобетонные, Бетонные, Глиногрунтовые. По конструкции «Стены в грунте» могут быть: Буронабивные, Монолитные бетонные и железобетонные, Сборные одноярусные, многоярусные, и колонного типа, Комбинированные многоярусные [2].

Применение данного метода при строительстве транспортных сооружений в условиях города чаще всего обусловлено отсутствием возможности строительства опускным методом в открытом котловане, из-за возникновения опасности нарушить устойчивость смежных сооружений, при высоком уровне залегания грунтовых вод, при необходимости устройства транспортных сооружений глубиной более 10 метров.

На примере проекта строительства путепровода на пересечении улицы Республики и улицы Мельникайте города Тюмени, рассмотрен тип устройства «стены в грунте» из буросекущих свай (рис. 1).



Рис. 1. Путепровод на пересечении улицы Республики и улицы Мельникайте города Тюмени [3].

Буросекущие сваи относятся к виду буронабивных свайных опор, широко используемых для передачи значительных усилий на плотные слои грунта на большую глубину. В готовом виде фундамент похож на

настоящую стену из сплошного бетона, расположенную в грунтово-массиве. В отличие от забивных свай, погружаемых ударными механизмами, буросекущие сваи изготавливаются непосредственно в готовой скважине без применения динамических воздействий. Опоры устанавливают сплошными рядами, частично перекрывая каждый сегмент соседнего элемента [4].

Технологию сооружения устройства подпорной стены из буросекущих свай можно разбить на несколько этапов:

**Подготовительный этап.** Геодезическая разбивка и закрепление осей подпорных стен рампового участка съездов и опор путепровода на местности. Транспортировка на стройплощадку необходимого оборудования и строительных материалов для строительства подпорных стен. Сооружение форшахты для бурения и бетонирования буросекущих свай подпорных стен (рис. 2).



Рис. 2. Схема устройства форшахты [5]

**1-й этап.** Бурение и бетонирование скважин армируемых (опережающих) свай, после набора проектной прочности осуществляется бурение армируемых (пересекающих) свай с последующим опусканием каркаса и бетонированием (рис. 3).

**2-й этап.** Демонтаж форшахты и срубка шламового слоя гусеничным экскаватором с гидромолотом и устройство противодиффузионной завесы при помощи установки струйной цементации грунтов по технологии Jet-grouting (рис. 4).

**3-й этап.** Поэтапная разработка грунта котлована с последующим вывозом на полигон ТБО. Бурение наклонной скважины буровой установкой для струйной цементации штангой анкерной яги с буровым наконечником через неармированные (опережающие) сваи с устройством заделки анкера путем инъектирования цементным раствором под избыточным давлением. Монтаж металлоконструкций обвязки грунтовых анкеров (рис. 5).



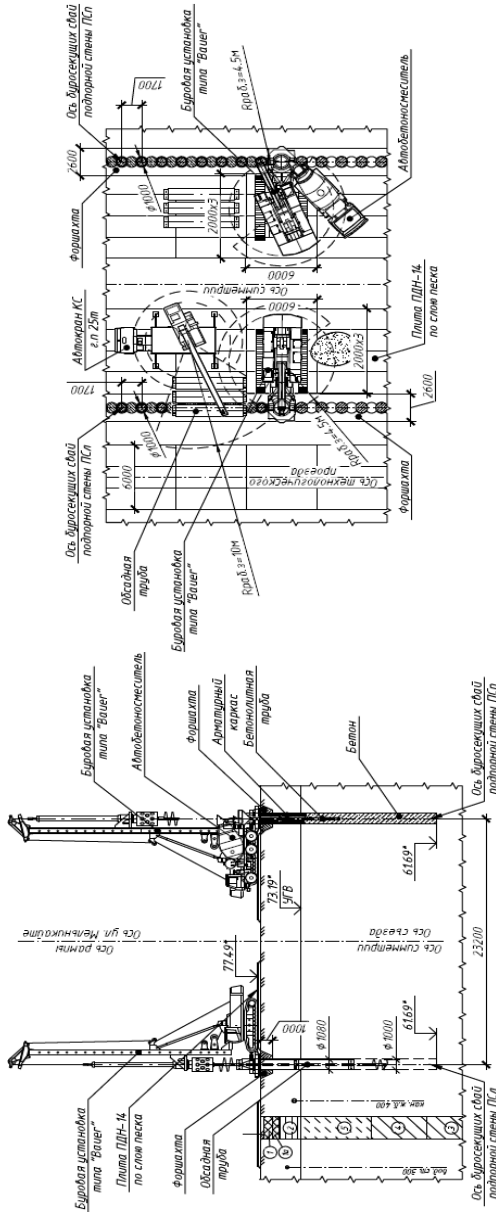


Рис. 3. Бурение и бетонирование скважин не армируемых (опережающих) свай [6].

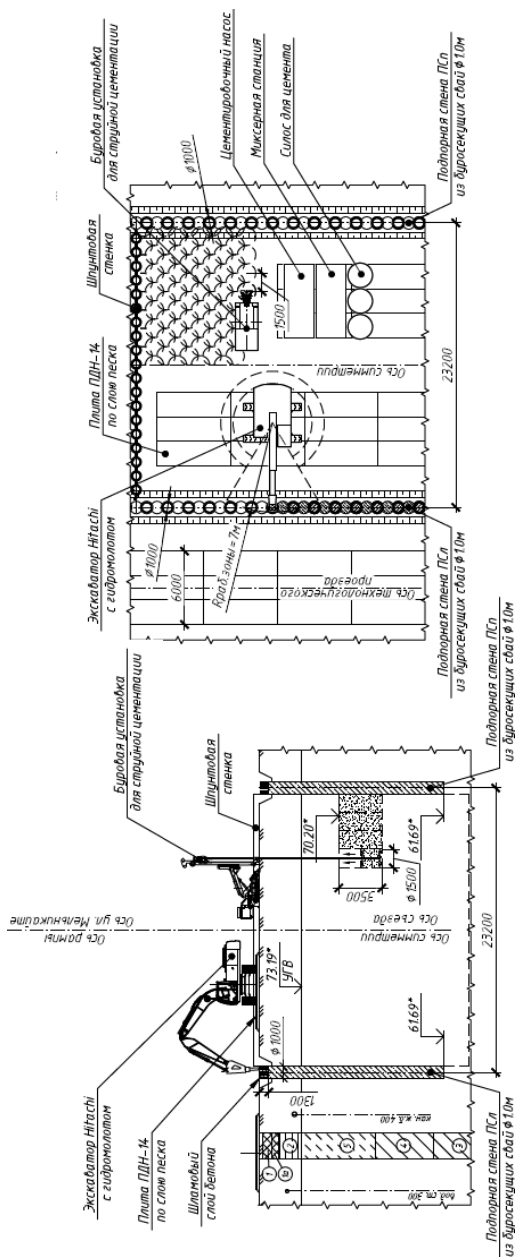


Рис. 4. Срубка шлама, устройство противофильтрационной завесы [6]

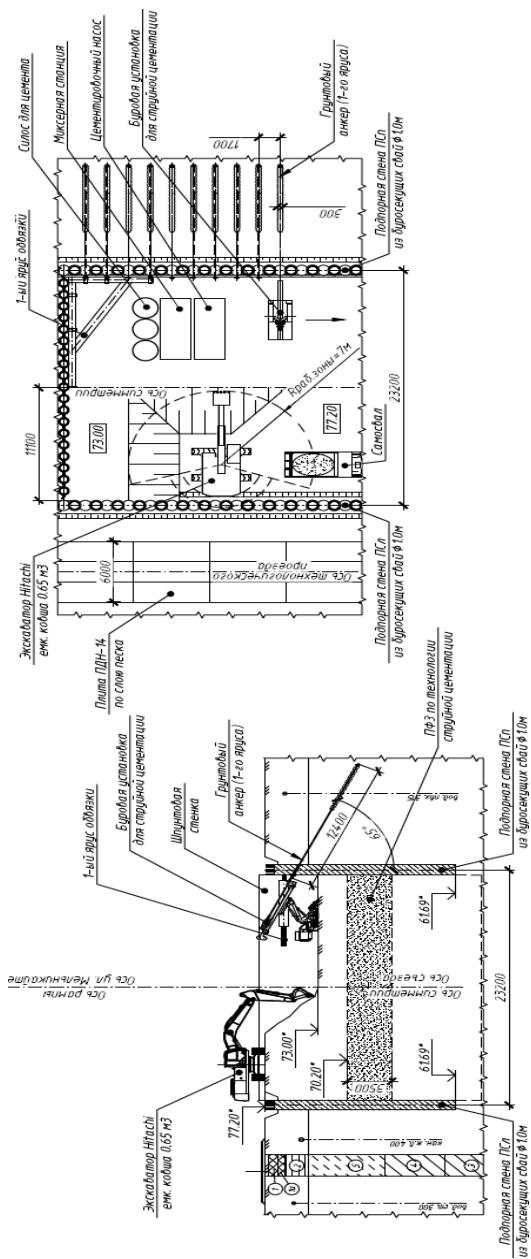


Рис. 5. Разработка котлована, устройство анкеров. [0]

4-й этап. Монолитные работы по сооружению черновых стен, насадки свайного ряда и несущих опор, шкафной стенки, подферменных камней, лотка тоннеля (рис. 6).

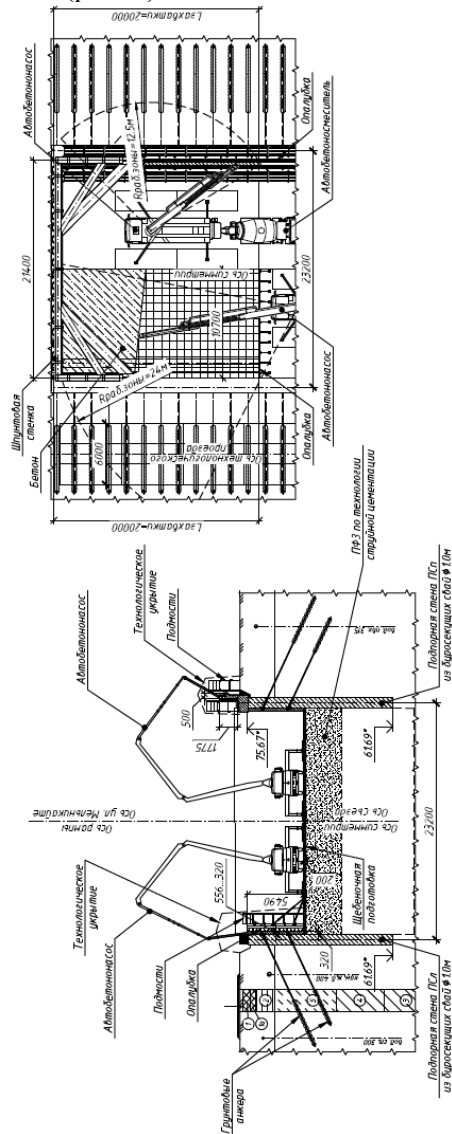


Рис. 6. Монолитные работы [6].

Благодаря использованию метода «стена в грунте» способом изготовления буросекущих свай, достигается ряд преимуществ:

- По сравнению с технологией «стена в грунте» с применением тиксотропного глинистого раствора, требуется гораздо меньше рабочего пространства;
- Обеспечивается устойчивость близлежащих зданий и сооружений, благодаря отсутствию при изготовлении свай ударных волновых нагрузок, способных вызвать перемещение грунтовых масс;
- Менее дорогая технология производства по сравнению с траншейным способом возведения бетонной стены с использованием тиксотропного глинистого раствора;
- Возможность использования подпорной стены в качестве несущей опоры пролетного строения;
- Наличие гидрозащиты от грунтовых вод.

#### Библиографический список

1. Стена в грунте. - [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Стена\\_в\\_грунте](https://ru.wikipedia.org/wiki/Стена_в_грунте) (дата обращения: 22.04.2023).

2. В.С. Колесников, В.В. Стрельникова Возведение подземных сооружений методом «Стена в грунте». Технология и средства механизации: Учебное пособие. /В.С. Колесников, В.В. Стрельникова - Волгоград: Изд-во ВолГУ, 1999. - 144 с.

3. На Мельникайте появится новая развязка с туннелем и подземными переходами. Проект на согласовании. - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://72.ru/text/transport/2022/01/26/70401554/> (дата обращения: 23.04.2023).

4. Что такое буросекущие сваи. - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gidfundament.ru/svajnyj/tekhnologiya-burosekushchih.html> (дата обращения: 22.04.2023).

5. Устройство форшахты. - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mavink.com/post/459438E925F2B8A9A90EDC2297E7BA3358AM64BE09> (дата обращения: 23.04.2023).

6. ОАО ПИИ «ТюменьДорПроект». Проектная документация «Строительство транспортной развязки в разных уровнях на пересечении ул. Республики с ул. Мельникайте (г. Тюмень) Корректировка» /ОАО ПИИ «ТюменьДорПроект». - Тюмень: 2021.

УДК 624.21

## **ПРОБЛЕМА ЗАЩИТЫ БЕТОНА КОНСТРУКЦИЙ ОТ КОРРОЗИИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

Пименов И.И., Овчинников И.И.

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

Наиболее сложным этапом ошибочно считается проектирование и возведение мостовой конструкции, сильно недооценивая все сложности и проблемы, возникающие в процессе эксплуатации сооружения.

Коррозия бетона - это сложный физико-химический процесс взаимодействия его составляющих с внешней средой и образование вследствие этого нежелательных соединений, иногда и их внутреннее перемещение, что чаще всего вызывает снижение прочности бетона или его полное разрушение.

В зависимости от свойств агрессивной среды различают четыре основных вида коррозии бетона: выщелачивание, растворение, коррозия кристаллизации, электрокоррозия. [1]

Рассмотрим данную проблему на примере моста через р. Самару на а.д. Обводная г. Самара от а.д. «Урал» до а.д. «Самара-Волгоград», который обеспечивает пропуск транзитного автотранспорта в обход города Самары (рис. 1) [2].



Рис. 1. Общий вид моста.

Мост железобетонный с предварительно напрягаемой арматурой, балочно-неразрезной конструкции, построен по схеме 51,5+79,5х3+72,6+58,5+40,9 м. Полная длина моста по концам открылков устоев составляет 468,37 м. Габарит ездового полотна моста составляет 11,42 м, предназначен для пропуска двух полос автомобильного движения.

Пролетное строение собрано из рядовых блоков длиной 2,78 м и пар надпорных блоков (над промежуточными опорами) длиной 1,66 м на клеевых стыках (эпоксидный клей). Материал блоков - бетон гидротехнический по ГОСТ 4795-68 марок М-500 и М-600, Мрз-200.

Мост введен в эксплуатацию в 1984 году. В 2014 году обследование проводилось институтом «Проект Мостореконструкция». В ходе обследования было выявлено нарушение герметичности водоотвода и гидроизоляции, из-за чего сооружение подвергалось воздействию агрессивных сред. О чем нам говорят многочисленные следы коррозии и разрушения бетона пролетного строения (рис. 2) [2].



Рис. 2. Пролет 1. Протечка у водоотводной трубки.  
Выщелачивание бетона.

Влияние агрессивных сред привело к высокому проценту износа элементов балки пролетного строения, а именно:

- консоли - И=44 %;
- верхняя плита - И=40 %;
- стенки - И=67 %;
- диафрагмы - И=40 %;
- нижняя плита - И=52 %.

Из расчета износа элементов пролетных строений следует, что приведенный износ пролетного строения в целом составил 47,59 %. Данный

процент износа превышает границу предельного износа  $I_{\text{пред}} = 40\%$  для пролетов длиной от 60 до 80 метров, что говорит о необходимости замены элементов.[3]

Вода, проникая через нарушенную гидроизоляцию, попадает на бетон плиты балки и далее, по микротрещинам, просачивается до арматуры, вызывая её коррозию, выщелачивание бетона защитного слоя, морозному разрушению, появлению трещин в блоках пролетного строения. Выщелачивание связано с растворением цементного камня, что уменьшает прочность конструкции. Продукты коррозии разрывают бетон, приводя к его разрушению (рис. 3) [2].



Рис. 3. Пролет 7. Выщелачивание бетона по стыку блоков Б168-Б169 с правой (верховой) стороны

Защиту для бетона можно разделить на первичную и вторичную. Первичная защита подразумевает использование добавок в составе бетона, которые могут быть гидроизоляционные, противоморозные, уплотняющие и прочие. Вторичная защита менее эффективна и подразумевает внешнее нанесение защитного покрытия, пропиток и других мер, позволяющих оградить конструкцию от агрессивных сред [4].

В результате коррозии бетона уменьшается его площадь в приопорных зонах, что при непринятии мер приводит к снижению грузоподъемности



сооружения и риску возникновения аварий или разрушения транспортных сооружений. Предотвратить коррозию невозможно, но есть методы, которые позволяют ее отсрочить. Не менее важно, чем методы защиты и борьбы с коррозией, является регулярный осмотр и своевременное обнаружение самой коррозии на ключевых конструкциях сооружений.

#### Библиографический список

1. СО 34.21.667. Рекомендации по защите от коррозии бетонных и железобетонных строительных конструкций водоподготовительной установки / Министерство энергетики и электрификации СССР. - М.: СПО Союзтехэнерго, 1982 (Дата обращения: 18.05.2023).

2. 116-1/48-ИД-ОИС-5. Проектная документация реконструкции моста через реку Самару на км 24+500 автомобильной дороги Обводная г. Самары от «Урал» до «Самара-Волгоград» в муниципальных районах Волжский и Кинельский Самарской области. Проектная документация. - Саратов: ООО «Институт «Проектмостореконструкция», 2014. - 96 с (Дата обращения: 18.05.2023).

3. ОДМ 218.0.018-05 Определение износа конструкций и элементов мостовых сооружений на автомобильных дорогах. - Москва: Минтранс России, 2005. - 159 с (Дата обращения: 18.05.2023).

4. Коррозия бетона. Её виды и способы борьбы с ней [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2020/article/2018020684> (Дата обращения: 18.05.2023).

УДК 69.007

### **АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАДРАМИ И МОТИВАЦИЕЙ ПЕРСОНАЛА В СОВРЕМЕННОЙ КОМПАНИИ, РАБОТАЮЩЕЙ В СФЕРЕ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Ченькаев И.В., Титенко Н.Е.  
*ТИУ, г. Тюмень, Россия*

Из года в год строительство является самым быстрорастущим производственным районом в мире и приносит новые открытия и новые рабочие механизмы, которые абсолютно не влияют не только на соседние производственные мощности, но и на строительные производства. Однако практически на всех строительных площадках проблема недостаточной подготовки не первый год стоит остро. Система управления персоналом практически не изменилась. Воздействие на рабочую силу уменьшается с каждым годом, в то время как тенденции строительства и спрос на качественно хорошо обученный персонал неумолимо растут.

Отметим, что система управления персоналом строительных компаний должна полностью соответствовать особенностям и отдельным элементам строительной отрасли.

Основные характеристики конструкции, влияющие на процесс управления персоналом, должны включать:

- уникальность подавляющего большинства объектов строительства, определяющая необходимость разработки новой проектной документации и внедрения новых организационно-технических решений;

- различные виды работ;

- зависимость большей части рабочей силы от климатических условий;

- значительный срок годности (обычно более 1 года);

- оценку экономической эффективности организационных, технических и управленческих решений, а также значительную продолжительностью строительных проектов;

- наличие существенных и объективно определенных перерывов в загрузке специализированных строительных компаний или отдельных специализированных бригад в строительные компании в результате завершения всего строительства или выполнения определенных работ;

- длительный срок службы строительных изделий в связи с необходимостью обеспечения безопасной эксплуатации строительных проектов на протяжении всего цикла (более 100 лет);

- компетентность персонала в управлении (во время подготовки и внедрения) и в производстве (во время строительного-монтажных работ). Это существенно влияет на безопасность последующих работ объекта строительства;

- многоступенчатая реализация строительных проектов, большое количество участников в сочетании со сложным процессом организации прохождения документов, сложность определения предмета и уровень ответственности за принятие решений, основа которых неясна или неверна;

- территориальное подразделение строительных и производственных компаний: офис строительной компании находится на постоянном месте, при этом работы ведутся в разных местах, регионах, иногда даже странах.

В последние годы наблюдается явная тенденция к снижению качества строительного-монтажных работ, широкому привлечению низкоквалифицированных рабочих к повышению производительности труда и снижению качества подготовки инженерных кадров [1].

И.И.Феклистов посвятил свои работы инженерно-техническим работникам. Исследования по предоставлению человеческих ресурсов для инновационного развития строительных организаций и выделили следующие особенности строительства:

- поскольку строительство ведется одновременно во многих местах и на большой площади, трудно централизовать оценку деятельности сотрудников компании;

- как правило, строительные работы ведутся в открытом грунте, где постоянно меняются погодные условия. Это влияет на организацию и технологию работы, а значит, и на оценку результатов труда сотрудников, что требует специальной системы мотивации.

Автор [2] также указывает на снижение ответственности и трудовой дисциплины, уровня культуры и морали художников, что также влияет на качество работы. Поэтому система управления персоналом строительной компании должна строиться с учетом вышеуказанных особенностей отрасли. Схематическое изображение системы управления персоналом строительной компании представлено на рис. 1.

Система включает в себя три субъекта управления персоналом строительной организации: руководитель организации, отдел управления персоналом, руководитель (начальник строительной площадки, бригадир, начальник отдела). Персонал компании является ее основным ресурсом. Отсутствие хорошо скоординированной и качественной работы персонала сводит к нулю предложение компании других ресурсов, в том числе финансовых. На диаграмме показаны основные функции управления персоналом в современном строительном предприятии с учетом роли служб управления персоналом. Поэтому в одну из функций Службы управления персоналом может входить организация работы, в том числе участие в разработке производственной программы предприятия. В производственном графике предприятия должен учитываться текущий персонал, размер его нагрузки, и наоборот, персонал должен соответствовать производственному графику. Эта функция также включает в себя непосредственное участие отдела кадров в производственном процессе, включая постоянный контроль качества персонала за выполнением производственных задач, реальностью производственных задач, особенно за достаточным временем для их выполнения. В сотрудничестве с руководителем администрация персонала должна сертифицировать рабочие места. Функции управления персоналом выполняются не только соответствующим отделом. Планирование потребностей в персонале, оценка навыков, укомплектование персоналом, набор персонала, обучение, организация, обучение, переподготовка и профессиональное развитие всех функций управления, таких как степень участия в этом процессе, выполняются субъектами. Процесс оценки квалификации персонала должен быть организован и методично организован

руководством персонала, а менеджеры всех уровней должны принимать непосредственное участие в оценке [3].

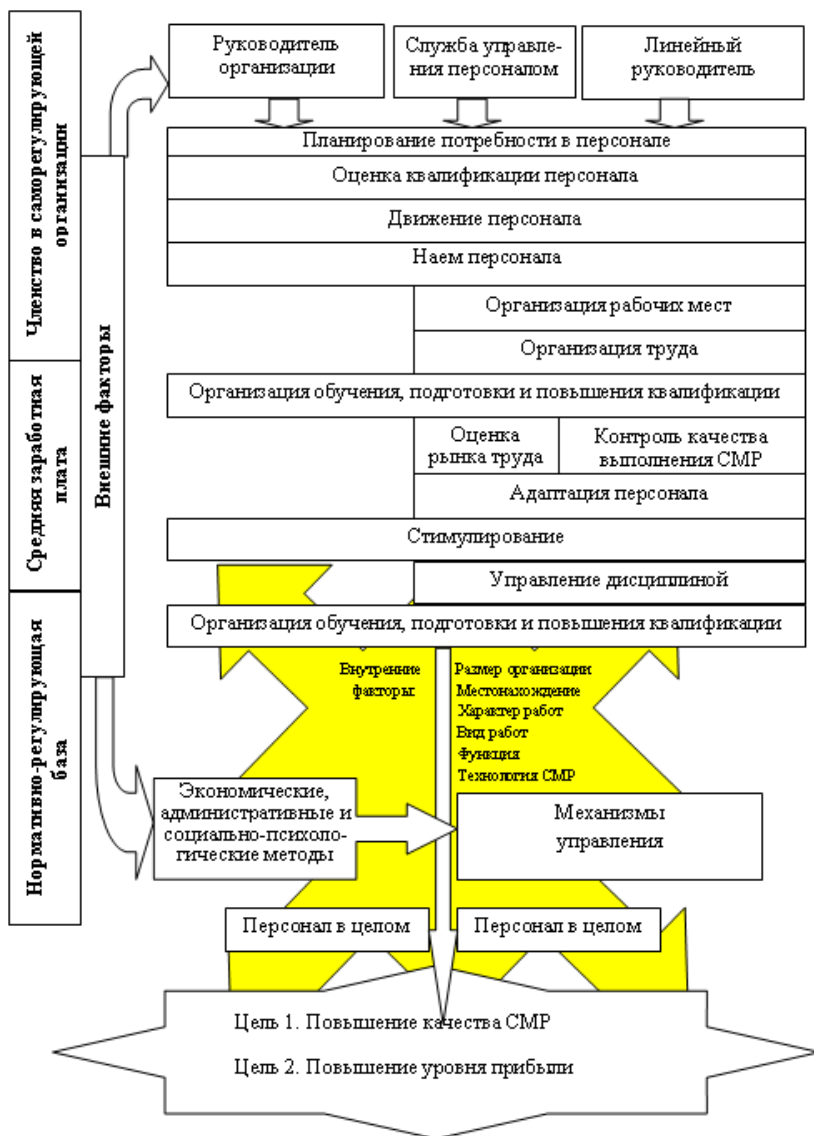


Рис. 1. Схематическое изображение системы управления персоналом строительной компании [3]

Внутренними факторами, влияющими на систему управления персоналом конкретной строительной компании, являются размер данной организации, ее местонахождение, вид работ, вид работ, организационная функция строительного проекта, технологии, используемые при строительно-монтажных работах. Внешние факторы включают макроэкономическую ситуацию в стране и регионе, особенно среднюю заработную плату в этой стране, уровень безработицы, нормативную базу и многое другое. Для подготовки механизмов управления персоналом необходимо использовать весь комплекс современных методов - экономических, административных, социально-психологических. Основными целями организации строительства, на которые должны быть направлены все усилия, должны быть повышение качества строительно-монтажных работ, размер прибыли, полученной от организации основного вида деятельности, и обеспечение равного использования ресурсов.

#### Библиографический список

1. Булат Р.Е. Теория и практика формирования готовности работников строительных организаций к профессиональной деятельности: поиск, привлечение, оценка, подбор, наем, адаптация, обучение, аттестация, увольнение персонала, документирование кадровой работы / Р.Е.Булат, М.А.Мосин. - СПб: Стройиздат, 2008. - 212 с.
2. Феклистов И.И. Кадровое ресурсное обеспечение инновационного развития строительных организаций // Экономическое возрождение России. - 2011. - Т. 28. - № 2. - С. 104-111.
3. Карибова И.Ш. Повышение квалификации строителей как один из главных рычагов роста производительности труда и качества строительной продукции // Региональные проблемы преобразования экономики. - 2011. - № 2. - С. 293-299.

УДК 624.15

### **ОПЫТ ОБСЛЕДОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И ПРОБЛЕМА СЛАБЫХ ГРУНТОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Черняев А.А.

*ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия*

Рассматриваются работы по обследованию технического состояния [1] конструкций фундаментов цокольного этажа и геологических условий гарнизонного храма здания на территории академии ФСО в г. Орле. Обсуждается проблема строительства зданий на слабых грунтах и необходимость усиления таких грунтов цементными сваями.

Обследуемое сооружение здания было построено в 2009 году на территории Академии ФСО России в Советском районе г. Орла. В дальнейшем строительство здания было приостановлено.

Целью работы явилось обследование конструкций цокольного этажа здания, определение их технического состояния и разработка заключения о возможности продолжения строительства, а также при необходимости разработка мероприятий по восстановлению работоспособности конструкций и грунтов.

При выполнении работ была разработана программа обследования, которой предусмотрены:

- анализ сохранившейся проектно-сметной и исполнительной строительной документации;
- обследование основных несущих и ограждающих конструкций сооружения и выявление их дефектов;
- анализ причин возникновения дефектов.

Обследуемое сооружение имеет прямоугольную в плане форму с размерами в осях (А-Е) - (1-6) 20,96×25,70 метров соответственно. Высота обследуемого помещения составляет 3,80 м. План обследуемого сооружения на отметке -4,580 представлен на рис. 1.

Несущей конструкцией сооружения является монолитная железобетонная плита на свайном поле. Габариты плиты составляют в осях (А-Е) - (1-6) 24,96×29,70 метров соответственно. Устойчивость и жесткость здания обеспечивается совместной работой стен, дисков перекрытий, фундаментов.

Конструктивная схема сооружения бескаркасная с несущими продольными и поперечными кирпичными стенами.

С целью изучения геологического строения, гидрогеологических условий площадки, определения физико-механических свойств грунтов [2], их коррозионной активности и агрессивных свойств подземной воды были проведены инженерно-геологические изыскания [3].

На площадке строительства пробурена 1 скважина, глубиной 20,0 м, механическим ударно-канатным способом.

Выполнено 1 измерение УЭС грунта и 1 определение наличия блуждающих токов.

В геоморфологическом отношении она приурочена к четвертой погребенной террасе р. Оки. Рельеф участка спокойный с уклоном на север. Абсолютные отметки поверхности площадки меняются от 202,63 до 203,40 м.

Геологическое строение площадки до глубины 20,0 м представлено глинистыми покровными отложениями (grII-III). С поверхности распространён насыпной грунт (tIV).

Подземные воды, на момент изысканий (апрель 2017г.), до глубины 20 м скважиной не вскрыты.

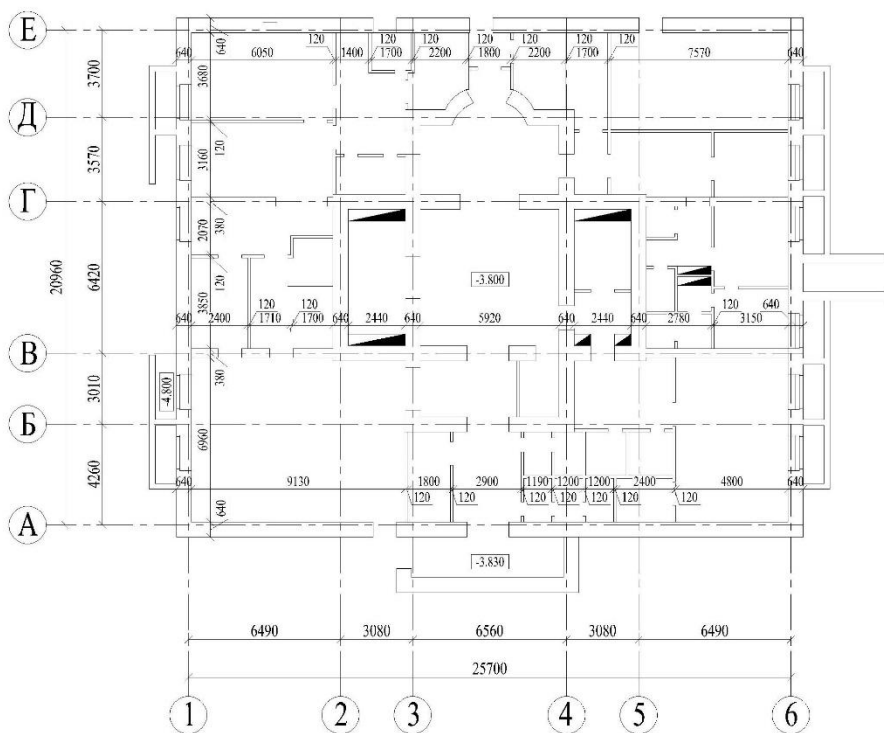


Рис. 1. План обследуемого сооружения на отметке -4,580

В результате выполненных инженерно-геологических изысканий выделено четыре ИГЭ (инженерно-геологических элемента):

1. Насыпной грунт: смесь почвы, песка, щебня бетона. Мощность 1,3м. Не рекомендуется в качестве основания сооружения.

2. Суглинок палево-бурый, лессовидный, полутвёрдый, макропористый, просадочный. Мощность 3,2м. Расчетные физико-механические показатели:  $E_{ест}=10\text{МПа}$ ;  $E_{вод}=12\text{МПа}$ ;  $cI=16\text{кПа}$ ,  $cII=17\text{кПа}$ ;  $\phi I=20^\circ$ ,  $\phi II=21^\circ$ ;  $\rho I=1,76\text{г/см}^3$ ,  $\rho II=1,79\text{г/см}^3$ ; показатель текучести  $JL=0,22$ ; естественная влажность  $W=0,222$ ; показатель текучести при полном водонасыщении  $=0,52$ . Начальное просадочное давление  $P_{sl}=0,22\text{МПа}$ .

3. Супесь палевая, лессовидная, твёрдая, карбонатная, без включений, ожелезненная, просадочная. Мощность 11,5 м. Расчетные физико-механические показатели:  $E_{ст}=20\text{МПа}$ ;  $E_{вод}=14\text{МПа}$ ;  $c_I=11\text{кПа}$ ,  $c_{II}=12\text{кПа}$ ;  $\varphi_I=\varphi_{II}=23^\circ$ ;  $\rho_I=1,73\text{г/см}^3$ ,  $\rho_{II}=1,74\text{г/см}^3$ ; показатель текучести  $J_L=-0,79$ ; естественная влажность  $W=0,140$ ; показатель текучести при полном водонасыщении  $=1,06$ . Начальное просадочное давление  $P_{sl}$  изменяется от 0,02 до 0,30 МПа.

4. Суглинок серый, коричнево-бурый, полутвердый, слабожелезненный, без включений, не просадочный. Вскрытая мощность 4,0 м. Расчетные физико-механические показатели:  $E_{ст}=21\text{МПа}$ ;  $E_{вод}=19\text{МПа}$ ;  $c_I=c_{II}=23\text{кПа}$ ;  $\varphi_I=21^\circ$ ,  $\varphi_{II}=22^\circ$ ;  $\rho_I=1,96\text{г/см}^3$ ,  $\rho_{II}=1,98\text{г/см}^3$ ; показатель текучести  $J_L=0,0$ ; естественная влажность  $W=0,210$ .

Фундамент под здание монолитная железобетонная плита, опирающаяся на свайное поле. Сваи буронабивные диаметром 270 мм и глубиной 16 м. Класс бетона сваи В15, F50. В осях (2-5) шаг свай составляет 820 мм с количеством 19 штук в ряду. В осях (Б-Д) шаг свай составляет 830 мм с количеством 19 штук в ряду. В осях (1-2) и (5-6) шаг свай составляет 2300 мм. В осях (А-Б) и (Д-Е) шаг свай составляет 2400 мм. План свайного поля и разрез по нему представлен на листах 2, 3 альбома 119-07-КР и 3, 4 альбома 119-17-КЖ0 проектной документации. Габариты плиты составляют в осях (А-Е) - (1-6) 24,96×29,70 метров соответственно. Толщина плиты составляет 500 мм. Общие указания по устройству монолитной плиты, опалубочный план плиты представлены на листах 4, 5 альбома 119-07-КР и 5...7 альбома 119-17-КЖ0 проектной документации, а также на рисунке 1.2 настоящего Заключения. Класс бетона плиты В25. Плита в нижней зоне армирована вдоль и поперек арматурными стержнями  $\varnothing 22$  мм класса А500с. Шаг стержней 200 мм. В верхней зоне плита армирована вдоль и поперек арматурными стержнями  $\varnothing 20$  мм класса А500с. Шаг стержней 200 мм. Кроме того, проектом предусмотрено дополнительное горизонтальное и поперечное армирование. Схемы армирования плиты представлены на листах 8...21 альбома 119-17-КЖ0 проектной документации.

Для обследования фундаментной плиты было открыто 4 шурфа (рис. 2).

В процессе обследования фундамента в шурфах не было обнаружено дефектов, влияющих на работоспособность конструкций. проблемой будущего строительства здания являются слабые грунты, и дальнейшим исследованиям необходимо рассмотреть варианты их усиления цементными сваями.

Общий вид фундамента в шурфах представлен на рис. 3.



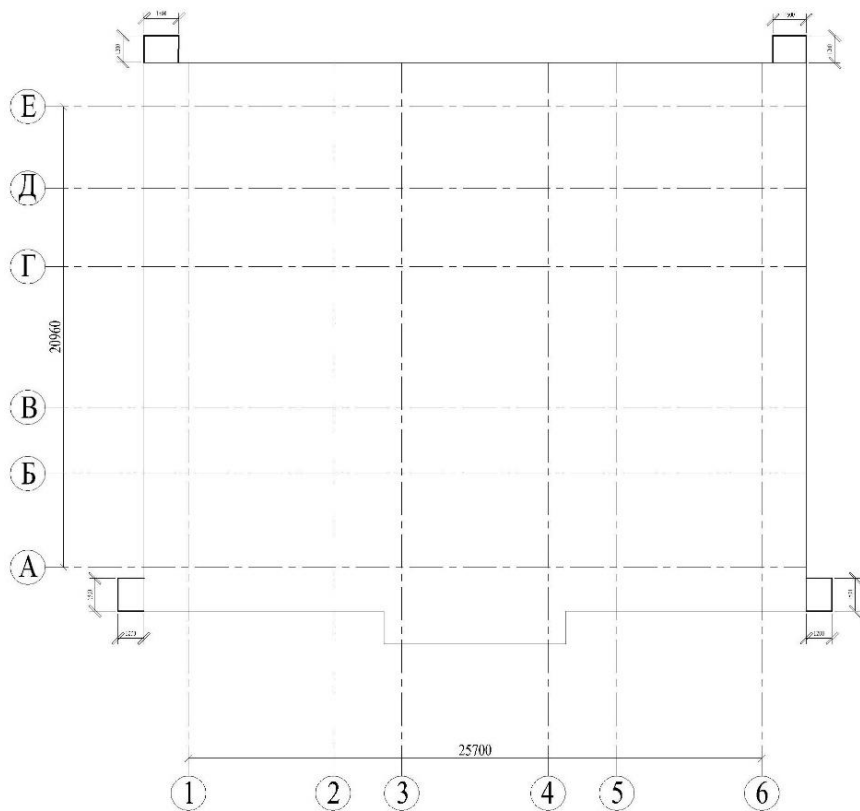


Рис. 2. Схема расположения шурфов



Рис. 3. Общий вид шурфов №1-2



Рис. 4. Общий вид шурфов №3-4

#### Библиографический список

1. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.
2. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.
3. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.

## **СЕКЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «СТРОИТЕЛЬСТВО»**

УДК 378.14

### **СВЯЗЬ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН БАКАЛАВРИАТА И МАГИСТРАТУРЫ НАПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВО**

Барковская С.В.  
*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Преподавание ряда технологических дисциплин по профилю «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» требует применение междисциплинарного подхода в обучении студентов, т.е. сотрудничество между преподавателями различных дисциплин для более полного понимания студентами взаимосвязей материаловедения и технологии. Процесс обучения - это приобретение знаний и умений для решения различных задач, Коменский Я.А. определял обучение: «... всё находится во взаимной связи, должно и преподаваться в такой же связи» [1].

Рассмотрим один из компонентов бетонной смеси, который в настоящее время применяется повсеместно в составах строительных материалов на основе минеральных вяжущих веществ - это добавки - суперпластификаторы (далее ПАВ). Оценка свойств добавок, их влияния на свойства строительных материалов, влияние на особенности технологии изготовления строительных материалов с данным компонентом - это только небольшая цепочка взаимосвязи дисциплин (таблица 1) не только бакалавриата, но и дисциплин магистратуры направленности «Технология строительных материалов, изделий и конструкций».

Если таблицу 1 представить поэтапно, то получаем следующую цепочку событий:

1) лабораторные работы по дисциплине «Вяжущие вещества» (6 семестр обучения бакалавриата). При изучении данного материала преподавателю необходимо учитывать, что навыки и сведения, полученные студентом, помогут в магистратуре (1 семестр обучения) выполнить самостоятельно индивидуальное задание по практике (НИР).

2) лабораторные и лекционные занятия по дисциплине «Технология бетона, строительных изделий и конструкций» (6 - 7 семестр обучения бакалавриата) находят отражение, как при выполнении курсового

проекта в 8 семестре бакалавриата, так и при выполнении индивидуального задания по практике в магистратуре (2 семестр обучения).

3) выполнение практических работ по дисциплине «Применение методов математического планирования эксперимента» (6 семестр бакалавриата) необходимо для самостоятельного выполнения научно-исследовательской работы (3 семестр, магистратура) и части магистерской диссертации.

Таблица 1. Связь дисциплин на примере добавок ПАВ

Параметр компонента, оценка свойств	Дисциплина	Связанная дисциплина
Влияние ПАВ на свойства, вяжущих (строительного гипса, портландцемента)	«Вяжущие вещества» (бакалавриат)	«Учебная практика (НИР)» (магистратура)
Влияние ПАВ на свойства бетонных смесей	«Технология бетона, строительных изделий и конструкций» (бакалавриат)	«Современные высококачественные и высокотехнологичные бетоны» (магистратура)
Расчет состава бетона с ПАВ	«Технология бетона, строительных изделий и конструкций» (бакалавриат)	«Производственная практика (НИР)» магистратура «Проектирование предприятий по производству строительных материалов и изделий»
Особенности технологии при использовании добавки в составе бетона	«Технология бетона, строительных изделий и конструкций» (бакалавриат) «Оборудование и технологические комплексы в производстве строительных материалов» (бакалавриат)	«Проектирование предприятий по производству строительных материалов и изделий» (бакалавриат) «Производственная практика (НИР)» магистратура
Особенности совместимости компонентов бетонной смеси с ПАВ	«Применение методов математического планирование эксперимента в решении технологических задач» (бакалавриат)	«Моделирование технологических процессов производства строительных материалов, изделий и конструкций» (магистратура) Производственная практика (НИР) (магистратура) Подготовка магистерской диссертации (магистратура)

Итак, на примере только одного сырьевого материала мы видим, что на ряде дисциплин студенты изучают основы работы и поведение данного компонента, как в смеси с другими сырьевыми компонентами (вяжущими веществами), так и в составе материала (бетонной смеси). В ходе лабораторных работ бакалавриата студенты изучают закономерности поведения данной составляющей сырьевых смесей, основы расчета, основы проектирования составов. Из семестра в семестр информация усложняется и данные, усвоенные ранее, должны помогать пониманию следующих сведений на других дисциплинах. К этому необходимо добавить и то, что все изученные закономерности и полученные навыки студентами необходимы при дальнейшем обучении в магистратуре. Как видно из таблицы 1, то, что изучено в бакалавриате, в магистратуре требуется для успешного освоения практики (выполнения научно-исследовательской работы) и выполнения магистерской диссертации.

#### Библиографический список

1. Грачева А.Г. Междисциплинарное обучение в финской школе // Современные научные исследования и инновации. - 2016. - №2 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/02/64516> (дата обращения: 26.05.2023).

УДК 378.14

## **О ПОДХОДАХ К ПРЕПОДАВАНИЮ МЕХАНИКИ СООРУЖЕНИЙ СТУДЕНТАМ НАПРАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРА**

Захарова И.А.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Изучение технических дисциплин в вузах сталкивается с постоянно возрастающим объемом и сложностью учебного материала при ограниченном объеме часов, отведенных на его освоение. Механика сооружений является образовательной дисциплиной, изучение которой в вузе позволяет сформировать базу для изучения других специальных дисциплин и дальнейшей квалифицированной работы по специальности.

Целью образования в области Механики сооружений является подготовка студентов к профессиональной деятельности в области общих методов расчета строительных конструкций и их отдельных элементов на прочность, жесткость и устойчивость. Однако при преподавании данной дисциплины студентам архитектурного направления возникает ряд проблем.

Большинство обучающихся направления «Архитектура» надеются на малое присутствие технических дисциплин в учебной программе.

Они не видят необходимости в изучении технических предметов, поскольку у них формируется представление о профессии Архитектор как о человеке, рисующем внутренний и внешний вид зданий и сооружений, но не участвующем в расчетах конструкций.

К сожалению, многие из студентов имеют низкий уровень подготовки по школьным курсам Математики, Физики, что существенно сказывается на усвоении материала.

Для решения этой проблемы на первых занятиях проводится разъяснительная работа с формированием правильного вектора осознания требований к профессии.

Задачами освоения дисциплины «Механика сооружений» являются основные понятия и аксиомы статики; система сил на плоскости; методы расчета плоских ферм; система сил в пространстве; некоторые вопросы кинематики и динамики; геометрические характеристики плоских сечений; расчет элементов конструкций при различных видах напряженно-деформированного состояния; кинематический анализ плоских шарнирно-стержневых систем; определение внутренних усилий в статически определимых и неопределимых стержневых системах; определение перемещений в плоских расчетных схемах от различных воздействий.

Сложность и трудоемкость математических вычислений в задачах приводит к снижению интереса у студентов к их решению.

Данные проблемы во многом обусловлены индивидуально-психологическими особенностями студентов-гуманитариев, выражающихся в неформализованном восприятии материала, возникновении трудностей при анализе причинно-следственных связей.

Поэтому на занятиях по механике сооружений делается акцент на то, что владение основами расчета элементов конструкций в дальнейшем поможет правильно коммуницировать с инженерами-проектировщиками, что повысит эффективность работы.

После отработки приёмов решения основных задач разбираются примеры, имеющие прямое отношение к будущей специальности.

Немаловажную роль в решении проблемы мотивации сыграло использование в процессе обучения балльно-рейтинговой системы.

Поскольку балльно-рейтинговая система - это регулярное отслеживание качества усвоения знаний и умений в учебном процессе, выполнения планового объема самостоятельной работы, ведение многобалльной системы оценки позволило, с одной стороны, отразить индивидуальные особенности студентов, а с другой, объективно оценить усилия студентов, затраченные на выполнение отдельных видов работ.

Кроме того, в систему рейтинговой оценки включаются дополнительные поощрительные баллы за более быстрое освоение материала.

Выявленные в ходе решения задач пробелы в знаниях студентов или трудности в представлении изучаемого материала можно корректировать с помощью введения более подробных разъяснений с применением наглядных примеров.

Самостоятельная работа также является одной из существенных форм обучения в целях развития профессиональной направленности личности студента. Существенную роль в организации самостоятельной работы играет электронный курс по дисциплине «Механика сооружений».

В нем размещены материалы лекционных и практических занятий, задания для индивидуальной работы. Данные материалы корректируют работу студентов и совершенствуют ее качество.

Таким образом, для оптимизации процесса обучения студентов направления Архитектура приняты следующие меры:

- созданы условия для развития познавательных способностей и активности;
- студенты обеспечены необходимыми методическими материалами, как в бумажном, так и в электронном виде;
- созданы меры, поощряющие студентов за качественно выполненную работу.

Содержание курса имеет академический характер, но максимально учитывает психологические особенности мышления людей гуманитарного склада ума и уровень математической подготовки студентов, обучающихся на архитектурной специальности.

Качественное освоение дисциплины «Механика сооружений» становится неотъемлемой частью подготовки высококвалифицированных специалистов направления «Архитектура».

УДК 378.126

## **ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

Кузнецова В.О.  
*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Основные векторы реформирования образовательного процесса в России определены главной задачей образовательной политики, а именно залогом современного качества образования на базе сохранности его фундаментальности и соответствия актуальным потребностям личности, общества и государства в целом. Процесс совершенствования уровня образования является главной целью реформы европейской системы высшего образования, провозглашенной Болонской декларацией.

В соответствии с документом ЮНЕСКО «Реформа и развитие высшего образования» (1995 г.) уровень образования трактуется как многосторонняя концепция, охватывающая главные функции и виды деятельности вуза и отражает возможность студента выпускного курса быстро и эффективно войти в трудовую деятельность в интересах общества, работодателя и для личностной пользы. Неопределенность понятия «качество образования», как и многих других, приводит не только к возможности его наполнения самым, что не наест, разным содержанием, но и является существенной преградой при определении эффективных способов его повышения.

Условия повышения качества и стабильности образования как процесса представляют диалектическое единство противоположностей. Улучшение должно происходить через краткосрочную и управляемую нестабильность. Взяв на вооружение методологию процессного подхода, можно улучшить качество образовательной деятельности вуза. Система управления вузом, как и любой другой структурой, во многом определяет показатели во всех областях его деятельности. В организации управления, наглядно проявляющейся в существующих организационных структурах вузов, высшее образование достаточно консервативно и использует устаревшие подходы, приёмы и методы. Как следствие - не только большая численность административно-управленческого аппарата, но и «затянутые» реакции на изменения окружающей среды вуза, снижение качества принимаемых решений, сложность оперативного решения возникающих задач и т. д. Путь к повышению качества работы вуза очевиден: следует использовать при администрировании методологию современного управления, уделяя своевременное и соответствующее внимание прогнозированию, текущему и оперативному планированию, организации всех видов деятельности вуза, мотивации всех участников образовательного процесса, контролю, совершенствуя системы коммуникации и методы принятия решений.

Начальный уровень знаний студентов, их личностные качества и мотивация к получению образования по выбранной специальности играют решающую роль в их последующем обучении. Неблагоприятные тенденции в этой области общеизвестны и обусловлены не только состоянием общества, культуры, общего образования, но и продолжающимися изменениями в структуре народного хозяйства и экономики страны, которые порождают неопределенность в отношении областей деятельности выпускников вуза.



Имеется ряд факторов, непосредственно влияющих на качество образования в вузе:

- уровень содержания образования в современном вузе;
- уровень квалификации преподавателей вуза и обеспеченность учебного процесса специалистами соответствующего направления;
- научно-исследовательская деятельность вуза;
- использование активных методов обучения в образовательном процессе;
- обеспеченность соответствующей литературой;
- внедрение информационных технологий в учебный процесс;
- сбалансированность графика учебного процесса [1].

Важно отметить, что качество результатов деятельности университета обеспечивается управлением качеством, как ключевых процессов вуза. Решение этой проблемы связано с системой контроля качества образования в вузе, их соответствие современному состоянию развития общества, науки [2].

Современное образование должно быть направленно на развитие личности человека, раскрытие его возможностей, талантов, становление самосознания, самореализации. Личностно-ориентированное обучение предполагает, что в центре обучения находится сам обучающийся, его мотивы, цели, его неповторимый психологический склад, т.е. студент как личность. Личностно-ориентированное обучение - это такое обучение, где во главу угла ставится личность ребенка.

Личностно ориентированное обучение позволит:

- повысить мотивированность учащихся к обучению;
- повысить их познавательную активность;
- создать условия для систематического контроля (рефлексии) усвоения знаний учащимися;
- отследить динамику развития учащихся;
- учесть уровень обученности и обучаемости практически каждого учащегося.

Признание учащегося главной действующей фигурой всего образовательного процесса и есть личностно-ориентированная педагогика. Преподаватель не сможет построить свою работу на занятии в русле личностно-ориентированного подхода, не зная психологических особенностей обучающихся. Ведь ученики очень разные. Один очень активно работает на занятии, другой знает ответ, но боится отвечать, у одного проблемы с дисциплиной, у другого - со слуховой памятью и т.д. То есть преподаватель должен строить свою работу, изучая своих студентов,

изучая их личности. Должна присутствовать педагогическая поддержка. Современный преподаватель должен владеть этой технологией.

Соответственно, проблемы улучшения качества высшего профессионального образования и подготовки специалиста в целом являются актуальными и требуют постоянного исследования наукой и практикой высшей школы [3].

На качество образования влияет ряд взаимосвязанных факторов: уровень содержания образования в современном вузе; уровень квалификации преподавателей вуза и обеспеченность учебного процесса специалистами соответствующего направления; научно-исследовательская деятельность вуза; уровень организации производственных практик, а также ориентированность на работу образовательных организаций; сбалансированность графика учебного процесса; нормирование нагрузки преподавателей и студентов [4].

Ключевыми из всех перечисленных факторов является качество преподавания и профессиональный уровень преподавателя как лидера образовательного процесса в современном вузе.

#### Библиографический список

1. Иванченко И.В. Проблема повышения качества образования в вузе // Молодой ученый. - 2016. - №5.1. - С. 18-21.
2. Коптюг Н.М. "Интернет-проект как дополнительный источник мотивации учащихся". Иностранные языки в школе, 2003, № 3.
3. Пахомова Н.Ю. Проектное обучение - что это? // Методист, №1, 2004. ср. 42.
4. Полат Е.С. "Интернет на уроках иностранного языка" Иностранные языки в школе" № 2, 3 2001 г.

УДК 378.147

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПРИ ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ ОСНОВАМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Прохорова А.В.  
*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Бетонные железобетонные конструкции являются одними из наиболее распространенных и востребованных. Эти строительные материалы используются как в ограждающих, так и в несущих элементах зданий.

Для расчета и проектирования зданий и сооружений из железобетона требуются грамотные специалисты, подготовка которых ведется в

Тулском государственном университете на кафедре «Строительство, строительные изделия и конструкции». При изучении основ проектирования железобетонных конструкций студентам необходимо понять сущность и закономерности совместной работы бетона и арматуры, распределение усилий в сечениях конструктивных элементов и механизмы разрушения железобетонных конструкций, что часто вызывает трудности даже у опытных проектировщиков [1].

На кафедре ССМиК преподаватели применяют современные формы обучения, позволяющие помочь студентам наиболее наглядно представить и понять эффективное сочетание двух разных по характеристикам материалов.

На лекционных занятиях кроме устного изложения теоретического материала демонстрируются наглядные материалы: образцы арматурных стержней, фотографии готовых железобетонных конструкций. Просмотр видеоматериалов вызывает у студентов живой интерес к проектированию строительных конструкций, позволяет осознать функциональную взаимосвязь несущих элементов каркаса, значение системы связей.

Лабораторные работы позволяют вовлечь обучающихся в активный познавательный процесс, предоставляют возможность почувствовать себя исследователями. Проведение таких исследований в специализированной лаборатории строительных материалов помогает максимально эффективно решать образовательные задачи.

Для выполнения экспериментальных работ формируются малочисленные группы (не более 7 человек). Дополнительная теоретическая подготовка студентов, которая контролируется перед началом занятия, позволяет проявить студентам самостоятельность и творческий подход. При проведении испытаний ведется подробный журнал наблюдений, результаты натурных испытаний сравниваются с данными теоретических расчетов. Такой комплексный учебный процесс формирует у студентов глубокое понимание теоретического материала, позволяет всесторонне осветить разные физические явления, связанные с внутренней работой строительных материалов.

Часть практических и лабораторных занятий проводится в рамках сотрудничества с предприятиями строительной индустрии. Кафедра ССМиК ТулГУ регулярно взаимодействует с Тульским и Первомайским заводами ЖБИ. Опытные специалисты, руководители производства, инженеры и технологи подробно и интересно открывают студентам секреты своей профессии. Такие выездные занятия и лекции во время экскурсий вызывают живой интерес у студентов к пониманию и более глубокому изучению

особенностей работы железобетонных конструкций. Наблюдения за технологическими процессами армирования и формовки бетонных и железобетонных изделий помогают будущим проектировщикам наглядно оценить расположение арматурных изделий в опалубке.

Многие преподаватели подтверждают, что развитию заинтересованности у студентов в значительной степени способствуют экскурсии на промышленные предприятия Тулы и Тульской области. При осознанном осмотре строительных конструкций производственных корпусов студенты могут оценить функциональную взаимосвязь несущих элементов каркаса, ощутить ответственность проектировщика за обоснованность своих решений.

Достаточно сложным моментом при изучении основ проектирования железобетонных конструкций является понимание функционального назначения конструктивной и монтажной арматуры. Во время проведения выездных лабораторных работ студентам демонстрируют процессы изготовления монтажных петель, арматурных каркасов и сеток. Преподаватели и технологи обращают внимание обучающихся на особенности расположения рабочих и распределительных стержней, на способы закрепления монтажных петель и закладных деталей внутри до заполнения опалубки бетонной смесью.

Во время теоретического обучения студентам сложно осознать конструктивные и технологические требования изготовления железобетонных изделий. Трудности такого характера легко преодолеваются после наблюдений за работой арматурщиков, которые подготавливают арматурные изделия. Специалисты наглядно демонстрируют возможности применения сварки и вязальной проволоки для соединения элементов каркаса. Студенты начинают осознавать ответственность проектировщика за выбор способов соединения и соотношений между диаметрами свариваемых стержней.

Во время защиты лабораторных работ студенты дополнительно закрепляют теоретический материал, связанный с темой работы, обобщают полученные результаты. Каждый студент отчитывается по каждой лабораторной работе индивидуально, что позволяет выявить пробелы в его подготовке. В ходе защиты лабораторных работ педагог помогает студенту дополнительно разобраться в сложном процессе совместного деформирования двух разных по характеристикам и свойствам материалов.

На практических занятиях по проектированию железобетонных конструкций рассматриваются задачи по расчету прочности сечений разного профиля, подбору армирования и проверке несущей способности. Использование блок-схем для демонстрации хода решения и разработанная база

исходных данных по каждому типу задач позволяют студентам работать самостоятельно по индивидуальному графику. Преподаватель помогает в поиске справочных и табличных данных, определении коэффициентов надежности. Во время семинарских занятий обсуждаются готовые проектные решения и случаи, вызывающие затруднения.

Курсовое проектирование формирует у студентов ответственность и развивает творческий подход к заданию. Каждому студенту большую часть заданий приходится выполнять самостоятельно и самому планировать свою деятельность, соблюдать сроки выполнения работы. Особенностью курсовых работ, связанных с проектированием железобетонных конструкций, является большой объем чертежей и расчетов. Комплексное проектирование на разных стадиях мотивирует студентов к саморазвитию, помогает им грамотно использовать нормативную документацию.

Выступление с коротким докладом является обязательным требованием при защите любой курсовой работы. Во время своего краткого выступления студент подводит итоги длительной работы, обращает внимание на согласованность расчетов, чертежей и спецификаций.

Регулярные контрольные мероприятия стимулируют отстающих более активно включиться в учебный процесс, чтобы выполнить установленный график проектирования.

Проведение небольших численных экспериментов в рамках практических занятий и курсового проектирования развивает у студентов интерес к своей будущей профессии. Возможность использования программного обеспечения для расчета усилий в элементах конструкций не только сокращает объем расчетов, но также позволяет студентам проявить свои навыки работы с ПЭВМ, мотивирует их личностный рост и стремление к повышению профессиональной квалификации.

В заключении хотелось бы отметить, что грамотно построенный учебный процесс помогает заинтересовать каждого студента, вовлечь его в исследовательскую деятельность, развить мотивацию в получении более глубоких знаний и практических навыков.

#### Библиографический список:

1. Мурашкин Г.В., Бородачев Н.А., Снегирева А.И., Мурашкин В.Г. Инновационные методики при изучении теории и практики проектирования железобетонных конструкций и сооружений// Современные проблемы науки и образования. - 2008. - № 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=1015>.

УДК 378.046.4

## **СИМУЛЯЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫМ САПР В ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ**

Теличко В.Г.

*ТулГУ, г. Тула, Россия*

Сегодня на рынке систем автоматизированного проектирования (САПР) строительных сооружений предлагается достаточно разнообразная и востребованная программная продукция, которая позволяет реализовать как отдельные этапы строительного проекта (например, линейка продуктов Plaxis или Scad Office), так и технологию информационного моделирования сооружений - BIM (например, программные комплексы семейства Autodesk REVIT или Renga Software).

Независимо от широты охвата потребностей проектировщиков все программные продукты имеют некоторые общие особенности, которые существенно влияют на эффективность обучения работе в их средах:

- значимые отличия в пользовательских интерфейсах;
- различающаяся терминология, как в составе встроенных в среду САПР информационно-справочных систем этих программных продуктов, так и в сопроводительной документации, что зачастую усугубляется её некорректным переводом на русский язык;
- вариативность выполнения отдельных шагов алгоритмов разработки моделей строительных сооружений на различных стадиях проектирования;
- наличие большого количества уровней детализации опций главного меню в текстовой и/или графической формах;
- применение нормативных баз данных со значениями параметров управления принимаемым решением на каждом недетерминированном шаге реализуемого алгоритма;
- наличие развитой системы верификационных примеров, определяющих возможности того или иного программного обеспечения (ПО) САПР и иллюстрирующих особенности его применения в доступном диапазоне поведения реальных строительных сооружений.

Имеются и другие особенности работы в средах САПР, которые участвуют в формировании совокупности необходимых и достаточных навыков в работе проектировщика, определяющих ту или иную его профессиональную компетенцию.

Конкретные виды профессиональных компетенций определены профессиональными стандартами [1] посредством структуры обобщённых

трудовых функций и связанных с ними трудовыми действиями, необходимыми умениями и знаниями.

В многочисленных публикациях, которые обсуждают проблемы качества подготовки строителей-проектировщиков в рамках государственных образовательных учреждений на базе федеральных образовательных стандартов (ФГОС), в том числе, на базе поколения ФГОС 3++, отмечается значительный разрыв между потребностями работодателей и реальной квалификацией выпускников по направлению Строительство в области автоматизированного проектирования [2].

Причины такой ситуации достаточно просты:

- необходимость иметь в вузе материальную базу, которая могла бы обеспечить функционирование современных САПР строительного проектирования;

- необходимость иметь эти САПР в актуализированное состояние, поскольку происходит непрерывное обновление нормативного обеспечения проектных работ;

- необходимость поддерживать лицензионную чистоту программного обеспечения САПР;

- невозможность изучения примеров реального проектирования в средах студенческих версий ПО САПР;

- ограниченность времени, выделяемого учебными планами на дисциплины, связанные с САПР;

- проблемы кадрового состава, связанные с наличием актуального практического опыта проектирования в средах САПР.

В этих условиях проблему приобретения необходимого уровня квалификации в области автоматизированного строительного проектирования может решить система непрерывного дополнительного профессионального образования (ДПО) в различных её формах, разрешённых законодательством [3]. Ниже обсуждаются возможности использования реальной проектной организации, которая на добровольной основе готова инвестировать часть своих материальных и кадровых ресурсов в формирование компетентности проектировщиков, руководствуясь как собственными потребностями, так и потребностями других заказчиков.

При этом следует подчеркнуть, что организация учебного процесса в форме ДПО ставит перед проектной организацией ряд важных задач. В частности, требуется:

- получить лицензию на образовательную деятельность в области ДПО, что представляется задачей не тривиальной, так как требует

выполнения целого условий, устанавливаемых лицензирующей региональной организацией;

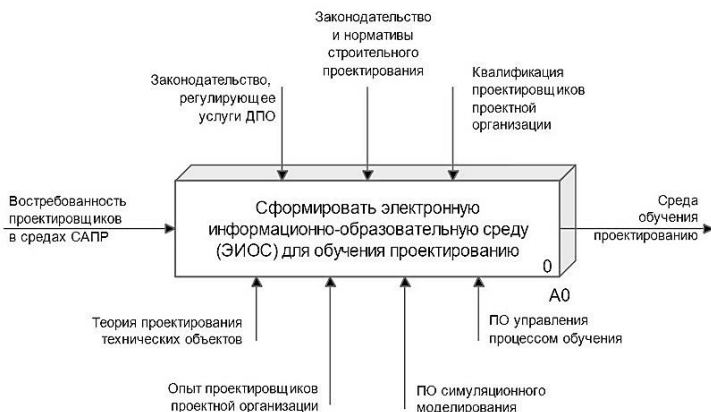
- выбрать технологию обучения, которая должна обеспечивать формирование целевых компетенций, востребованных на рынке, в том числе - по индивидуальным запросам физических лиц;

- материализовать обучающие ресурсы, которые по структуре и номенклатуре должны соответствовать действующему законодательству в области ДПО;

- обеспечить привлекательные для потребителей выбранной формы обучения.

Для реализации ДПО в условиях реальной проектной организации нами разработана функциональная модель деятельности, основанная на системно-деятельностном подходе с использованием технологии симуляционного обучения. Модель описана на графическом языке SA-блоков методологии SADT [4], что позволяет минимизировать описательную часть, сосредоточившись на функциях деятельности, условиях и механизмах их реализации, представленных минимально необходимым уровнем детализации. Соответствующие диаграммы функциональной модели представлены на рис. 1-3.

Цель: Создать среду для удовлетворения спроса на дополнительное профессиональное образование (ДПО) в области проектирования объектов капитального строительства средствами систем автоматизированного проектирования (САПР)



Точка зрения: Определяющим фактором формирования навыков проектирования средствами САПР является освоение алгоритмов деятельности при решении реальных задач проектирования

Рис. 1. Диаграмма контекста функциональной модели обучения

Поясним некоторые важные механизмы, использованные в контексте функциональной модели:



- теория проектирования технических объектов [5] позволяет рассматривать деятельность проектирования строительных сооружений как частный случай проектирования технического объекта, что открывает путь к применению системного подхода для информационного сопровождения этой деятельности, используя структуру банков данных строительного объекта: потребности заказчика проекта, типовые функциональные структуры, физические операции, физические эффекты, технические решения, проектные решения;

- опыт проектирования проектной организации определяет тематику, на которой будут отрабатываться алгоритмы проектирования моделей сооружения; для этого (в соответствии с [5, рис. 1]) предлагается их следующая иерархическая структура:

целевая - результат доработки технического задания на проектирование в результате его анализа проектной организацией (свойства строительного объекта в представлении заказчика);

архитектурная - уменьшенная в определенном масштабе точная копия какого-либо здания или сооружения (свойства строительного объекта в представлении архитектора);

конструктивная - архитектурная модель с назначенными конструктивными решениями узлов, обеспечивающих совместную работу несущих элементов сооружения (свойства строительного объекта в представлении конструктора);

схемная - расчётная схема сооружения, смоделированная средствами САПР (топологические, кинематические и прочие, в том числе - нагрузки, предварительно заданные свойства строительного объекта);

расчётная - характеризуется напряжённо-деформированным состоянием (НДС) расчётной схемы при заданной целевой модели поведения (свойства строительного объекта, представленные числовыми значениями подмножества механических параметров);

проектная - расчётная схема с изменёнными параметрами НДС в процессе достижения средствами САПР выполнения критериев прочности, жёсткости, устойчивости (свойства строительного объекта, представленные выполненными критериями безопасности);

документарная - проектная модель, материализованная в различных форматах (бумажном, цифровом и др.), задаваемых целевой моделью (свойства строительного объекта, представленные подмножеством управляющих предписаний для организации и реализации строительства);

- ПО симуляционного моделирования является средством создания симуляционных моделей деятельности обучающихся, основанных на алгоритмах, предлагаемых экспертами-проектировщиками проектной

организации, которые реализуются в средах САПР. Этим целям может служить, например, программный комплекс iSpring Suite.

Наличие подтверждённой квалификации специалистов проектной организации является необходимым условием создания и сопровождения ЭИОС, в частности, она определяет содержание банков профессиональных знаний, умений и навыков, формирующих профессиональные компетенции, запрошенные заказчиком обучения.

Из диаграммы рис. 2 следует, что первым этапом деятельности является разработка ЭУМК - электронного учебно-методического комплекса [6]. При его создании предлагается опираться на симуляционную технологию обучения.

Обращение к симуляционной технологии обучения обусловлено опытом, полученным в результате ориентации учебного процесса на достижение профессиональных компетенций, востребованных в практической деятельности. Действенность использования этой технологии подтверждается многолетним опытом применения, например, в области подготовки медицинских работников [7, 8].

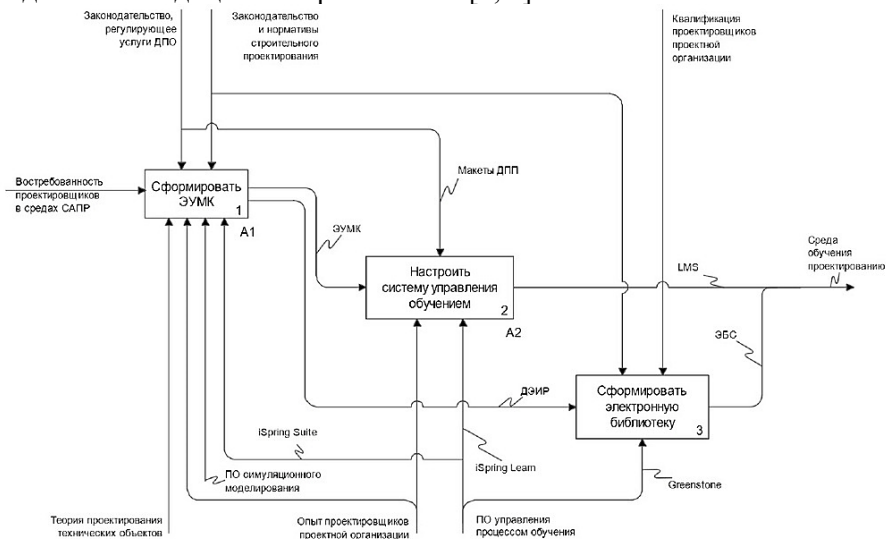


Рис. 2. Диаграмма основных функций модели обучения

Этот опыт, интерпретированный в соответствии с потребностями профессиональной подготовки проектировщиков строительных сооружений, позволяет отметить следующие факторы симуляционной технологии обучения, существенные с точки зрения повышения профессиональной компетентности проектировщиков в процессе обучения:

- профессиональная мотивация (работа в среде компьютерной симуляции, идентичной по интерфейсу среде, осваиваемой САПР);
- индивидуализация обучения с ориентацией на конкретно востребованные профессиональные компетенции;
- возможность многократного повторения отрабатываемого алгоритма деятельности при сопровождении обучения контекстной системой поддержки принятия решений);
- благоприятный эмоциональный фон (самостоятельность в освоении алгоритма при возможности обратиться к специалисту за консультацией на любом шаге реализации проектирования модели);
- объективизация оценки успешности каждого этапа учебной деятельности на базе системы контроля, встроенной в программное обеспечение компьютерной симуляции;
- востребованность теоретических знаний при принятии решений в ходе деятельности проектирования в различных режимах её симуляции;
- освоение алгоритмов деятельности проектирования в среде конкретной САПР на уровне навыка, что в решающей степени определяет формирование профессиональной компетенций.

Документирование материалов ЭУМК осуществляется в виде дополнительных профессиональных программ (ДПП), макеты которых для разных видов ДПО выложены на портале Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (<http://www.fgosvo.ru/support/63/60/22>).

На рис. 3 представлена структура деятельности по разработке содержания ЭУМК.

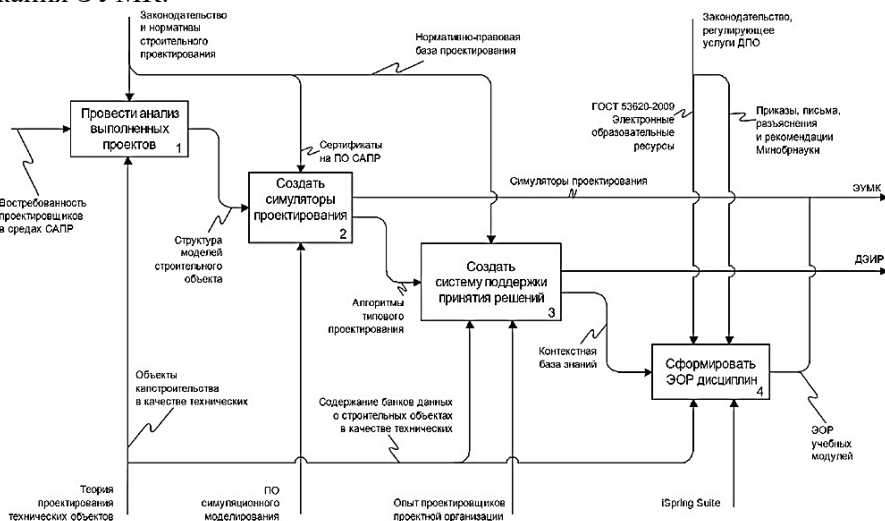


Рис. 3. Диаграмма действий по формированию ЭУМК

С учётом иерархической структуры моделей в составе проекта строительного объекта естественного обратиться к *модульному* построению материала. Тем более, что реализация проектирования моделей сооружения в среде, симулирующей САПР, должна быть ограничена по времени для деятельности обучающегося. Этому способствует тот факт, что каждая модель может быть представлена фрагментами, характеризующимися определённой завершёностью.

Например, разработка схемной модели в качества фрагмента может иметь целью построение глобальной геометрии без расстановки связей в узлах дискретизации модели. Кроме того, построение одной и той же модели может выполняться в разных средах САПР и для разных типов её поведения под внешним воздействием.

Кроме того, модульное построение ЭУМК является необходимым для формирования индивидуализированных курсов обучения, целью которых является персонифицированный комплект профессиональных компетенций в области строительного проектирования.

Ядром учебного модуля является алгоритм проектирования конкретной модели (фрагмента модели), реализованный средствами ПО симуляции для конкретной среды САПР. Окружение этого ядра (контекстная база знаний) дополняет его до уровня модуля электронного образовательного ресурса (ЭОР), полная структура которого определяется нормативными требованиями [9]. Дополнительные электронные информационные ресурсы (ДЭИР) составляют содержание электронной библиотечной системы (ЭБС) и фактически являются частью удалённой системы поддержки принятия решений.

Рассмотрим особенности ПО симуляции проектирования модели (или её фрагмента) строительного объекта, которые предлагается использовать для достижения целей и преимуществ симуляционной технологии для целей профессионального обучения в области проектирования.

Важнейшим элементом среды эмуляции является автоматизированная система поддержки принятия решений пользователя (СППР) на каждом шаге выполняемого алгоритма.

Содержание базы знаний для конкретного алгоритма формируется специалистом-экспертом проектной организации. Структура этой базы знаний имеет следующие уровни поддержки:

- действия, выполнение которых требует только навыка выполнения их стандартной последовательности;
- действия, которые требуют выбора значений параметров из коридора управления, регламентированных нормативной документацией;

действия, которые требуют выбора решения, обусловленного теоретическими положениями строительной науки;

- действия, которые требуют принятия решения на базе правильного анализа получаемых результатов в ходе последующих шагов алгоритма - реализация модельного эксперимента.

Использование СППР реализуется в 3-хэтапном циклическом процессе обучения:

1-й этап - демонстрация реализации алгоритма в интерактивном режиме под управлением пользователя-обучающегося с показом всех возможностей СППР;

2-й этап - выполнение алгоритма по указаниям СППР на каждом шаге алгоритма;

3-й этап - выполнение алгоритма без прямых указаний СППР, однако, если обучающийся в ходе нескольких попыток не может выполнить требуемое действие, такое указание будет выдано, но с начислением штрафных баллов; если число штрафных баллов превысит установленный предел, обучающийся отправляется на повторный цикл с самостоятельным выбором этапа повторного процесса обучения.

Окончательная проверка уровня освоения навыка осуществляется на другом объекте проектирования, но с тем же алгоритмом моделирования. Выполнение этого моделирования за установленное время является окончательным подтверждением получения навыка в рамках формируемой профессионально компетенции.

#### Библиографический список

1. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 28 декабря 2015 г. № 1167н «Об утверждении профессионального стандарта «Специалист в области инженерно-технического проектирования для градостроительной деятельности»» (с изменениями от 31 октября 2016 г.).

2. Рогачевский Б. Факторы риска проектных организаций в проектных условиях // Вестник Национального объединения изыскателей и проектировщиков. - Москва, 2017. - № 8-9 (54-55). - Сентябрь-октябрь 2017. - С. 19.

3. Методические рекомендации по реализации дополнительных профессиональных программ с использованием дистанционных образовательных технологий, электронного обучения и в сетевой форме: Приложение к письму Министерства образования и науки Российской Федерации от 21 апреля 2015 г. № 1013/06 «О направлении методических рекомендаций по реализации дополнительных профессиональных программ».

4. Р 50.1.028-2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. Руководящий документ. - М.: Госстандарт России, 2003. - 54 с.

5. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. - М.: Машиностроение, 1988. - 368 с.

6. ГОСТ Р 55751-2013 Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Электронные учебно-методические комплексы. Требования и характеристики. - М.: Стандартиформ, 2014. - 8 с.

7. Потапов М.П. Роль симуляционных образовательных технологий в обучении врачей // Высшее образование в России, 2019. - №№ 8-9. - С. 138-148.

8. Логвинов Ю.И., Ющенко Г.В., Орловская А.И. Оценка эффективности обучения с использованием симуляционных технологий // Медицинское образование и профессиональное развитие, 2018. - № 1. - С. 86-105.

9. ГОСТ Р 53620-2009 Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Электронные образовательные ресурсы. Общие положения. - М.: Стандартиформ, 2011. - 6 с.

УДК 378.1

## **О ПОДХОДЕ К АКТУАЛИЗАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ЛЕГКИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ» В РАМКАХ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ И ПОДГОТОВКИ КУРСОВЫХ РАБОТ**

Чигинский Д.С.

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

В последние годы в строительстве активно применяются легкие металлические конструкции, которые обладают целым рядом преимуществ: низкий вес, эстетика, экологичность и потенциал экономической эффективности. Учебная дисциплина «Лёгкие металлические конструкции» в системе высшего образования даёт магистрантам практический опыт проектирования и расчётов, в том числе достаточно сложных в теоретическом плане и с использованием программной реализации метода конечных элементов, что развивает актуальные в настоящее время навыки использования и владения цифровыми технологиями и современным расчётными (прикладными) программными комплексами [1].

В работе рассмотрен опыт учебной работы по дисциплине «Лёгкие металлические конструкции» в Тульском государственном университете, в частности, в рамках проведения практических занятий и курсового проектирования на примере теории, расчёта и проектирования лёгких стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), что предоставляет

студентам возможность приобрести навыки в рассматриваемой и смежных областях.

Основа преподавания рассматриваемой дисциплины заложена профессором кафедры «Строительство, строительные материалы и конструкции» канд. техн. наук Г. А. Нехаевым, в том числе в формате лекций [2].

Предлагаемый подход к актуализации дисциплины заключается в решении на практических занятиях задач, которые дополняют имеющийся багаж знаний студентов по методам расчёта металлических конструкций, а освоенные методики будут использованы при выполнении курсовой работы.

В качестве конкретных практических задач предлагаются решение следующих задач [3] «ручным» способом и с использованием автоматизации (посредством электронных таблиц и систем компьютерной алгебры):

1. Геометрические характеристики сечения брутто для холодноформованного С-образного профиля с отгибами полок;
2. Геометрические характеристики эффективного сечения С-образного профиля с отгибами полок при сжатии;
3. Геометрические характеристики эффективного сечения для С-образного профиля с отгибами полок при изгибе относительно оси наибольшей жесткости;
4. Геометрические характеристики эффективного сечения для  $\Sigma$ -образного профиля с отгибами полок при изгибе относительно оси наибольшей жесткости;
5. Геометрические характеристики эффективного сечения для Z-образного профиля с отгибами полок при изгибе относительно оси наибольшей жесткости.

Необходимость решения указанных задач вызвана широким спектром применяемых профилей при различных видах напряжённых состояний, что позволяет студентам глубже понять принципы работы легких металлических конструкций и освоить методы расчета их геометрических характеристик.

В качестве тематики для курсовых работ предлагается следующая:

- Проектирование каркаса одноэтажного здания из тонкостенных холодногнутох оцинкованных профилей, включающую необходимость выполнить: компоновку каркаса здания; сбор нагрузок; статический расчёт поперечной рамы каркаса; подбор поперечных сечений стержней фермы из ЛСТК с использованием актуальных норм [4]; конструирование и расчёт узлов; оформление текстовой и графической частей согласно индивидуальным заданиям.

В качестве исходных данных для курсовой работы предлагаются следующие: город строительства; объёмно-планировочное решение - прямоугольное в плане одноэтажное однопролётное здание, выполненное из лёгких металлических конструкций (тонкостенных холодногнутых оцинкованных профилей), с указанием размеров в осях, шага поперечных рам, высоты до низа стропильной конструкции; применение двухскатных ферм с параллельными поясами (с указанием уклона) и нисходящими раскосами, с указанием высоты на опоре; стеновое ограждение и кровля - из сэндвич-панелей с указанием толщины и типа теплового контура - наружный или внутренний.

Для академических целей указанная тема интересна тем, что сечения элементов подбираются по результатам расчётного обоснования (на силовые воздействия, в частности, по первой группе предельных состояний), а не только по конструктивным требованиям.

Учитывая использование в инженерной практике проприетарного программного обеспечения, например, CFSteel (НПК Дельта инжиниринг), Магnum (SCAD Soft) или Robot Structural Analysis (Autodesk, Inc.), важной особенностью предлагаемого подхода является освоение студентами универсальных «ручных» расчётов, с наработкой инструментов и шаблонов расчётов, которые в последствие используются при выполнении курсовой работы, что позволяет сформировать квалифицированного специалиста, способного проанализировать и оценить результаты расчётов, а не только пользователя современного программного обеспечения.

Указанный выше подход был сформирован с учётом опыта практический инженерной работы на базе проектной организации ООО «Строительное Проектирование», в том числе по результатам подготовки рабочей документации и выполнения расчётов для следующих объектов:

- Реконструкция крыши (устройство стропильной системы из ЛСТК) жилого 6-ти подъездного дома, расположенного в г. Киреевск Тульской области (2012 г.);

- Быстровозводимое здание из ЛСТК, расположенное в Егорьевском районе Московской области (2013 г.);

- Реконструкция крыши (устройство стропильной системы из ЛСТК) двухэтажного здания колледжа культуры, расположенного в г. Тула Тульской области (2014 г.).

Следует отметить, что потенциал дополнения подхода и уточнения содержания практических занятий и курсовой работы сохраняется, учитывая регулярную актуализацию норм [4] и выпуск новых рекомендаций [5, 6, 7].



В заключение следует отметить, что описанный подход к дисциплине «Лёгкие металлические конструкции» предоставляет возможность студентам сформировать умения, получить знания и практические навыки в сфере расчёта и проектирования строительных конструкций из лёгких стальных тонкостенных профилей на современном уровне развития технологий строительного проектирования.

#### Библиографический список

1. Концепция подготовки кадров для строительной отрасли до 2035 года. Проект (по состоянию на 17 октября 2022 г.). - М.: НИУ МГСУ, 2022.
2. Нехаев Г.А. Конспект лекций. Лёгкие металлические конструкции. - Тула: ООО «ПрофСтальПрокат», 2012.
3. Расчёт элементов из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 / Э. Уэй, М. Хэйвуд, Н.А. Беляев [и др.]. - Киев: УЦСС, 2015. - 104 с.
4. СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованного профиля и гофрированных листов. Правила проектирования» (Приказ Минстроя России от 3 декабря 2016 г. № 881/пр);
5. Пособие по проектированию конструкций из стальных тонкостенных холодногнутого профилей. - М., 2019.
6. Пособие «Расчет элементов из стальных гнутых профилей» (к СП 260.1325800.2016). - М., 2020.
7. Пособие по проектированию строительных конструкций малоэтажных зданий из стальных холодногнутого оцинкованного профилей (ЛСТК) / АРСС. - Санкт-Петербург: Первый ИПХ, 2021.

**СОДЕРЖАНИЕ**

СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И СТРОИТЕЛЬНЫХ  
 КОНСТРУКЦИЙ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ» .....5

*Арутюнян Л.А., Севрунов И.А., Овчинников И.Г.*  
 «GALAPAGOS» как инструмент  
 параметрического проектирования систем «ТЕНСЕГРИТИ» .....5

*Быстров Н.С., Овчинников И.Г.*  
 О методах расчета зданий и сооружений  
 на сейсмические воздействия в нормах РФ ..... 12

*Иноземцев В.К., Синева Н.Ф.*  
 Устойчивость оболочек с низкой сдвиговой жесткостью ..... 16

*Кастырина А.А., Чигинский Д.С.*  
 Инструментарий повышения надежности  
 информационных моделей зданий и сооружений ..... 25

*Кузнецова В.О.*  
 Воздействие водородосодержащей среды на напряженно-  
 деформированное и предельное состояния  
 цилиндрической оболочки из сплава титана ..... 29

*Мир-Салим-заде М.В.*  
 Частичный контакт берегов трещины в стрингерной пластине с  
 круговым отверстием ..... 41

*Подлесных И.С., Гриднев С.Ю.*  
 Расчет пролетного строения с железобетонной плитой  
 на воздействие солнечной радиации с учетом сдвиговой жесткости ..... 46

*Прохорова А.В., Строченов Р.Д.*  
 К решению задачи о распространении повреждений  
 от взрыва и их влияние на плоскую железобетонную раму ..... 49

<i>Раводин И.В., Гриднев С.Ю., Скалько Ю.И.</i> Разработка оптимального вычислительного алгоритма для параметрического анализа конструктивно-нелинейных колебаний упруго-опертых систем .....	55
<i>Сафронов В.С., Барченкова Н.А., Киселев Д.А.</i> Статистический анализ несущей способности сталефибробетонных балок прямоугольного поперечного сечения .....	61
<i>Судакова И.А., Куравская Е.М.</i> Методы расчета железобетонных конструкций, испытывающих кривой изгиб, согласно нормам проектирования Российской Федерации и Еврокоду .....	66
<i>Теличко В.Г., Ванян М.Р.</i> Моделирование снеговой нагрузки на здание с двускатной крышей.....	74
<i>Теличко В.Г., Чигинская И.А., Чигинский Д.С.</i> К решению связанной задачи термоупругости для оболочечных конструкций, встречающихся в реальной расчетной практике .....	81
<i>Теличко В.Г., Чигинская И.А., Чигинский Д.С.</i> Решение связанной нестационарной задачи термомеханического изгиба для тонкой прямоугольной пластины из нелинейного изотропного материала в программном комплексе ANSYS .....	84
<i>Трещев А.А., Бесстраинов Д.О.</i> Математическая модель основания из ортотропных слоев с учетом их деформационной псевдонеоднородности .....	92
<i>Трещев А.А., Лапина М.А.</i> Получение соотношений для расчета деформирования призматических оболочек из материалов, чувствительных к виду напряженного состояния.....	102
<i>Трещев А.А., Селезнев И.Р.</i> Модель деформирования сферической оболочки на упругом основании, выполненной из материала с двойной анизотропией .....	108

<i>Трещев А.А., Теличко В.Г., Селезнев И.Р.</i>	
Напряженно-деформированное состояние сферической оболочки из материала с двойной анизотропией, покоящейся на упругом основании .....	114
<i>Трещев А.А., Ющенко Н.С.</i>	
Ортотропия и нелинейность одновременно с приобретаемой псевдонеоднородностью изгибаемых прямоугольных пластин средней толщины .....	121
<b>СЕКЦИЯ «ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ» .....</b>	
<b>135</b>	
<i>Барковская С.В., Рябов Г.Г., Воронин Д.С., Гаврюшина Д.О., Голубева П.И., Кудряшов З.Ю., Кузин А.А., Леончев А.А.</i>	
Выбор эффективного суперпластификатора и влияние качества заполнителей в бетонах .....	135
<i>Белов В.В., Куляев П.В., Баркая Т.Р.</i>	
Повышение трещиностойкости карбонатного бетона .....	138
<i>Леончев А.А., Рябов Г.Г.</i>	
Композиционная масса ангобов для облицовочной керамики .....	146
<i>Медведева Г.А., Юсупова А.А., Бараева Л.Р., Ахметова Р.Т.</i>	
Технология композиционного материала на основе отходов теплоэнергетики .....	149
<i>Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Нармания Б.Е., Промзелева Е.С.</i>	
Повышение биостойкости цементного камня бетона посредством введения добавок .....	156
<i>Сергеева С.Б.</i>	
Улучшение свойств гипсовых литых декоративных плиток .....	160
<i>Соловьева И.Е., Барковская С.В., Хрунов Е.Е.</i>	
Эффективность применения микрокальцита в составе мелкозернистого бетона .....	165

*Ярцев В.П., Данилов В.М.*

Влияние натрия двууглекислого на прочностные свойства  
древесно-наполненного полимерного композита..... 167

СЕКЦИЯ «ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ОБСЛЕДОВАНИЕ И УСИЛЕНИЕ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ» ..... 174

*Андронов А.М.*

Проблемы усиления строительных конструкций  
композитными материалами ..... 174

*Батырев К.Г.*

Модульные конструкции из ЛСТК, как способ популяризации  
данной технологии в малоэтажном строительстве..... 178

*Кузнецов Е.Е.*

Оценка воздействий на силосные сооружения для сыпучих  
материалов по Еврокоду 1 и нормативам Российской Федерации ..... 183

*Мамырев Е.Н.*

Эффективность и расчет усиления мостов  
полимерными композиционными материалами и сравнение с  
традиционными методами ..... 190

*Насонов С.И.*

Применение технологии «стена в грунте» при строительстве  
транспортных сооружений в стесненных городских условиях ..... 198

*Пименов И.И., Овчинников И.И.*

Проблема защиты бетона конструкций от коррозии  
в процессе эксплуатации транспортных систем ..... 206

*Ченькаев И.В., Титенко Н.Е.*

Анализ системы управления кадрами и мотивацией  
персонала в современной компании, работающей в сфере транспортного  
строительства..... 209

*Черняев А.А.*

Опыт обследования фундаментов зданий  
и проблема слабых грунтов в строительстве..... 213

СЕКЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «СТРОИТЕЛЬСТВО» ..... 219

*Барковская С.В.*

Связь теории и практики технологических дисциплин бакалаврита  
и магистратуры направления Строительство..... 219

*Захарова И.А.*

О подходах к преподаванию механики сооружений  
студентам направления архитектура ..... 221

*Кузнецова В.О.*

Оценка факторов повышения качества образовательного процесса ..... 223

*Прохорова А.В.*

Методические подходы при обучении студентов основам  
проектирования бетонных и железобетонных конструкций..... 226

*Теличко В.Г.*

Симуляционное обучение строительным САПР  
в дополнительном профессиональном образовании ..... 230

*Чигинский Д.С.*

О подходе к актуализации дисциплины  
«Легкие металлические конструкции»  
в рамках практических занятий и подготовки курсовых работ..... 238

Научное издание

Актуальные проблемы строительства  
и строительной индустрии

Сборник материалов XXIV Международной  
научно-технической конференции  
(29 – 30 июня 2023 г.)

Авторское редактирование

Принято 17.07.2023. Подписано в печать 18.07.2023

Формат бумаги 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 20,1

Тираж 100 экз. Заказ 105

Адрес редакции и издателя:

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95