Министерство науки и высшего образования РФ
Российская академия архитектуры
и строительных наук
Тульский государственный университет
ООО «Строительное проектирование»

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

XXII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (28-29 июня 2021 г.)

ТУЛА
2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

XXII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (28-29 июня 2021 г.)

ТУЛА
2021

В настоящем сборнике опубликованы материалы, представленные участниками XXII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (Тульский государственный университет, 28-29 июня 2021 года, г. Тула).

Тезисы докладов соответствуют авторским оригинал-макетам, поступившим в оргкомитет конференции.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

Механика материалов и строительных конструкций, проектирование зданий и сооружений. Технология и экологические проблемы строительных материалов. Эксплуатация, обследование и усиление строительных конструкций. Проблемы современного высшего образования по направлениям «Строительство»

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Кравченко О.А. - д.т.н., доц., и.о. ректора 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,

Секретариат - Кузнецова В.О. - инженер ТулГУ

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели:

Травуш В.И. - академик РААСН, д.т.н., проф., РААСН (г. Москва).
Карпенко Н.И. - академик РААСН, д.т.н., проф., РААСН (г. Москва).
Колчунов В.И. - академик РААСН, д.т.н., проф., ЮЗГУ (Курск).
Петров В.В. - академик РААСН, д.т.н., проф., СГТУ (г. Саратов).
Чернышов Е.М. - академик РААСН, д.т.н., проф., ВГТУ (г. Воронеж).

Члены программного комитета:

Акимов П.А. - академик РААСН, д.т.н., проф., РААСН (г. Москва).
Белов В.В. - советник РААСН, д.т.н., проф., ТверьГТУ (г. Тверь).
Ерофеев В.Т. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГУ (г. Саранск).
Белостоцкий А.М. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., ЗАО НИЦ СтаДиО (г. Москва).
Зубчанинов В.Г. - д.т.н., проф., ТверьГТУ (г. Тверь).
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).
Овчинников И.Г. - академик АТ, д.т.н., проф., СГТУ (г. Саратов).
Селяев В.П. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГУ (г. Саранск).
Соколова Ю.А. - академик РААСН, д.т.н., проф., НИУ МГСУ (г. Москва).
Федосов С.В. - академик РААСН, д.т.н., проф., НИУ 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)

ISBN 978-5-7679-4855-0

© Авторы сборника, 2021
© Издательство ТулГУ, 2021

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»

INFORMATION PACKAGE

XXII International scientific and technical conference «Contemporary issues of engineering and building industry» (June 28-29, 2021)

TULA
2021

This package consists of articles submitted by participants of XXII International scientific and technical conference «Contemporary issues of engineering and building industry» (Tula State University, June 28-29, 2021, Tula).

Abstracts of reports match with original drafts that were submitted to organizing committee.

CONFERENCE SESSIONS

Mechanics of materials and building structures, design of buildings and structures. Technology and environmental problems of construction materials. Operation, inspection and strengthening of building structures. Problems of modern higher education in the areas of "Construction »

ORGANIZING COMMITTEE

Convener:
Kravchenko O.A. - Doctor of Technical Sciences, docent, acting 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., engineer, Tula State University.

PROGRAM COMMITTEE

Co-conveners:
Travush V.I. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., RAACS (Moscow);
Karpenko N.I. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., RAACS (Moscow);
Kolchunov V.I. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., RAACS (Kursk);
Petrov V.V. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., SSTU (Saratov);
Chernyshov E.M. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., VSTU (Voronezh).

Members of program committee:
Akimov P.A. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., RAACS (Moscow);
Belov V.V. - adviser of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., TSTU (Tver);
Erofeev V.T. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., OMSU (Saransk);
Belostotsky A.M. - c.m. of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., CJSC SIC StaDiO (Moscow);
Zubchaninov V.G. - Doctor of Technical Sciences, prof., TSTU (Tver);
Mondrus V. L. - c.m. of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., NRU MGSU (Moscow);
Merkulov S. I. - c.m. of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., KSU (Kursk);
Ovchinnikov I. G. - member of the AT, Doctor of Technical Sciences, prof., SSTU (Saratov);
Selyaev V.P. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Prof., OMSU (Saransk);
Sokolova Yu.A. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., NRU MGSU (Moscow);
Fedosov S.V. - member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., NRU MGSU (Moscow);
Cherkasov V.D. - c.m. of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, prof., OMSU (Saransk);
Mueller W. H. - Doctor of Engineering, prof., Technical University of Berlin (Berlin, Germany).

ISBN 978-5-7679-4855-0

© Authors of package, 2021
© Tula State University, 2021

УЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ

Андросова Н.Б., Заев А.В.
ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

Вопросам живучести строительных конструкций и конструктивной безопасности несущих систем зданий, сформированных на фундаментальных положениях предельных состояний, посвящены работы В.О.Алмазова [1], В.М.Бондаренко [2], Г.А.Гениева [3], П.Г.Еремеева, Н.Н.Трекина [4], Н.И.Карпенко [5], Э.Н.Кодыша [6], В.И.Травуша [7], А.Г.Тамразяна [8], Г.И.Шапиро [9], I.Diagoro I. [10], P.M.Stylianidis [11], E.J.Cha [12] и других ученых. Несмотря на неизбежный силовой и средовой износ, а также эксплуатационные повреждения, при проектировании строительных конструкций в первом предельном состоянии заложены резервы по расчетной прочности до 25-30%, как показывают опытные данные. Эти резервы можно использовать при учете характера работы строительных конструкций в запредельном (особом) состоянии. Например, при отказе несущего элемента вовлекаются в совместное деформирование сопрягаемые элементы, усилия перераспределяются, разгружая или догружая несущий элемент. Проф. В.И.Колчуновым и другими учеными [13] предлагается введение особого предельного состояния как одногоиз способов снижения затрат на обеспечение живучести зданий при аварийных воздействиях. Такое решение заключается в более полном учете особенностей длительного деформирования конструкций при действии нагрузки и характера изменения схемы работы элементов здания, т.е. учете физической и конструктивной нелинейности.

В данной работе даны некоторые аналитические выражения по оценке напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при длительном нагружении по наклонному сечению.

За последние несколько десятилетий уже накоплены некоторые результаты экспериментально-теоретических исследований по изучению сопротивления железобетонных конструкций при внезапном удалении несущего элемента или связи и установлении возможных картин их разрушения. Испытания проводились на балочных, стоечно-балочных, балочно-плитных конструкциях [14-17]. В этих работах были выявлены принципиальные особенности деформирования и разрушения железобетонных конструктивных систем в процессе внезапного удаления не-

сущего элемента (связи). Под действием такой аварийной нагрузки происходило динамическое высокоскоростное догружение оставшихся неразрушенных конструкций в течение очень короткого промежутка времени. Проявляющаяся при этом повышенная прочность материалов обычно связывается с мгновенным проявлением сил вязкого сопротивления, непосредственно воспринимающих внешнее воздействие и тормозящих развитие деформаций. Однако до настоящего времени выполнено крайне мало экспериментально-теоретических исследований по решению задач сохранения потенциала живучести железобетонных конструктивных систем во времени с учетом накопления повреждений неравновесного характера. Отдельными вопросами неравновесных процессов занимались В.М.Бондаренко [2], В.И.Колчунов [18], Н.В.Федорова [19], А.Г.Тамразян [20], О.В.Кабанцев [21], L.Jianyong, E.Vasanelli [22] и др.

Неравновесные процессы силового сопротивления бетона, эволюционирующие во времени, имеют силовой и несиловой характер происхождения. Неравновесные процессы силового происхождения характеризуются полными деформациями ползучести:

$$\varepsilon_{ins} = \varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}\,, \qquad (1)$$

где ε_{c1} - мгновенные (быстронатекающие) деформации ползучести; ε_{c2} - длительные (запоздалые) деформации ползучести.

Проф. Р.С.Санжаровским отмечено, что в теории ползучести железобетонных конструкций последовательно рассматриваются три основных проблемы [23]. Первая проблема состоит в построении уравнений ползучести бетона при переменных (режимных) нагружениях. Вторая - в получении решения уравнения ползучести. Третья проблема заключается в расчете железобетонных конструкций при длительном загружении, в том числе и при рассматриваемом нами особом воздействии.

Известно, что деформации ползучести (приблизительно 70%) проявляются в первые 3-4 месяца с момента загружения. В современных условиях все существующие теории ползучести носят феноменологический характер, т.е. основаны на моделировании и описании наиболее изученных экспериментальных явлений. Наличие различных теорий ползучести объясняется тем, что авторы, разделяя простую ползучесть на линейную и нелинейную, используют различные подходы к описанию составляющих. Во всех уравнениях ползучести есть общая количественная оценка деформаций ползучести (учет длительного нагружения) - мера ползучести $C(t, t_0)$. Это - общепринятый параметр линейной

ползучести и определяется как отношение деформаций ползучести к напряжению, при которых происходит эта ползучесть:

$$C_{t,t_0}(b) = \frac{\varepsilon_{ins}(t)}{\sigma_b} = \frac{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}}{\sigma_b}. \quad (2)$$

Мера деформаций ползучести C(t, t_0) к моменту наблюдения t бетона некоторого состава зависит от двух факторов: возраста в момент начала нагружения t_0 и продолжительности нагружения t-t_0 [24].

Изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента вычисляется по формуле:

$$D = E_{b,red}(t, t_0) \cdot I_{red}. \quad (3)$$

Длительный модуль деформаций бетона, отвечающий линейной зависимости между напряжениями и деформациями в момент времени t при начале загружения t_0 находится по формуле:

$$E_b(t, t_0) = \left[\frac{1}{E_b} + c(t, t_0) \right]^{-1}, \quad (4)$$

где E_b - модуль начальной упругости.

Для оценки прочности железобетонных элементов по наклонному сечению можно использовать модель Н.И. Карпенко:

$$Q < Q_b + Q_{sw} + Q_s. \quad (5)$$

Неравновесные процессы несилового характера происхождения можно учесть средовыми (коррозионными) повреждениями, используя модель В.М.Бондаренко о внестадийном развитии во времени неравновесных процессов силового сопротивления твердых тел [2].

Расчет по наклонному сечению повреждаемых железобетонных балочных конструкций с учетом средового (коррозия) и длительного силового (ползучесть) воздействия предложено выполнять из условия равновесия внешних и внутренних поперечных сил, действующих в наклонном сечении:

$$Q^* < Q_b^* + Q_{sw}^* + Q_s,^* \quad (6)$$

где Q^* - поперечная сила в наклонном сечении с длиной проекциисна продольную ось элемента, поврежденного коррозией, определяемая от всех внешних сил, расположенных по одну от рассматриваемого наклонного сечения, при этом учитывают наиболее опасное загружение в пределах наклонного сечения с учетом ползучести; Q_b^* - поперечная сила, воспринимаемая бетоном, поврежденным коррозией в наклонном сечении железобетонного балочного элемента с учетом ползучести;

Q_{sw}^{*} - поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой, поврежденной коррозией в наклонном сечении железобетонного балочного элемента с учетом ползучести; Q_{s}^{*} - предельные поперечные усилия в продольной растянутой арматуре, поврежденной коррозией, с учетом ползучести.

Следовательно, можно сделать вывод, что наиболее сложным и ответственным моментом в особом предельном состоянии является назначение критерия особого предельного состояния во времени с позиции экспозиции живучести, до перехода конструкции в механизм. Например, для железобетонных конструкций критерии особого предельного состояния зависят от класса бетона, параметров армирования и условий опирания.

Библиографический список

1. Алмазов В.О. Проблемы прогрессирующего разрушения // Строительство и реконструкция, 2014, №6. - С. 3-10.

2. Бондаренко В.М. Силовое деформирование, коррозионные повреждения и энергосопротивление железобетона / В.М.Бондаренко, Курск: Юго-зап. гос. ун-т, 2016. - 68 с.

3. Гениев Г.А. Вопросы длительной и динамической прочности анизотропных конструкционных материалов / Г.А.Гениев, К.П.Пятикрестовский. - ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000. - 38 с.

4. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В. Анализ нормативных требований к расчету строительных конструкций на прогрессирующее обрушение // Вестник НИЦ Строительство, 2019, №2. - С. 15-29.

5. Карпенко Н.И., Римшин В.И., Ерышев В.А., Шубин И.Л. Deformation models of concrete strength calculation in the edition of Russian and foreign norms // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, p. 022076.

6. Трекин Н.Н. Кодыш Э.Н. Особое предельное состояние железобетонных конструкций и его нормирование // Промышленное и гражданское строительство, 2020, №3, С. 4-9.

7. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects / В.И.Травуш, Н.В.Федорова // Magazine of Civil Engineering, 2018, №5. - С. 73-80.

8. Тамразян А.Г. Технология расчета железобетонных конструкций при пожаре после землетрясения // Бетон и железобетон, 2020, № 1. - С. 49-56.

9. Shapiro G.I., Smirnov A.V. Calculation model of typical panel building conjugation with large-span frame construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. - P. 012090.

10. Diagoro I. Progressive Collapse Analysis of Structures/ Diagoro I. - Elsevier, 2018. - 260 p.

11. Stylianidis P.M., Nethercot D.A., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y. Study of the mechanics of progressive collapse with simplified beam models // Engineering Structures, 2016, 117. - p. 287-204.

12. Cha, E.J., Ellingwood, B.R.: Seismic risk mitigation of building structures // Structural Safety, 2013, 40. - P. 11-19.

13. Колчунов В.И., Федорова Н.В. Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях // Вестник НИЦ Строительство, 2018, №1. - С. 115-119.

14. Клюева Н.В., Шувалов К.А. Исследование динамических догружений в железобетонных неразрезных балках с использованием статико-динамических диаграмм // Вестник МГСУ, 2011, №2. - С. 145-152.

15. Федорова Н.В., Кореньков П.А. Статико-динамическое деформирование монолитных железобетонных каркасов зданий в предельных и запредельных состояниях // Строительство и реконструкция, 2016, №5. - С.90-100.

16. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J, Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structuresin the 21st century / Engineering Structures, 2018, №173. - P. 122-149.

17. Fedorova N. The dynamic effect in a structural adjustment of reinforced concrete structural system / Fedorova N., Kolchunov V., Tuyen V.N., Dinh Quoc P., Medyankin M. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering - 2020. - Т. 869 - С. 052078.

18. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях / Промышленное и гражданское строительство, 2013, №2. - С 28-31.

19. Fedorova N.V., Gubanova M.S. Crack-resistance and strength of a contact joint of a reinforced concrete composite wall beam with corrosion damages under loading / Russian journal of building construction and architecture. 2018, №2. - p. 6-18.

20. Tamrazyan A.G., Mineev T.K., Zhukova L.I. Influence of chloride corrosion on probabilistic assessment of bearing capacity of beamless slabs overlap / IOP conference series: Materials science and engineering. 2019. - P. 012117.

21. Kabantsev O.V., Mitrovic B. Modelling post-critical deformation processes of flat reinforced concrete elements under stresses / MATEC Web of Conferences, 2017. - P. 00071.

22. Vasanelli E., Micelli F., Aiello M.A., Plizzari G. Long term behaviour of FRC flexural beams under sustained load // Engineering Structures, 2013, №56. - P. 1858-1867.

23. Беглов А.Д., Санжаровский Р.С. О методах решения уравнений ползучести бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2005. №3. - С. 55-63.

24. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. - М.: Стройиздат, 1982. - 287 с.

25. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. - М.: Стройиздат, 1988. - 120 с.

ПЕРЕРАБОТКА ШЛАМА ХИМВОДООЧИСТКИ И ПОПУТНОЙ СЕРЫ

Бараева Л.Р., Юсупова А.А., Медведева Г.А.
КНИТУ, г. Казань, Россия

Водоподготовка - важный производственный процесс теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). При производстве электрической и тепловой энергии используется большое количество воды. При её подготовке в цехе химической водоочистки, образуются значительные объемы шламовых отходов (шлам ХВО). Учитывая, что на долю тепловых электростанций в России приходится около 77% вырабатываемой электроэнергии, масштабы образуемых шламовых отходов при подготовке воды являются значительным для организации промышленной переработки.

Шлам ХВО - серьезная экономическая и экологическая проблема для ТЭЦ. Ежегодно на шламонакопительные станции сбрасывают несколько тысяч тонн таких отходов. После полного заполнения хранилища до проектных значений, дальнейший сброс шламовых вод необходимо прекратить. Шламонакопитель при этом не может быть использован до тех пор, пока он не будет очищен и отходы не будут вывезены на полигон для захоронения. Экологические службы постоянно ужесточают контроль за отходами станций [1].

Проблема утилизации и переработки отходов сегодня стоит особенно остро. По официальным данным всего около 2% добываемого из недр сырья превращается в конечный продукт, оставшиеся 98% - это отход. Поэтому необходимо как можно быстрее научиться их перерабатывать.

Разработка технологии утилизация шлама химводоочистки Нижнекамской ТЭЦ позволит:

- существенно снизить затраты на хранение шлама в шламоотвалах и снизить экологические платежи;
- упростить транспортировку шлама к местам его использования;
- решить проблему отчуждения значительных площадей под шламонакопители;
- экономить природные и минерально-сырьевые ресурсы.

Несмотря на давность и большое количество исследований в области экологически чистого производства, проблема утилизации и переработки промышленных отходов остается актуальной до сих пор. Поэтому, появилась экономически, технологически и экологически обоснованная необходимость в разработке и внедрении всё новых прогрессивных и безопасных методов решения проблемы загрязнения биосферы отходами производства и потребления. Для выбора более рационального пути решения проблемы необходим предварительный учет и оценкам отходов.

С этой точки зрения, необходимость исследований, направленных на создание и изучение бессточных технологических систем особенно актуальна.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что шламы ХВО ТЭС, являющиеся «производственным отходом, могут служить ценным сырьем для многих отраслей промышленности и сельского хозяйства».

Одним из перспективных способов утилизации шлама ХВО является его использование в качестве наполнителя строительных материалов [2-3].

Еще одна проблема, с которой сталкивается нефтяные регионы - это накопление попутной серы. Поскольку с увеличением объема добычи углеводородов выросло количество серы как продукта, сопутствующего нефть и газ. Крупные компании проводятпоиск новых методов переработки серы, но зачастую онаостается не полностью утилизированной и складируется наобъектах открытого хранения. Сера является не токсичнымпродуктом, но при хранении на открытых площадях можетсерьезно нарушать экологическую обстановку региона. Между тем целый ряд положительных свойств серы (гидрофобность, бактерицидные и связующие свойства, низкая токсичность, стойкость в агрессивных средах) создаютпредпосылки для расширения ее использования внетрадиционных материалоемких сферах. Такой сферойможе выступать стройиндустрия. Известно, что серныебетоны, являясь относительно новым видом материалов,отличаются рядом положительных свойств по сравнению страдиционнымицементнымибетонами:плотностью, от-

сутствием усадочных деформаций, меньшей ползучестью, водонепроницаемостью, атмосферо- и морозостойкостью, высокой химической стойкостью к слабым щелочам, кислотам, сульфатам, органическим растворителям, способностью твердеть под водой, быстрым набором прочности, связанным только с периодом остывания смеси, низкой стоимостью исходных материалов, что и определяет их высокую востребованность в дорожном строительстве. В подобных материалах серавыполняет роль вяжущего [4]. В качестве наполнителя зачастую используют кремнеземсодержащие породы [5].

В ходе исследования были получены материалы на основе серы - побочного продукта АО "Танеко" и химически осажденного мела - высушенного до влажности 1% шлама ХВО с добавлением активатора сырьевых компонентов хлорида цинка.

Целью работы является разработка технологии получения серного бетона на основе шлама Нижнекамской ТЭЦ методом прессования, с использованием активатора хлорида цинка и исследование свойств полученных материалов.

Образцы направлялись на физико-химические испытания для бетонов согласно:

- ГОСТ 7473-94 Смеси бетонные. Технические условия;
- ГОСТ 12730.1-78 Бетоны. Метод определения плотности;
- ГОСТ 10180-90 (СТСЭВ 3978-83) Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам;
- ГОСТ 12730.3-78 Бетоны. Метод определения водопоглощения.

Также исследовалась стойкость к действию влаги.

Реологические исследования проводили на приборе ВУБ-20, согласно методике ГОСТ 32060-2013.

Рассматривались физико-механические характеристики для композиций сера: наполнитель 1:1 и 1:1,5.

Структуру контактной зоны серного вяжущего с наполнителем можно изменить путем физико-химической активации связующего и поверхности наполнителя. В качестве такого активатора нами был выбран хлорид цинка. Содержание хлорида цинка в композициях было выбрано на основе исследований, представленных в работах Ахметовой Р.Т., Сабаховой Г. Юсуповой А.А. [6] и составило 2%.

Ниже приведены результаты исследований зависимостей изменения прочности серных композиций от количества модифицирующей добавки.

На рис. 1 представлены графики зависимости предела прочности при сжатии композиций на основе серы и химически осажденного ме-

ла, модифицированных хлоридом цинка, полученных по технологии прессования при различном содержании мела.

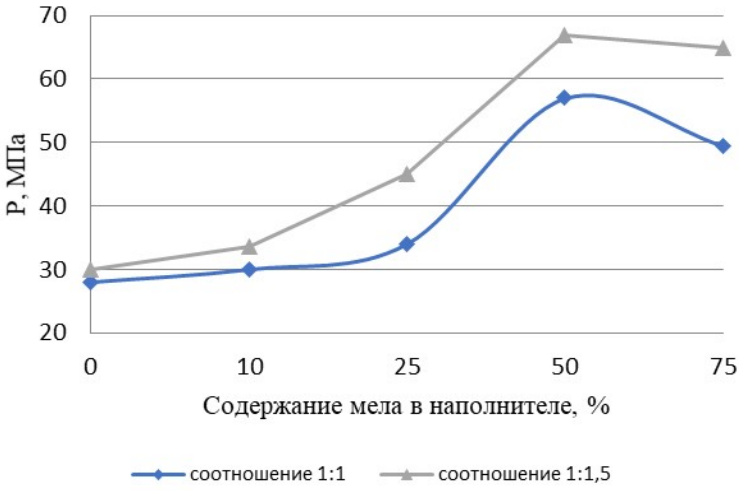


Рис. 1. Предел прочности при сжатии серосодержащих композиций, при различном содержании химически осажденного мела в наполнителе

Как видно из рисунка, наибольший эффект достигается при количестве химически осажденного мела - 50%, полученных при соотношении сера: наполнитель 1:1,5 (верхняя кривая) и при соотношении сера: наполнитель 1:1 (нижняя кривая).

Проведенными расчетами статистической обработки результатов измерений установлено, что погрешность определения прочностных характеристик составляет не более 3%. Анализируя результаты измерений, можно отметить, что точки эксперимента фактически совпадают с точками математической модели.

При введении химически осажденного мела в состав композиции водопоглощение серных композиционных материалов составляет 0,4-0,9% (рис. 2).

Анализ экспериментальных данных показывает, что введение химически осажденного мела, приводит к не значительному повышению величины водопоглощения серных композиций. Водопоглощение образцов не превышает 1%, что соответствует требованиям ГОСТа 12730.3-78.

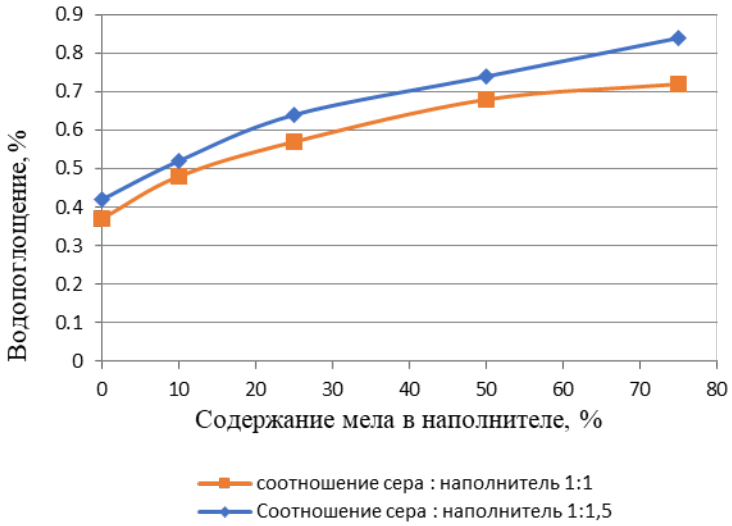


Рис. 2. Зависимость водопоглощения серосодержащих композиций, при различном содержании химически осажденного мела в наполнителе

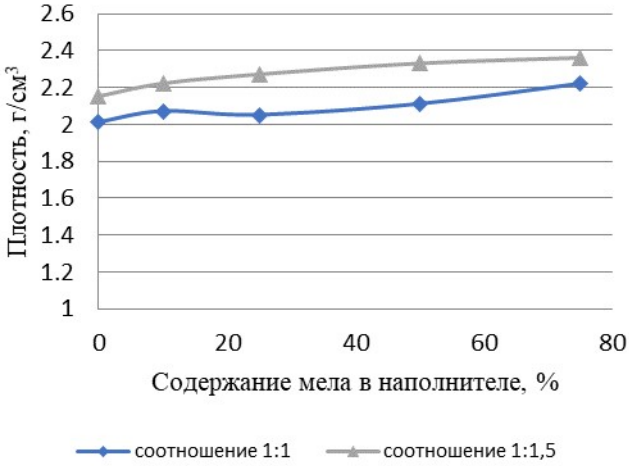


Рис. 3. Зависимость плотности серосодержащих композиций, при различном содержании химически осажденного мела в наполнителе

При включении в состав композиций химически осажденного мела наблюдается повышение плотности. Постепенное увеличение химически осажденного мела выше 50% при соотношении сера: наполнитель

1:1,5 и выше 25% при соотношении сера: наполнитель 1:1 приводит к снижению плотности (рис. 3).

Анализ экспериментальных данных показывает, что оптимальное содержание химически осажденного мела составляет 25-50% при соответствующих соотношениях сера: наполнитель.

Как известно, стойкость строительных материалов в водной среде определяется их структурой, которая зависит от рецептурных и технологических факторов. Результаты физико-механических испытаний образцов оптимального состава показали высокие показатели стойкости рекомендуемых композиций к влаге (К=0,92-0,97).

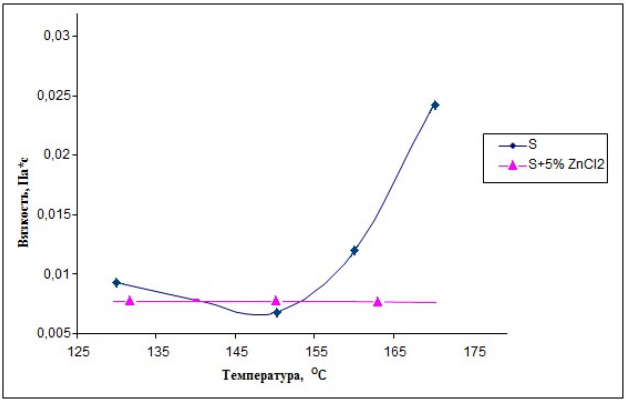


Рис.4. Зависимость вязкости от температуры чистого серного расплава и с добавлением модифицирующей добавки хлоридов металлов

Для выяснения влияния исследуемогоактиватора на технологические свойства серного расплава и свойства получаемых материалов определили изменение вязкости серного расплава в зависимости от температуры и вида модифицирующих добавок.

Вначале было изучено влияние электрофильного активатора на вязкость серного расплава. Как видно из представленной зависимости (рис. 4), до 150 ºС расплав серы представляет собой легкоподвижную жидкость, для которой характерны радикалы с различным числом атомов в цепи. Выше 150 ºС в расплаве содержится 7,3% полимерной серы, 5,4% кольцевой и 87,3% циклооктасеры. Выше 157ºС расплав становится вязким ввиду полимеризации - сшивке радикалов и образованию длинных серных цепей, содержащих до миллиона атомов серы.

Как показали исследования при добавлении хлорида цинка (рис. 4), вязкость серного расплава остается неизменно низкой во всем рабочем температурном интервале (130-170ºС). Следовательно, хлорид цинка

способствует образованию и стабилизации огромного числа (S_2, S_4, S_6, S_8) реакционноспособных радикалов, а значит, повышает химическую активность серного компонента.

Таким образом, хлорид цинка выполняют роль электрофильного активатора раскрытия серного кольца, образования подвижных коротко-цепных радикалов, тем самым понижая вязкость и поверхностное натяжение расплава и повышая его проникающую способность.

С другой стороны, закрепляясь на концевых атомах серы в радикалах препятствуют процессам полимеризации, сохраняя высокие технологические свойства пропитывающих составов. В результате улучшается смачиваемость и проникающая способность пропиточной смеси, что способствует образованию более надежного эффективного защитного покрытия на цементном бетоне.

Очевидно, что физико-механические характеристикипредложенных серосодержащих композитов существенноотличаются в положительную сторону от применяемых в настоящее время материалов, а разработка способов утилизации промышленных отходов с получением хозяйственно-полезной продукции позволяет снизить потребление природных ресурсов и создать реальную основу для рационального (сбалансированного природопользования).

Библиографический список

1. Николаева, Л.А., Бородай, Е.Н. Ресурсосберегающая технология утилизации шлама водоподготовки на ТЭС / Л.А.Николаева, Е.Н.Бородай. - Казань.: КГЭУ, 2012. - 110 с.

2. Большаков, Р.В. Экологические и экономические проблемы утилизации крупнотоннажных отходов химводоподготовки Нижнекамской ТЭЦ / Р.В.Большаков // Материалы VIII Международного симпозиума «Энерго- ресурсоэффективность и энергосбережение», Казань, 2007.

3. Валеев, Р.Ш. Утилизация шламовых отходов водоочистки в строительной композиции с использованием минерального наполнителя, вяжущего / Р.Ш.Валеев. - Казань, 2015. - С. 1-4.

4. Вяжущее. *Патент* №2448067 от 9.07.2010U2448067C2.

5. Бараева Л.Р. Исследование возможности утилизации серы НПЗ / Л.Р. Бараева, Р.Т. Ахметова, П.А. Чудина, А.И. Туктарова // Бутлеровские сообщения. - 2017. - Т.49, - В. 1, - С. 121-127.

6. Туктарова, Г.И. Исследование взаимодействия в системе серадиоксид кремния в присутствии активатора хлорида цинка / Г.И. Туктарова, А.А. Юсупова, Т.Г. Ахметов, Р.Т. Ахметова, Н.И. Наумкина,

А.М. Губайдуллина, А.И. Лин // Вестник Казанского технологического университета. - 2012. - Т. 15. - №20. - С. 43-46.

7. Yusupova, A. Investigation of the activating effect of metal chlorides (Al, Zn, Ti, Fe) in the reactions of surface functional groups of amorphous silicon dioxide / A.Yusupova, R.Ahmetova, L.Baraeva, L.Shafigullin // Materials Today: Proceedings. - 2020. - №38, - P. 1653-1658.

СВЯЗЬ ПРАКТИКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН БАКАЛАВРИАТА ПРОФИЛЯ «ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ»

Барковская С.В.
ТулГУ, г. Тула, Россия

В 8-м семестре бакалавриата по направлению «Строительство» учебным планом предусмотрено прохождение студентами производственной практики (проектной практики), в рамках которой предусмотрена подготовка студентов к решению задач исследовательского характера. Данную практику студенты проходят в течение семестра, дискретно, т.е. в течение семестра выделяется по одному дню в неделе для постепенного выполнения студентами индивидуального задания по практике.

Задания на практику носит исследовательский характер и предполагает решение какой-либо задачи, относящейся к бакалаврской работе (далее БР), подготовка и защита которой начинается непосредственно после окончания 8-го семестра. В состав БР входит раздел «Технологическая часть», в которой студенты профиля «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» на стадии подготовки к разработке технологии производства изделия по заданию на БР подбирают сырьевые материалы, а также рассчитывают состав бетона (в случае, если задание на БР - это проектирование предприятия по производству сборных железобетонных изделий) [1, 2]. Подраздел «Технологической части» БР - «Сырье и полуфабрикаты» - проработан полностью, при условии не только расчета состава бетона, но расчета состава бетона с добавкой (пластификатором, суперпластификатором и т.д.). Для расчета состава бетона с добавкой (поверхностно-активными веществами) студенту необходимо, помимо знания концентрации и плотности раствора добавки, знать «порог» эффективности действия добавки на то или иное свойство бетонной смеси или бетона. Данные сведения можно взять из паспорта на добавку, где производитель указывает рекомендуемый диапазон. С целью более полного понимания студентами откуда берется данный диапазон в рекомендациях произво-

дителя, что такое «порог» эффективности действия добавки, а также для достоверных результатов им и выдается нижеописанные задания на проектную практику

В рамках проектной практики студент получает задание на определение эффективного количества той или иной добавки, а также расчет состава бетона с полученным значением добавки. Рассмотрим пример, задание студента «Определение «порога» эффективности действия добавки BASF MS 1640 по прочностным показателям. Расчет состава тяжелого бетона с эффективным количеством добавки BASF MS 1640». В таком случае, в дни, отведенные на практику студент делает пробные замесы, для различных расходов добавки добиваясь одинаковой подвижности, которая ему необходима в расчетах бетонной смеси бакалаврской работы, затем формует образцы для определения прочности на сжатие, испытывает их после 28-суток твердения в н.у. (сроки проведения проектной практики в течение семестра это позволяют), а затем по прочностным показателям выбирает наиболее эффективное количество добавки, при котором получена необходимая подвижность бетонной смеси и прочностные показатели, корректирует состав и после получения результатов испытания на прочности откорректированного состава у студента есть натурально определенное, практически подтвержденное количество исследуемой им добавки для представления ее в расчете сырьевых материалов (расчет состава бетона) в бакалаврской работе.

Ниже в таблице 1 приведены результаты, полученные студентом на проектной практике 8-го семестра 2020/2021 учебного года по определению «порога» эффективности действия добавки BASF MS 1640. В ходе проведения работы контролировалась подвижность бетонной смеси в рамках 3 - 4см осадка конуса и из полученной бетонной смеси заформованы образцы 10 × 10 × 10 см для определения предела прочности при сжатии в возрасте 28-ми суток твердения.

Из результатов видно, что при расходе добавки больше 0,8% от массы цемента по сухому веществу наблюдается небольшое снижение расхода воды и незначительное повышение прочности при сжатии.

Студентом для проведения корректировки состава по прочности было выбран расход добавки 0,6% от массы цемента. Далее, учитывая, что в бакалаврской работе необходим класс бетона В30 (с учетом коэффициента вариации прочности необходимо обеспечение прочности на сжатие 33,3МПа), студент выполнил корректировку состава бетона, с выполнением необходимых пробных замесов. Экономия цемента по-

сле проведения корректировки состава бетона с применением 0,6% от массы цемента добавки BASF MS 1640 составил 10% по сравнению с контрольным бездобавочным составом.

Таблица 1. Определение «порога» эффективности действия добавки BASF MS 1640

Состав	Расход добавки,% от массы цемента	Снижение расхода воды,%	Предел прочности при сжатии (28 суток), МПа
1	0	0	30,5
2	0,2	2	31,0
3	0,4	7	34,4
4	0,6	12	36,7
5	0,8	15	37,6
6	1,0	16	38,0
7	1,2	17	38,4

В результате, в ходе прохождения проектной практики и выполнения индивидуального задания получены результаты, которые могут быть перенесены в подраздел «Технологической части» БР - «Сырье и полуфабрикаты», а именно, необходимое (эффективное) количество добавки в состав бетона, а также получены практически подтвержденные данные по сокращению расхода цемента в состав бетона.

Библиографический список

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учеб. пособие // Ю.М. Баженов. - М: Высшая школа, 1990. - 455с.

2. Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов. Методическое пособие / НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство». - М.: ФАУ «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2016. - 100 с.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНОГО ГИПСА

Барковская С.В., Пчельникова В.А.
ТулГУ, г.Тула, Россия

Одним из источников сырья для производства строительных материалов является гипсовое вяжущее вещество. Несмотря на то, что изделия на основе строительного гипса экологичные, они не обладают

достаточно высокими прочностными характеристиками, а также имеют низкую водостойкость.

Эффективными способами модификации свойств строительного гипса являются минеральные компоненты, вводимые в состав гипсового вяжущего; введение поверхностно-активных веществ (ПАВ), обладающих сложным строением с включениями гидрофильной группы или получение композиционного гипсосодержащего вяжущего вещества [1].

Повышение водостойкости, морозостойкости, прочностных показателей строительного гипса можно обеспечить модификацией свойств гипсового вяжущего путем введения поверхностно-активных веществ. Такой способ наиболее доступен и распространен.

Таблица 1 - Результаты влияния введения добавки Реламикс на физико-механические свойства строительного гипса

Дозировка добавки,% от массы гипса	Влияние на нормальную густоту гипсового теста,%	Рост средней плотности гипсового камня,%	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Марка гипса	Коэффициент размягчения
Вяжущее вещество (100% гипс) + Реламикс						
0	0	0	2,0	4,0	Г - 4	0,71
0,3	- 6,8	+ 11,1	3,4	6,5	Г - 6	0,68
0,6	- 10,5	+17,5	3,4	5,4	Г - 5	0,75
0,9	- 11,6	+ 20,6	3,3	5,3	Г - 5	0,77
1,2	- 13,1	+ 26,9	3,2	4,4	Г - 4	0,72
Вяжущее вещество (70% гипс и 30% цемент) + Реламикс						
0	- 11,7	+ 7,9	3,0	6,0	Г - 6	0,71
0,3	- 16,7	+ 25,4	4,5	11,2	Г - 10	0,66
0,6	- 19,6	+ 26,9	4,2	10,8	Г - 10	0,80
0,9	- 20,5	+28,6	3,75	10,4	Г - 10	0,81
1,2	- 21,8	+30,2	3,6	9,6	Г - 7	0,90

В данной работе рассматривается влияние добавки производителя ООО «Полипласт» - суперпластификатор «Реламикс» на физико-механические свойства строительного гипса. В первом случае введение

добавки производилось к вяжущему (100% гипс). Во втором случае добавление суперпластификатора осуществлялось к вяжущему (30% цемента и 70% гипса). Результаты сравнительных испытаний образцов в возрасте 7 суток приведены в таблице 1.

Испытания проводились на строительном гипсе со следующими характеристиками: нормальная густота гипсового теста 65%, марка гипсового вяжущего Г - 4 (предел прочности при изгибе 2,0 МПа, предел прочности при сжатии 4,0 МПа).

А образцы из вяжущего (гипс 70% и цемент 30%) обладают следующими свойствами: нормальная густота гипсового теста 53%, марка гипсового вяжущего Г - 6 (предел прочности при изгибе 3,0 МПа, предел прочности при сжатии 6,0 МПа). При испытании гипсового теста на сроки схватывания введение добавок в обоих случаях приводило к более раннему схватыванию гипсового теста.

Для оценки влияния суперпластификатора в обоих случаях определялись свойства: нормальная густота гипсового вяжущего, сроки схватывания и прочностные характеристики, коэффициент размягчения. Испытания проводились на образцах-балочках размером 4 × 4 × 16 см. Прочностные показатели образцов гипса определялись как в определенном ГОСТ времени - в возрасте 2 часов, а также в возрасте 7 суток для возможности оценки влияния введения добавки на прочность гипса во времени. По результатам испытаний добавки составлены графики (рисунок 1, 2, 3).

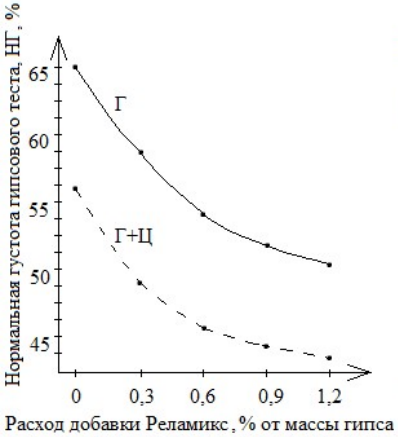


Рис. 1. Влияние добавки Реламикс на нормальную густоту гипсового камня

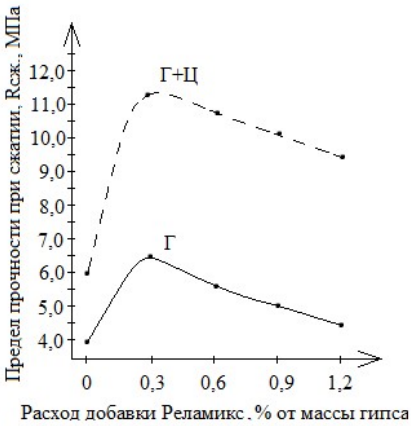


Рис. 2. Влияние добавки Реламикс на прочностные характеристики гипсового камня

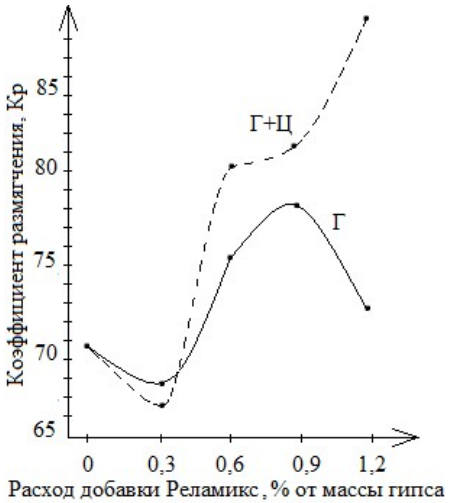


Рис. 3. Влияние суперпластификатора Реламикс на водостойкость гипсового камня

Введение добавки Реламикс в обоих случаях обеспечивает повышение водостойкости и прочностных характеристик. Однако образцы с содержанием 30% цемента обладают более высокими показателями, по сравнению с образцами из вяжущего (гипс 100%).

Библиографический список

1. Соболевский М.В. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. М.: Химия, 1975. 296 с.: ил.

2. Сураев В.Г. Гидрофобизация. Теория и практика. Часть 1. М.: Технология строительства, 2002. С. 120 - 121.

ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫЙ АСФАЛЬТОБЕТОН В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Батырев К.Г.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Марат Хуснуллин, Заместитель Председателя Правительства РФ, заявил: «Реализация национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» позволит нам обеспечить достижение главной цели, поставленной перед дорожниками главой государства, - создать в российских регионах качественную и надежную транспортную инфраструктуру».

При реализации национального проекта следует особое внимание уделять применению инновационных дорожно-строительных материалов. Од-

ним из таких современных материалов, отвечающих заявленным требованиям, является щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА).

Щебеночно-мастичный асфальт был разработан в Германии в 60-х годах XX века. На начальном этапе борьбы с разрушением асфальтированных покрытий и возросшей колейностью, проблемы решались заливкой дефектных участков специальной мастикой с последующей присыпкой щебнем и уплотнением. Отремонтированные таким образом участки покрытия показали высокую степень износостойкости. Но технология имела ряд существенных недостатков, а именно: высокую стоимость работ и низкую, по причине большого объема ручного труда, производительность.

Для устранения этих недостатков было принято решение перенести процесс приготовления смеси на стационарный асфальтобетонный завод. Однако, при транспортировке приготовленной на заводе щебеночно-мастичной смеси к объекту асфальтирования, появилась другая проблема - расслаивание смеси (вытекание битумного вяжущего с поверхности минерального заполнителя).

Ключом к решению этой проблемы стало применение стабилизирующей добавки на основе целлюлозных волокон. Оригинальный патент на идею использования натуральных целлюлозных волокон в качестве стабилизирующей добавки для щебёночно-мастичных смесей (препятствующей вытеканию вяжущего) был выдан 30 июля 1968 года строительной компании «Strabag SE».

В дальнейшем, при проведении многочисленных испытаний, неоднократно подтверждалось, что асфальтируемые с применением щебёночно-мастичных асфальтобетонных смесей дорожные покрытия обладают более высокими эксплуатационными характеристиками по сравнению с обычными асфальтобетонными. Закономерным итогом этого стало то, что в 1984 году в Германии был принят первый стандарт на применение ЩМА при выполнении работ, связанных с асфальтированием верхних слоев дорожного покрытия.

В настоящее время щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь - искусственный дорожно-строительный материал, представляющий собой смесь минеральных материалов (щебня, песка из отсевов дробления и минерального порошка), битумного вяжущего и стабилизирующей добавки.

Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь включает в свой состав 3 компонента: минеральный материал (щебень, песок, минеральный порошок); битумное вяжущее; стабилизирующую добавку.

В качестве битумного вяжущего при приготовлении щебеночно-мастичных смесей используется вязкий нефтяной дорожный битум с модифицирующими добавками или без них, а также полимерно-битумные вяжущие (ПБВ).

Стабилизирующая добавка является обязательным компонентом щебеночно-мастичного асфальта. Она требуется для того, чтобы удерживать битумное вяжущее на поверхности зерен минерального материала, препятствуя таким образом расслаиванию, которое может возникать во время промежуточного хранения и транспортировки горячей щебеночно-мастичной смеси к месту укладки. В качестве стабилизирующей добавки применяются целлюлозные волокна или прессованные гранулы из целлюлозных волокон, а также полимерные или минеральные волокна. Наибольшее распространение получили стабилизирующие добавки для ЩМА на основе целлюлозных волокон (VIATOP, TOPCEL, ANTROCEL и др.).

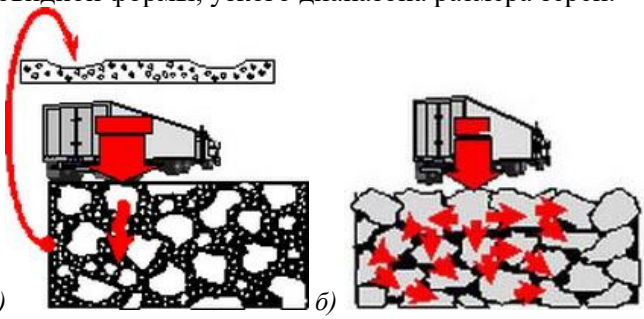
Согласно действующему в РФ ГОСТ Р 58406.1-2020 «Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия» в зависимости от номинально максимального размера применяемого минерального заполнителя щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси подразделяют на следующие типы:

- ЩМА-22 - смеси с номинально максимальным размером зерен 22,4 мм;
- ЩМА-16 - смеси с номинально максимальным размером зерен 16,0 мм;
- ЩМА-11 - смеси с номинально максимальным размером зерен 11,2 мм;
- ЩМА-8 - смеси с номинально максимальным размером зерен 8,0 мм.

Основное отличие ЩМА от обычных асфальтобетонов заключается в его жесткой каркасной структуре в слое покрытия. ЩМА укладывается более тонким слоем, чем обычный асфальтобетон. Там, где требуется укладка слоя асфальтобетона толщиной 35-50 мм, ЩМА можно уложить толщиной 25-35 мм, что позволяет уменьшить расход материала на 1м^2 до 40%. При укладке ЩМА важно строго соблюдать технологию, а именно, смесь должна укладываться горячей (не ниже 140^{o}C), недопустимо переуплотнение покрытия. При соблюдении технологии на всех этапах производства и укладки, ЩМА проявит все положительные свойства

При движении транспорта зерна крупных фракций щебня контактируют между собой, и нагрузка равномерно распределяется на значительной площади покрытия, таким образом, предотвращается неравномерный износ покрытия и образование колеи (рис. 1). В то же время мелкие фракции щебня вместе с песком и минеральным порошком,

смешавшись с битумом, образуют «мастику», заполняющую поры покрытия, придавая ему прочность и препятствуя попаданию воды и разрушению покрытия. Кроме состава смеси немалую роль играет прочность и геометрическая форма самого щебня, а также его гранулометрический состав. Для ЩМА применяется щебень из твердых горных пород, кубовидной формы, узкого диапазона размера зерен.



а) *б)*

Рис. 1 Схема распределения усилий в дорожной одежде
а) обычный асфальтобетон; б) щебеночно-мастичный асфальтобетон.

Многолетняя практика применения щебеночно-мастичного асфальта в дорожно-строительной отрасли и большое количество проведенных испытаний, подтверждают его высокую эффективность, экономическую целесообразность и удобство использования для устройства верхних асфальтированных слоев дорожного покрытия. На сегодняшний день, во многих развитых странах щебеночно-мастичный асфальт становится основным материалом, применяемым при асфальтировании скоростных дорог, автомагистралей и взлетно-посадочных полос аэродромов. Основными его преимуществами являются:

- Водонепроницаемость и морозостойкость. Достигаются благодаря большому содержанию битумного вяжущего, а также малой величине остаточной пористости в уплотненном состоянии;

- Высокая усталостная стойкость. Достигается за счет дисперсно-армирующего действия стабилизирующей добавки, а также большого содержания вяжущего и низкой остаточной пористости;

- Повышенная сдвигоустойчивость. Обусловлена более высоким, в сравнении со стандартным асфальтобетоном, статическим пределом текучести при сдвиге.

- Низкая истираемость и стойкость к разрушающему воздействию шипованных автомобильных шин. Достигается за счет применения в составе щебеночно-мастичной смеси щебня из прочных горных пород, а также за счет высокого содержания мастики (асфальтовяжущего вещества).

- Шероховатость покрытия и высокие фрикционные свойства (уровень сцепления дорожного покрытия с колесами). Способствует повышению безопасности движения транспортных средств на высоких скоростях.

- Повышенная трещиностойкость. Хотя степень устойчивости щебеночно-мастичного асфальтобетонного покрытия к температурному трещинообразованию зависит в большей степени от состава щебеночно-мастичной смеси, устойчивость к усталостному трещинообразованию свойственна всем ЩМА.

- Низкий уровень шума. Покрытия из ЩМА отличаются более низким уровнем шума от автомобильного движения чем обычные асфальтобетонные покрытия (в среднем на 4-5 дБ).

Совокупность вышеперечисленных преимуществ щебеночно-мастичного асфальтобетона позволяет существенно увеличить межремонтные сроки дорожного покрытия, повысить комфорт, качество и безопасность движения.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 58406.1-2020 «Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия»;

2. ПНСТ 129-2016 «Смеси асфальтобетонные щебеночно-мастичные. Метод объемного проектирования»;

3. ПНСТ 265-2018 «Проектирование нежестких дорожных одежд»;

4. СП 34.13330.2021 «Автомобильные дороги»;

5. European standard for SMA prEN 13108-6.

НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ПОЛИМЕРЫ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Батырев К.К.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

В наше время в мире наблюдается высокий рост научного интереса к нанотехнологиям во всех отраслях жизни, в том числе и в строительной индустрии. Данные технологии используются с целью улучшения свойств «системы», недоступных каждому компоненту этой «системы» по отдельности. Значительное внимание в этом направлении дорожными специалистами и организациями уделяется использованию для строительства оснований дорог местных грунтов или минеральных смесей от капитально ремонтируемых дорог, подвергнутых холодному ресайклингу и укрепленных добавками минеральных связующих (це-

мент, известь, активные добавки типа «Дорцем» и др.), специально подобранных смесей минеральных связующих с органическими добавками (битумы, смолы разного состава) или композитами на основе широкого круга полимерных материалов.

Возможность применения укрепленных грунтов и минеральных смесей для строительства оснований дорог или дорожных покрытий допускается в соответствии с ГОСТ 30491-97, ГОСТ 30491-2012 и ГОСТ 12801-98. Введение наночастиц в качестве модификаторов позволяют повысить прочностные характеристики различных материалов, их срок службы, устойчивость по отношению к внешним воздействиям, таким как колебания температуры и влажности, загрязнение атмосферного воздуха [1].

В работах [2, 3] было показано, что дорожно-строительный материал на основе полимерно-битумное вяжущее (ПВБ) будет обладать повышенной устойчивостью против образования остаточных деформаций (колеи) летом, поперечных температурных трещин зимой и усталостной трещиностойкостью (выносливостью) при повторном изгибе. Также был проведен анализ влияния различного рода полимерно-битумных вяжущих и полимерных добавок на физико-механические свойства горячих асфальтобетонных смесей, из которых можно сделать вывод о положительном влиянии добавок, а именно повышается предел прочности при температуре +20 и $+50^0$С в среднем на 25-35%, увеличивается коэффициент водостойкости и ряд других показателей [4].

В заключении можно сказать, что применение полимерных позволяет значительно повысить многие характеристики строительных материалов. Например, прочностные характеристики, их срок службы, уменьшить образование дефектов на покрытии, вследствие внешних воздействий.

Библиографический список

1. Клюев С.В. Применение композиционных вяжущих для производства фибробетонов // Технологии бетонов. 2012. № 1-2 (66- 67). С. 56-57.

2. Бонченко Г.А. Асфальтобетон. Сдвигоустойчивость и технология модифицирования полимером. -М. Машиностроение, 1994. -176 с.

3. Ковалев Я.Н. Капсулирование битума химически совместимой полимерной добавкой, свойства модифицированного вяжущего и асфальтобетона на его основе / Я.Н. Ковалев, В.Н. Романюк // Наука и техника в дорожной отрасли. - 2007. - №1. - С. 29 - 31.

4. Чернов С.А., Чирва Д.В. Влияние полимерно-битумного вяжущего на процессы колееобразования в верхних слоях покрытий автомобильных дорог. - Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», 2012, №4.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЛАЖНОСТИ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ В ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Белов В.В.
ТГТУ, г. Тверь, Россия

На сегодняшний день существует немало способов выравнивания основания пола под дальнейшую укладку напольных покрытий. Наиболее простым и эффективным в укладке является стяжка пола различными смесями [1]. В первую очередь это касается стяжки пола на цементном вяжущем, применяемом для заливки не только черновых, но и финальных слоев. Работа, связанная с получением ровной поверхности пола при помощи цементных вяжущих, должна соответствовать всем требованиям нормативного документа СНиП 2.03.13-88.

Технология изготовления традиционных стеновых материалов, получаемых методом полусухого прессования (керамический кирпич и плитки, силикатный кирпич и др.) характеризуется высоким расходом энергоносителей. В технологии прессования большое значение имеет подбор оптимальной влажности смеси с целью получения наибольшей плотности прессовки после снятия давления [1].

Формирование структуры сырьевой смеси, которая во многом наследуется в структуре и свойствах готовых изделий, происходит под влиянием аутогезии частиц порошка. Аутогезия представляет собой силовое взаимодействие между контактирующими частицами и определяется разрывной прочностью контактов между ними. Сила аутогезии складывается из сил различной природы, а именно: силы молекулярного взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса и когезии), электрические силы, капиллярные силы и силы механического зацепления. Аутогезия определенного порошкового материала может быть обусловлена действием нескольких сил одновременно. Взаимно исключающими являются только электрические и капиллярные силы [2, 3].

Аутогезия в технологических процессах оказывает как положительное, так и отрицательное влияние. В случаях, когда необходимо уменьшить дисперсность порошков или предотвратить расслаивание порошковой смеси, аутогезия оказывает благоприятное влияние. В то же время, в процессах смешивания однородность смеси может существенно нарушаться в результате образования агрегатов [2, 4-6, 8, 9].

Силы аутогезии способствуют слеживанию, образованию арочных структур, образованию сводов при истечении порошков из бункеров и иных емкостей [2, 5-7, 10-13].

Исследование влияния аутогезии порошковых материалов на структуру и свойства сырьевой смеси в технологии прессованных керамических изделий является актуальной задачей для оптимизации рецептуры смеси и самой технологии. Это объясняется тем фактом, что технологические процессы переработки, хранения и транспортировки сырьевой смеси, а также формования изделий широко применяются при производстве не только керамики, но и огнеупоров, бетонов, композиционных материалов разного назначения, биоматериалов, электроники, продуктов питания и косметики, и везде достоверно установлено значение сил аутогезии [2, 6, 14].

Структурообразование в дисперсных системах является результатом сил межчастичного взаимодействия: межмолекулярного, электрического, капиллярного. Хотя большое количество исследований посвящено изучению адгезии частиц (аутогезии) в дисперсных системах, конкретные вопросы, связанные с типом структурных элементов и структур в результате доминирующей роли капиллярных сил адгезии в структурообразовании, до недавнего времени подробно не рассматривались. Так же, как структуры, образовавшиеся в результате коагуляции, называются коагуляционными, структуры, образовавшиеся в результате действия сил капиллярной связи, мы предложили называть капиллярными [15].

Эксперименты проводились на керамическом пресс-порошке распылительной сушки для получения облицовочных плиток. Химический состав пробы пресс-порошка изображен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав керамического пресс-порошка

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	R_2O_3	ппп
59,56	19,8	1,0	2,44	2,19	6,26	8,39

Зерновой состав пресс-порошка определяли при помощи иабора сит с размерами ячеек: 1 мм; 0,5 мм; 0,25 мм; 0,1 мм. По данным рассева пресс-порошка рассчитывали частные остатки в процентах, равные отношению остатков на данных ситах к общей массе навески, которая составляла 200 г, а также полные остатки в процентах, равные сумме частных остатков на данных ситах и на ситах с большим размером ячеек. В таблице 2 приведен гранулометрический состав пресс-порошка, использованного в работе.

Таблица 2. Гранулометрический состав керамического пресс-порошка

Размеры ячеек сита, мм	1	0,5	0,25	0,1
Частные остатки,%	0,025	1,325	63,375	25
Полные остатки,%	0,025	1,35	68,725	93,725

Данные таблицы 2 свидетельствует о том, что около 70% пресс-порошка имеют размеры гранул от 0,25 до 0,5 мм.

Технологическими свойствами пресс-порошка являются его насыпная плотность, сыпучесть и угол естественного откоса. Насыпную плотность определяли по известной методике, заключающейся в засыпке цилиндрического стакана емкостью 50 см^3 из воронки с диаметром отверстия 15 мм. Воронку устанавливали на 10 см выше верхнего края стакана, и таким образом через воронку в стакан засыпали 150 г пресс-порошка. После наполнения стакана с образованием излишков пресс-порошка в виде конуса его срезали вровень с краями стакана без уплотнения пресс-порошка.

Насыпную плотность пресс-порошка в пересчете на сухое вещество вычисляли по формуле

$$\rho_{\text{н}} = \frac{m_1 - m_2}{50\left(1+W\right)},$$

где m_1 - масса сосуда с пресс-порошком, г; m_1 - масса сосуда, г; W - влажность пресс-порошка.

Для определения пористости отдельных гранул пресс-порошка и пресс-порошка в целом в данной работе предложена специальная методика. Как известно, пористость или пустотность сыпучего материала определяется по формуле

$$П = \frac{\rho - \rho_{\text{н}}}{\rho} \cdot 100, \qquad (1)$$

где ρ - истинная плотность; $\rho_{\text{н}}$ - насыпная плотность.

Истинную плотность пресс-порошка измеряли с помощью объемомера Ле-Шателье-Кандло. Поскольку гранулы пресс-порошка в воде распадались на мельчайшие частицы, то объем вытесненной жидкости в объемомере был практически равен абсолютному объему керамического вещества, составляющего гранулы.

Объем гранул вместе с порами определялся в том же объемомере при его заполнении керосином. Порошок перед засыпкой увлажнялся до 10%, что примерно соответствует заполнению пор в гранулах водой. Поскольку вода и керосин взаимно несмачиваемые и несмешиваемые

жидкости, то влажные гранулы в керосине сохраняли свою форму и вытесняли керосин на величину, численно равную своему объему вместе с внутренними порами. По указанной выше влажности пересчитывали высыпанную в объемомер навеску пресс-порошка на сухое вещество, а отношение последнего к вытесненному объему керосина принимали за плотность гранул пресс-порошка.

Пористость гранул рассчитывается по следующей формуле

$$П_{г} = \frac{\rho - \rho_{г}}{\rho} \cdot 100,$$

где $\rho_{г}$ - плотность гранул пресс-порошка.

Межзерновая пористость (пустотность) пресс-порошка в свободно насыпанном состоянии определяется по формуле

$$П_{мз} = \frac{\rho_{г} - \rho_{н}}{\rho} \cdot 100.$$

Общая пористость пресс-порошка в уплотненном состоянии вычисляется по формуле, аналогичной (1), только вместо $\rho_{н}$ в эту формулу подставляется средняя плотность уплотненного пресс-порошка $\rho_{о}$.

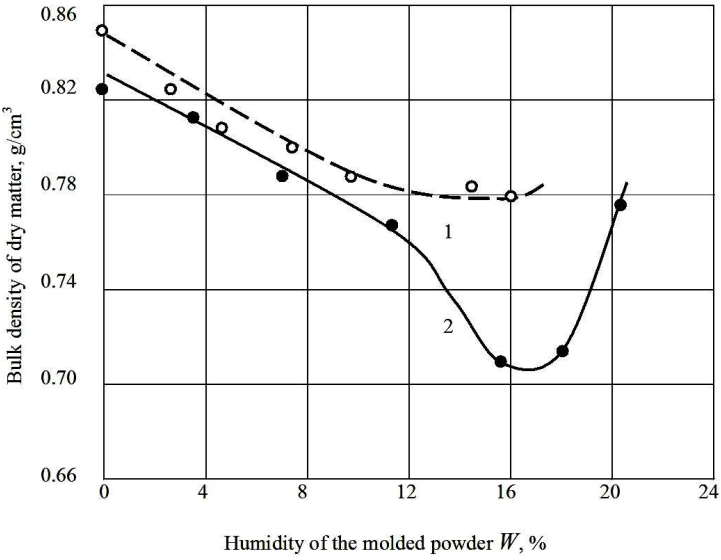


Рис. 1. Зависимости насыпной плотности пресс-порошка по сухому веществу от влажности при измерениях с воронкой (1) и желобом (2)

В экспериментах по изучению влияния влажности пресс-порошка на его свойства и уплотнение дополнительное увлажнение пресс-порошка производилось пульверизацией. После увлажнения для отделения незначительного количества комков пресс-порошок пропускали через сито 1,25 мм. С целью получения влажности, меньшей по сравнению с естественной, пресс-порошок подсушивали в комнатных условиях.

Данные по насыпной плотности в пересчете на сухое вещество керамического пресс-порошка распылительной сушки приведены на рисунке 1. Для сравнения на том же рисунке приведены данные, полученные при измерении насыпной плотности того же пресс-порошка от влажности при помощи наклонного под углом 60° желоба, установленного выше сосуда на 10 см. Насыпная плотность пресс-порошка в обоих случаях с увеличением влажности уменьшается, что объясняется образованием агрегатов из гранул и увеличением межзерновой пустотности пресс-порошка в результате действия капиллярной аутогезии.

Рисунок 1 показывает, что значения насыпной плотности пресс-порошка зависят от способа ее измерения. Поэтому использование данных, полученных в условиях лаборатории, при расчете реальных условий засыпки пресс-порошка в пресс-формы прессов возможно только после изучения этих условий и их моделирования. В то же время эту характеристику пресс-порошка первым способом (через воронку) при влажности пресс-порошка более 16% из-за сильного комкования измерить нельзя, и для выявления зависимости во всем диапазоне влажности необходимо воспользоваться желобом. В этом случае обнаруживается минимум насыпной плотности пресс-порошка при влажности около 17%, затем насыпная плотность пресс-порошка резко возрастает.

Таблица 3. Значения насыпной плотности пресс-порошка, плотности его гранул, а также межзерновой пористости (пустотности) пресс-порошка и пористости гранул

Влажность пресс-порошка W,%	$\rho_н$, г/см^3	$\rho_г$, г/см^3	$П_{мз}$,%	$П_г$%
0	0,85	1,80	52,8	28,6
4,8	0,813	«	54,8	«
7,7	0,805	«	55,3	«
10	0,792	«	56,0	«
16	0,785	«	56,5	«

Результаты измерений сыпучести и угла естественного откоса пресс-порошка при изменении влажности от 2% до 15% показали, что

эти характеристики мало зависят от влажности в указанном диапазоне и соответственно равны 45-46 г/с и 20-22° [16].

Значения насыпной плотности пресс-порошка, плотности его гранул, а также межзерновой пористости (пустотности) пресс-порошка и пористости гранул при истинной плотности керамического вещества 2,52 г/см3 приведены в таблице 3.

Расчетные данные показывают, что пористость гранул составляет около 30% общей пористости пресс-порошка в свободно насыпном состоянии. Этот показатель является важной характеристикой пресс-порошка, отражающей его микроструктуру, в то время как насыпная плотность пресс-порошка, характеризующая макроструктуру, зависит, прежде всего, от зернового состава пресс-порошка.

По гранулометрическому составу пресс-порошка согласно методике [16, 17] определен объемно-поверхностный диаметр или средневзвешенный размер гранул:

$$d_{3,2} = \frac{\sum g_i}{\sum \frac{g_i}{d_i}},$$

где g_i - доля гранул диаметром d_i,%, по массе; d_i - средний размер для частного остатка пресс-порошка, мм.

Таблица 4. Объемно-поверхностный диаметр и пористость гранул пресс-порошка в различных пробах и фракциях

Номера проб	1	2	3	4
Объемно-поверхностный диаметр порошка, мм	0,281	0,303	0,298	0,299
Пористость тела гранул,%	29,9	32,9	31,4	32,9
Фракции, мм	1-0,5	0,5-0,315	0,315-0,25	0,25-0,1
Пористость тела гранул,%	33,2	33,0	30,6	25,8

Значения объемно-поверхностного диаметра гранул пресс-порошка и пористости гранул в различных пробах пресс-порошка (таблица 4) показывают, что имеется определенное соответствие между этими значениями, а именно пористость гранул уменьшается по мере уменьшения размера гранул, что подтверждается литературными данными [17].

На рисунке 2 приведены зависимости предельного напряжения сдвига, определенные с помощью пенетрационного реометра ПРБ-2 [18], от влажности пресс-порошка при различной плотности образцов

после прессования: 0,95; 1,0; 1,05 и 1,1 г/см^3. Данные показывают, что при увеличении влажности значения предельного напряжения сдвига, а также величина капиллярного сцепления в данных системах, увеличиваются, достигают максимума при определенной влажности $W_{мс}$, а затем уменьшаются.

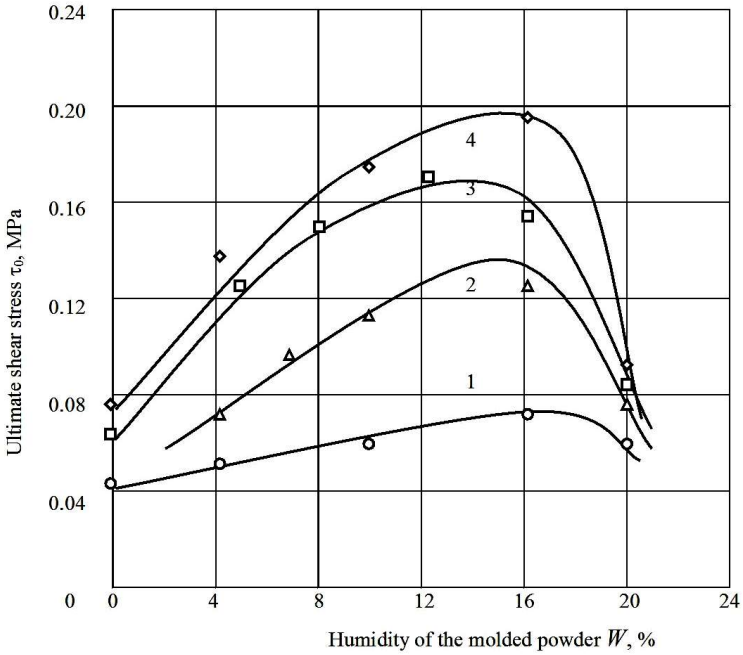


Рис. 2. Предельное напряжение сдвига пресс-порошка в зависимости от влажности при различной плотности прессованных образцов: 0,95 (1); 1,0 (2); 1,05 (3) и 1,1 (4) г/см^3

Из теории капиллярного сцепления следует, что капиллярная аутогезия между двумя шарообразными частицами имеет наибольшую величину в момент образования жидкостного мениска в зоне их контакта. Очевидно, что мениск между гранулами пресс-порошка образуется после заполнения их пор влагой. Рассчитаем влажность $W_{мс}$ пресс-порошка, соответствующую этому моменту по формуле

$$W_{мс} = \frac{П_г \cdot \rho_ж}{\rho_г}, \qquad (2)$$

где $\rho_ж$ - плотность жидкой фазы (воды).

Подставив значения $П_г$ и $\rho_г$, приведенные в таблице 3, получим значение $W_{мс}$, равное 15,9%, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными (см. рисунок 2).

Таким образом, капиллярное сцепление, являющееся основой прочности свежесформованного полуфабриката, имеет максимальное значение при определенной влажности, величину которой можно рассчитать по формуле (2).

Зависимости плотности пресс-порошка в уплотненном состоянии от влажности (рисунок 3) показывают, что с увеличением влажности пресс-порошка его плотность увеличивается, достигает максимума при определенной влажности, а затем уменьшается.

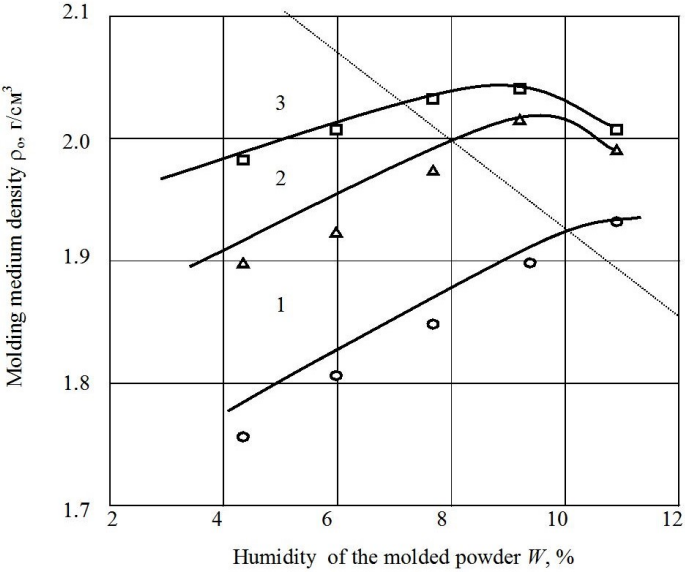


Рис. 3. Зависимости плотности пресс-порошка в уплотненном состоянии от влажности при давлении прессования: 1 - 10 МПа; 2 - 20 МПа; 3 - 30 МПа

На рисунке 3 пунктирная линия соответствует критической влажности, при которой система при данном давлении прессования будет иметь двухфазное состояние и максимальную плотность. При двухфазном состоянии системы все поры насыщаются водой. Вплоть до данного состояния при увеличении влажности плотность пресс-порошка в уплотненном состоянии возрастает Эти зависимости существенно отличаются от зависимостей насыпной плотности пресс-порошка (см.

рисунок 1), характеризующихся минимумом насыпной плотности при влажности, близкой к значению $W_{мс}$.

Эти различия объясняются тем, что при свободной засыпке с ростом влажности до указанной влажности, соответствующей максимуму капиллярного сцепления, происходит увеличение агрегирования пресс-порошка под действием капиллярной аутогезии в то время, как при уплотнении пресс-порошка из пластичного глиняного сырья определяющее значение имеет уменьшение сил внутреннего трения между частицами с сохранением аутогезионных связей.

Прессование керамических пресс-порошков при давлениях, принятых в производстве керамических изделий, критические значения влажности в 1,5-2 раза меньше влажности $W_{мс}$. Таким образом, достижение системой максимальной плотности происходит задолго до той влажности ($W_{мс}$), при которой капиллярное сцепление может достичь своего максимума и что проявляется в случае зависимостей насыпной плотности пресс-порошка.

Следовательно, при реальных условиях прессования керамических пресс-порошков необходимо определять критические значения влажности, которые соответствуют не только макимально возможному уплотнению прессовки, но и макимально возможному значению в данных условиях капиллярному сцеплению. Эти значения влажности являются наилучшими также для увеличения прочности готовых изделий [19].

Прессование сырьевой смеси оптимальной влажности способствует перестройке макроструктуры смеси, прежде всего, снижая количество макропор и повышая прочность контактных зон, а также среднюю плотность прессовки. При этом прочность керамических изделий с оптимальной структурой будет максимальной, что будет обеспечивать снижение энергоемкости изделий и повышение их качественных показателей.

Библиографический список

1. Миронов В.А. Оптимизирование композиций для изготовления строительных смесей: Научное издание / В.А. Миронов, В.В. Белов, А.И. Голубев, М.А. Смирнов. СПб: РИА «Квинтет», 2008. 416 с.

2. Зимон А. Д., Андрианов Е. И. Аутогезия сыпучих материалов. - Металлургия, 1978.

3. Удалов Ю.П., Германский А.М., и др. Технология неорганических порошко-вых материалов и покрытий функционального назначения. Учебное пособие. - С. Пе-тербург: Янус, 2001. - 428 с.

4. Zimon A. D. Adhesion of dust and powder. - Springer Science & Business Media, 2012.

5. Li, Hongming. Impact of cohesion forces on particle mixing and segregation. Diss. University of Pittsburgh, 2006.

6. Halidan M. et al. The effect of interparticle cohesion on powder mixing in a ribbon mixer //AIChE Journal. - 2016. - Т. 62. - №. 4. - С. 1023-1037.

7. Podczeck F., Newton J. M., James M. B. Adhesion and autoadhesion measurements of micronized particles of pharmaceutical powders to compacted powder surfaces //Chemical and pharmaceutical bulletin. - 1995. - Т. 43. - №. 11. - С. 1953-1957.

8. Bridgwater J. Fundamental powder mixing mechanisms //Powder Technology. - 1976. - Т. 15. - №. 2. - С. 215-236.

9. Orr N. A., Shotton E. Mixing of cohesive powders //Chemical Engineer-London. - 1973. - №. 269. - С. 12-19.

10. Parteli E. J. R. et al. Attractive particle interaction forces and packing density of fine glass powders //Scientific reports. - 2014. - Т. 4. - С. 6227.

11. Ku N. et al. Auto-granulation of fine cohesive powder by mechanical vibration //Procedia engineering. - 2015. - Т. 102. - С. 72-80.

12. Ku N. Evaluation of the behavior of ceramic powders under mechanical vibration and its effect on the mechanics of auto-granulation. - Rutgers The State University of New Jersey-New Brunswick, 2015.

13. Castellanos A. The relationship between attractive interparticle forces and bulk behaviour in dry and uncharged fine powders //Advances in physics. - 2005. - Т. 54. - №. 4. - С. 263-376

14. Chirone R. et al. A comparison between interparticle forces estimated with direct powder shear testing and with sound assisted fluidization //Powder Technology. - 2018. - Т. 323. - С. 1-7.

15. Белов В.В. Капиллярное структурообразование в дисперсных системах, применяемых для производства строительных материалов / В.В. Белов // Известия вузов. Строительство. 2002. № 9. С. 46-51.

16. Новая технология керамических плиток / Под ред. В.И. Добужинского. - М.: Стройиздат, 1977.

17. Кондрашев Ф.В., Мишулович Л.Я., Павлов В.Ф. Производство керамических плиток для полов. - М.: Стройиздат, 1971.

18. Берней И.И., Белов В.В. Теория работы конического пластометра, основанная на истинной картине деформирования среды // Физико-химическая механика: Журн. Болгарской акад. наук. 1982. № 10. С. 12-14.

19. Суслов А.А., Шмитько Е.И., Важинский А.Т. Роль внутренних сил в процес-сах раннего структурообразования керамических формовочных масс // Известия вузов. Строительство. 1998. № 11-12. С. 63-68.

ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бордокина Е.А.
СГУПС, г. Новосибирск, Россия

Одна из основных экологических проблем производства строительных материалов связана с громадными объёмами производства, добычей и переработкой свыше 2 млрд. т природных материалов. С этим связано широкомасштабное отчуждение, нарушение и загрязнение сельскохозяйственных угодий, поскольку сырье для строительных материалов для уменьшения транспортных расходов, как правило, добывается как можно ближе к району строительства. А районы интенсивного строительства - это густонаселенные районы, удобные для выращивания сельскохозяйственных культур. Один из путей решения проблемы заключается в рекультивации нарушенных земель, устройстве прудов на месте карьеров и их использование для культурных целей, рыборазведения и т.д.

Главную опасность представляет собой загрязнение атмосферы. На величину концентрации вредных примесей в атмосфере влияют метеорологические условия, определяющие перенос и рассеивание примесей в воздухе -смена направления скорости ветра и др. Нежелательной с точки зрения загрязнений приземного слоя атмосферы является инверсия температуры в атмосфере. Суть этого процесса состоит в том, что происходит повышение температуры воздуха с высотой вместо обычного для нижних слоев атмосферы убывания температуры на 0,5-0,6 градуса на каждые 100 м высоты. Инверсия температуры препятствует развитию вертикальных движений воздуха и может способствовать образованию зон с повышенным содержанием примесей в приземном слое атмосферы. Экологические исследования, проведенные в последние десятилетия во многих странах мира, показала, что все возрастающее разрушительное воздействие антропогенных факторов на окружающее среду привело ее на грань кризиса. Среди различных составляющих экологического кризиса (истощение сырьевых ресурсов нехватка чистой пресной воды возможные климатические катастрофы). Наиболее угрожающий характер приняла проблема загрязнения незаменимых природных ресурсов-воздуха, воды почти отходами промышленности и строительства. Большие количества сточных вод образуются в промышленности нерудных строительных материалов (например, песка и щебня). Сточные воды после промывки материалов содержат 50-60% механических примесей, в том числе 48-84% песка,16-52% пылевидных

и глинистых частиц. По технологическим нормам содержание взвешенных веществ в воде, поступающей на промывку, не должна превышать г\л. Замкнутые водооборотные системы разрабатываются и для других предприятий производства строительных материалов. В целом же промышленность строительных материалов не имеет принципиальных технических и технологических препятствий для организации своей деятельности по безотходной технологии.

Объём сточных вод, поступающих от предприятий промышленности строительных материалов в городскую канализацию и водоёмы, составляет около 650 млн. $м^3$/год. В результате в водоёмы ежегодно поступает до 280 тыс. т солей, 28 тыс. т минеральных и 4 тыс. т органических веществ, высокотоксичные соединения шестивалентного хрома, фенолов, щелочей и нефтепродуктов. Такое большое количество загрязнений, сбрасываемых со сточными водами предприятий строительной индустрии, объясняется недостаточно высокой эффективностью применяемых очистных сооружений и нерациональными схемами водного хозяйства. Коэффициент водооборота в целом по отрасли составил 49%; наиболее высокий водооборот - 58% был достигнут в цементной и стекольной промышленности.

Препятствием для повторного использования сточных вод является также загрязнение их в значительном количестве грубодиспергированными примесями. Для достижения требуемого содержания взвешенных веществ (100 мг/л) разработан метод очистки в напорных гидроциклонах. Применение этих циклонов позволяет кроме воды возвращать в технологический цикл и цемент, что сокращает потери сырья.

Большие количества сточных вод образуются в промышленности нерудных строительных материалов (например, песка, щебня). Сточные воды после промывки материалов содержат 50-160 г/л механических примесей, в том числе 48-84% песка и 16-52% пылевидных и глинистых частиц. По технологическим нормам содержание взвешенных веществ в воде, поступающей на промывку, не должно превышать 2 г/л.

Загрязнённый поток сточных вод после промывки щебня на вибрационных грохотах направляется в гидроциклоны для выделения песка, который затем обезвоживается в классификаторе и передаётся на склад готовой продукции. Верхний слив из гидроциклонов и классификатора обрабатывается коагулянтом и направляется в гидроциклоны. Осадок от гидроциклонов в количестве 10-20% от расхода очищаемых сточных вод перекачивается в шламонакопители, а осветлённая вода направляется на повторное использование.

В целом же промышленность строительных материалов не имеет принципиальных технических и технологических препятствий для организации своей деятельности по безотходной технологии.

ОБЩАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЖЕСТКОГО СООРУЖЕНИЯ С ВЫСОКО РАСПОЛОЖЕННЫМ ЦЕНТРОМ СИЛ ТЯЖЕСТИ

В.К. Иноземцев, В.И. Редков
СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

К объектам с высоко расположенным центром сил тяжести, склонным к опрокидыванию, можно отнести заводские трубы, водонапорные башни, радиомачты, телевизионные башни, опоры высоковольтных линий передач, подпорные стенки. В XX веке к ним добавились высотные здания и сооружения. Особенность решения задачи об общей устойчивости сооружений, подвергающихся опасности опрокинуться, в том, что оно находится в отрыве от других задач устойчивости сооружений. Рассмотрим это решение, тем более что и до настоящего времени на него встречаются ссылки в учебной литературе.

Вертикальная и горизонтальная равнодействующие сил, действующих на объект с высоко расположенным центром тяжести создают удерживающий $M_{УД}$ и опрокидывающий $M_{ОПР}$ моменты относительно ребра возможного опрокидывания. Если точка А на линии действия равнодействующей сил P и Q, обозначенной R, находится внутри площади фундамента объекта, то объект устойчив против опрокидывания. При выходе точки А за пределы этой площади он не устойчив против опрокидывания. При нахождении точки А на границе площади фундамента объекта, объект находится в пограничном состоянии. Таким образом, устойчивость оценивается коэффициентом против опрокидывания *k*:

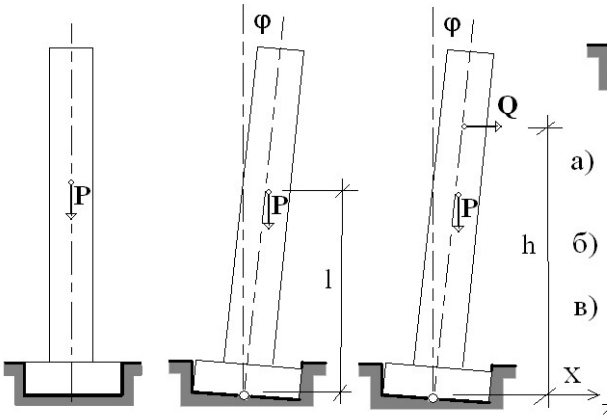
$$k = \frac{M_{УД}}{M_{ОПР}} \qquad (1)$$

Недостоверность расчета по формуле (1) состоит в отсутствии учета деформируемости основания, расположенного под фундаментной плитой. Пренебрежение описанием работы основания высотного объекта приводит к очевидному парадоксу для задачи об общей устойчивости жесткой колонны, опирающейся на грунтовое основание (рис. 1а).

При отсутствии горизонтальной силы, опрокидывающий момент равен нулю. В этом случае по формуле (1) получится, что коэффициент устойчивости равен бесконечности. Колонна, сколь бы высокой она ни

была, всегда будет устойчивой. Очевидно, что податливость грунтового основания этого не допускает.

Более правильная расчетная схема данной задачи была предложена Г. Крамером и Н.П. Павлюком [3, 4], а несколько позже и Я.Б. Львиным [1, 2]. В их работах была предложена расчетная схема общей устойчивости жесткой колонны на упругом основании (рис. 1б).



а б в

Рис. 1

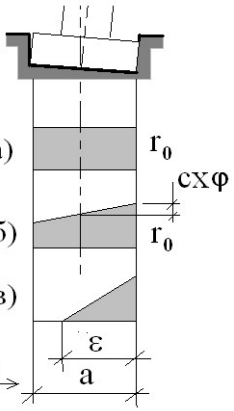


Рис. 2

В качестве модели упругого основания была принята модель Э. Винклера, согласно которой реакция основания в каждой точке по плану фундамента пропорциональна осадке подошвы фундамента (рис. 1а, 2а). Полученное при этом значение силы тяжести колонны P является критической нагрузкой, при которой колонна теряет устойчивость исходного строго вертикального положения равновесия. Г. Крамер и Н.П. Павлюк [3, 4] предложили принимать в качестве коэффициента устойчивости отношение

$$k = \frac{P_{kp}}{P} = \frac{cJ}{Pl} \quad . \tag{2}$$

где c - коэффициент пропорциональности, характеризующий жесткость основания; l - высота центра тяжести колонны, b - размер подошвы фундамента, перпендикулярно плоскости чертежа; J - момент инерции площади основания относительно оси перпендикулярной плоскости чертежа.

Таким образом, свободно стоящая на упругом основании жесткая колонна получила количественную оценку общей устойчивости в случае, когда горизонтальные силы отсутствуют.

Полученное решение задачи устойчивости колонны в отсутствии горизонтальных сил можно обобщить на случай, когда на колонну действует горизонтальная сила Q (рис. 1в). Для этого необходимо рассмотреть последовательность возможных состояний равновесия при постепенном увеличении горизонтальной силы и угла ϕ. Уравнение моментов должно быть дополнено моментом горизонтальной силы Q:

$$-Qh - Pl\phi + c\phi J = 0, \tag{3}$$

где h - ордината точки приложения горизонтальной силы,

Полученное уравнение показывает, что в определенном диапазоне изменения горизонтальной силы Q, зависимость между углом отклонения колонны ϕ и силой Q линейная:

$$Q = \frac{cJ - Pl}{h}\phi. \tag{4}$$

Прослеживая постепенное увеличение горизонтальной силы Q, можно видеть, что линейная зависимость справедлива пока эпюра реакций основания имеет вид трапеции (рис. 1б, 2б). Дальнейшее увеличение горизонтальной силы и рост угла ϕ приводит к изменению эпюры реакций основания, эпюра становится треугольной (рис. 1в, 2в). Левая часть подошвы фундамента не испытывает реактивного отпора основания и происходит частичный отрыв подошвы фундамента от основания. Для прямоугольного в плане фундамента колонны со сторонами a и b угол ϕ, при котором трапециевидная эпюра переходит в треугольную, определяется формулой

$$\phi_1 = \frac{2P}{ca^2b}. \tag{5}$$

Соответствующее значение горизонтальной силы равно

$$Q_1 = \frac{Pa}{6h}\left(1 - \frac{Pl}{cJ}\right). \tag{6}$$

При дальнейшем увеличении угла ϕ момент реакции основания определяется выражением

$$M_r = P\left(\frac{a}{2} - \frac{\varepsilon}{3}\right), \tag{7}$$

где ε - ширина зоны контакта основания с подошвой:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2P}{\phi bc}}\,. \tag{8}$$

В этом случае уравнение моментов (3) получит вид

$$-Qh - Pl\phi + P\left(\frac{a}{2} - \frac{1}{3}\sqrt{\frac{2P}{\phi bc}}\right) = 0\,. \tag{9}$$

Полученное уравнение показывает нелинейную связь между горизонтальной силой Q и углом ϕ

$$Q = \frac{P}{h}\left(\frac{a}{2} - \frac{1}{3}\sqrt{\frac{2P}{\phi bc}} - l\phi\right). \tag{10}$$

Таким образом, вся последовательность возможных состояний равновесия колонны при постепенном увеличении горизонтальной силы и угла ϕ, образует график (рис. 3), представленный линейной зависимостью (6) и нелинейной зависимостью (10).

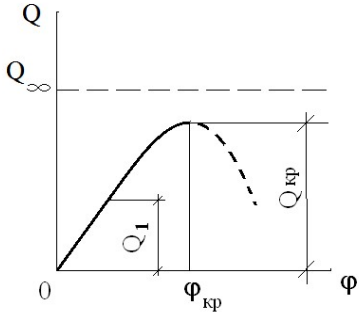


Рис. 3

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

Максимум кривой на рис. 3 определяет наибольшее значение горизонтальной силы, при котором еще возможно равновесие колонны $Q = Q_{кр}$ ($Q_{кр}$ - критическая нагрузка).

Здесь следует отметить, что потеря общей устойчивости колонны происходит при исчезновении равновесных форм при $Q > Q_{кр}$, так как при превышении значения горизонтальной силы критической величины колонна выходит из состояния равновесия. В диапазоне изменения

значения горизонтальной силы $Q_1<Q<Q_{кр}$ имеют место два равновесных состояния, однако можно показать, что восходящий участок кривой описывает совокупность устойчивых состояний равновесия, а нисходящий участок, показанный штриховой линией описывает неустойчивые состояния равновесия колонны.

Очевидно, возникает вопрос о том, насколько различаются простое решение задачи устойчивости колонны против опрокидывания, позволяющее определить удерживающий и опрокидывающий моменты и найти коэффициент устойчивости против опрокидывания k и решение, определившее величину горизонтальной критической нагрузки, при превышении которой происходит исчезновении равновесных форм колонны. Основное различие между этими двумя решениями состоит в том, что первое принимает предположение об абсолютной жесткости основания, при котором $c \to \infty$ и:

$$Q_{\infty} = \frac{Pa}{2h}. \tag{11}$$

Это значение горизонтальной силы получено из условия предельного состояния равновесия, при котором коэффициент устойчивости против опрокидывания k=1.

Второе решение, учитывающее условие упругой деформируемости основания колонны, дает другую оценку предельного состояния равновесия колонны, выраженную через максимум кривой равновесных состояний (рис. 3). Максимум достигается при следующем значении угла отклонения колонны $\phi_{кр}$ и соответствующей критической силы $Q_{кр}$:

$$\phi_{кр} = \left(\frac{1}{6l} \sqrt{\frac{2P}{bc}} \right)^{2/3}, \tag{12}$$

$$Q_{кр} = \frac{Pa}{2h} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{Pl}{cJ}} \right). \tag{13}$$

Таким образом, приходим к выводу $Q_{\infty} > Q_{кр}$. Отсюда следует, что простое решение и, соответственно, коэффициент устойчивости против опрокидывания k преувеличивают действительный запас устойчивости. Это преувеличение может быть значительным, так как оно зависит от характерного отношения $cJ/(Pl)$. В [5] дана оценка такого преувеличения коэффициента устойчивости для колонны, характеризуемой вы-

соким значением отношения $cJ/(Pl)=8$. Применение формулы (11) влечет за собой двукратную ошибку.

Очевидно, что полученная оценка общей устойчивости колонны может быть уточнена. При записи уравнений равновесия была допущена возможность замены тригонометрических функций $\sin\varphi$ и $tg\ \varphi$ значениями самого угла ϕ. Это позволит рассматривать большие перемещения при отклонении высотного объекта от исходного невозмущенного состояния равновесия.

Библиографический список

1. Львин Я.Б. Устойчивость жестких стен и колонн на упругом и упругопластическом основании // Инженерный сборник. 1950. Т.VII.

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

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

4. Павлюк Н.П. Устойчивость жестких стен и колонн // Труды Ленинградского института инженеров коммунального строительства. 1935. Вып. II.5.

5. Пановко Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, ошибки и парадоксы / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1979. 384 с.

К ЗАДАЧЕ О НАПОЛНЕНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБСЛЕДУЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ДАННЫМИ О ДЕФЕКТАХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Валеев Г. В., Чигинский Д. С.
ТулГУ, г. Тула, Россия

С 2014 года проводятся мероприятия по развитию строительной отрасли РФ в направлении перехода на технологии информационного моделирования зданий и сооружений (BIM-технологии) [1]. Необходимость и потребность в скорейшем освоении технологий BIM уже осознана многими участниками строительной отрасли и признана на государственном уровне [2]. Как следствие, интерес в применении BIM-технологий при обследовании зданий и сооружений с каждым годом будет только нарастать.

Информационные модели зданий и сооружений позволяют накапливать и использовать сведения на каждой из стадий жизненного цикла, и, в частности, на каждом из этапов взаимодействия с объектом обследования: подготовительном этапе анализа рабочей документации существующего здания или сооружения; этапе накопления информации, собираемой в ходе обследования, включая рекомендации по устранению дефектов и повреждений; при подготовке чертежей восстановления и усиления; подготовке документации для реконструкции или технического перевооружения, а также на этапе эксплуатации после обследования [3].

Авторами рассматривается задача накопления сведений, получаемых в процессе обследования, в объёме информационной модели здания или сооружения, в частности моделирование дефектов строительных конструкций зданий и сооружений. Использование BIM-технологий для моделирования дефектов строительных конструкций зданий и сооружений позволяет систематизировать информацию о дефектах, хранить и обрабатывать автоматизированным образом. В качестве инструментария рассмотрены возможности программного обеспечения Tekla Structures (Trimble Inc.) и Autodesk Revit (Autodesk Inc.).

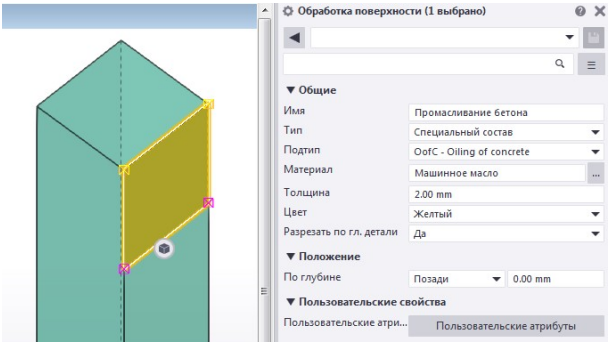


Рис. 1. Моделирование дефекта «Промасливание бетона»

Рассмотрен подход, при котором для моделирования поверхностных дефектов стальных и железобетонных конструкций в Tekla Structures используется инструмент «Обработка поверхности в выбранной области» [4], который позволяет разместить объект на грани конструкции с возможностью задать размеры дефектного участка и другие его атрибуты.

Например, рассмотрена ситуация - дефект промасливание в следствие технологических протечек на поверхности железобетонной конструкции (рисунок 1). Имеется возможность заполнить встроенные свойства (атрибуты) объекта, такие как Имя, Материал и Толщина. В

поля Пользовательских атрибутов может быть внесена дополнительная информация, например, нормативный документ, определяющий требования к конструкции и методы устранения рассматриваемого дефекта.

Другой пример дефекта - повреждение сплошной коррозией металлической конструкции (рисунок 2). Заполнение свойств (атрибутов) информацией может быть выполнено аналогичным образом.

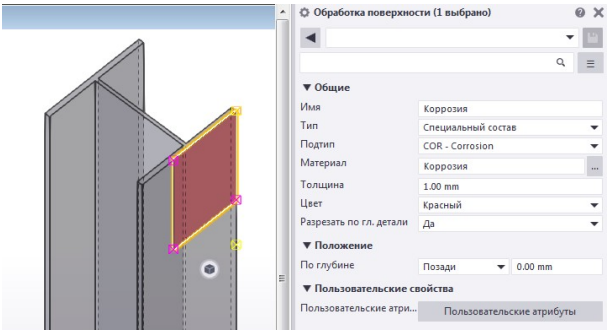


Рис. 2. Моделирование дефекта «Сплошная коррозия металла»

После моделирования дефектов строительных конструкций имеется возможность создания отчёта (рисунок 3), ведомости дефектов, включающей информацию о наименовании дефектов, количестве участков и площади их поверхности. Далее, на основе собранной информации может быть сформирована ведомость расхода материалов, необходимых для устранения дефектов.

Обработка поверхности

Шифр:

Страница: 1

Отчёт создал:

Дата: 22.06.2021

Время: 23:17:41

Название	Кол-во	Материал	Толщ.	Площадь, м2	Масса, кг	Объем, м3
Коррозия	1	Коррозия	1	0.06	0.18	0.000
Коррозия	1	Коррозия	1	0.09	0.27	0.000
Промасливание бетона	1	Машинное масло	2	0.08	0.13	0.000
Промасливание бетона	1	Машинное масло	2	0.20	0.32	0.000
Промасливание бетона	1	Машинное масло	2	0.40	0.64	0.001
Специальный состав			Итого:	0.83	1.54	0.002
			Всего:	0.83	1.54	0.002

Рис. 3. Отчет по поверхностным дефектам конструкций

Технологии информационного моделирования зданий и сооружений, кроме проектирования, обладают необходимым инструментарием для формирования моделей и обработки накопленной информации, полученной по результатам обследования, в частности, о дефектах строи-

тельных конструкций. Как следствие, современное программного обеспечение можно успешно применять как для подготовки документации по результатам обследования, так и для разработки документации для восстановления, строительных конструкций зданий и сооружений.

Библиографический список

1. Бобков С.В. BIM-технологии как составляющая инновационного развития строительной отрасли // Студенческий научный форум 2018: материалы X Междунар. студ. науч. конф. Москва, 2018.

2. Постановление Правительства РФ № 1431 от 15.09.2020 г. Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства. URL: http://government.ru /news/40424/.

3. Чигинский Д.С. Информационное моделирование сооружений при обследовании и усилении // Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности: материалы XVII Междунар. науч.-технич. конф. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 230-231.

4. Tekla Structures. Руководство по моделированию. URL: https://docplayer.ru/258539-Tekla-structures-rukovodstvo-po-modelirovani yu-versiya-produkta-21-0-marta-2015-2015-tekla-corporation.html.

5. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК Пресс, 2011. 392 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Гараников В.В.
ТГТУ, г. Тверь, Россия

Сложность форм современных конструкций, повышение интенсивности воздействий приводит к неоднородности напряженно-деформируемого состояния, возникновению областей пластичности. Во многих случаях пластическое деформирование возникает в реальных технологических. Построение определяющих соотношений для произвольных процессов, воздействующих на упруго-вязкопластическое тело, является важной задачей механики деформируемого твердого тела. Поэтому постановка экспериментов на широком классе траекторий, также проверка физической достоверности определяющих соотношений теории пластичности являются актуальной проблемой экспериментальной механики. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на автоматизированном рас-

четно-экспериментальном комплексе СН-ЭВМ. Данный комплекс разработан в лаборатории механических испытаний Тверского государственного технического университета под руководством заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора В.Г.Зубчанинова и успешно функционирует до настоящего времени.

Комплекс состоит из нагружающей установки, реализующей трехпараметрическое воздействие на образец (осевая сила, кручение и внутреннее давление), датчиков усилий и деформаций, управляющей ЭВМ типа IBM PC и устройства связи с объектом (УСО).

Механическая часть выполнена на базе испытательной машины ЦДМУ-30 и включает замкнутую силовую раму с размещенными на ней элементами крепления образца и приводами реализуемых усилий. В процессе автоматизации регулятор давления (РД) гидросистемы был дополнен приводом, управление которым осуществлялось программно с блока, задающего параметры нагружения. Аналогично была проведена модернизация гидростанции внутреннего давления, подводимого в образец. Механическая часть привода кручения была взята за основу. Для улучшения параметров регулирования увеличили редукцию и заменили двигатель привода. Измерение нагрузок, действующих на образец, осуществляется двухкопонентным силоизмерителем осевой нагрузки и крутящего момента. Датчик рассчитан на осевую силу 60 кН и крутящий момент 0.5 кНм. Погрешность в определении компонент нагрузки не превышает ±0.12 кН, ±3 Нм соответственно.

Для измерения осевых, окружных и сдвиговых перемещений оболочки применялся экстензометр [6]. Он состоит из верхней и нижней частей, которые имеют две степени свободы перемещений друг относительно друга. Эти две части соединены между собой посредством трех упругих элементов, обеспечивающих их осевое перемещение и шарикоподшипникового узла, который обеспечивает относительный поворот двух частей. На верхней и нижней части прибора под углом 120 установлены по три подпружиненных упора для фиксации его на образце. В верхней части устройства смонтирован тензометр поперечных деформаций, состоящий из струны, которая по полупериметру обхватывает образец, концы которой жестко закреплены в подпружиненной обойме. В обойму ввернута направляющая с отверстием, в котором установлен шток индуктивного датчика. Устройство работает следующим образом. При осевом деформировании образца происходит осевое относительное смещение верхней и нижней части, которое фиксируется упругими элементами с наклеенными на них тензорезисторами. При закручивании образца происходит относительное угловое перемещение верхней части относительно нижней, которое также фиксируется упру-

гим элементом с наклеенными тензорезисторами. Установка на верхней части экстензометра спирали Архимеда повышает точность измерения угловых деформаций, за счет устранения нелинейности характеристики выходного сигнала от угла поворота. Устройство позволяет независимо регулировать процесс растяжения (сжатия) и закручивания тензометра с точностью по осевым перемещениям 1·10-3 мм и углу поворота 1·10-4 рад.

Захваты для образцов, используемые в испытаниях, состоят из двух колец и корпусной вилки, соединенных во взаимно-перпендикулярном направлении в горизонтальной плоскости, образующих крестообразный шарнир Гука. Корпусная вилка верхнего захвата крепится на траверсу, нижнего захвата непосредственно к двухкомпонентному силоизмерителю. Благодаря наличию крестовин захваты могут самоустанавливаться под действием приложенных усилий, что исключает влияние эксцентриситета осевой силы.

При нагружении образца внутренним давлением обычно герметизируют его торцы пробками. При этом возникает дополнительное усилие растяжения, которое усложняет управление экспериментом и снижает точность. Для исключения этого явления на установке СН применяется приспособление в виде сплошного цилиндрического сердечника с герметизирующими элементами на концах. На длине рабочей части образца его диаметр на 2...5 мм меньше внутреннего диаметра образца. При этом усилие от давления замыкается на жесткий сердечник и не влияет на канал управления осевой силой.

Эксперименты выполнены на тонкостенных круговых цилиндрических оболочках. Образцы изготавливались по специально разработанной и апробированной технологии. Наружная и внутренняя поверхности образцов обработаны по седьмому классу точности. Тонкостенные трубчатые образцы имели толщину стенки h = 1мм, радиус срединной поверхности R =15 мм, длину рабочей части L = 6R. Оболочки с разностенностью более 0.03 мм отбраковывались.

Программная часть системы обеспечивает выполнение функций формирования исходных данных для управления и условий реализации алгоритма, задание траектории нагружения, сбор и обработку измерительной информации о ходе эксперимента, реализацию функций регулятора системы автоматического управления, обработку внешнего изменения условий и параметров процесса нагружения. Работа программы начинается с ввода исходных данных, которыми являются: признак вида эксперимента (управление по деформациям или по нагрузкам), количество участков траектории, скорость нагружения. Отдельно для каждого участка задаются: тип траектории (отрезок прямой или дуга окружности), предлагаемая дли-

на отрезка, угол наклона отрезка, начальная фаза и радиус кривизны дуги, количество витков, начальный радиус, направление развития спирали. Исходные параметры вводятся в понятной для экспериментатора форме, затем они масштабируются в машинные эквиваленты. Сбор измерительной информации осуществляет программа, которая осуществляет управление коммутатором и АЦП. Помимо этого, в состав массива анализируемых данных входят в виде признаков, требующих изменения параметров и условий выполнения программы, значения, задаваемые вручную с блока генератора констант.

Эксперименты в пространстве деформаций проводились при постоянной скорости деформирования. С целью исключения влияния релаксационных эффектов на результаты опытов, скорость деформации принималась S=10-6 1/сек. в зоне упругопластических деформаций и S=5·10-61/сек. в пределах упругости. При проведении испытаний в пространстве напряжений диапазон изменения скоростей нагружения составлял σ=0.02...0.1 МПа/с.

Испытания, в которых круговые тонкостенные цилиндрические оболочки подвергали воздействию осевой силы и крутящего момента, проведены на автоматизированном расчетно-экспериментальном комплексе СН-ЭВМ. Программа испытаний в пространстве напряжений состояла в следующем (рис. 1).

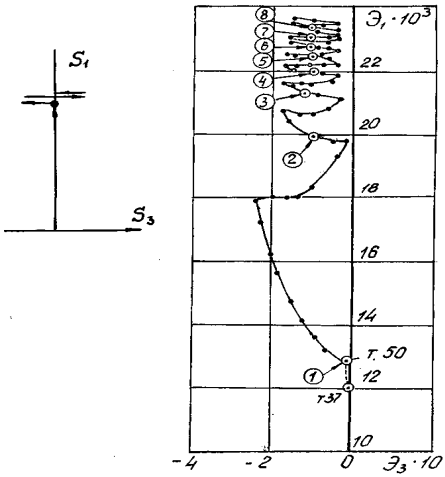


Рис. 1. Программа испытаний и траектория деформаций

После предварительного растяжения (S_1=300 Мпа), полной разгрузки и последующего нагружения до уровня S_1=318 Мпа осуществлялась полная выборка ползучести. После выборки ползучести при условии

поддержания S_1=const осуществлялось сложное нагружение циклически (с постоянной скоростью) изменяющимся напряжением -150<S_3<150 (МПа) (рис. 1). Отклик на данную программу нагружения представлен в виде траектории деформаций, изображенной на рис 1. Точки, отмеченные номерами 37,50, отвечают соответственно началу и окончанию процесса выборки ползучести. Точки, обозначенные цифрами в кружках, соответствуют началу циклов сложного нагружения. Как видно из рис. 1, циклическое закручивание оболочки при S_1=const приводит к существенному увеличению компоненты $Э_1$ вектора деформаций Э, причем наибольший рост характерен для первого цикла сложного нагружения и составляет более 50% от значения $Э_1$ в точке начала реализации сложного процесса. После пятого цикла степень прироста модуля вектора деформаций практически стабилизируется.

Всего было выполнено 10 полных циклов нагружения по S_3. Диаграмма деформирования представлена на рис. 2. Треугольники отвечают предварительной полной разгрузке, кружки с внешними крестиками соответствуют повторному простому нагружению до S_1=318 МПа.

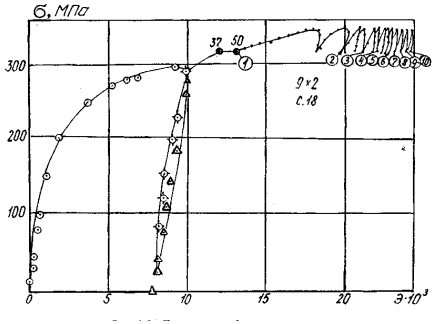


Рис.2. Диаграмма деформирования

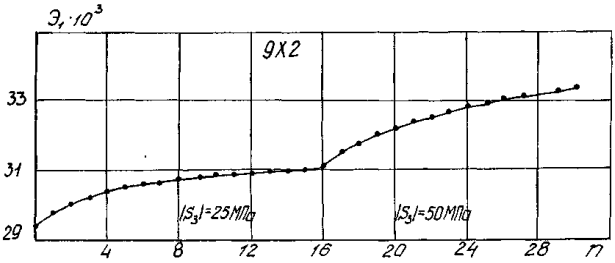


Рис. 3. Зависимость изменения компоненты $Э_1$ от числа циклов

После реализации 10 циклов сложного нагружения по S_3 образец был дополнительно растянут до S_1=406 МПа (S_3=0). По окончании процесса выборки ползучести повторно реализовано сложное шестнадцатицикловое закручивание оболочки в диапазоне $-25<S_3<25$(Мпа), после чего амплитуда изменения компоненты S_3 в пределах цикла была увеличена до $|S_3|$ =50 МПа.

Результаты данного этапа эксперимента приведены на рис. 3. Здесь представлены в виде графика зависимости компоненты $Э_1$ вектора деформаций Э от числа циклов сложного нагружения. Сопоставление данных рис. 1-3 показывает, что для всех реализованных процессов сложного нагружения после пяти первых циклов скорость изменения компоненты $Э_1=Э_1(n)$ практически стабилизируется и возрастает с увеличением диапазона изменения S_3 в пределах цикла нагружения.

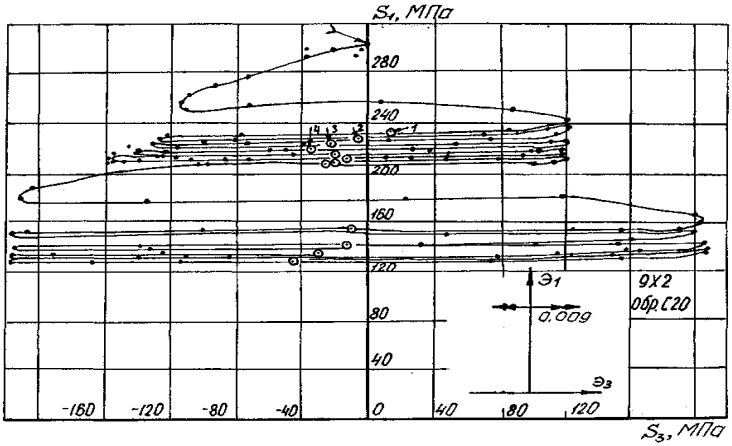


Рис. 4. Программа деформирования и траектория нагружения

Программа испытаний в пространстве деформаций представлена на рис. 4. Предварительное нагружение осуществлено растяжением до уровня деформации $Э=Э_1=0.9\%$. После разгрузки ($\sigma=0$) и повторного нагружения до $Э=Э_1=0.1\%$, было реализовано циклическое деформирование кручением $-0.1\%<Э_3<+0.1\%$. На рис. 4 представлена траектория нагружения, отвечающая реализованной программе деформирования. Стрелка на данном рисунке указывает начальную точку реализации сложного процесса. Сложное деформирование приводит к уменьшению модуля вектора напряжений за счет изменения компоненты S_1. При этом наибольшее падение значения S_1 наблюдается на первом цикле деформирования и составляет 23% от достигнутого уровня S_1 в точке

начала реализации сложного процесса. К 10-му циклу траектория нагружения практически стабилизируется.

С целью проверки данного результата в ходе эксперимента была уменьшена амплитуда $Э_3$ до значения $|Э_3|=0.2\%$. Аналогично первому этапу, к 8 циклу траектория нагружения стабилизируется (рис. 4).

По результатам проведенных испытаний, можно сделать следующий вывод: циклическое закручивание с малой амплитудой (при $S_1=const$) приводит к существенному увеличению компоненты $Э_1$ и уменьшению S_1 (при $Э_1=const$). Скорость изменения $Э_1(S_1)$ имеет наибольшее значение на первом цикле и стабилизируется к пятому циклу нагружения (деформирования)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Гасанов Ш.Г.[1], Рустамханлы Дж.С.[2]
[1]АзТУ, АзАСУ[2], г. Баку, Азербайджан

Задачи изгиба пластин внешней нагрузкой при различных условиях закрепления, а также при промежуточных опорах имеют важное значение при расчетах безбалочных перекрытий.

Рассмотрим изотропную упругую пластину, жестко соединенную с бесконечным рядом колонн. Реакция колонн равномерно распределена по всей площадке контакта с пластиной. Поставленная задача состоит в нахождении оптимальной формы площадки контакта, такой чтобы отсутствовали какие-либо участки предпочтительные для хрупкого разрушения или пластических деформаций. Отыскание подобной оптимальной (равнопрочной) формы площадки важно для снижения концентрации напряжений в пластине.

Будем искать равнопрочную форму границы площадок контакта L_{mn}, центры которых расположены в точках

$$P_{mn} = m\omega_1 + n\omega_2 \qquad (m,n = 0,\pm1,\pm2,\ldots), \tag{1}$$
$$\omega_1 = 2, \qquad \omega_2 = 2le^{i\alpha},$$
$$l > 0, \qquad \mathrm{Im}\,\omega_2 > 0.$$

Каждый контур L_{mn} ограничивает область S_{mn} $(m,n = 0,\pm1,\pm2,\ldots)$ соприкасания. Геометрический центр контура L_{00} и срединной плоскости пластины располагается в начале системы координат.

Полагаем, что площадки контакта, ограниченные контурами L_{mn} находятся под действием равномерной нагрузки. В пластине действуют средние моменты

$$M_x = M_x^{\infty}, \quad M_y = M_y^{\infty}, \quad H_{xy} = 0. \tag{2}$$

Принято, что неизвестные контуры L_{mn} имеют две оси симметрии. На основании симметрии краевых условий задачи и геометрии области занятой пластиной вне площадок контакта, компоненты тензора напряжений являются двоякопериодическими функциями с основными периодами ω_1 и ω_2.

Представим прогибы пластины в виде

$$w_0 = f_0 + F_0, \qquad w = F, \tag{3}$$

где w_0 –прогиб области S_{00}; w – прогиб пластины вне областей S_{mn} соприкасания; F_0 и F – бигармонические функции, которые определяются в зависимости от граничных условий пластины. f_0 является частным решением неоднородного бигармонического уравнения для области S_{00} при давлении, вызванном реакцией центрально расположенной колонны

$$\frac{\partial^4 w_0(z,\bar{z})}{\partial z^2 \partial \bar{z}^2} = \frac{1}{16}\frac{q}{D}.$$

Здесь $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$; h – толщина пластины; E и ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала пластины.

На контуре L_{mn} площадки контакта должны выполнятся следующие условия

$$w_0 = w, \qquad \frac{\partial w_0}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial n}, \qquad \frac{\partial w_0}{\partial s} = \frac{\partial w}{\partial s}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial n^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial n^2}, \qquad \frac{\partial^2 w_0}{\partial s^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial s^2}, \qquad \frac{\partial^2 w_0}{\partial n \partial s} = \frac{\partial^2 w}{\partial n \partial s}.$$

Искомые функции (напряжения, моменты, прогиб, контактное давление и другие) ищем в виде разложений по малому параметру ε. За малый параметр принимается отношение $R_{\max}/\lambda$, где $R_{\max}$ – наибольшая высота неровности профиля контура L_{00} от окружности $r = \lambda$. Каждое из приближений удовлетворяет системе дифференциальных уравнений теории изгиба пластин.

Для нахождения неизвестных бигармонических функций F_0 и F выразим их через аналитические функции комплексного переменного $z = x + iy$ формулами Гурса.

Отделим мысленно площадки контакта от пластины. Тогда при деформации пластины смежные точки контура площадок контакта и пластины должны иметь одинаковые перемещения, а усилия, действующие на любую контактную площадку со стороны пластины, должны быть равны по величине и про-

тивоположны по знаку усилиям, действующим на пластину со стороны соответствующей площадки контакта.

Поскольку решение для пластины обладает свойством двоякопериодичности, достаточно рассмотреть условия сопряжения пластины с колонной только вдоль контура L_{00}.

На основании технической теории Кирхгофа и непрерывности смещений на контуре L_{00} имеем следующее краевое условие для комплексных потенциалов [1]

$$\Phi(t)+\overline{\Phi(t)}-\left[t\Phi'(t)+\Psi(t)\right]e^{2i\alpha}= \tag{5}$$

$$=\Phi_0(t)+\overline{\Phi_0(t)}-\left[t\Phi_0'(t)+\Psi_0(t)\right]e^{2i\alpha}+\frac{1}{32}qt\bar{t}\ ,$$

где q – реакция колонн.

Учитывая равенство нагрузки, действующей на область S_{00} со стороны пластины, и нагрузки, действующей на пластину со стороны контактной площадки, получим второе граничное условие на контуре L_{00} для комплексных потенциалов

$$\Phi(t)+\varepsilon\overline{\Phi(t)}-\left[t\Phi'(t)+\Psi(t)\right]e^{2i\alpha}= \tag{6}$$

$$=\Phi_0(t)+\varepsilon\overline{\Phi_0(t)}-\left[t\Phi_0'(t)+\Psi_0(t)\right]e^{2i\alpha}+\frac{1}{32}\varepsilon qt\bar{t}\ .$$

Также записываем дополнительное краевое условие на неизвестном контуре L_{00}:

$$M_t=M_*=\text{const}, \tag{7}$$

где величина M_* подлежит определению в процессе решения.

Неизвестная величина q реакции колонн определяется из условий контакта пластины с колоннами. Это условие отнесено к центральной точке поперечного сечения каждой колонны, в которой фиксируется прогиб

$$w_0=0 \quad \text{при} \quad z=P_{mn}. \tag{8}$$

Эти соотношения являются следствием непрерывности прогибов пластины, углов наклона касательной к пластине и величин изгибающих моментов.

Удовлетворяя краевым условиям задачи, получаем в каждом приближении линейные алгебраические системы для определения коэффициентов искомых функций.

Управляющими переменными приняты параметры геометрии границы площадки соприкасания пластины и опоры. Не уменьшая общности поставленной задачи оптимизации несущей способности, полагаем,

что искомая функция $h(\theta)$, определяющая неизвестную форму площадки контакта, симметрична относительно координатных осей и может быть представлена в виде отрезка тригонометрического ряда Фурье

$$h(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{2k} e^{2ik\theta}, \qquad \operatorname{Im} d_{2k} = 0 \quad (k = 0,\pm1,\pm2,\ldots). \tag{9}$$

Для определения искомых коэффициентов (параметров управления) использовали метод наименьших квадратов.

Во втором приближении уравнение оптимальной формы границы площадки контакта имеет вид:

для треугольной сетки расположения центров площадок

$$r^2 = \lambda^2 (d + d_1 \cos 6\theta + d_2 \cos 12\theta), \tag{10}$$

для квадратной сетки расположения центров площадок

$$r^2 = \lambda^2 (d^0 + d_1^0 \cos 4\theta + d_2^0 \cos 8\theta). \tag{11}$$

Библиографический список

1. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.

ПРОБЛЕМЫ СОГЛАСОВАННОСТИ ПРОЕКНЫХ РЕШЕНИЙ И ГОТОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Голубева А.С., Прохорова А.В., Сычева Т.Н.
ТулГУ, г. Тула, Россия

В нашей стране, как и во всем мире постоянно идет проектирование и строительство различных объектов. Процессу строительства традиционно предшествует стадия проектирования. Состав и назначение проектной документации определены в Градостроительном кодексе Российской Федерации: это документация, содержащая материалы в текстовой и графической формах и (или) в форме информационной модели, определяющая архитектурные, функционально-технологические, конструктивные и инженерно-технические решения для обеспечения строительства, реконструкции объектов капитального строительства, их частей, капитального ремонта [1]. Таким образом, проектная документация отражает инженерные решения, которые должны быть реализованы при возведении или ремонте здания или сооружения. Практические наблюдения показывают, что готовые объекты не всегда соответствуют разработанному проекту.

В Туле и Тульской области были возведены ряд значимых градостроительных объектов: Казанская набережная около Тульского кремля, торгово-развлекательные центры, расположенные в центральной части города. Их строительство и открытие привлекало широкое внимание общественности, для проектов проводились публичные слушания. Стоит ожидать, что все проектные решения были полностью соблюдены при строительстве.

Примером реализованных проектных решений можно назвать Казанскую набережную в г. Тула. Благодаря своему расположению около Тульского кремля это сооружение стало очень популярным местом отдыха для туляков и гостей города. Система пешеходных мостов и прогулочных маршрутов, зрительные зоны и зоны отдыха на берегах реки Упы, организованные детские площадки и преобразование улицы Металлистов в пешеходную зону - все это было представлено в проектной документации [3]. Можно уверенно сказать, что готовый объект соответствует проекту: зонирование территории, использованные строительные и отделочные материалы, все рекомендации проекта были реализованы. Пока только одно проектное предложение не удавалось воплотить - организация катка в зимнее время в результате заливки улицы Металлистов.

Нередко встречаются случаи, когда готовые объекты частично или полностью отличаются от своего проекта. Причины несоответствий могут быть разнообразными. Назовем наиболее распространенные:

- с целью ускорения процесса реализации проекта строительство объекта проводится параллельно с разработкой рабочей документации, при этом не соблюдается стадийность архитектурно-строительного проектирования;

- в период возведения сооружения были выявлены проблемы, решение которых требует уточнение, доработку или внесение изменений в готовую утвержденную проектную документацию.

Согласно градостроительному кодексу Российской Федерации, изменения в проектную документацию можно вносить даже после утверждения рабочей документации. Такие изменения тоже должны проходить утверждение, однако пунктом 3.8 предусмотрен ряд случаев, когда изменения могут вноситься без утверждения [1].

По решению застройщика экспертизу проектной документации можно не проводить в отношении изменений, внесенных в проектную документацию, которая уже имеет положительное заключение экспертизы проектной документации, если такие изменения одновременно:

1) не затрагивают несущие строительные конструкции объекта капитального строительства, за исключением замены отдельных элементов конструкций на аналогичные или иные улучшающие показатели таких конструкций элементы;

2) не влекут за собой изменение класса, категории и (или) первоначально установленных показателей функционирования линейных объектов;

3) не приводят к нарушениям требований технических регламентов, санитарно-эпидемиологических требований, требований в области охраны окружающей среды, требований государственной охраны объектов культурного наследия, требований к безопасному использованию атомной энергии, требований промышленной безопасности, требований к обеспечению надежности и безопасности электроэнергетических систем и объектов электроэнергетики, требований антитеррористической защищенности объекта;

4) соответствуют заданию застройщика или техническому заданию на проектирование, а также результатам инженерных изысканий;

5) соответствуют установленной в решении о предоставлении бюджетных ассигнований на осуществление капитальных вложений, принятом в отношении объекта капитального строительства государственной (муниципальной) собственности в установленном порядке, стоимости строительства (реконструкции) объекта капитального строительства, осуществляемого за счет средств бюджетов бюджетной системы Российской Федерации.

Изменения, вносимые в проект после прохождения экспертизы, скорее всего, являются целесообразными, экономически выгодными и согласованными с заказчиком, но зачастую они не соответствуют Сводам правил (СП). В качестве примера несоблюдения требований СП можно указать торговый центр «Гостиный двор», который размещается в центральной части г. Тулы. Несоответствие связано с обязательными требованиями к организации парковки. Для данного центра было запроектировано не менее 1070 парковочных мест. На момент ввода здания в эксплуатацию и открытия торгового центра мест для парковки оказалось 300 [2]. В настоящий момент благодаря организации двухуровневой подземной парковки и парковочной полосы по периметру всего здания количество машино-мест удалось увеличить, но требуемое число достичь невозможно.

Директор ТЦ «Гостиный двор» в статье «Все решения градостроительного совета мы будем исполнять», опубликованной на сайте «MySlo», отмечает, руководство торгового центра будет искать «новые

территории» для парковки автомашин. При этом отмечается, что «на первых порах парковок будет достаточно» [2]. Очевидно, что заказчик находит обоснование для несоблюдения проектных решений и требований нормативной документации.

Согласно проекту торгово-развлекательного центра «Макси», прилегающая к нему территория была спланирована несколько по-другому. Не было реализовано комплексное благоустройство набережной и территории за стенами гидротехнического сооружения, окружающего территорию торгового центра [5]. Из запланированных элементов благоустройства смогли только устроить «причал» для водного трамвая, небольшой зоопарк, спортивную площадку и кафе. Важными проектными решениями являлись зонирование парковки «зелёными» полосами, устройство пешеходных озеленённых дорожек и организация выезда с территории торгово-развлекательного центра через железную дорогу на улицу Кирова [5]. Все это до настоящего времени остается только проектными предложениями.

По вопросу организации парковочных мест у центра «Макси» нормы СП выполнены, но требуемый процент озеленения территории обеспечить не удалось. В соответствии с текстом СП 42.13330.2016 «…в городских и сельских поселениях необходимо предусматривать, как правило, непрерывную систему озелененных территорий и других открытых пространств. Удельный вес озелененных территорий различного назначения в пределах застройки городов (уровень озеленённости территории застройки) должен быть не менее 40%...» [4]. Согласно сведениям на сайте ТРЦ «Макси» площадь территории составляет 34 Га [5]. Выполнив несложные расчеты, можно определить, что озеленение должно составлять 13,6 Га площади этого сооружения. Возможно, в будущем проектные решения по озеленению прибрежной территории все же будут реализованы, и у туляков появятся дополнительные места отдыха в центре города.

Не лишним будет еще раз подчеркнуть важность продуманного, поэтапного и последовательного стадийного проектирования и строительства. Представленные примеры наглядно отображают значимость каждой стадии проектирования и соблюдения требований нормативной документации.

Библиографический список

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 №190-ФЗ (ред. от 30.12.2020).

2. «Все решения градостроительного совета мы будем исполнять," - директор ТЦ "Гостиный двор" Рафик Папян» [Электронный ресурс]. Режим доступа - https://myslo.ru/news/arhiv/news-58305, - свободный.

3. «Реконструкция набережной реки Упы, Тула» [Электронный ресурс]. Режим доступа - https://archi.ru/projects/russia/11869/rekonstrukciya-naberezhnoi-reki-upy-tula, - свободный.

4. СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений».

5. «Торговый центр Макси г. Тула» [Электронный ресурс]. Режим доступа - https://all-malls.ru/torgovye-tsentry/maksi-tula/, - свободный.

К РАСЧЕТУ ПЛАСТИН ПОЛИГОНАЛЬНОГО ОЧЕРТАНИЯ В ПЛАНЕ

Горбачева О.А.
СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов,
НИИСФ РААСН, г. Москва, Россия

Расчету пластин классической формы посвящено много исследований. Однако в строительной и машиностроительной индустрии часто применяются пластины полигонального очертания в плане, отдельные кромки которых могут быть криволинейными. Такие пластины будем называть пластинами сложного очертания.

Пластины сложного очертания можно рассчитать численными методами, такими как метод конечных разностей или метод конечного элемента. Тогда решение получим в виде численного массива. При вариантном проектировании наиболее удобным является решение задачи в виде формул. В этом случае пластины сложного очертания рассчитывают вариационными методами. Точность решения в вариационных методах зависит от удачного выбора системы аппроксимирующих функций, поэтому построение аппроксимирующих функций является важной проблемой.

В работе [1] для расчета пластин с кусочно-гладким контуром для построения системы аппроксимирующих функций использована рекомендация Л.В. Канторовича - для расчета пластинок, ограниченных прямыми и криволинейными отрезками, строить аппроксимирующие функции с помощью уравнений контурных линий. Этот же способ построения аппроксимирующих функций использован в работе [2] при расчете треугольной в плане пластины вариационным методом Бубнова-Галеркина в трех приближениях. Исследование сходимости показало, что решение во втором приближении удовлетворяет инженерной точности.

Полагаем, что пластина имеет вид выпуклого многоугольника, имеющего k прямолинейных или криволинейных сторон. Уравнение изгиба пластины в безразмерной форме запишем в виде

$$Lu(\xi,\eta) = p(\xi,\eta) \tag{1}$$

где L - бигармонический оператор, u - безразмерный прогиб, p - безразмерная поперечная нагрузка, ξ,η – безразмерные координаты.

Приближенное выражение прогиба $u_n^*(\xi,\eta)$ будем искать в виде разложения по аппроксимирующим функциям

$$u^*(\xi,\eta) = \omega(\xi,\eta)\sum_{i=0}^{N} A_i \xi^{ik}\eta^{il}, \qquad (k,l = 1,2,...) \tag{2}$$

где A_n – искомые коэффициенты (обобщенные координаты), $\omega(\xi,\eta)$ – главная часть решения.

Функцию $\omega(\xi,\eta)$ представим в виде произведения левых частей уравнений сторон многоугольника, записанных в общей системе координат ξ,η в стандартном виде $\psi_j(\xi,\eta) = 0$. Так как аппроксимирующие функции должны соответствовать области определения оператора L, то есть быть четырежды дифференцируемыми по переменным ξ,η и удовлетворять при этом заданным граничным условиям, то для определения параметров соответствия аппроксимирующих функций области определения оператора L, функцию $\omega(\xi,\eta)$ запишем в виде

$$\omega = (\psi_1\psi_2...\psi_k)^m \psi_j^n = \Psi_j^m \psi_j^n \tag{3}$$

где $\Psi_j(\xi,\eta)$ представляет собой произведение всех левых частей уравнений линий контура пластинки за исключением рассматриваемой j-ой. Проверяя выполнение граничных условий в точках каждой j-ой стороны, минимальные значения показателей степени m и n определяем из условия сохранения структуры уравнения j-ой стороны многоугольника. Например, при жестком защемлении j-ой стороны аппроксимирующая функция и ее первая производная в направлении нормали к контуру в точках (ξ_j,η_j) должны обращаться в ноль. Для этого в выражении (3) и в его первых производных по переменным ξ,η должна сохраниться структура левой части уравнения j-ой стороны много-

угольника, которая обращается в ноль в точках $\left(\xi_j,\eta_j\right)$. В силу этого прогиб *j*-ой стороны должен обратиться в ноль при $m=n=1$.

Первая производная имеет вид

$$\omega'=\left(\Psi_j^m\right)'\psi_j^n+\Psi_j^m\left(\psi_j^n\right)' \tag{4}$$

В точках линии контура $\left(\xi_j,\eta_j\right)$ первый член обращается в ноль в силу сохранения структуры левой части уравнения *j*-ой стороны многоугольника, а второй член обратится в ноль только при $n\geq 2$. Следовательно, в случае жесткого защемления стороны многоугольника первый член разложения (2) следует взять в виде $\omega\left(\xi,\eta\right)=\Psi_j^m\psi_j^2$. В других вариантах опирания контура пластинки при конструировании аппроксимирующих функций следует выполнить аналогичные действия.

Подставляя (2) в уравнение (1), найдем невязку решения

$$F_n\left(\xi,\eta\right)=Lu_n^*-b \tag{5}$$

Решение уравнения (1) является элементом вещественного гильбертова пространства, в котором определено скалярное произведения двух функций в виде определенного интеграла

$$\left\langle f_1,f_2\right\rangle=\iint\limits_{\Omega}f_1\left(\xi,\eta\right)f_2\left(\xi,\eta\right)d\xi d\eta$$

где Ω – область, занятая пластиной. Если функции f_1 и f_2 ортогональны, то это условие имеет вид алгебраического уравнения $\left\langle f_1,f_2\right\rangle=0$.

Для определения численных коэффициентов A_n выражения (2) необходимо иметь систему *n* алгебраических уравнений. Эту систему построим из условий ортогональности невязки решения к каждой из функций ряда (2), которые имеют вид

$$\left\langle F_n,\varphi^{2i}\right\rangle=0,\quad \left(i=1,2,...,N\right) \tag{6}$$

В качестве примера рассмотрим пластинку, имеющую в плане вид равнобедренной трапеции, жестко защемленную по всему контуру, под действием равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q_0.

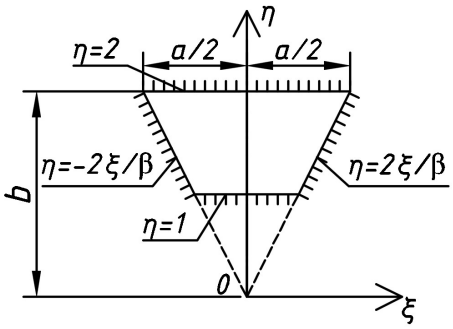


Рис.1. Расчетная схема

Дифференциальное уравнение изгиба пластины имеет вид (1), где $\xi = x / a, \quad \eta = y / b$ - безразмерные координаты (a - половина основания треугольника, b - высота равнобедренного треугольника), $u(\xi,\eta) = W / h$ - безразмерный прогиб (W - прогиб, h - толщина пластинки), $\beta = a / b$ параметр удлиненности треугольника, $p_0 = \dfrac{12(1-\mu^2)}{\alpha^4}\dfrac{q_0}{E}$ - безразмерный параметр поперечной нагрузки, где $\alpha = h / a$ - относительная толщина пластинки. Дифференциальный оператор L имеет вид

$$L = \frac{\partial^4}{\partial\xi^4} + 2\beta^2 \frac{\partial^4}{\partial\xi^2\partial\eta^2} + \beta^4 \frac{\partial^4}{\partial\eta^4}$$

Аппроксимирующую функцию $\varphi(\xi,\eta)$ берем в виде

$$\varphi(\xi,\eta) = (2\xi - \beta\eta)^2 (2\xi + \beta\eta)^2 (\eta - 1)^2 (\eta - 2)^2 \qquad (8)$$

$2\xi - \beta\eta = 0, \quad 2\xi + \beta\eta = 0, \quad \eta - 1 = 0, \quad \eta - 2 = 0$ уравнения сторон треугольника. Для определения сходимости решения удержим в разложении (2) два члена. Система алгебраических уравнений для определения обобщенных координат имеет вид

$$\left\langle L\sum_{n=1}^{2} A_n \varphi^{2n} - p_0, \varphi^{2i} \right\rangle = 0, \quad (i = 1,2) \qquad (9)$$

Учитывая, что производная суммы равна сумме производных, в развернутом виде имеем следующую систему алгебраических уравнений

$$\int_1^2 \int_{-\beta\eta/2}^{\beta\eta/2} \left(\sum_{n=1}^{2} A_n \varphi^{2i} L\varphi^{2n} - p_0 \varphi^{2i} \right) d\xi d\eta = 0, \quad (i = 1,2) \tag{10}$$

Так как интеграл суммы равен сумме интегралов, то можем уравнению (10) придать вид

$$\sum_{n=1}^{2} A_n \int_1^2 \int_{-\beta\eta/2}^{\beta\eta/2} \varphi^{2i} L\varphi^{2n} d\xi d\eta = p_0 \int_1^2 \int_{-\beta\eta/2}^{\beta\eta/2} \varphi^{2i} d\xi d\eta, \quad (i = 1,2) \tag{11}$$

Введем обозначения коэффициентов этой системы уравнений

$$r_{ni} = \int_1^2 \int_{-\beta\eta/2}^{\beta\eta/2} \varphi^{2i} L\varphi^{2n} d\xi d\eta, \quad g_i = \int_1^2 \int_{-\beta\eta/2}^{\beta\eta/2} \varphi^{2i} d\xi d\eta, \quad (i = 1,2) \tag{12}$$

С учетом принятых обозначений получим следующую систему двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными A_i

$$\sum_{n=1}^{2} r_{ni} A_n = p_0 g_i, \quad (i = 1,2) \tag{13}$$

Решая эту систему уравнений, найдем обобщенные координаты A_n и, подставляя их в (2), получим искомую функцию прогиба трапециевидной пластинки. Далее по известным формулам теории пластинок определяем моменты и перерезывающие силы и определяем напряженно деформированное состояние пластинки от действия заданной нагрузки.

В первом приближении легко вывести формулу для величины амплитуды прогиба в зависимости от параметра удлиненности β

$$A(\beta) = \frac{0{,}12 \cdot \beta^2}{\beta^8 + 0{,}12 \cdot \beta^4 + 0{,}06}, \tag{14}$$

Подставляя найденную амплитуду в выражение (2), получим функцию прогиба в виде формулы

$$u(\xi,\eta) = \frac{0{,}12 \cdot \beta^2}{\beta^8 + 0{,}12 \cdot \beta^4 + 0{,}06} (2\xi - \beta\eta)^2 (2\xi + \beta\eta)^2 (\eta - 1)^2 (\eta - 2)^2$$

На рис. 2 изображены эпюры прогибов и изгибающих моментов в характерных сечениях пластины. Пунктирной линии соответствует первое приближение, а сплошной линии - второе приближение. Экстремум функции прогиба смещается к центру тяжести пластины, а мак-

симальные значения изгибающего момента M_η наблюдаются в заделке у большего основания трапеции. Результаты расчета пластины в первом и втором приближениях практически сливаются (различие наблюдается в тысячных долях). Это говорит о быстрой сходимости, т.е. первое приближение дает решение задачи с необходимой точностью.

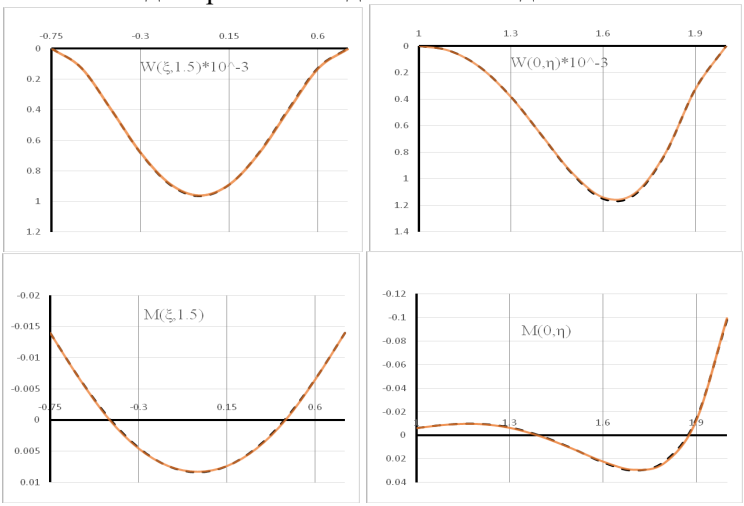


Рис.2. Эпюры прогибов и изгибающих моментов пластинки

В первом приближении легко вывести формулу для величины амплитуды прогиба в зависимости от параметра удлиненности β

$$A(\beta)=\frac{0{,}12\cdot\beta^2}{\beta^8+0{,}12\cdot\beta^4+0{,}06}, \qquad (14)$$

Подставляя найденную амплитуду в выражение (2), получим функцию прогиба в виде формулы

$$u(\xi,\eta)=\frac{0{,}12\cdot\beta^2}{\beta^8+0{,}12\cdot\beta^4+0{,}06}\left(2\xi-\beta\eta\right)^2\left(2\xi+\beta\eta\right)^2\left(\eta-1\right)^2\left(\eta-2\right)^2$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о быстрой сходимости решения (практически достаточно первого приближения). Максимальный прогиб находится в области центра тяжести трапециевидной пластинки, а максимальные изгибающие моменты возникают на ее контуре. Предложенная методика построения системы аппроксимирующих функций на базе уравнений контурных линий пластинки позволяет решать сложные задачи по расчету пластин сложного очертания.

Библиографический список

1. Петров В.В. Теория расчета пластин и оболочек / Петров В.В. - М.: АСВ. 2018. - 410 с.

2. Петров В.В. Расчет пластинок сложного очертания в плане / В.В. Петров, О.А. Закирова, С.А. Хмарин // Вестник Приволжского территориального отделения Российской Академии архитектуры и строительных наук. - 2019. - № 22. - С. 153-156.

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ ПРИ УЧЕТЕ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ВО ВРЕМЕНИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Гриднев С.Ю., Подлесных И.С.
ВГТУ, г. Воронеж, Россия

Рассматриваются пролетные строения двух типов - сталежелезобетонное и с ортотропной плитой. Они находятся в условиях меняющегося во времени температурного воздействия. При расчете на дневные колебания температуры важно учитывать результаты напряженно-деформируемого состояния (НДС) от предыдущего нагружения и использовать как начальные условий для выполнения последующего.

Выполненная работа является продолжением исследований [1 - 7], проведенных авторами по изучению и анализу НДС пролетного строения при воздействии на него солнечной радиации.

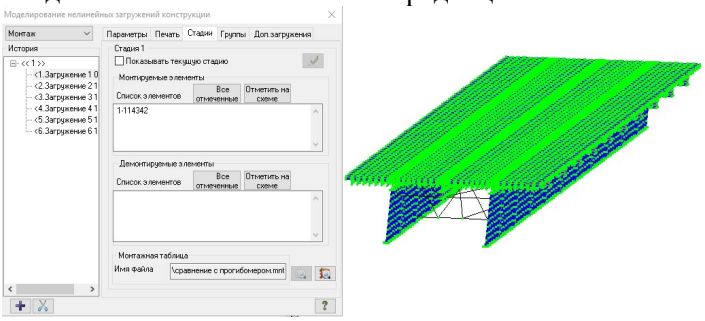


Рис. 1. Конечно-элементная модель пролетного строения с ортотропной плитой и вид панели модуля «Монтаж»

По результатам натурных инструментальных измерений температурных полей элементов пролетного строения с ортотропной плитой получено распределение температуры по площади элементов и высоте

поперечного сечения, исходя из особенностей воздействия солнечной радиации в конкретное время года, ориентации и конструктивных особенностей пролетного строения.

Изменение температурных полей в течение дня при выполнении расчета учитывалось поэтапным загружением температурным воздействием по времени, с учётом результатов предыдущих состояний, с использованием встроенного модуля "Монтаж" комплекса Лира Сапр (рис.1).

Выполнен на примере пролетного строения с ортотропной плитой сравнительный расчет НДС на температурные воздействия с учетом и без предыдущего температурного нагружения. Учитывалось изменение температур в течение дня в жаркий период лета. Сделан сравнительный анализ результатов расчета двух типов пролетных строений.

Учет изменения во времени солнечной радиации оказывает как правило существенное влияние на НДС элементов пролетного строения с ортотропной плитой для рассмотренного случая. Дальнейшие исследования позволят определить границы применимости такого подхода. Сделан вывод о необходимости учета предыстории предыдущего загружения и использования в качестве начальных условий для последующего загружения.

Библиографический список

1. Подлесных И.С., Гриднев С.Ю., Барченкова Н.А. Анализ влияния солнечной радиации на напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонного 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

2. Podlesnykh I.S., Gridnev S.Yu., Barchenkova N.A. Verifying Regulatory Documents for Solar Radiation Level Control When Estimating Stress-Strain State of the Spans Based on the Ortho-tropic Slab / The 24th International Scientific Conference MECHANIKA-2019. - 2019. - p.116-122.

3. Гриднев С.Ю., Подлесных, И.С. Влияние неравномерного нагрева на распределение напряжений в элементах пролетного строения с ортотропной плитой / Сборник материалов XX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры». - 2019. - С.108-110.

4. Гриднев С.Ю., Подлесных, И.С. Особенности температурного поля в элементах пролетного строения автодорожного моста при близких к нулю отрицательных температурах / Сборник материалов XX Международной

научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры». - 2019. - С. 110-112.

5. Подлесных И.С., Гриднев С.Ю., Скалько Ю.И. Уточнение напряженно-деформированного состояния пролетного строения с ортотропной плитой при учете солнечной радиации // Транспортные сооружения, 2019 №4, https://t-s.today/PDF/15SATS419.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/15SATS419

6. Gridnev S.Yu., Podlesnykh I.S., Skalko Yu.I., Rezunov A.V. Estimating the influence of solar radiation at different seasons on the mode of deformation of a span structure with an ortrotropic plate / Archives for Technical Sciences No 23. - 2020. - P. 59-66.

7. Гриднев С.Ю., Подлесных, И.С. Методика измерения температурного поля пролетного строения с ортотропной плитой при воздействии солнечной радиации / Сборник материалов XXI Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии». - 2020. - С. 62-68.

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КАК СПОСОБ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С.Ю. Гриднев, Е.Е. Прокшиц, О.А. Сотникова
ВГТУ, г. Воронеж, Россия

В настоящее время инженеры при проектировании строительных конструкций стремятся повышать их удельную прочность с одновременным снижением веса. Достижение этой цели напрямую связано с задачей поиска оптимальных геометрических параметров проектируемых строительных конструкций. Для решения этой задачи применяются методы топологической оптимизации. [1].

Одними из первых возможность алгоритмического подхода к топологической (структурной) оптимизации конструкций, моделируемых по МКЭ, исследовали Hemp W.S. и Topping B.H. Пространство, в котором может располагаться конструкция, покрывается сеткой узлов. В этих узлах прикладываются нагрузки и задаются закрепления [2].

Топологическая оптимизация - это процесс изменения конструкции, структуры детали и ее варьирующихся параметров при заданном критерии оптимальности с сохранением или улучшением ее функционала. Он осуществляется методом автоматизированного проектирования, позволяющим получить оптимальную форму изделия в заданных усло-

виях эксплуатации. Программа конечно-элементного анализа «MidasCivil» обладает модулем для решения такого рода задач, функционал которого постоянно расширяется.

Целью топологической оптимизации является поиск оптимального распределения материалов в области проектирования при определенных нагрузках с удовлетворением критериев оптимизации, другими словами, определение лучшего использования материала для исследуемого объекта или конструкции, так, чтобы целевая функция параметра имела максимальное или минимальное значение при наличии существующих ограничений. В сравнении с традиционной оптимизации топологическая оптимизация не требует указания параметров в явном виде. В топологической оптимизации параметром усовершенствования (оптимизации) является функция распределения материала по объему конструкции. Область проектирования известна заранее и является фиксированной в процессе оптимизации, а переменной проектирования является форма элемента [1].

В процессе топологической оптимизации изменяется "плотность формы элемента". Иначе говоря, в пределах заданной области, программа убирает материал там, где он не нужен и добавляет, там, где он необходим. Поэтому метод используется для оптимизации массы. Топологическая оптимизация зачастую используется на этапе концептуального проектирования и даёт общее представление о том, как, возможно, должна выглядеть конструкция или изделие в итоге, в каком направлении следует двигаться, чтобы улучшить дизайн несущей системы.

Есть несколько постановок задачи оптимизации с использованием возможностей программного комплекса Midas NFX - оптимизация конструкции при фиксированной массе; оптимизация объёма при минимизации перемещений или напряжений. При этом материал должен быть однородным.

В ходе топологической оптимизации необходимо учитывать следующие положения:

1) В задаче оптимизации должна быть некая переменная, которая должна быть минимизирована или максимизирована. Например, вес конструкции.

2) Должны быть условия, которые обязательно должны быть выполнены.

3) Должны быть переменные проектирования. В задаче топологической оптимизации это плотность.

4) Должны быть элементы в модели, которые не изменятся.

При использовании программного комплекса Midas NFX пользователю необходимо создать прототип проектируемой конструкции, для которой необходимо учесть все возможные эксплуатационные нагрузки, которые можно представить в виде набора загружений. Далее задаётся пространство проектирования, каждому элементу которого ставится в соответствие проектная переменная, её значение, равное 0 соответствует отсутствию материала, а 1 - полному заполнению материалом в данном конечном элементе, это и позволяет сформировать задачу оптимизации, а также учесть технологические ограничения. Последний шаг - выбор постановки задачи или её самостоятельное формирование и запуск расчёта. После проведения вычислений производится постобработка, проверочный расчёт и интерпретация результатов оптимизации.

Благодаря возможностям модуля «Топологическая оптимизация» конечно-элементного вычислительного комплекса «MidasCivil» была сгенерирована конечно-элементная модель из оболочечных элементов с равномерной сеткой, которая представлена на рисунке 3.

Ранее авторами данной статьи была начата работа по оптимальному проектированию тонкостенного купольного покрытия [3-5].

Ширина рассматриваемого купола - 16,5 метра. Высота купола варьировалась в ходе расчётов. На рис. 1 показана геометрическая схема купола. Нагрузка принималась вертикальная равномерно распределённая нагрузка 1тс/м^2+собственный вес (рис. 1-2).

В результате топологической оптимизации получается просто равномерное уменьшение толщины оболочки к основанию при действии только вертикальной равномерно распределённой нагрузки и собственного веса. Вид сбоку и сверху оптимизированного купольного покрытия представлены на рис. 2-3.

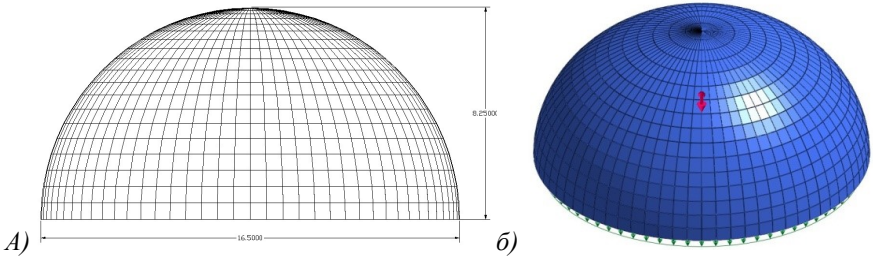


Рис. 1. а) геометрическая схема купола;
б) вид конечно-элементной модели купольного покрытия

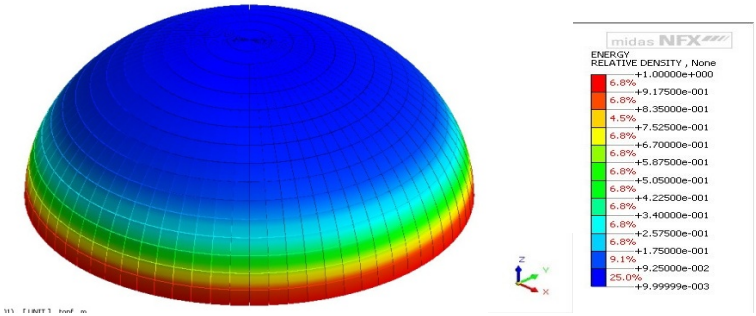


Рис. 2. Вид оптимизированного купольного покрытия (вид на верхнюю точку)

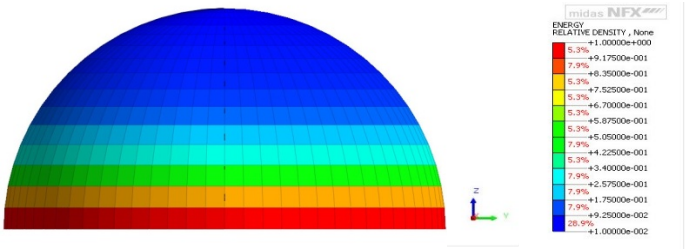


Рис. 3. Вид оптимизированного купольного покрытия (вид сбоку)

При оптимизации ставились условием ограничения по вертикальным перемещениям центра купола - 4 см. На рис. 4 представлен деформированный вид оптимизированного купольного покрытия.

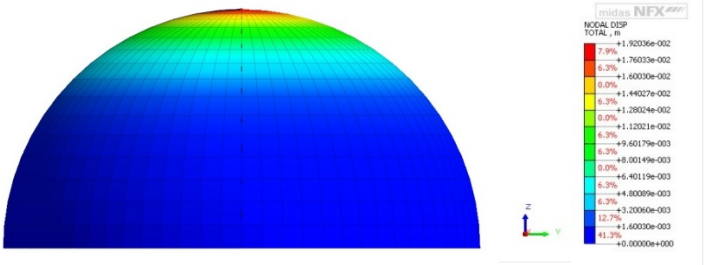
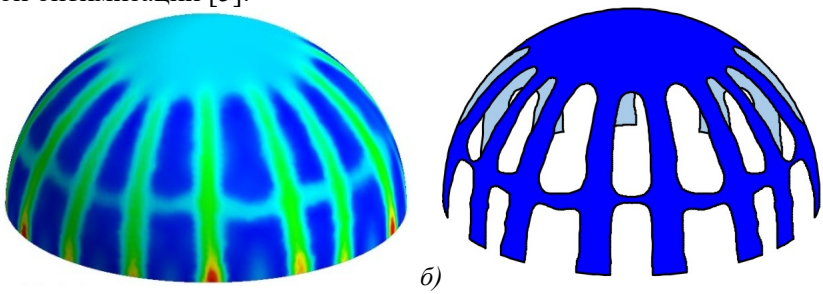


Рис. 4. Деформированный вид оптимизированного купольного покрытия

Приведем пример полученных результатов, иллюстрирующие возможности программного комплекса с точки зрения топологической оптимизации купола, позволяющие проектировать купольные покрытия с рациональным распределением материала по поверхности купольного покрытия при заданной нагрузки.

На рис. 5 (а,б) показаны соответственно конечно-элементная модель до оптимизации, мозаики распределения плотности материала по его поверхности, эскиз конечно-элементной модели по результатам проведенной оптимизации [5].



а) *б)*

Рис. 5. а) результаты оптимизации купола с распределением плотности материала по его поверхности; б) эскиз конечно-элементной модели по результатам проведенной оптимизации

Использование при проектировании методов оптимального (в частности, геометрического) проектирования тонкостенных купольных покрытий позволяет создавать более рациональные и экономичные конструкции, принимать обоснованные инженерные решения и находить новые архитектурные формы. Все это показывает обоснованность и целесообразность применения метода топологической оптимизации.

Библиографический список

1. Башин К.А., Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли / К.А. Башин, Р.А. Торсунов, С.В. Семенов / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, - 2017. - № (4 (51)). - С. 51-61.

2. Болдырев, А.В., (2011). Топологическая оптимизация силовых конструкций на основе модели переменной плотности. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, - 2011. - №13 (1-3). - С. 670-673.

3. Сотникова, О.А., Декомпозиция купольного покрытия при выборе конструктивных решений / О.А. Сотникова, С.Ю. Гриднев, Е.Е. Прокшиц // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии. Сборник материалов XXI Международной научно-технической конференции, - 2020. - С. 151-154.

4. Гриднев, С.Ю., Численные исследования влияния параметров тонкостенных купольных оболочек при их оптимизации / С.Ю. Грид-

нев, О.А. Сотникова, Е.Е. Прокшиц // Научный журнал строительства и архитектуры, -2020. - № 4 (60). - С. 11-21.

5. Gridnev, S.Yu., Optimization of thin-shell structure covers from position of their space stability / S.Yu. Gridnev, O.A. Sotnikova, L.P. Salogub, V.V. Portnov // Advances in Intelligent Systems and Computing, - 2021. -Т. 1259. - С. 708-720.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ДВИЖУЩЕЙСЯ НАГРУЗКИ

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

В настоящее время использование современных конечно-элементных комплексов является по сути мировым стандартом при выполнении динамических расчетов сооружений при решении ряда задач строительной механики. При этом ни один из широко известных конечно-элементных комплексов не имеет встроенного модуля для выполнения динамических расчетов несущих систем транспортных сооружений на действие подвижной инертной нагрузки.

Одним из способов имитации воздействия движущейся нагрузки является разработка вспомогательных программ (плагинов), расширяющих возможности существующих комплексов. Такой подход будем называть декомпозиционным, так как колебания несущей системы и колебания инертной модели движущейся нагрузки рассматриваются раздельно. Решается система дифференциальных уравнений, в которой приравниваются перемещения узлов пролетного строения в точках контакта и перемещения опорных узлов динамической модели движущейся нагрузки. Применение декомпозиционного подхода к расчету мостов рассматриваются в работах [1-3]. К недостаткам такого подхода можно отнести необходимость использования дополнительных программных средств, а также понимания алгоритмов работы плагинов для модификации модели движущейся нагрузки. Это ограничивает использование подхода для решения практических инженерных задач, а также усложняет сертификацию программного продукта в заявленной области на территории РФ.

Другим направлением разработки способа моделирования движущейся нагрузки с помощью МКЭ является использование алгоритмов контактного взаимодействия. Контактные условия широко используется в задачах прокатки и штамповки, краш-тестах, для моделирования взаимодействия деталей механизмов и соединений и реализованы в

большинстве универсальных конечно-элементных комплексов. При таком подходе именно контакт обеспечивает взаимосвязь конечно-элементных моделей движущейся нагрузки и несущей системы, позволяет моделировать совместные колебания общей динамической системы. В последние годы за рубежом заметно увеличилось количество публикаций, в которых для описания действия движущейся нагрузки используются контактные условий. Моделирование совместных колебаний подвижной нагрузки и пролётного строения автодорожного моста рассматривается в [4-7]. Недостаток этого подхода состоит в том, что существенная нелинейность модели порождает проблемы со сходимостью решения, что влечет за собой необходимость использования малых по времени шагов численного интегрирования системы дифференциальных уравнений движения и приводит к длительному времени расчета. Однако в последние годы границы применения контактных условий в задачах механики существенно расширились, что связано с одной стороны с ростом вычислительных возможностей компьютеров, а с другой - с совершенствованием алгоритмов расчета. Кроме того, если представить автомобиль в виде упрощенной модели, состоящей из жестких тел, соединенных между собой дискретными упругими связями, время расчета можно существенно уменьшить. Такой подход может быть использован, если целью задачи является анализ деформированного состояния несущей конструкции, а модель движущейся нагрузки адекватно отражает динамическое воздействие со стороны транспортного средства.

Чаще всего для моделирования контакта в конечно-элементных комплексах используется метод штрафа. Он применяется для обеспечения взаимодействия поверхностей, заданных узлами, и предотвращает взаимопроникновение частей модели друг в друга. Для установления связи между пролетным строением и движущейся нагрузкой с помощью алгоритмов контакта, необходимо выбрать и назначить поверхности, которые будут проверяться на каждом шаге динамического расчета на взаимопроникновение. Со стороны пролетного строения в контакте участвуют грани конечных элементов модели несущей системы, тогда как со стороны движущейся нагрузки контактную поверхность можно моделировать несколькими способами.

Использование конечно-элементной модели колеса позволяет достаточно достоверно отразить реальное динамическое поведение автомобиля, однако требует применения мелкой сетки для удовлетворительной аппроксимации цилиндрической поверхности. И

хотя такой подход часто встречается за рубежом в научных исследованиях, применение его в практических целях практически невозможно из-за большой трудоемкости.

В качестве альтернативы авторами предлагается использовать упрощенную конечно-элементную модель транспортного средства, которая обеспечивает динамическое взаимодействие с пролетным строением и позволяет значительно снизить трудозатраты расчета. Вместо колеса предлагается использовать его отпечаток, который моделируется с помощью плоских или стержневых конечных элементов. Податливость шин задается с помощью упругих связей, тогда как контактные условия между поверхностями балки и отпечатка служат лишь для передачи нормальных сил взаимодействия.

Численные исследования по анализу динамического поведения упруго-опертых балочных систем выполнялись в универсальном конечно-элементном комплексе LS-Dyna. В качестве несущей конструкции принята шарнирно-опертая балка с промежуточными упругими опорами общей длиной 120 см, по которой с постоянной скоростью перемещается тележка с грузом. Стойки тележки моделировались стержневыми КЭ, которые с одной стороны соединены с рамой, а с другой - взаимодействуют с балкой с помощью встроенной процедуры *CONTACT. Поступательное движение тележки вдоль балки задается другой процедурой PRESCRIBED_MOTION_RIGID. Она позволяет определить для узлов тела параметры движения (скорости, ускорения или смещения) по выбранному направлению. Внешние силы и кинематические граничные условия действующие на модель тележки во время движения представлены на рис. 1.

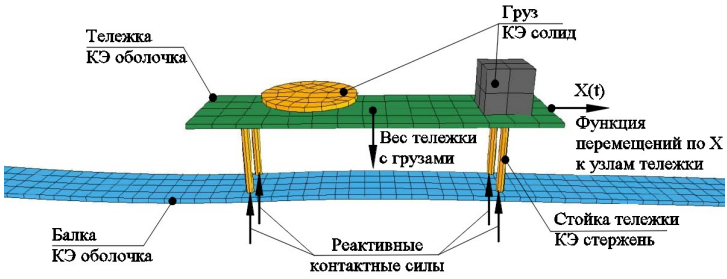


Рис. 1. Модель тележки и действующие факторы

При моделировании колебаний упруго-опертой системы, динамические уравнения движения решались явным методом центральных разностей. На

рис. 2 представлен деформированный вид рассматриваемой динамической системы в характерные моменты времени.

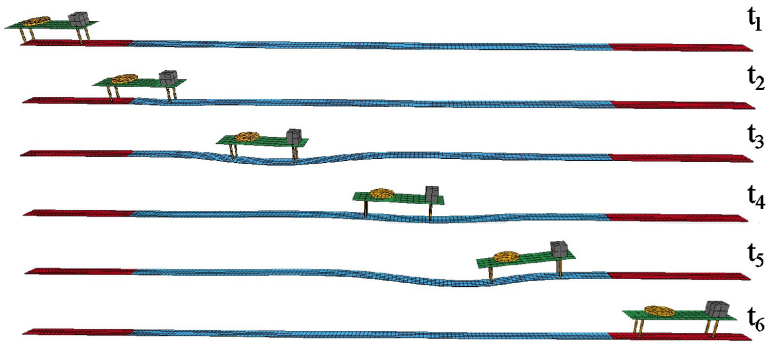


Рис. 2. Деформированный вид системы

Время расчета варьировалось в зависимости от скорости движения нагрузки (от 2 до 5 секунд). Расчет представленной задачи выполнялся на процессоре Intel i5-8600 и длился в среднем 40 минут.

Таким образом, выбранный и адаптированный подход конечно-элементного моделирования движущейся нагрузки с помощью контактных условий позволяет оценить напряженно-деформированное состояние пролетного строения в динамической постановке, используя стандартные инструменты программы LS-Dyna. С ростом вычислительных возможностей компьютеров предложенный способ, при условии выработки оптимальной модели транспортного средства, может стать одним из наиболее перспективных при анализе пролетных строений в дополнение к нормативной методике расчета.

Библиографический список

1. Архипенко Ю.В. Методика расчета динамического взаимодействия подвижных нагрузок с мостами с применением программных комплексов конечно-элементного анализа: автореф. дис. … канд. техн. наук. - Москва, 2006. - 176 с.

2. Кадисов Г.М. Конечно-элементное моделирование динамики мостов при воздействии подвижной нагрузки / Г.М. Кадисов, В.В. Чернышов // Инженерно-строительный журнал. - 2013. - №9 - С. 56-63.

3. Сафронов, В. С. Современные алгоритмы динамического расчета стержневых систем на подвижную подрессоренную нагрузку / В. С. Сафронов, А. В. Антипов // Строительная механика и конструкции. - 2019. - № 1(20). - С. 30-40.

4. Gridnev S. Finite element modeling of a moving load using contact conditions / S. Gridnev, I. Ravodin // XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering - Rostov-on-Don, 2018 - 8 p.

5. Gridnev S. Development of a Model to Moving Load For Analyzing Oscillations of a Bearing System with Elastic Constraints in the Finite Element Complex Midas NFX / S. Gridnev, Yu. Scalko, I. Ravodin // Mechanika 2019: Proccedings of the 24th International Scientific Conference, Kaunas 17.05.2019 - Kaunas University of Technology, 2019. - P. 126-131.

6. Gui Shuirong, Research on Models of a Highway Bridge Subjected to a Moving Vehicle Based on the LS-DYNA Simulator / Gui Shuirong, Liu Lv, Chen Shuisheng, Zhao Hui // Journal of Highway and Transportation Research and Development. - 2014. - Vol.8 - P. 76-82.

7. Huan-huan Wang, Dynamic analysis of maritime gasbag-type floating bridge subjected to moving loads / Huan-huan Wang, Xianlong Jin // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. - 2015. - Vol.8 - P. 137-152.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ СООРУЖЕНИЙ НА МНОГОСЛОЙНОМ АНИЗОТРОПНОМ УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С УЧЕТОМ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ

Золотов Н.В., Теличко В.Г., Трещев А.А.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Интенсивное развитие технологий и науки о материалах в XXI веке, а также всё растущие требования к экономичности и надёжности строительных конструкций предъявляют серьёзные требования к развитию исследовательского аппарата строительной механики. При детальном изучении деформирования некоторых широко используемых в инженерной практике материалов, таких как бетон, графиты, полимеры и др., было установлено, что их поведение значительно отличается от «классических» представлений. Деформационные и прочностные характеристики таких материалов проявляют чувствительность к виду реализуемого в точке напряжённого состояния, причём при высоких эксплуатационных нагрузках зависимости между напряжениями и деформациями оказываются существенно нелинейными. Кроме того, данные особенности характерны, как для и для композитных материалов применяемых в строительстве современных зданий и сооружений, таких как, например, бетон и железобетон, так и для упругих оснований, составленных из анизотропных, в общем случае, грунтовых образований.

В конце XIX, вместе с поиском новых архитектурных направлений были открыты новые возможности бетонов и классическая эстетика архитектурной композиции была заменена представлениями конструктивизма. Бетон, а затем и железобетон, дали возможность архитектору создавать ранее невиданные уникальные архитектурные формы, что позволило сделать многоэтажные высотные здания лицом многих городов мира.

Расчет зданий и сооружений необходимо выполнять с учетом совместной работы системы «здание-основание» для учета взаимовлияния деформирования сооружения/здания и основания. Необходимость подобного расчета четко указана в современных нормативных документах. Необходимость выполнения расчета здания совместно с основанием особенно актуальна для настоящего уровня развития механики как передовой науки, когда, благодаря внедрению, соответствующих требованиям настоящего времени, методов расчета и новейших материалов, может быть реализована возможность проектирования строительных конструкций с оптимальными запасами прочности. При совместной работе здания и упругого основания даже незначительное изменение условий функционирования объекта может приводить к проявлению явления трещинообразования и снижению надежности конструкции сооружения с последующим разрушением.

Таким образом, задача о разработке подхода к моделированию напряженно-деформированного состояния комбинированных конструкций (система «здание - основание») с учетом чувствительности свойств материала к виду реализованного в точке напряженного состояния, учета структурной анизотропии строительных материалов, анизотропии грунтов, а также явления разносопротивляемости и образования трещин в несущих конструкциях является актуальной и важной задачей современной строительной механики как теоретическом, так и прикладном плане.

Для определения напряженно-деформированного состояния нелинейных разносопротивляющихся материалов был предложен ряд определяющих соотношений [1 - 6]. Однако, практически все указанные модели имеют существенные недостатки, ограничивающие их применения для расчета конструкций, находящихся в сложном напряженном состоянии [2]. Поэтому в данной работе используется вариант уравнений состояния изотропных разносопротивляющихся материалов, базирующийся на методике нормированных пространств напряжений [1].

Как показано в работах [2, 9, 10] достаточно эффективными для расчета железобетонных конструкций являются гибридные КЭ, Р.Куком получены две модификации гибридных КЭ с тремя степенями свободы

в узле [12]. Непосредственное применение конечных элементов Р.Кука к расчету железобетонных пространственных конструкций показало, что они не учитывают продольные усилия и перемещения в срединной поверхности, а также не позволяют определить вектор обобщенных сил в центре КЭ достаточно просто и точно [2, 8]. Поэтому была разработана модификация гибридных КЭ с пятью степенями свободы в узле и матрицей жесткости, полученной непосредственно для произвольного плоского треугольного элемента. На основе выбранных определяющих соотношений рассмотрена модель гибридного изгибного треугольного конечного элемента с 5 степенями свободы в узле, учитывающая продольные усилия и деформации поперечного сдвига, позволяющая просто и эффективно исследовать НДС конструкций произвольной геометрии. Процедуры связанные с получением матрицы жесткости гибридного конечного элемента подробно описаны в работах [2, 12].

Авторами была решена задача об определении напряженно-деформированного состояния здания на упругом основании. Здание содержит 12 этажей, имеющих одинаковую планировку, внешний вид здания в виде 3D модели показан на рис. 1.

При расчете принимались следующие допущения: 1) расчетная модель здания состоит только из горизонтальных и вертикальных несущих элементов монолитного железобетонного остова, соответственно - междуэтажных перекрытий и пилонов; 2) толщина всех междуэтажных перекрытий принята одинаковой и равняется 300 мм (толщина фундаментной плиты 800 мм); 3) толщина всех пилонов по высоте здания принимается одинаковой и равняется 400 мм; 4) все узлы сопряжения элементов несущего остова между собой приняты жесткими; 5) деформирование горизонтальных и вертикальных элементов несущего остова происходит с учетом процессов разрушения, 6) упругое основание моделируется в соответствии с работами, на основе определяющих соотношений для анизотропных разносопротивляющихся материалов.

Таблица 1. Нагрузки

Нагрузка	Шаг нагрузки		Максимальная величина нагрузки	
Единицы измерения:	кПа	кН/м	кПа	кН/м
На покрытие - q_{rf}	1,5	-	30	-
На этаж - q_{fl}	1,5	-	30	-
Ветровая - q_{w1}	0,5	0,152	10	3,04
Ветровая 2 - q_{w2}	0,7	0,212	14	4,24
Ветровая 3 - q_{w3}	0,45	0,136	8	2,42

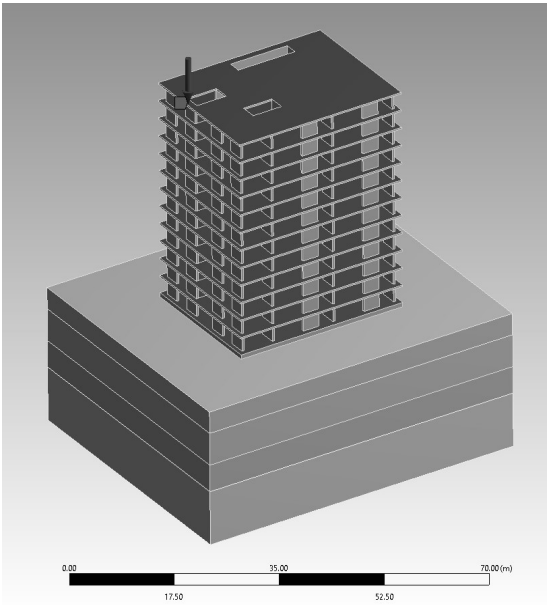
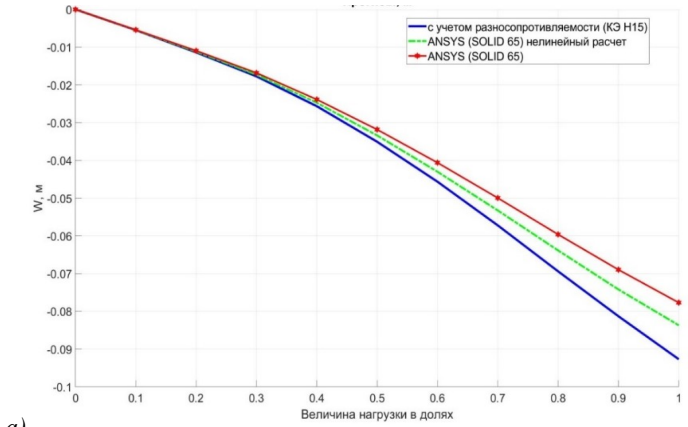


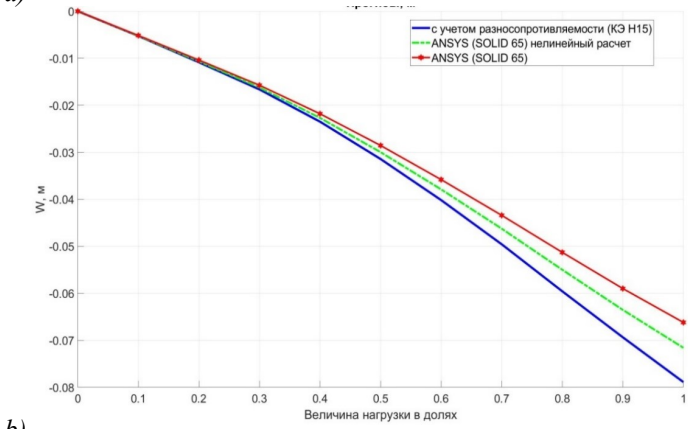
Рис 1. Общий вид рассматриваемого здания
(модель в ANSYS Workbench 2020 R2)

В качестве основного материала здания использовался бетон с пределом прочности на сжатие $R^{-} = 28,4$ МПа . Армирование фундаментной плиты принято стержнями А400 диаметром 16 мм в виде сетки расположенной симметрично в сечении плиты (защитный слой 50 мм, предел текучести $\sigma_p = 400\ МПа$), армирование плит перекрытия принято стержнями А400 диаметром 14 мм в виде сетки расположенной симметрично в сечении плиты (защитный слой 35 мм, предел текучести $\sigma_p = 400\ МПа$), армирование пилонов принято стержнями А400 диаметром 12 мм в виде двух сеток симметрично расположенных в сечении пилона (защитный слой 35 мм, предел текучести $\sigma_p = 400\ МПа$). Прилагаемые нагрузки приведены в таблице 1.

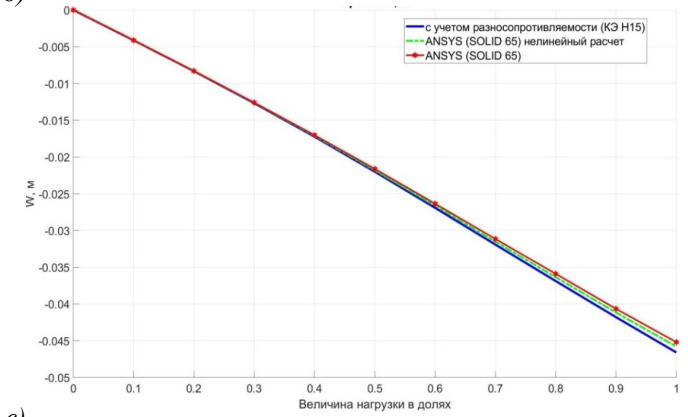
На рис. 2 приведены результаты расчетов в сравнении с аналогичными расчетами, выполненными в системе ANSYS Workbench \ ANSYS APDL. Здесь a) в плите перекрытия 12-ого этажа; b) в плите перекрытия 6-ого этажа; c) в фундаментной плите. Разница по вертикальным напряжениям достигает величины в 25%.



a)



b)



c)

Рис. 2. Максимальное вертикальное перемещение

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Модель разносопротивляемости, в принятая в соответствии с работами [1,3,6] показала хорошие результаты в части определения перемещений, полученные результаты отличается от аналогичных, полученных в результате нелинейного расчета в программе ANSYS, в точке экстремума на 25%.

2. Проведенный численный эксперимент по решению задачи об определении напряженно-деформированного состояния здания позволяет объективно утверждать, что данная модель обладает рядом преимуществ перед существующими, реализованными в популярных САПР. Модель позволяет учесть разносопротивляемость материала, образование трещин, пластические деформации в арматуре, построенный конечный элемент получен в форме удобной для его программной реализации, что и было продемонстрировано в данной работе, также возможен учет работы упругого состояния для расчета комбинированных конструкций.

Библиографический список

1. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения. М.; Тула: РААСН; ТулГУ. 2008. 264 с.

2. 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.

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

4. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. Москва: Наука, 1982. 320 с.

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

6. Трещев А.А. Теория деформирвоания и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Упругопластические деформации. / А.А. Трещев, А.А. Бобрышев. - М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2017. - 140 с.

7. Карпенко, Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами / Н.И. Карпенко. - М.: Стройиздат, 1976. - 208 с.

8. 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.

9. Jendele L, Cˇervenka J. On the solution of multi-point constraints - application to FE analysis of reinforced concrete structures // Computers & Structures. 2009. Vol. 87. Pp. 970-980.

10. Bathe K.J., Walczak J., Welch A., Mistry N. Nonlinear analysis of concrete structures // Computers & Structures. 1989. Vol. 32. Pp. 563-590.

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

12. 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.

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

14. Гениев, Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. - М.: Стройиздат, 1974. - 316 с.

15. Теличко, В.Г. К расчету оснований методом конечных элементов / В.Г. Теличко, П.Ю. Ходорович // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2014. Вып. 11: в 2 ч. Ч. 1. С. 341-347.

16. Трещев, А.А. Задача о давлении на полупространство из анизотропного разносопротивляющегося материала / А.А. Трещев, В.Г. Теличко, П.Ю. Ходорович // Сборник трудов конференции «Фундаментальные проблемы механики деформируемого твердого тела, математического моделирования и информационных технологий» в 2 частях. 2013, Издательство: Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева (Чебоксары), 2013. С. 250-258.

17. Трещев, А.А. К задаче о давление на грунтовое основание / А.А. Трещев, В.Г. Теличко, П.Ю. Ходорович // Вестник отделения строительных наук РААСН. - М.: РААСН-МГСУ. - 2014. - Вып. 18. - С. 95 - 99.

18. Карпенко, Н.И. Модель деформирования железобетона в приращениях и расчет балок-стенок и изгибаемых плит с трещинами / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, А.Н. Петров, С.Н. Палювина - Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. - 156 с.

ПРИМЕНЕННИЕ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПЕШЕХОДНЫХ МОСТОВ

Козырева Л.В., Балакшин А.В.
СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Древесина и камень издавна служили материалами для строительства мостов. Первый металлический мост был построен в конце 18 века, а первый железобетонный спустя 100 лет, в конце 19 века. В настоящее время металл и железобетон являются основными строительными

материалами в мостостроении, потеснив древесину и камень, но в последнее времядля мостовых сооружений все чаще стали применяться композитные материалы. Правда мостовики осторожно подходят к использованию нового материала и применяют его только для пешеходных мостов, которые наряду с оригинальным дизайном создают интересные современные решения мостовых сооружений.

Композиты - это материалы, состоящие из двух или более компонентов (армирующих элементов и скрепляющей их матрицы) и обладающие свойствами, отличными от суммарных свойств компонентов.

Характерными чертами композитов является то, что его состав, форма и распределение компонентов материала «заранее продуманы»;материал не встречается в природе, а создан человеком; материал состоит из двух и более компонентов, различающихся химическим составом и разделенных четкой границей; свойства материала определяются каждым из его компонентов; материал обладает такими свойствами, которыми его компоненты, взятые по отдельности, не обладают.

В современной архитектурно-строительной практике и, в частности, при строительстве мостов, в основном используются три типа фиброармированного пластика. Их классифицируют по типу армирующего материала (матрицы), а именно: стекловолокно, углеродное волокно и органопласт. Эти композиты армированы, соответственно, стекловолокном, углеродным волокном, органическим волокном. В последнем случае возможны варианты использования волокон, полученных при переработке биоматериалов.

Преимуществами мостов из полимерных композиционных материалов являются: отсутствие деформации в диапазоне рабочих температур;коррозионная стойкость, простота ухода и мытья водой; достаточно высокая огнестойкость; меньшая высота конструкций и меньшее давление на опоры и, как следствие, более легкие и эффективные опоры;довольно простой монтаж при меньшем использовании подъемного оборудования;большая простота доставки в более легкие сборочные единицы мостовых сооружений; возможность снижения трудозатрат с возможностью выполнения ручной сборки в труднодоступных местах.

Примером малого пешеходного моста с пролётным строением из стеклопластика может служить мост, построенный в г.Роттердам в Голландии в 2012 г., где реализуется городская программа замены старых мостов на новые. В городе, известном своими многочисленными каналами, количество пешеходных мостов исчисляется сотнями. Пролеты новых пешеходных мостов, заменяющие старые, изготавливаются

на основе стеклопластикового композита и на несущую конструкцию устанавливаются металлические перила.

Рис. 1

Пролеты таких пешеходных мостов тонкие и изящные. Архитектурные решения таких объектов впервые были разработаны Олафом Гипсером. Право на разработку проекта было получено после победы в открытом тендере, проведенном администрацией города в 2010 году. Реализованный дизайн отличается лаконичностью и элегантностью. По замыслу архитекторов, верхний профиль перил не повторяет очертания пролета, а остается строго горизонтальным. Такое решение, по мнению авторов, добавляет спокойной горизонтали окружающему городскому ландшафту. Легкие и тонкие мосты из стекловолокна с расчетным сроком службы до 60 лет гораздо лучше подходят для городских условий, чем их более массивные деревянные предшественники. В последние годы берега обросли взрослыми деревьями, что способствует улучшению экологии и спокойному стилю ходьбы, характерному для парковых зон. Поэтому силуэты перил новых мостов должны были стать максимально изящными: тонкими и почти незаметными. Решения реализованы полностью.

Все мосты, производимые «ФайберКорЕвропа» с использованием технологии «ИнфраКор 27, характеризуются гибридной конструкцией, сочетающей эстетику гладкого и тонкого настила из стекловолокна с рациональными очертаниями и металлическими перилами, обычно сделанными из тонких стальных профилей. Стекловолокно и металл

стыдятся создавать образ конструктивной чистоты, лаконичности, тонкости и выражения основных эстетических свойств каждого из материалов. Формируется гибридный дизайн, позволяющий удачно вписать современные постройки в существующий городской ландшафт.

Интересный вариант использования профилированного стеклопластика был реализован в 2011 году при строительстве пешеходного моста на пересечении Юбилейного проспекта, ул. Горшина и ул. 9 мая в городе Химки Московской области.

Крестовидный пешеходный мост расположен над кольцевой проезжей частью, имеет четыре цилиндрических лестнично-лифтовых узла и ажурную архитектурную решетку из стеклопластика. Изящная конструкция изогнутых стержней круглого сечения оплетает лаконичные объемы перехода единой объемной сеткой. Конструкция представляет собой пример гибридного дизайна, сочетающего традиционную узнаваемую структуру металлического каркаса и фасадного остекления с эстетикой современной трехмерной композитной сетки, геометрия которой построена с использованием технологий 3D CAD. Вес четырехпролетной сетчатой конструкции - 17,2 тонны (из них 15,2 тонны - композитный материал). Габариты объекта в плане - 90х90 м20.

Рис. 2

В соответствии с последними исследованиями и разработками, фиброармированный пластик может применяться в различных областях мостостроения. Одним из наиболее актуальных направлений является строительство малых пешеходных и велосипедных мостов.

Проектирование и строительство пешеходных мостов из композиционных полимерных материалов - одно из перспективных направлений современного мостостроения.

Библиографический список

1. Ушаков А.Е., Кленин Ю.Г., Сорина Т.Г., Хайретдинов А.Х., Сафонов А.А. Мостовые конструкции из композитов // Композиты и наноструктуры. 2009 №3 (3). - С. 25-37.

2. Аверченко Г.А., Квитко А.В. Развитие композитов в мостостроении // Научные исследования: от теории к практике. - 2016. - № 4-2 (10). - С. 10-16.

3. Гутам Бхаттачария, НрипатиРаньянБоуз. Применение современных армированных композитных материалов в мостах и конструкциях//Мостостроение мира. 2014. №3, с. 20-29.

4. Фролов Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции// Стройиздат. М. 1980. 105 с.

5. Композиты - это будущее! (интервью с Б.Б. Мандриком-Котовым, ООО «ПГМ -Городское пространство») // Дороги. Инновации в строительстве 2014. №42. с.82-83.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОДЪЕМНО-ПОВОРОТНОГО СТЕНДА МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко И.Н., Матченко Н.М.
ТулГУ, ООО «ЭЦТБ», г. Тула, Россия

Подъемно-поворотный стенд является ответственным агрегатом в металлургическом производстве. Его две консоли поднимают сталеразливочные ковши с предельно допустимым весом 250 т.

Подъемно-поворотный стенд для сталеразливочных ковшей машины непрерывного литья, содержит поворотный корпус, траверсы для сталеразливочных ковшей, шарнирно соединенные между собой посредством пальцев через верхние и параллельные нижние звенья, а также гидроцилиндры подъема, штоки которых шарнирно соединены осями с траверсами для сталеразливочных ковшей. Каждая траверса выполнена из двух частей, закрепленных с возможностью поворота относительно друг друга.

В настоящее время остро стоит проблема периодического контроля областей металла и сварных швов консолей подъемно-поворотного стенда в связи с наличием сложных условий в виде вы-

соких температур и невозможности длительной остановки (максимальный срок остановки до 5 дней). Опыт эксплуатации подъемно-поворотных стендов показывает появление трещин (видимых или подповерхностных) в растянутой зоне консолей. Обследуемый стенд выполнен SMS-Group (Германия).

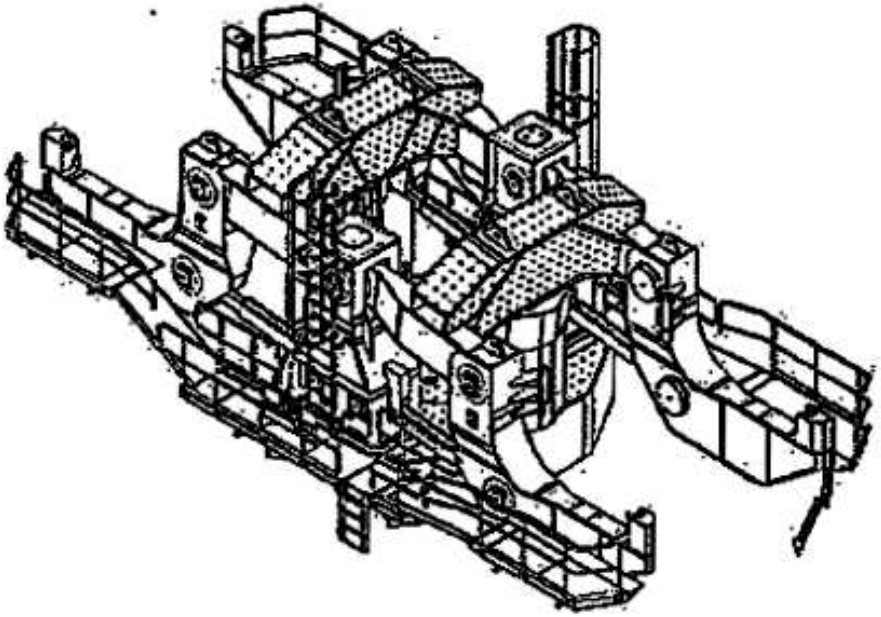


Рис. 1. Аксонометрическое изображение подъемно-поворотного стенда

В ходе оценки состояния проводился неразрушающий контроль по методу магнитной памяти металла [2] и вихретоковый контроль [3]. Замеры проведены в зонах контроля сварных швов и основного металла (рис. 3 -области контроля консоли подъемно-поворотного стенда, рис. 4 - области контроля опоры для установки разливочного ковша на подъемно-поворотный стенд).

Были выявлены на контрольных образцах трещины в сварном шве и зоне термического влияния. Специализированные вихретоковые датчики позволяют отстроиться от влияния мешающих факторов и работать по грубой и необработанной поверхности сварного шва через защитное покрытие.

Результаты проведенной работы показали надежность и высокую производительность выявления трещин в сварных швах вихретоковым методом.

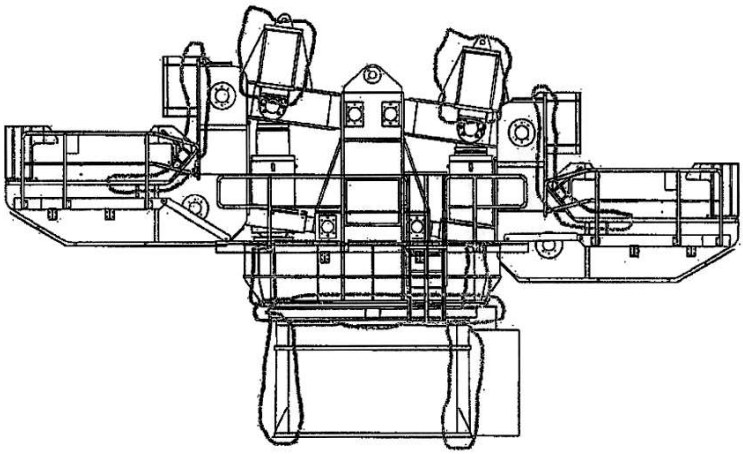


Рис. 2. Области контроля подъемно-поворотного стенда

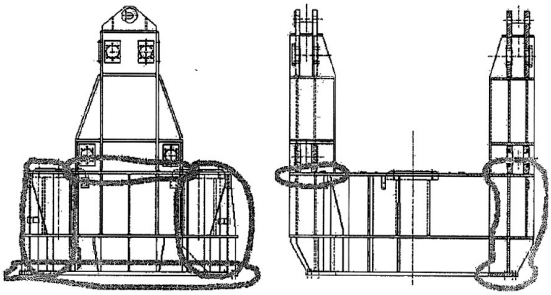


Рис. 3. Области контроля консоли подъемно-поворотного стенда

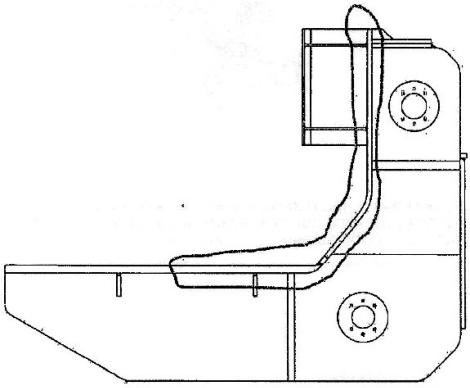


Рис. 4. Области контроля опоры для установки разливочного ковша на подъемно-поворотный стенд

Библиографический список

1. Гроздов В. Т. Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений. - СПб.: Издательский Дом KN+, 2001. 140 с.

2. ГОСТ Р ИСО 24497-2-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. - Non-destructive testing. Metal magnetic memory.: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 декабря 2009 г. N 587-ст: введен впервые: дата введения 2010-12-01. Подготовлен Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АНО «НИЦ КД»). - Москва: Стандартинформ, 2010. - 8 с. - Текст непосредственный.

3. ГОСТ Р ИСО 15549-2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. - Non-destructive testing. Eddy current testing.: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. N 1099-ст: введен впервые: дата введения 2011-01-01. Подготовлен Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГУП "ВНИИОФИ"). - М.: Стандартинформ, 2011. - 12 с.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОРРОЗИОННОЙ ВОДОРОДНОЙ СРЕДЫ НА НДС КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Кузнецова В.О.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Впервые модель расчёта элементов конструкций, работающих в агрессивных коррозионных водородосодержащих средах, с учётом изменения свойств материала во времени, была предложена В.В. Петровым, И.Г. Овчинниковым и А.Б. Рассадой. Кроме напряжения, в систему определяющих параметров введены дополнительные параметры q_i, которые учитывают взаимодействие материала со средой [1].

Объектом проводимого исследования является цилиндрическая оболочка, выполненная из титанового сплава ВТ1-0, находящаяся под внутренним давлением до 5 МПа, закрепление по периметру жесткое. Координаты случайной точки срединной поверхности оболочки опре-

деляется гауссовыми координатами α_1 и α_2, с учётом действия поперечной нагрузки q, согласно рисунка 1. В рассматриваемом случае коэффициенты Ляме и главные кривизны определяются следующим образом [2]:

$$\tilde{A} = 1; \qquad \tilde{B} = R; \qquad k_1 = 0; \qquad k_2 = R^{-1}, \tag{1}$$

здесь R - радиус оболочки.

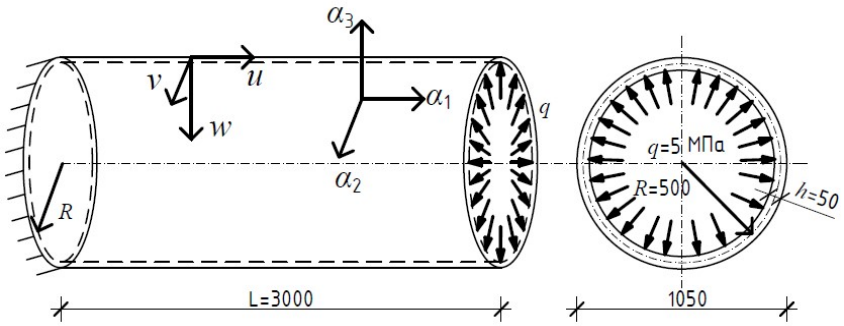


Рис. 1. Расчётная схема оболочки

Кинетический потенциал деформаций для рассматриваемой задачи примем в виде:

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

где $A_e(\lambda)$, $B_e(\lambda)$, $C_e(\lambda)$, $D_e(\lambda)$, $E_e(\lambda)$, $A_p(\lambda)$, $B_p(\lambda)$, $C_p(\lambda)$, $D_p(\lambda)$, $E_p(\lambda)$ - физические функции потенциала квазилинейной и нелинейной частей, зависящие от степени водородонасыщения. Зависимости механических свойств материала вычислены в результате полиномиальной интерполяции значений коэффициентов при заданном уровне концентрации среды λ (0; 0,01; 0,03 и 0,05%) и для сплава ВТ1-0 принимают вид:

$$V_{ek}(\lambda) = e_{0k} + e_{1k}\cdot\lambda + e_{2k}\cdot\lambda^2; \quad V_{pk}(\lambda) = p_{0k} + p_{1k}\cdot(p_{2k})^{\lambda}; \tag{3}$$

$$A_e(\lambda) = V_{e1}(\lambda); \quad B_e(\lambda) = V_{e3}(\lambda); \quad C_e(\lambda) = V_{e2}(\lambda); \quad D_e(\lambda) = V_{e4}(\lambda);$$
$$E_e(\lambda) = V_{e5}(\lambda); \quad A_p(\lambda) = V_{p1}(\lambda); \quad B_p(\lambda) = V_{p3}(\lambda); \quad C_p(\lambda) = V_{p2}(\lambda);$$
$$D_p(\lambda) = V_{p4}(\lambda); \quad E_p(\lambda) = V_{p5}(\lambda), \tag{4}$$

где e_{ik}, p_{ik} - коэффициенты полиномов i = 0...3; k = 1...3.

Зависимость тензоров деформаций и напряжений определим из потенциала деформаций (2) по формулам Кастильяно:

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

$$e_{ij} = 2C_e(\lambda)\sigma_{ij} / 3 + 2(A_e(\lambda) - C_e(\lambda))\sigma\delta_{ij} / 3 + T_{ij}(\lambda),$$

где $T_{ij}(\lambda)$ - нелинейная составляющая уравнений состояния.

Для теории цилиндрических оболочек [3] характерны следующие зависимости:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5w_{,1}^2; \quad \varepsilon_2 = v_{,2} + k_2 w + 0,5(-w_{,2} + k_2 v)^2;$$
$$\gamma = v_{,1} + u_{,2} - w_{,1}(w_{,2} + k_2 v);$$
$$\chi_1 = -w_{,11}, \tag{6}$$

где ε_1, ε_2 - удлинения; γ - сдвиговые деформации; u - осевые перемещения; v - касательные перемещения; w - радиальные перемещения.

Составляющие деформации в точках, отстоящих на расстоянии α_3 от срединной поверхности, определяются через компоненты тангенциальных и изгибных деформаций:

$$e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3\chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2 + \alpha_3\chi_2; \quad \gamma_{12} = \gamma + 2\alpha_3\chi_{12}. \tag{7}$$

Учитывая осевую симметрию рассматриваемой задачи и загружение оболочки внутренним давлением q, кинематические зависимости запишем в виде:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5w_{,1}^2; \quad \varepsilon_2 = k_2 w; \quad \chi_1 = -w_{,11}; \quad e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3\chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2. \tag{8}$$

Связь между деформациями и напряжениями представим в виде:

$$\begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \end{Bmatrix} = [\mathrm{A}] \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix}; \quad [\mathrm{A}] = \begin{bmatrix} A_{11} A_{12} \\ A_{21} A_{22} \end{bmatrix}; \tag{9}$$

Обращая соотношения (9), получаем зависимость напряжений от деформаций:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix} = [\mathrm{B}] \begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \end{Bmatrix}; \quad [\mathrm{B}] = \begin{bmatrix} B_{11} B_{12} \\ B_{21} B_{22} \end{bmatrix}, \tag{10}$$

где $[\mathrm{B}] = [\mathrm{A}]^{-1}$.

Здесь A_{11}, A_{12}…- составляющие симметричной матрицы податливостей [A] - т. е. функции, содержащие функции потенциала W_1 (2).

Усилия, моменты и поперечную силу найдём через напряжения традиционным способом:

$$N_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 d\alpha_3; \quad N_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_2 d\alpha_3; \; M_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 \alpha_3 d\alpha_3;$$

$$M_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_2 \alpha_3 d\alpha_3; \; Q_1 = M_{1,1}.$$

Связь моментов и усилий с компонентами деформаций оболочки приведём к виду:

$$N_1 = D_{11}\varepsilon_1 + D_{12}\varepsilon_2 + P_{11}\chi_1; \quad N_2 = D_{12}\varepsilon_1 + D_{22}\varepsilon_2 + P_{21}\chi_1;$$

$$M_1 = P_{11}\varepsilon_1 + P_{12}\varepsilon_2 + B_{11}\chi_1; \quad M_2 = P_{21}\varepsilon_1 + P_{22}\varepsilon_2 + B_{21}\chi_1,$$

где с учётом влияния степени наводороживания материалов при концентрации λ материальные функции имеют вид:

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

С учетом тройной нелинейности задачи, производим построение разрешающих уравнений в линеаризованной форме с использованием двухшагового метода последовательных возмущений параметров:

$$\delta e_{11} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \lambda}\delta\lambda; \; \delta e_{22} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \lambda}\delta\lambda;$$

$$\delta\varepsilon_1 = \delta u_{,1} + w_{,1}\,\delta w_{,1}; \quad \delta\varepsilon_2 = k_2\delta w; \quad \delta\chi_1 = -\delta w_{,11}; \tag{11}$$

$$\delta e_{11} = \delta u_{,1} + w_{,1}\,\delta w_{,1} - \alpha_3\delta w_{,11}; \quad \delta e_{22} = k_2\delta w.$$

Зависимости приращений деформаций в точке через приращения деформаций срединной поверхности $\delta\varepsilon_1$ и $\delta\varepsilon_2$ и кривизны срединной поверхности $\delta\chi_1$, представляются следующим образом:

$$\delta e_{11} = \delta\varepsilon_1 + \alpha_3\delta\chi_1; \quad \delta e_{22} = \delta\varepsilon_2;$$

Рассматривается задача, в которой процесс воздействия коррозионной водородной среды на оболочку завершён. Дифференцирование по параметру λ в выражениях приращений деформаций (11) не требуется, соответственно, уравнения связи усилий с деформациями срединной поверхности в приращениях примут вид:

$$\delta N_1 = D_{11}\delta\varepsilon_1 + D_{12}\delta\varepsilon_2 + P_{11}\delta\chi_1; \quad \delta N_2 = D_{12}\delta\varepsilon_1 + D_{22}\delta\varepsilon_2 + P_{21}\delta\chi_1;$$

$$\delta M_1 = P_{11}\delta\varepsilon_1 + P_{12}\delta\varepsilon_2 + B_{11}\delta\chi_1;\quad \delta M_2 = P_{21}\delta\varepsilon_1 + P_{22}\delta\varepsilon_2 + B_{21}\delta\chi_1. \qquad (12)$$

Учитывая осевую симметрию конкретной рассматриваемой задачи и то, что оболочка нагружена внутренним давлением q, уравнения равновесия запишутся в виде:

$$\delta N_{1,1} = 0;\ \delta M_{1,1} - \delta Q_1 + w_{,1}\,\delta N_1 + N_1\delta w_{,1} = 0;.\ \delta Q_{1,1} - k_2\delta N_2 + \delta q = 0\,. \qquad (13)$$

Проинтегрировав соотношения по толщине оболочки и подставив полученные зависимости для поперечной силы в уравнения равновесия и учитывая, что $\delta N_1 = 0$ и $\delta Q_1 = \delta M_{1,1}.$, а также, принимая во внимание уравнение неразрывности деформаций, которое в данном случае имеет вид в приращениях:

$$k\delta\chi_1 + \delta\varepsilon_{2,11} = 0\,.$$

Система разрешающих уравнений:

$$\delta M_{1,11} - k_2\delta N_2 + \delta q = 0,$$
$$k_2\delta\chi_1 + \delta\varepsilon_{2,11} = 0.$$

Из (12) получим выражения для приращений деформаций:

$$\begin{bmatrix}\delta\varepsilon_1\\ \delta\varepsilon_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_{11} & L_{12}\\ L_{12} & L_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta N_1 - P_{11}\delta\chi_1\\ \delta N_2 - P_{21}\delta\chi_1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_{11}\left(\delta N_1 - P_{11}\delta\chi_1\right) + L_{12}\left(\delta N_2 - P_{21}\delta\chi_1\right)\\ L_{12}\left(\delta N_1 - P_{11}\delta\chi_1\right) + L_{22}\left(\delta N_2 - P_{21}\delta\chi_1\right)\end{bmatrix}$$

Получим систему из двух уравнений учетом $\left[L\right] = D^{-1}$:

$$\left(P_{11}\left(\delta u_{,1} + w_{,1}\,\delta w_{,1}\right) + P_{12}k_2\delta w + \left(-\delta w_{,11}\right)\right)_{,11} -$$
$$-k_2\left(D_{12}\left(\delta u_{,1} + w_{,1}\,\delta w_{,1}\right) + D_{22}k_2\delta w + P_{21}\left(-\delta w_{,11}\right)\right) + \delta q = 0; \qquad (14)$$
$$k_2\left(-\delta w_{,11}\right) + L_{12}\left(-P_{11}\delta\chi_1\right)_{,11} + L_{22}\left(\delta N_2 - P_{21}\delta\chi_1\right)_{,11} = 0.$$

В процессе химической адсорбции водород распадается на атомы, которые затем проникают вглубь материала [3,4]. Плотность потока *J* или количество вещества, пр оникающего за единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярную этому потоку, строго пропорциональна градиенту концентрации λ. Для малых перепадов концентрации водорода в среде возможно применение первого закона Фика, который гласит, что количество вещества, проникающее через воображаемое сечение, перпендикулярное направлению диффундирова-

ния, строго пропорционально величине градиента концентрации вещества в этом сечении, площади сечения и времени диффундирования:

$$J = -Dgrad\,\lambda = -D\frac{\delta\lambda}{\delta z} \tag{15}$$

где D - константа диффузии, z - координата в направлении диффузии.

В рассматриваемой задаче физически активная среда контактирует с оболочкой только по верхней или нижней поверхности, что приводит к одномерности процесса диффузии. Для поставленной одномерной задачи уравнение (15) запишется в виде первого закона Фика:

$$J = -D\delta\lambda,_{z},$$

Для титановых сплавов концентрация не влияет на коэффициент диффундирования, поэтому из первого закона Фика вытекает второй закон в виде:

$$\frac{\partial\lambda(z,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2\lambda(z,t)}{\partial z^2} \tag{16}$$

где t - текущее время.

Из выражения (16) очевидно, что скорость изменения процесса диффузии во времени зависит только от константы диффузии D. При процессе одностороннего диффундирования решение уравнения (16) имеет вид:

$$\lambda(z,t) = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1)z/h + (2/\pi)\sum_{i=1}^{\infty}\sin(i\cdot\pi\cdot z/h)\exp(-F_o\pi^2 i^2)\times$$

$$\times[\lambda_2\cos(i\cdot\pi) - \lambda_1]/i \tag{17}$$

где $F_0 = Dt/h^2$ - число Фурье; i - число членов ряда; λ_1 и λ_2 - краевые условия для концентрации среды сверху и снизу оболочки; h - толщина оболочки; z - координата по толщине оболочки.

Расчёты производились посредством пакетов математических прикладных программ Maple и MATLAB. Ниже представлены результаты расчёта цилиндрической оболочки, работающей в агрессивной водородной среде с разной концентрацией от 0 до 0,05%, с использованием предложенной модели.

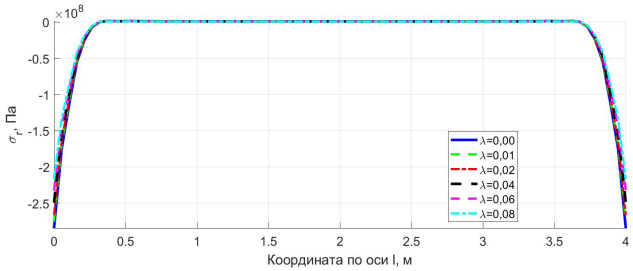


Рис.2. Напряжения σ_{11} вдоль образующей цилиндра снизу

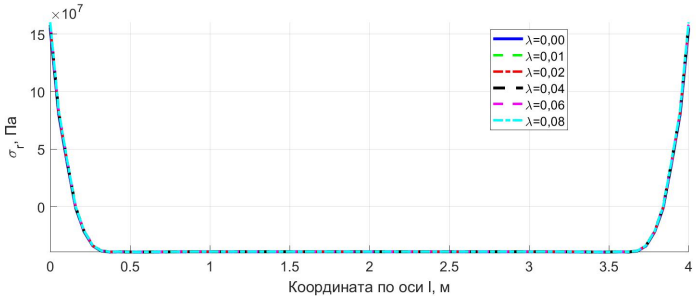


Рис.3. Напряжения σ_{11} вдоль образующей цилиндра сверху

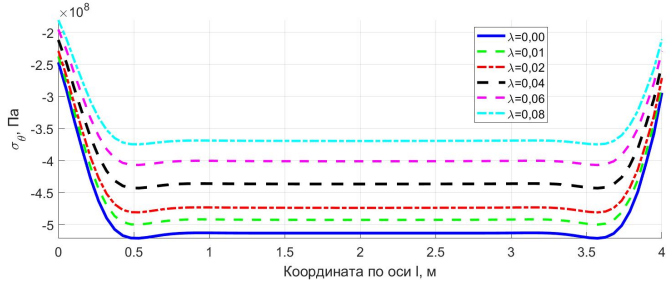


Рис.4. Напряжения σ_{22} вдоль образующей цилиндра снизу

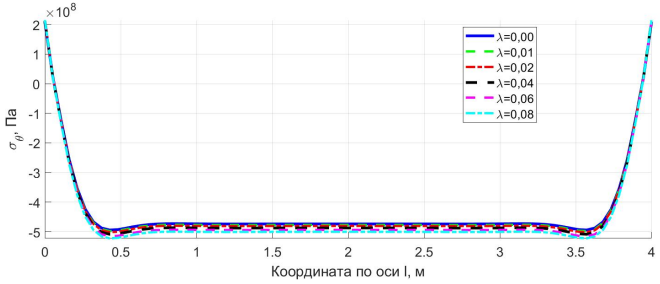


Рис.5. Напряжения σ_{22} вдоль образующей цилиндра сверху

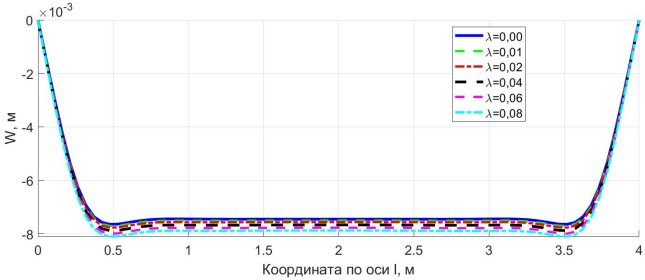


Рис.6. Прогибы в срединной поверхности цилиндра

В результате проведенного исследования подтвердилось предположение, что с течением времени, соответствующего большим градиентам концентраций водорода, наблюдается интенсивное изменение характера напряженно-деформированного состояния (см. рис. 2-6), достигающее для напряжений 20% в сжатых и 25% в растянутых зонах. Колебания в напряжениях, полученных в работах Овчинникова И.Г., достигают иных величин и составляют 15% и 35%, соответственно.

Количественные и качественные вариации, полученные в результате сравнения, объясняются различными механизмами учета влияния вида напряженного состояния. В выбранном нами подходе используется достаточно гибкий механизм учета разносопротивляемости, а также демонстрируется высокая точность согласования получаемых гипотез с экспериментальными данными по деформированию широкого круга материалов при сложных видах напряженного состояния.

Библиографические список

1. Овчинников, И.И. Модифицированная модель деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению // Строительная механика и расчёт сооружений, 2014. №1 С. 29-35.

2. Петров, В.В., Кривошеин И.В. Методы расчёта конструкций из нелинейно-деформируемого материала / Учебное пособие: - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. - 208 с.

3. Трещёв, А.А. Изотропные пластины и оболочки, выполненные из материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния: монография / А.А.Трещёв. - М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2013. - 249 с.

4. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А.Трещёв. - М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. - 328 с.

К РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВЗРЫВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Куриен Н.С., Теличко В.Г.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Развитие отраслей промышленности, ядерной энергетики и других опасных производств выдвигает ответственную и сложную задачу охраны населения, обслуживающего персонала и окружающей среды от аварий [3,5]. Первостепенное значение приобретает анализ возможных отклонений от нормальных эксплуатационных режимов на данных производствах и тщательное изучение возможного развития различных аварийных ситуаций, приводящих к динамическим воздействиям на сооружения [5,7,8].

Стратегия борьбы со взрывами и реализация мер по смягчению последствий взрыва требуют внимания и решения начиная с этапов планирования и проектирования опасного производственного объекта, поскольку впоследствии, при эксплуатации, решение данных задач становится либо трудным, либо невозможным. В настоящий момент существуют два пути уменьшения последствий воздействия взрыва: разработка взрывоустойчивой конструкции зданий и сооружений на вновь проектируемых или реконструируемых объектах; создание универсального защитного устройства, способного эффективно снизить интенсивность падающей ударной волны и удовлетворить требованиям по его размещению в условиях существующей плотной застройки на опасных объектах [1, 13, 14]. В обоих случаях для строительства конструкции, устойчивой к взрывам, изначально необходимо определить величину взрывной нагрузки, которую может выдержать конструкция.

Для того, чтобы понять, почему некоторые здания, запроектированные с учетом рекомендаций нормативных документов, в одном случае выдерживают взрыв, а в другом - разрушаются, необходимо уметь оценивать интенсивность взрывной нагрузки и у читывать структурную работу каркаса, при потере некоторых несущих элементов. Зачастую причиной обрушения больших площадей конструкций является не сам взрыв, а его последствия в виде прогрессирующего обрушения, что ставит на первый план задачу конструктивной безопасности заданий от прогрессирующего обрушения.

Таким образом, в работе рассматривается актуальная задача механики деформированного твердого тела, связанная с повышением живучести зданий и сооружений. Проведенные исследования позволяют определять возникающее напряженно-деформированное состояние

элементов конструкции, установить наиболее опасные зоны и прослеживать динамику изменения напряжений и деформаций во времени, что с учетом критерия прочности, что дает возможность выявлять образование и развитие участков разрушения.

При рассмотрении больших деформаций, уравнение движения для бетона может быть записано в следующем виде:

$$\int_{\Omega x} \rho \delta u \cdot \ddot{u} d\Omega + \int_{\Omega x} (\nabla_x^S \delta u) : \sigma d\Omega - \int_{\Omega x} \delta u \cdot b d\Omega - \int_{\partial \Omega_x^t} \delta u \cdot t d\Omega = 0. \quad (1)$$

где ρ - плотность, u - вектор смещения, точка сверху - производная по времени, σ = тензор напряжений Коши; ∇^S_x = симметричный оператор пространственного градиента; b = объемная сила; t = граничные условия, и Ω_x - область решения. Все переменные определяются в деформированной форме.

Разрушение в модели КСС характеризуется с помощью зависящей от напряжения поверхности и формулируется как

$$\Upsilon(p, \sigma, \lambda) = \sqrt{3J_2} - \Gamma(p, J_3, \lambda) \le 0 . \quad (2)$$

где p = $-\sigma_{kk}/3$ - сжатие, рассчитанное через уравнение состояния (УС), которые отражают поведение бетона. Параметр повреждения λ используется для отображения эффекта разрушения от нагружения. J_2 и J_3 - второй и третий инварианты тензора девиатора σ_0, соответственно.

$$J_2 = \frac{1}{2}\sigma' : \sigma', \; J_3 = |\sigma'| \text{ и } \sigma' = \sigma + pI . \quad (3)$$

Для учета больших деформаций, σ^{∇} используется при обновлении напряженного состояния

$$\sigma^{\nabla} = \dot{\sigma} - \dot{w}\sigma + \sigma\dot{w} = C^{ep} : \dot{\varepsilon} , \quad (4)$$

где

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{2}(L + L^T); \; \dot{w} = \frac{1}{2}(L - L^T); \; L = \nabla_x \dot{u} .$$

Здесь $\dot{\varepsilon}$ и $\dot{w}$ тензор скорости деформации и тензор кручения, соответственно. L - градиент скорости, C^{ep} - тензор упругопластичности.

Уравнение 6 часто представляется в виде

$$\dot{\sigma} = C^{ep} : \dot{\varepsilon} + R : \dot{w} \quad (5)$$

где R тензор вращения четвертого порядка

$$R_{ijkl} = (\sigma_{il}\delta_{jk} + \sigma_{jl}\delta_{ik} - \sigma_{ik}\delta_{jl} - \sigma_{jk}\delta_{il}) / 2 \quad (6)$$

Кроме того, тензор скорости деформации ε̇, можно разделить на упругую и пластическую часть

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p \tag{7}$$

Функционал Г в уравнении 4 определяет поверхность разрушения, и является функцией от значений, определяющих прочность бетона.

$$\Gamma(p, J_3, \lambda) = \begin{cases} r_f \cdot \Theta(J_3) \cdot \left[\eta(\lambda) \cdot (\hat{\sigma}_m(p) - \hat{\sigma}_y(p)) + \hat{\sigma}_y(p) \right] & \lambda \le \lambda_m \\ r_f \cdot \Theta(J_3) \cdot \left[\eta(\lambda) \cdot (\hat{\sigma}_m(p) - \hat{\sigma}_r(p)) + \hat{\sigma}_r(p) \right] & \lambda > \lambda_m \end{cases} \tag{10}$$

где три чувствительных к напряжению, независимых поверхности определяются как

$$\hat{\sigma}_i(p) = a_{0i} + \frac{p}{a_{1i} + a_{2i} p} \quad i = m, y, r \tag{11}$$

Для значений λ параметр интерполяции поверхности разрушения η определяется как

$$\eta(\lambda) = \eta^{\alpha} + \frac{\eta^{\alpha+1} - \eta^{\alpha}}{\lambda^{\alpha+1} - \lambda^{\alpha}} (\lambda - \lambda^{\alpha}) \tag{12}$$

где α = индекс (λ, η) входных данных таких, как $\lambda \in \left[\lambda^{\alpha}, \lambda^{\alpha+1} \right]$.

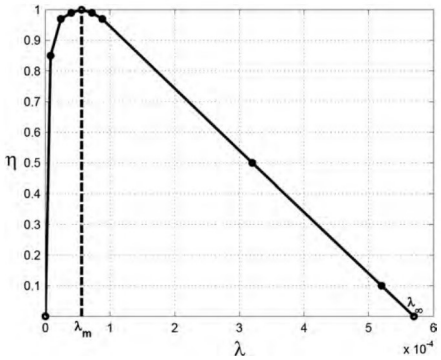


Рис. 1. Функция интерполяции поверхности разрушения

Развитие повреждений бетона характеризуется параметром повреждения λ. Это параметр отражает величину полученных пластических деформаций. Пластические деформации вычисляются следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\mu} \frac{\partial \varphi(\sigma, p, \lambda)}{\partial \sigma} \tag{13}$$

где пластический потенциал $\varphi(\sigma, p, \lambda)$ будет выражен в виде

$$\varphi(\sigma, p, \lambda) = \sqrt{3J_2} - \varpi\Gamma(p, J_3, \lambda) \tag{14}$$

где μ - параметр пластичности, а ϖ - параметр ассоциативности.

Развитие параметра повреждения λ определится функцией:

$$\dot{\lambda} = h(p)\dot{\varepsilon}_n^{\ p} \tag{15}$$

где $\dot{\varepsilon}_n^{\ p} = \sqrt{2/3\dot{\varepsilon}^p : \dot{\varepsilon}^p}$

Фактор развития повреждений *h(p)* определяется в виде:

$$h(p) = \begin{cases} \left[1 + p/(r_f f_t)\right]^{-b_1} / r_f & p \geq 0 \\ \left[1 + p/(r_f f_t)\right]^{-b_1} / r_f & p < 0 \end{cases} \tag{16}$$

где b_1 и b_2 - параметры материала, полученные из экспериментальных данных.

Девиаторные и объемные деформации в модели КСС рассматриваются отдельно. Такой подход к моделированию бетона позволяет разделить сдвиг и сжатие бетона.

$$p = p^{EOS} + K\Delta\varepsilon_\upsilon^e \tag{17}$$

где $\Delta\varepsilon^e_v$ - возрастающая объемная упругая деформация; p^{EOS} - начальное давление УС; и K - объемный модуль упругости. Оба p^{EOS} и K определяются в зависимости от материала и зависят от объемной деформации. Начальный объемный модуль упругости вычисляется как $K = E/3(1-2\nu)$, где модуль Юнга равен $E \approx 4734\sqrt{f_c}$, f_c указывается в МПа, а коэффициент Пуассона ν равняется 0,19.

В модели КСС давление *p* определяется уравнением состояния в соответствии с формулой 20. Входными данными для уравнения состояния является соотношение между упругой объемной деформацией и напряжением, а также объемной упругой деформацией и модулем объемной упругости при разгрузке. Упругая объемная деформация на текущем шаге рассчитывается как

$$\varepsilon^e_{\upsilon,n+1} = \ln(V_{n+1}/V_0) - \varepsilon^p_{\upsilon,n} \tag{18}$$

где V_{n+1} - текущий объем, V_0 - исходный объем $\varepsilon^p_{\upsilon,n}$ - пластическая объемная деформация на предыдущем этапе. Объемный модуль в уравнении 20 получается по-разному для нагружения и разгружения. Для

нагружения он рассчитывается через зависимость давления от упругой объемной деформации

$$K^L = \left| \frac{p^{\alpha}_{EOS} - p^{\alpha+1}_{EOS}}{\varepsilon^{\alpha}_{\upsilon,EOS} - \varepsilon^{\alpha+1}_{\upsilon,EOS}} \right| \quad \varepsilon^{e,\min}_{\upsilon,n+1} \in \left[\varepsilon^{\alpha+1}_{\upsilon,EOS} \quad \varepsilon^{\alpha}_{\upsilon,EOS} \right] \tag{19}$$

где индекс EOS указывает на то, что значение берется из в уравнения состояния, а верхний индекс α означает последовательность на входе EOS, $\varepsilon^{e,\min}_{\upsilon,n+1} \in \left[\varepsilon^{\alpha+1}_{\upsilon,EOS} \quad \varepsilon^{\alpha}_{\upsilon,EOS} \right]$. Давление нагрузки - это интерполяция между p^{α} и $p^{\alpha+1}$ с $\varepsilon^{e,\min}_{\upsilon,n+1}$, который задается как

$$p^L = p^{\alpha}_{EOS} - K^L(\varepsilon^{e,\min}_{\upsilon,n+1} - \varepsilon^{\alpha}_{\upsilon,EOS}) \tag{20}$$

Пиковая упругая объемная деформация сжатия $\varepsilon^{e,\min}_{\upsilon,n+1}$ за все время деформации определяется как

$$\varepsilon^{e,\min}_{\upsilon,n+1} = \min(\varepsilon^{e,\min}_{\upsilon,n}, \varepsilon^{e}_{\upsilon,n+1})$$

Для демонстрации применения рассматриваемого подхода была решена задача об определении НДС многопролетной многоэтажной монолитной железобетонной рамы.

При расчете рамы принимались следующие допущения: 1) расчетная модель здания состоит только из горизонтальных и вертикальных несущих элементов монолитного железобетонного остова, соответственно - ригелей и колонн; 2) размер всех ригелей принят одинаковым и равняется 600х400 мм; 3) сечение всех колонн по высоте здания принимается одинаковой и равняется 400х400 мм; 4) все узлы сопряжения элементов несущего остова между собой приняты жесткими; 5) деформирование горизонтальных и вертикальных элементов несущего остова происходит с учетом процессов разрушения, В качестве основного материала здания использовался бетон с пределом прочности на сжатие $R^{-} = 28,4\ МПа$. Армирование нижней и верхней зоны ригелей принято двумя стержнями А400 диаметром 40 мм (защитный слой 30 мм, предел текучести $\sigma_p = 400\ МПа$), армирование колонны перекрытия принято четырьмя стержнями А400 диаметром 40 мм (защитный слой 30 мм, предел текучести $\sigma_p = 400\ МПа$).

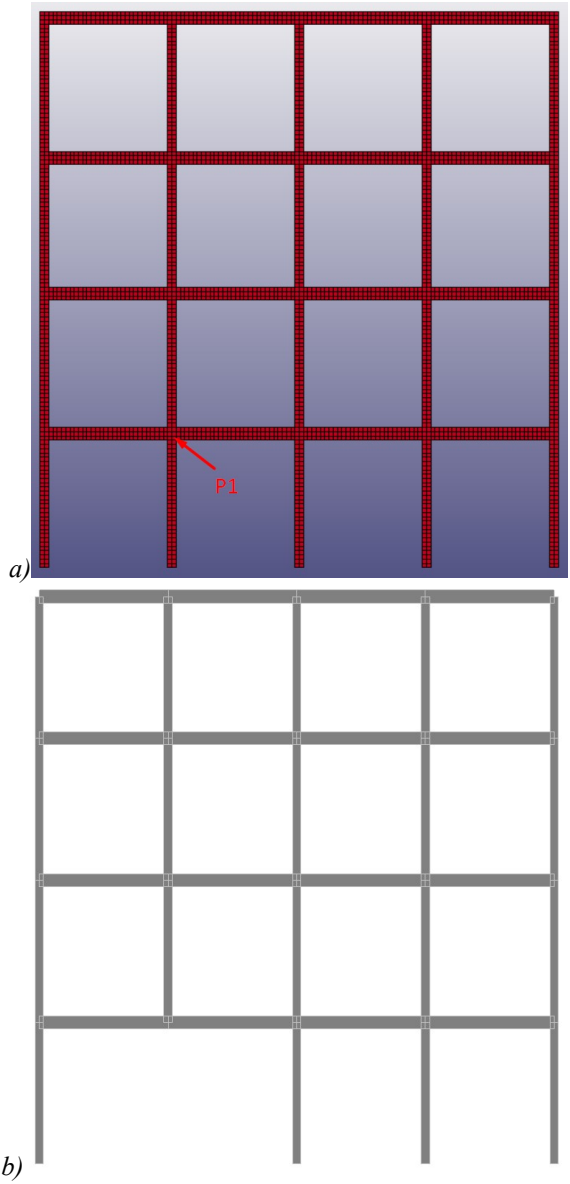


Рис. 2. Общий вид рамы (a) модель в LS-DYNA, b) модель в SCAD)

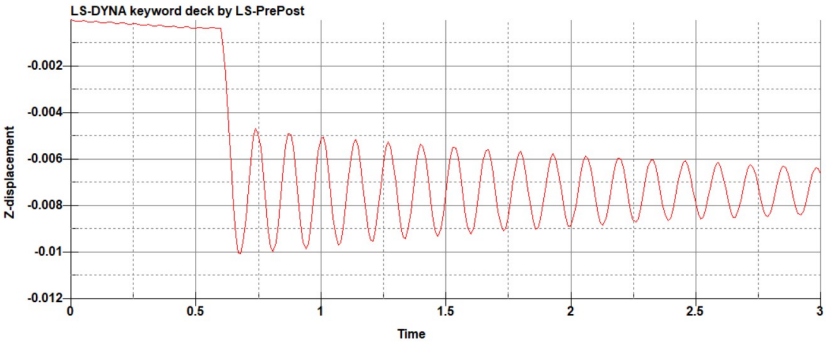


Рис. 3. Изменение вертикальных перемещений в точке P1,
в сжатой зоне во времени LS-DYNA (Па/Сек)

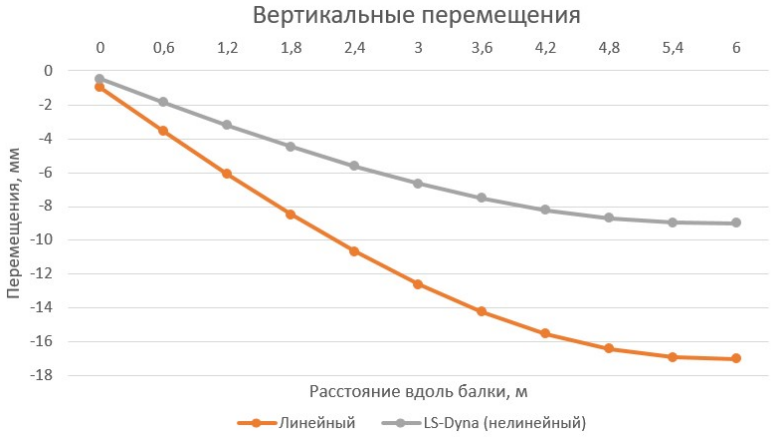


Рис. 4. Распределение вертикальных перемещений вдоль балки

По полученным результатам можно сделать следующий вывод:

Проведенный численный эксперимент по решению задач об определении напряженно-деформированного состояния рамы и отдельных элементов конструкций позволяет утверждать, что данная модель обладает рядом преимуществ перед существующими, реализованными в популярных САПР. Модель позволяет учесть динамическое упрочнение материала, образование трещин, пластические деформации в арматуре.

Не учет явлений динамического упрочнения, а также эффектов, связанных с трещинообразованием в железобетонных конструкциях, приводит к значительным погрешностям при вычислении основных характеристик напряженно-деформированного состояния в динамических задачах механики. Для получения достоверных результатов инженер-

ных расчетов и для предотвращения возникновения аварийных состояний элементов конструкций и сооружений необходимо учитывать влияние усложненных свойств материалов в полном объеме.

Библиографический список

1. Баженов, Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. - М.: Стройиздат, 1970. 271 с.

2. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. - М.: Стройиздат, 1982. - 448 с.

4. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. - М.: Мир, 1984. - 428 с.

5. Дегтярев, Д.В. Количественный анализ риска при обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений/ Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.А. Швыряев// Безопасность труда в промышленности. - 2013. - № 6. - С. 82-89.

6. Мартынюк В.Ф. Лекции по теории горения и взрыва: учеб. пособие. - М.: Изд. центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2014. - 184 с.

7. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 31 марта 2016 г. № 137. - Сер. 27. - Вып. 15. - М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. - 44 с.

8. Методы обоснования взрывоустойчивости зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 13 мая 2015 г. № 189. - Сер. 27. - Вып. 17. - М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. - 78 с.

9. Невская, Е.Е. Анализ способов и средств повышения уровня защиты зданий и сооружений от действия ударных волн / Е.Е. Невская, Е.В. Глебова // Безопасность труда в промышленности. - 2017. - № 2. - С. 73-78.

10. Расчет зон разрушения зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах/ К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин и др.// Безопасность труда в промышленности. - 2011. - № 9. - С. 70-77.

11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. - М.: Мир, 1979. - 392 с.

12. Агапова, Е.А. Сравнительный анализ российских и зарубежных методик и компьютерных программ по моделированию аварийных выбросов и оценке риска/ Е.А. Агапова, Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов и др.// Безопасность труда в промышленности. - 2015. - № 9. - С. 71-78.

13. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. - Изд. 3-е, переработанное. - В 2 т. Т.1. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. -832 с.

14. American Society of Civil Engineers «Design of blast resistant buildings in petrochemical facilities». - New York, 2010. - 318 p.

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПЛИТНО-БАЛОЧНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ ДЛИНОЙ 18 М ПРИ ПРОПУСКЕ СОВРЕМЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК

Лукашов А.П. Барченкова Н.А.
ВГТУ, г. Воронеж, Россия

В работе содержится описание методики расчёта типовых пролетных строенийгабаритами Г8+2х75 и Г11,5+2х75, составленных из предварительно напряженных балок двутаврового сечения длиной 18 м и высотой сечения 1,23 м, на современные нагрузки А14, Н14 и СН1800/200 по ГОСТ 32960-2014 и ГОСТ33390-2015, которые существенно превышают проектные.

Железобетонные плитно-балочные системы составляют более 90% эксплуатируемых и строящихся пролетных строений автодорожных мостов, в том числе предварительно напряжённые конструкции составляют не менее 40%. Исследование несущей способности и грузоподъёмности предварительно напряженных пролетных строений является актуальной научно-технической задачей, что особенно важно при оценке возможности пропуска современных нагрузок, превышающих проектные.

Действующие на исследуемое пролетное строение постоянные нагрузки определяются как сумма веса балок, веса продольного шва омоноличивания, веса дорожной одежды и веса металлических ограждений. Временные нагрузки принимаются различными для каждого пролетного строения (для габарита Г8+2 х 75: две полосы автомобильной нагрузки А14, одиночная колесная нагрузка Н14 и одиночная колесная нагрузка СН1800/200, а для Г11,5+2 х 75: три полосы автомобильной нагрузки А14, одиночная колесная нагрузка Н14 и одиночная колесная нагрузка СН1800/200). Поперечная жесткость элементов пролетного строения настолько мала, что связи между ними можно рассматривать в виде разрезных балок, опирающихся на главные балки. Наиболее нагруженной при этом способе будет одна из средних балок.

При построении ординат линий влияния временные нагрузки расставляются поперек пролета. Дляопределения величины изгибающего момента и поперечной силы в сеченияхнагрузкирасставляютсявдоль пролета. Полученные значения для нагрузки Н14 представлены в табл. 1.

Проверка по предельным состояниям выполняется в два этапа.

I-й этап. Проверка по первому предельному состоянию или проверка по прочности выполняется расчетом $M_{пред}$ и $Q_{пред}$ по представленным формулам (1) и (2).

$$M_{пред}=R_s*A_s\,(h_{0s} - x/2)+R_p*A_p(h_{0p}-x/2), \quad (1)$$

где x - высота сжатой зоны сечения, Rs - расчетное сопротивление рабочей арматуры при расчетах по прочности, As - площадь сечения рабочей арматуры, Rp - расчетное сопротивление высокопрочной арматуры при расчетах по прочности, Ap - площадь сечения рабочей высокопрочной арматуры, b - шаг балок, h0 - расчетная высота сечения балки.

Изгибающие моменты и поперечные силы, нагрузка Н14+постоянная, Г8+0,75*2

Таблица 1.

Се. Х, м	Средняя балка				Крайняя балка			
	М н14+ М пост^{н} кН*м	Qн кН	М н14+ М пост^{р} кН*м	Q^{расч} кН	М н14+ М пост^{н} кН*м	Qн кН	Мн14 + М пост^{р} кН*м	Q^{расч} кН
8,7	2074,8	146,7	2691,2	161,4	1717,5	81,6	2140,9	89,8
	1943,8		2511,0		2079,7		2639,0	
6,53	1960,9	248,9	2544,6	279,7	1619,0	170,8	2019,3	192,5
	1836,3		2373,2		1963,7		2493,2	
4,35	1558,6	350,9	2021,7	397,8	1289,4	259,9	1607,5	295,3
	1460,0		1886,2		1561,9		1982,2	
3,26	1275,4	402,0	1655,2	457,0	1052,5	304,6	1312,9	346,8
	1194,3		1543,6		1277,0		1621,5	
2,17	917,2	452,8	1190,6	515,9	756,2	349,1	943,4	398,1
	858,7		1110,1		918,0		1166,0	

$$Q_{пред}= Q_b+Q_x =2R_{bt}*b*h_0^2 / c+q_{xa}c \quad (2),$$

где Qb и Qx предельная поперечная сила бетона и хомутов, qxa - предельное усилие в хомуте на единицу длины балки, Rs - расчетное сопротивление поперечной арматуры при растяжении, Fx - площадь сечения хомутов в одном сечении балки, ua - шаг хомутов, Rbt - расчетное сопротивление бетона при осевом растяжении, b - ширина ребра балки, c - максимально невыгодная проекция наклонной трещины на продольную ось балки.

II-й этап. Проверка на тещиностойкость с использованиемформул (3). Эта проверка выполняется лишь для нагрузок А14 и Н14 т.к. нагрузка СН1800/200 не учитывается по СП35.13330.2011 Мосты и трубы.

$$M_{пред}\,2= 1{,}4R_{bt\,ser}W_н + N\,\frac{W_н}{A} + Nz, \quad (3)$$

где N - сила натяжения высокопрочной арматуры, N_z - момент силы N относительно центра тяжести сечения.

Таблица 2. Поперечные силы, Г11,5+0,75*2

Сеч X,м	Армирование	b, м	h_0, м	u_0, м	q_{xa}, кН/м	c_0, м	Q_{xb}, кН	$Q_{расч}$, кН		
								А14	Н14	СН
8,7	2⌀8А400 (Fx=1,01 см2)	0,16	1,1	0,2	140,8	2,02	569,4	257,7	192,3	160,2
6,53	2⌀10А400 (Fx=1,01 см2)	0,16	1,13	0,1	281,7	1,43	805,2	404,9	325,3	313,7
4,35	2⌀12А400 (Fx=2,26 см2)	0,16	1,15	0,1	633,4	0,97	1225,2	549,6	457,9	484,9
3,26	2⌀12А400 (Fx=2,26 см2)	0,16	1,15	0,1	633,4	0,97	1225,2	624,9	524,5	573,5
2,17	2⌀12А400 (Fx=2,26 см2)	0,215	1,15	0,1	633,4	1,12	1420,2	696,9	590,6	662,6

Расчет грузоподъемности исследуемых пролетных строений выполняется по следующим формулам:

$$\text{АК} = \frac{M_{\text{пред}} - M_{\text{пост}}}{M_{\text{A14}}} * 14 \quad (4) \quad \text{НК} = \frac{M_{\text{пред}} - M_{\text{пост}}}{M_{\text{H14}}} * 14 . \qquad (4)$$

Таким образом, от нагрузки А14 для балки габаритом Г8

$$\text{АК} = \frac{3667 - 1162}{2364} * 14 = 14{,}2 = \text{А}14{,}2;$$

от нагрузки А14 для балки габаритом Г11,5

$$\text{АК} = \frac{3667 - 1245}{2387} * 14 = 14{,}8 = \text{А}14{,}8;$$

от нагрузки Н14 для балки габаритом Г8

$$\text{АК} = \frac{3667 - 1162}{1528} * 14 = 22 = \text{Н}22;$$

от нагрузки Н14 для балки габаритом Г11,5

$$\text{АК} = \frac{3667 - 1245}{1821} * 14 = 18{,}6 = \text{Н}18{,}6.$$

Таблица 3. Значения предельных моментов в характерных сечениях

Сеч. X,м	$M_{расч}$кНм	$б_{рк}$ Мпа	$б_{n}$ Мпа	N, кН	Nz, кНм	$M_{расч+}N_{z}$, кНм	$б^{н}$ Мпа	$б^{в}$ Мпа	$M_{пред}$кНм
8,7	2372,3	1010	-200	-2289,1	-1442,1	930,2	2,48	-5,99	2427,2
6,53	2242,7	1010	-200	-2289,1	-1442,1	800,6	1,72	-5,5	2427,2
4,35	1782,1	1010	-200	-1907,6	-1239,9	542,2	0,72	-4,2	2136,2
3,26	1458,8	1010	-200	-1526,0	-991,9	466,9	0,81	-3,49	1786,4
2,17	1049,3	1010	-200	-1144,5	-743,9	305,3	0,39	-2,42	1451,7

По результатам расчетов сделаны следующие выводы:

1. с помощью линий влияния определены нагрузки от действия автомобильных нагрузок А14, Н14 и СН1800/200;

2. произведена проверка по двум предельным состояниям и доказано, что мост имеет достаточную прочность и трещиностойкость;

3. расчет грузоподъемности показал, что несущая способность моста превышает максимально допустимую, в связи с чем появляется возможность увеличить нагрузку при необходимости.

Библиографический список

1. ГОСТ 33390-2015. Дороги автомобильные общего пользования. Мосты. Нагрузки и воздействия.

2. ГОСТ 32960-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки. Расчетные схемы нагружения.

3. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

4. Свод правил СП35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СП 2.05.04-84*.

5. Байков В.Н., Сигалов Э. Е. "Железобетонные конструкции. Общий курс." Учебник для вузов. -5-е изд., перераб. и доп.-М.: Стройиздат, 1991.-767 с.: ил.

6. Мурашев В.И., Сигалов Э.Е., Байков В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс. 1962.

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА НА ПОВЕДЕНИЕ ВАНТОВОГО МОСТА В МЬЯНМЕ

Маунг Маунг Вин Аунг, Валиев Ш.Н.
МАДИ, г. Москва, Россия

Вопросу учета влияния длительных деформаций бетона на поведение вантовых мостов с железобетонной балкой жесткости и пилоном

уделяется большое внимание [1-4]. В данной работе с использованием программного комплекса Midas/Civil исследуется влияние усадки, ползучести бетона на поведение трехпролетного вантового моста в Мьянме (рис. 1).

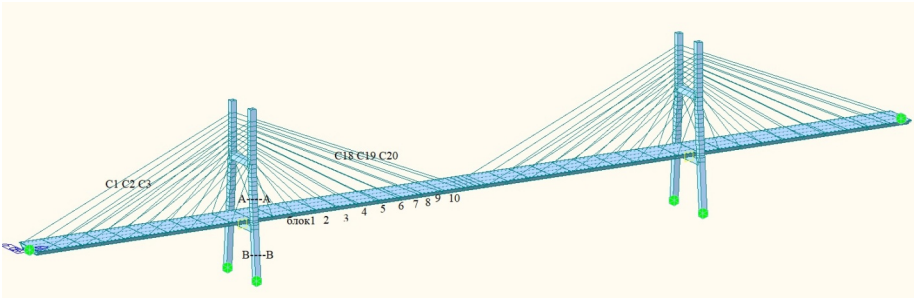


Рис. 1. Стержневая модель железобетонного вантового моста в MIDAS/CIVIL

При этом для моделирования длительных процессов в бетоне использовались российская (по СП 35.13330.2011), европейская (по CEB-FIB 1990) и американская (по ACI 209) модели. Были выполнены расчеты и построены эпюры изгибающих моментов в бадке жесткости и пилоне для разных моделей и для трех уровней влажности окружающей среды: 70%, 80%, 90%. В таблицах 1 и 2 приведены полученные в процессе имитационного моделирования данные о влиянии длительных деформаций бетона на прогиб балки жесткости в середине главного пролета, перемещение верха пилона и величину изгибающего момента в нижнем узле пилона.

Таблица. 1. Влияние длительных процессов на прогиб балки в середине главного пролета и перемещение верха пилона (см)

Наименование	Российская модель				Европейская модель				Американская модель			
	Без уче-та	70%	80 %	90 %	Без уче-та	70%	80%	90%	Без уче-та	70%	80%	90%
В балке (Dz)	-26	-25	-25	-25	-26	-22	-23	-23	-26	-22	-22	-22
В пилоне (Dx)	3	4	4	4	3	7	7	6	3	6	6	5

Таблица. 2. Влияние длительных процессов на изгибающий момент в нижем узле пилона у фундамента (кНм)

Российская модель				Европейская модель				Американская модель			
Без учета	70%	80%	80%	Без учета	70%	80%	90%	Без учета	70%	80%	90%
5664	7270	7270	7270	5664	10889	11381	9387	5664	11110	10569	8840

Анализ результатов расчета показывает, что прогиб балки жесткости в середине главного пролета уменьшается от ползучести и усадки на 4 см по американской, на 4 см по европейской и на 1 см по российской моделям. При изменении влажности прогиб особо не меняется.

Максимальное увеличение момента в пилоне составляет величину 1,6 МНм при влажности 70%, 80% и 90% по СП 35.13330.2011. Максимальное увеличение момента в пилоне составляет 5,2 МНм при 70%, 5,7 МНм при 80% и 3,7 МНм по европейской модели. Максимальное увеличение момента в пилоне составляет 5,4 мНм при 70%, 4,9 МНм при 80% и 3,2 МНм по американской модели. Прогиб пилона увеличивается от ползучести и усадки на 3 см по американской, 4 см по европейской и 1 см по российской моделям. При изменении влажности величина прогиба особо не меняется.

Также был проведен анализ изменения усилий в вантах при разных моделях учета усадки и ползучести и разной величине влажности окружающенй среды.

В процессе проведенных исследований установлено, что ползучесть и усадка в европейской модели CEB-FIP 1990 зависит от класса цемента, в российской модели по СП35.13330.2011 и американской модели ACI ползучесть и усадка бетона зависят от его типа и состав (содержания воздуха, водаы, цемента, песка и щебня)

В европейской и американской моделях при уровнях влажности 70%, 80% и 90% значительно изменялись усилия в балке жесткости, и в пилоне и в вантах. При использовании же российской модели влажность не оказывала влияния на изменение усилий.

Чем выше влажность окружающей среды, тем меньше увеличение моментов в железобетонных балке жесткости и пилоне. Поэтому при проектировании и расчете вантовых мостов с железобетонными пилонами и балкой жесткости для условий Мьянмы рекомендуется принимать уровень влажности равным 70% , что будет идти в запас прочности.

Длительные процессы ползучести и усадки приводят к увеличению перемещений в железоебтонных балке жесткости и пилоне. Причем с

учеличением влажности окружающей среды прогиб балки жесткости уменьшается, а перемещение пилона незначительно увеличивается.

Усилия в вантах уменьшаются от усадки и ползучести бетона. При этом установлено, что потери усилий в вантах уменьшаются с увеличением влажности окружающей среды. Максимальная потеря в 164 кН имеет место в ванте С 11 при влажности 70% при расчете по американским нормам ACI 209. Максимальная потеря в 300 кН в ванте С 11 при влажности 70% за 40 лет имеет место при расчете по есропейским нормам CEB-FIP 1990.

Обращает на себя внимание следующий установленный в процессе имитационного моделирования факт: результаты моделирования, полученные по европейским CEB-FIP 1990 и американским ACI 209 нормам не отличаются сильно друг от друга, однако результаты моделирования, полученные с использованием российских норм отличаются от других.

Понятно, что такое отличие порождается заложенными отличиями еще при моделировании поведения бетона при усадке и ползучести.

Поэтому мы полагаем, что необходимы обстоятельные и экспериментальные и теоретические исследования процессов ползучести и усадки бетонов с тем,чтобы обеспечить при моделировании поведения конструкций вантовых мостов с железобетонными балками жестокости и плилонами получение более надежных результатов.

Библиографический список

1. Pan Zuan-feng, Meng Shao-ping. Three-level Experimental Approach for Creep and Shrinkage of High-strength High-performance Concrete // Engineering Structures, 2016,120:23-36

2. Liu Mu-yu, Li Qian, Ultra-long Time Performance of Steel-concrete Composite Continuous Beam in Hong Kong-Zhuhai Macao Bridge with Creep and Shrinkage of Concrete Slabs // China Journal of Highway and Transport.2016(12):61-69.

3. Han Wei-wei, Lü Yi-gang. Experimental research on prediction model of concrete shrinkage and creep // Journal of Central South University (Science and Technology) 2016(10):35153522

4. Jing-Xian Shi, Zhi-Hong Ran. Calculation of Creep Effect of Extra-dosed Cable-stayed bridge based on Midas Civil // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 423 (2018) 012113 doi:10.1088/1757-899X/423/1/012113

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТРИНГЕРНОЙ ПЛАСТИНЫ

Мир-Салим-заде М.В.
ИММ НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

Решается задача минимизации напряженного состояния на контуре отверстия в стрингерной пластине, при этом полагается, что из контура отверстия исходит прямолинейная трещина.

Рассмотрим неограниченную тонкую пластину, усиленную регулярной системой стрингеров. Пластина растягивается вдоль стрингеров однородным напряжением $\sigma_y^{\infty} = \sigma_0$. Граничные условия задачи имеют вид:

$$\sigma_n = 0\,, \qquad \tau_{nt} = 0 \quad \text{на контуре отверстия;}$$

$$\sigma_y = 0\,, \qquad \tau_{xy} = 0 \qquad \text{на берегах трещины.}$$

Ищется такая форма отверстия в стрингерной пластине, для которой выполняются два условия: действующее на контуре тангенциальное нормальное напряжение σ_t является минимальным

$$\min_{\zeta \in C} \max_{\theta \in [0,2\pi]} \sigma_t(\theta, \zeta)\,, \tag{1}$$

и условие неподвижности исходящей из контура отверстия трещины

$$K_{\mathrm{I}}^{l} \le \alpha K_{\mathrm{I}c}\,. \tag{2}$$

Здесь ζ - проектные параметры, C - набор ограничений, подлежащий определению, K_{I}^{l} - коэффициент интенсивности напряжений в окрестности вершины трещины, $K_{\mathrm{I}c}$ – критическое (предельное) значение коэффициента интенсивности напряжений для данного материала пластины, α – коэффициент уменьшения допускаемой вязкости разрушения, имеет различные значения для разных материалов и конструкций. Другими словами, α есть коэффициент безопасности по отношению к допускаемому критическому значению вязкости разрушения материала.

Будем искать контур отверстия в классе контуров близких к круговым.

Напряжения, перемещения, коэффициент интенсивности напряжений K_{I}^{l} и заменяющие действие стрингеров сосредоточенные силы P_{mn} ищем в виде разложений по малому параметру ε. Каждое из приближений удовлетворяет системе дифференциальных уравнений плоской задачи теории упругости. Для упрощения пренебрегаем членами, содержащими ε степени выше первой.

Используя метод возмущений, записываем краевые условия задачи для компонент напряжений σ_n и τ_{nt} в каждом приближении.

На основании формул Колосова-Мусхелишвили [1] и краевых условий задача в нулевом приближении сводится к определению аналитических функций $\Phi^{(0)}(z)$, $\Psi^{(0)}(z)$ из условиий

$$\Phi^{(0)}(\tau)+\overline{\Phi^{(0)}(\tau)}-\left[\overline{\tau}\Phi^{(0)'}(\tau)+\Psi^{(0)}(\tau)\right]e^{2i\theta}=0 \qquad \text{при } \tau=Re^{i\theta}, \quad (3)$$

$$\Phi^{(0)}(x)+\overline{\Phi^{(0)}(x)}+x\overline{\Phi^{(0)'}(x)}+\overline{\Psi^{(0)}(x)}=0 \qquad R\le x\le l. \quad (4)$$

Решение краевой задачи (3)-(4) для каждого приближения ищем в виде

$$\Phi(z)=\Phi_0(z)+\Phi_1(z)+\Phi_2(z), \quad \Psi(z)=\Psi_0(z)+\Psi_1(z)+\Psi_2(z). \quad (5)$$

Функции $\Phi_0^{(0)}$, $\Psi_0^{(0)}$ описывают поле напряжений и деформаций в сплошной панели под действием сосредоточенных сил $P_{mn}^{(0)}$ и растягивающего напряжения σ_0. Функции $\Phi_1^{(0)}$ и $\Psi_1^{(0)}$ ищем в виде

$$\Phi_1^{(0)}(z)=\frac{1}{2\pi}\int_R^l\frac{g^{(0)}(t)}{t-z}dt,$$

$$\Psi_1^{(0)}(z)=\frac{1}{2\pi}\int_R^l\left[\frac{1}{t-z}-\frac{1}{(t-z)^2}\right]g^{(0)}(t)dt,$$

где $g^{(0)}(x)=\dfrac{2\mu}{1+\kappa}\dfrac{d}{dx}\left[v^+(x,0)-v^-(x,0)\right]$ - искомая функция; μ - модуль сдвига материала панели, $\kappa=(3-\nu)/(1+\nu)$; ν - коэффициент Пуассона материала пластины; v^+ и v^- – значения перемещений на верхнем и нижнем берегах трещины, соответственно.

Для определения потенциалов $\Phi_2^{(0)}$ и $\Psi_2^{(0)}$ используем краевые условия (3)-(4) и решение Н.И. Мусхелишвили [1].

Требуя, чтобы функции (3) удовлетворяли краевому условию (4) на берегах трещины, получаем сингулярное интегральное уравнение относительно $g^{(0)}(x)$:

$$\frac{1}{\pi}\int_R^l\frac{g^{(0)}(t)}{t-x}dt+\frac{1}{\pi}\int_R^l K(t,x)g^{(0)}(t)dt=F^{(0)}(x), \quad (6)$$

Для решения сингулярного интегрального уравнения (6) используем метод прямого решения сингулярных уравнений [2, 3].

В рассматриваемой задаче один конец трещины выходит на поверхность отверстия. Напряжения на этом конце ограничены. Вместе с дополнительным условием

$$K_{\mathrm{I}}^{(0)} = 0 \qquad \text{при } x = R,$$

сингулярное интегральное уравнение (6), сводится с помощью процедуры алгебраизации [2, 4] к системе M линейных алгебраических уравнений для определения M неизвестных $g^{(0)}(\tau_m)$ ($m = 1,2,\ldots,M$).

Для определения сосредоточенных сил $P_{mn}^{(0)}$ используем закон Гука. Решая полученные системы, определяем величины сосредоточенных сил $P_{mn}^{(0)}$, приближенные значения $g^{(0)}(\tau_m)$ в узловых точках, и, соответственно, комплексные потенциалы нулевого приближения $\Phi^{(0)}(z)$, $\Psi^{(0)}(z)$.

Для коэффициента интенсивности напряжений в окрестности вершины трещины при $x = l$ в нулевом приближении находим [3]

$$K_{\mathrm{I}}^{(0)} = \sqrt{\pi(l-R)}\sum_{m=1}^{M}(-1)^m g^{(0)}(t_m)\operatorname{ctg}\frac{2m-1}{4M}\pi\,.$$

По формулам Колосова-Мусхелишвили и соотношениям (5) находим компоненты напряжений в нулевом приближении.

Далее переходим к решению задачи в первом приближении. Полученные системы уравнений первого приближения не являются замкнутыми, поскольку в их правые части входят коэффициенты d_{2k} разложения функции $H(\theta)$ в ряд Фурье (управляющие параметры). Для построения недостающих уравнений используем условие (1) при наборе ограничений C, включающих системы уравнений первого приближения, а также (2).

С помощью полученного решения, находим напряжения σ_t в поверхностном слое контура отверстия с точностью до величин первого порядка относительно малого параметра ε

$$\sigma_t = \sigma_t^{(0)}(\theta)\Big|_{r=R} + \varepsilon\left[H(\theta)\frac{\partial\sigma_t^{(0)}(\theta)}{\partial r} + \sigma_t^{(1)}(\theta)\right]\Bigg|_{r=R}$$

Находим максимальное значение функции $\sigma_t(\theta,d_{2k})$ на контуре отверстия

$$\max\sigma_t\,(\theta_*,d_{2k}).$$

Здесь θ_* есть решение уравнения

$$\frac{d\sigma_t(\theta)}{d\theta} = 0\,.$$

Для построения недостающих уравнений, позволяющих определить проектные параметры (коэффициенты d_{2k}), требуем минимизации максимального окружного напряжения σ_t на контуре отверстия (1) при ограничениях

$$\sum_{m=1}^{M}(-1)^m\left[g^{(0)}(t_m)+\varepsilon g^{(1)}(t_m)\right]\operatorname{ctg}\frac{2m-1}{4M}\pi \le \alpha K_{1c},$$

$$\max\sigma_t \le [\sigma],$$

где $[\sigma]$ - допустимое окружное напряжение для материала панели, определяемое опытным путем.

Необходимо найти значения коэффициентов d_{2k}, которые удовлетворяют полученной системе уравнений и обращают в минимум линейную функцию $\max\sigma_t$ (целевую функцию). Так как напряжения $\sigma_t(\theta,d_{2k})$ (показатель качества управления) и $\max\sigma_t$ линейно зависят от искомых коэффициентов d_{2k}, приходим к задаче линейного программирования. В поставленной задаче наиболее эффективным оказался метод симплексного алгоритма.

Библиографический список

1. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.

2. Каландия А.И. Математические методы двумерной упругости. М.: Наука, 1973. 304 с.

3. Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацышин А.П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. Киев: Наук. думка, 1976. 443 с.

4. Мирсалимов В.М. Неодномерные упругопластические задачи. М.: Наука, 1987. 256 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS MECHANICAL ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГОСТИ

Петровичев Е.Е., Чигинский Д.С.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Становление теории деформирования разносопротивляющихся материалов относится к началу шестидесятых годов двадцатого столетия. Существенные результаты в этом направлении были получены в работах Н.М. Матченко и А.А. Трещева. В рамках закона теплопроводности Фурье и классических условий динамического равновесия в работе [1]

были получены основные дифференциальные уравнения разномодульной теории термоупругости: уравнение теплопроводности, включающее в связанном случае учет влияние вида напряженного состояния, и уравнения динамического равновесия. Помимо этого, были решены задачи термоупругости о плоском деформированном состоянии полого разномодульного цилиндра при нестационарных термосиловых воздействиях и об осесимметричном напряженно-деформированном состоянии полого разномодульного цилиндра при стационарных термосиловых воздействиях.

В дальнейшем данная теория получила свое развитие в работах [2, 3], в которых были решены задачи термоупругости в связанной постановке для тонких пластин и оболочек, выполненных из нелинейных материалов, чувствительных к виду напряженного состояния.

Таким образом, проведённый анализ имеющихся материалов позволяет утверждать, что указанная тематика глубоко проработана. В то же время открытым остаётся вопрос об реализации рассматриваемых теоретических положений средствами современных программных комплексов (CAE-систем, Computer Aids Engineering), использующих метод конечных элементов.

Целью работы является моделирование задачи термоупругости в программном комплексе ANSYS Mechanical, обладающем широкими функциональными возможностями для решения термомеханических задач.

Следует отметить, что в ANSYS Mechanical реализован ряд специализированных конечных элементов для связанных расчётов, которые располагают степенями свободы как по перемещениям, так и по температуре. Указанные элементы поддерживают также нелинейные модели механических и тепловых свойств материала и позволяют, например, производить расчёт тепловыделения, обусловленного пластическим деформированием.

В рамках работы решена модельная задача со следующими исходными данными: квадратная пластина из графита марки АРВ со стороной l=5 м, толщиной h=200 мм, жестко защемлена по контуру, нагружается равномерно распределенной нагрузкой q=13 кПа. В начальный момент времени пластина имеет температуру T_0=20 °С. На верхней поверхности пластины задаётся постоянная температура T_1=10 °С, на нижней поверхности пластины - T_2=50 °С. Механические характеристики графита АРВ приняты согласно [2]. Для решения поставленной задачи в программном комплексе ANSYS Mechanical использована функция анализа «Coupled Field», позволяющая реализовать одновре-

менное действие поля температуры и механических воздействий. Расчётная модель выполнена из типовых конечных элементов SOLID226 (гексаэдр), схема которого представлена на рисунке 1.

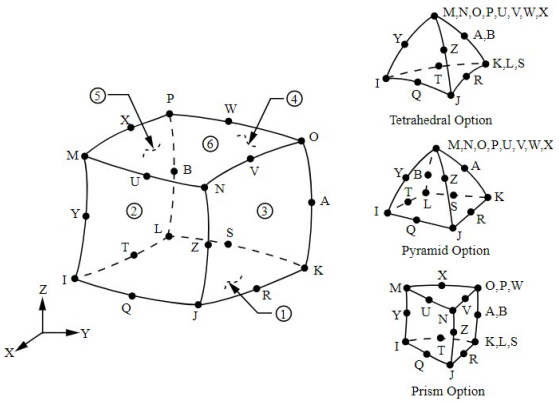


Рис. 1. Схема конечного элемента SOLID226

Выбор указанного конечного элемента для моделирования обусловлен встроенными возможностями реализации связанных расчётов; помимо распределения температуры результатов, SOLID226 позволяет получать решение для перемещений, напряжений, относительных деформаций и т.д. Можно обратить внимание, что конечные элементы в ПК ANSYS Mechanical для связанных расчётов являются конечными элементами второго порядка (содержат промежуточные узлы на рёбрах элементов), что обеспечивает высокую точность расчётов напряжённо-деформированного состояния.

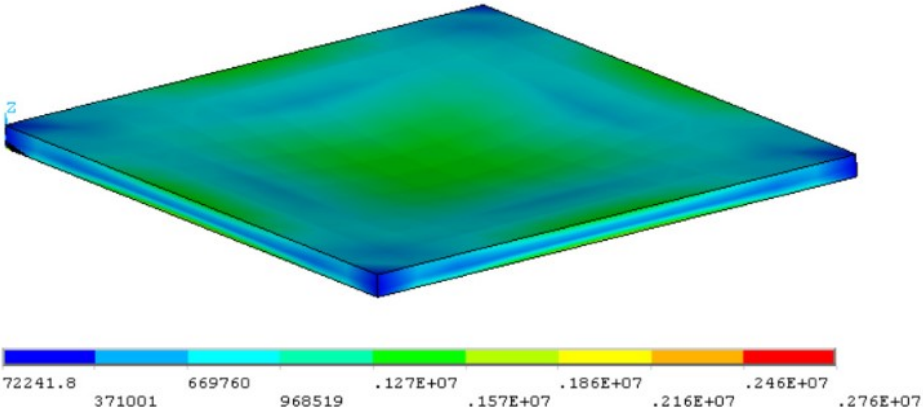


Рисунок 2 - Распределение напряжений в пластине, МПа

На рисунках 2-3 приведены некоторые характерные результаты расчета напряженно-деформированного состояния для пластины, описанной выше.

На рисунке 2 показано распределение напряжений, действующих в пластине, на рисунке 3 - распределение вертикальных прогибов w.

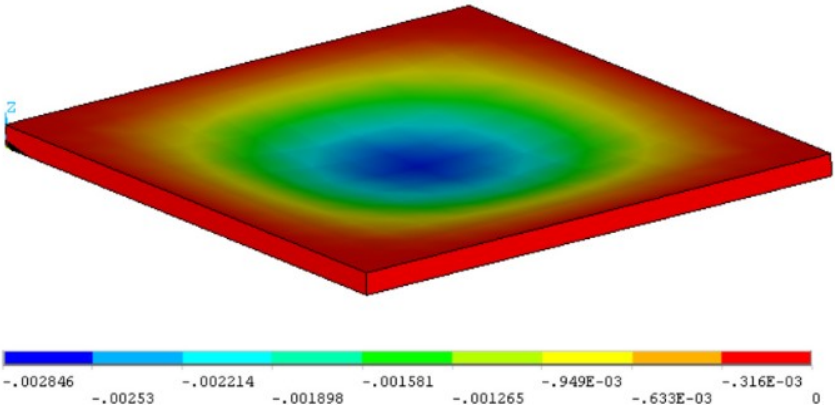


Рисунок 3 - Распределение вертикальных прогибов w, м

По результатам выполнения работы, освоены основные функциональные возможности программного комплекса ANSYS Mechanical, необходимые для решения несвязанных задач термоупругости, что послужит основой для успешного поиска способа решения связанных задач термоупругости для строительных конструкций, выполненных из разносопротивляющихся материалов.

Библиографический список

1. Матченко Н.М., Трещев А.А. Теория деформирования разносопротивляющихся материалов. Прикладные задачи теории упругости. - Тула: ТулГУ, 2004. - 211 с.

2. 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.

3. 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. Трещёв // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11-1. - Тула: ТулГУ. 2014. - С. 317-326.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОГОБОРИТНОГО СБОРНО-РАЗБОРНОГО МОСТОВОГО ПРОЛЕТА

Поддубный А.А.[1], Гордон В.А.[2]
[1]БелГУТ, г. Гомель, Беларусь,[2]ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

Разработан и изготовлен малогаборитный сборно-разборный мостовой пролет. Это изобретение относится к области строительства, в частности, к мостам сборно-разборным, предназначенным для быстрой установки пешеходных низководных мостов в труднодоступных местах. Применяется при чрезвычайных ситуациях и при ликвидации стихийных бедствий. В ходе разработки, основной задачей являлось снижение трудоемкости монтажа мостового пролета, упрощение конструкции для уменьшения массы и количества деталей, снижение стоимости при изготовлении, сборке и эксплуатации.

Составными частями МСРМП являются главные балки, пешеходный настил, перильное ограждение.

Малогабаритный сборно-разборный мостовой пролет состоит из двух главных балок (поз. 1 на рис. 1 и поз. 2 на рис. 2), изготовленные из профильной трубы по ГОСТ 30245-2003 сечением 120×80×5 мм длиной 6 м, марка стали не ниже С245 по ГОСТ 27772-1988.

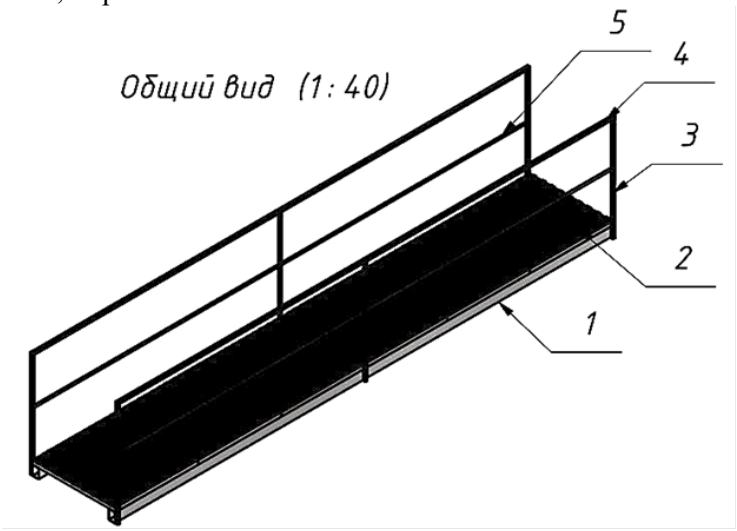


Рис. 1. Общий вид малогабаритного сборно-разборного мостового пролета

Пешеходный настил выполнен из уголков по ГОСТ 8509-1993 поперечных и продольных связей сечением 40×40×4 мм и просечно-

вытяжного листа ПВЛ 506 по ГОСТ 8706 - 1978, сечением 1,0×1,0 м (на рис. 2, поз. 2), марки стали не ниже Ст3 по ГОСТ 380-2005.

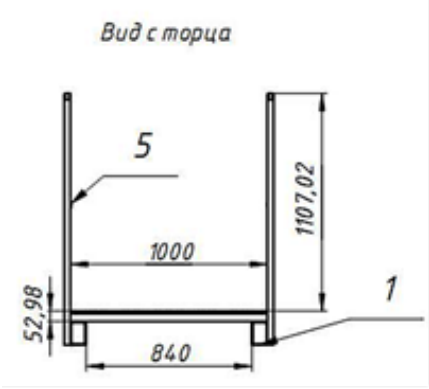


Рис. 2. Вид с торца малогабаритного
сборно-разборного мостового пролета

Перильное ограждение выполнено из уголка по ГОСТ 8509-1993 сечением 30×30×3 мм, состоят из:

- стойки перил высотой 1,25 м (рис. 1, 3, поз. 3);
- перил длиной 6 м на рис. 1, 3 (поз. 4);
- продольного усиления из полосы стали по ГОСТ 103-2006 сечением 30×4 м, длиной 6 м на рис. 1 - 3 (поз. 5), марки стали не ниже Ст3 по ГОСТ 380-2005.

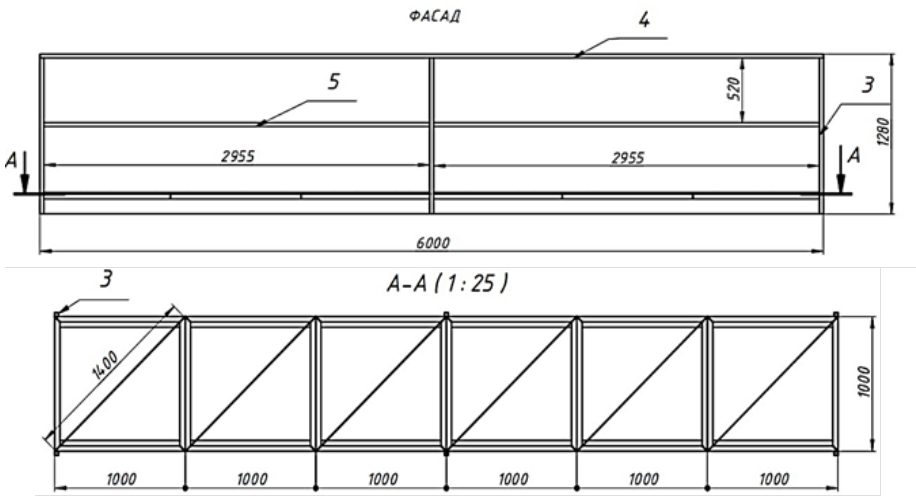


Рис. 3. Чертеж малогабаритного сборно-разборного мостового пролета

Изготовление малогабаритного сборно-разборного мостового пролета можно организовать как на предприятиях, так и в полевых условиях. При этом все его элементы рассчитаны таким образом, что не составляет трудностей их перевозить любым видом транспорта, производить погрузочно-разгрузочные работы без использования специальной техники.

Монтаж элементов МСРМП необходимо производить на подготовленные опоры, устанавливаемые на различные виды фундамента.

В качестве основного несущего элемента МСРМП принимаются главные балки, которые выполнены из профильной трубы по ГОСТ 30245 - 2003 сечением 120×80×5 мм длиной 6 м (на рис. 1, поз. 1). Марка стали не ниже С245 по ГОСТ 27772 - 1988.

Уголки поперечных и продольных связей пешеходного настила крепятся к просечно-вытяжному листу ПВЛ - 506 при помощи сварного шва по ГОСТ 5264 - 1980.

Пешеходный настил к главным балкам крепится при помощи сварного шва по ГОСТ 5264 - 1980 (рис. 4).

Рис. 4. Установка главных балок и пешеходного настила, перильного ограждения

Перильное ограждение крепится к главным балкам при помощи сварного шва по ГОСТ 5264 - 1980. Элементы перильного ограждения крепятся между собой сварными швами по ГОСТ 5264 - 1980 (рис. 4).

Использование малогабаритного сборно-разборного мостового пролета позволяет за счет минимального количества элементов составных частей снизить массу конструкции и трудоемкость монтажа (демонтажа) оборудования, что дает возможность переносить элементы вручную и монтировать его в любом труднодоступном месте.

Одной из важных проблем при проектировании является анализ чувствительности несущих конструкций к структурным перестройкам и повреждениям под нагрузкой при эксплуатации типа внезапно выключающихся связей, частичных разрушений, трещин, расслоений и т. д. Получение такой информации для реальных конструкций требует разработки специальных методов, так как данная проблема не может быть решена универсальным методом. С позиции строительной механики в этих задачах возникает необходимость расчета конструктивно нелинейных конструкций, изменяющих расчетную схему под нагрузкой. Особо важным является учет внезапности образования дефекта. До возникновения дефекта напряженно-деформированное состояние конструкции определялось статическим воздействием нагрузки и реакции основания. При внезапном образовании повреждения или структурной перестройки моментально снижается общая жесткость несущей системы, нарушается статическое равновесие, и система приходит в движение, в ходе которого перераспределяются и растут деформации и внутренние силовые факторы. Такое динамическое догружение приводит к нарушению штатного функционирования конструкции - отказам, потере несущей способности, прогрессирующему разрушению.

Каждый элемент МСРМП был рассчитан под заданную нагрузку с заданным запасом прочности [1].

Строительство производилось на структурно - неустойчивых грунтах, то есть изменяющих свою структуру под внешними влияниями, дающих просадку.

На несущую способность оснований горизонтально нагруженных фундаментов большое влияние оказывает материал, форма и размеры подземной части сваи (стержня), глубина погружения в грунт, характеристики грунта, величина, направления и место приложения горизонтальных сил и т. д.

Поэтому с целью увеличения живучести моста были произведены расчеты по специально разработанным методикам.

При расчете свайного фундамента была применена методика расчета критической силы сжатого стержня, частично опертого на упругое основание Винклера. Решив эту задачу, мы оценили величину «условной силы» в долях известной критической силы такого же, но свободного (без основания) стержня. Это позволило, определить коэффициент, характеризующий данную систему «стержень - основание», обоснованно выбрать одну из трех функций прогибов (форм потери устой-

чивости) и далее определить критическую силу на базе этих функций и не допустить потерю устойчивости свайного фундамента. Подробно эта методика рассмотрена в работе [2].

Так как рассматриваемый мост построен на структурно-неустойчивых грунтах, была применена методика определения динамических догружений стержня при внезапном изменении структуры упругого основания. Разработанная математическая модель процесса позволяет последовательного решить поставленные задачи. Полученные результаты исследования показали существенные приращения напряжений и значительные изменения картины напряженно-деформированного состояния, вызванные внезапным изменением структуры и расчетной схемы рассмотренной модели «балка - основания». Подробно эта методика рассмотрена в работе [3].

Все проведенные расчеты в совокупности позволили принять правильное решение для определения элементов конструкций малогабаритного сборно-разборного мостового пролета с запасом прочности не менее 20%.

В соответствии с требованиями заказчика был разработан малогабаритный сборно-разборный мостовой пролет (МСРМП) и выполнены следующие работы:

- все элементы МСРМП спроектированы и рассчитаны на заданную нагрузку;
- разработана техническая документация для изготовления МСРМП;
- изготовлено на заводе более 100 м. п. МСРМП;
- произведено строительство моста более 100 м. п. на структурно - неустойчивых грунтах;
- мост проходит испытание с учетом изменяющихся граничных условий его эксплуатации.

Таким образом, проектирование малогабаритного сборно-разборного мостового пролета позволили за счет минимального количества элементов составных частей снизить массу конструкции и трудоемкость монтажа (демонтажа) оборудования, что дало возможность переносить элементы вручную и монтировать их в любом труднодоступном месте. А применение разработанных методик расчета позволило обоснованно принять правильное решение для определения элементов конструкций МСРМП с запасом прочности не менее 20% и построить мост на структурно-неустойчивых грунтах с высокой степенью надежности, в кратчайшие сроки и с минимальными материальными затратами. Подана заявка на регистрацию изобретения.

Библиографический список

1. Старовойтов, Э. И. Механика материалов / Э. И. Старовойтов. - Гомель: БелГУТ, 2012. - 376 с.

2. Поддубный, А. А. Методика расчёта критической силы сжатого стержня, погруженного в упругое основание / А. А. Поддубный, В. А. Гордон // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. - 2019. - № 1(38)

3. Dynamic Loading of the Rod at a Sudden Change of Elastic Foundation Structure A APoddubny and V B Gordon Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1079, Chapter. Citation A APoddubny and V B Gordon 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 042076.

ТИПОВЫЕ ОШИБКИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ ПО УТЕПЛЕНИЮ СКАТНОЙ КРОВЛИ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПЕНОПЛЭКС И ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

Полякова А.В.
ТГТУ, г. Тамбов, Россия

Обустройство скатной кровли считается одним из самых трудоемких, самых затратных и самых ответственных этапов любого строительства. Особенно, это актуально при возведении частного дома.

Если все неправильно рассчитать, то в скором времени крышу придется переделывать.

Некачественная или неправильная укладка теплоизоляционного материала может послужить причиной гниения деревянных конструкций. Как результат, придется заново обустраивать крышу дома, что повлечет дополнительные затраты сил и средств. Чтобы крыша на протяжении долгого времени смогла выполнять свои функции, необходимо серьезно относиться к этапу утепления скатной кровли.

На рынке современных строительных материалов представлено огромное количество всевозможных теплоизоляционных материалов различного происхождения, изготовленных по самым различным технологиям.

Чтобы определиться с подходящим утеплителем для скатной крыши, стоит учитывать такие их показатели [1-3]:

- низкий показатель теплопроводности, не более 0,05 Вт/м×К;
- минимальная масса, чтобы не перегружать кровлю;
- материал должен обладать водоотталкивающими свойствами;

- устойчивость к резким колебаниям температур, включая крепкие морозы и различные природные воздействия, что серьезно сказывается на долговечности материала;

- экологическая чистота - а именно выделения в пространство вредных веществ в процессе эксплуатации;

- пожаробезопасность. Материал не горит и не поддерживает горение;

- долговечность.

Подобным требованиям удовлетворяют следующие современные утеплители:

- пенополистирол (пенопласт) годится для утепления нежилых чердачных помещений. Его укладывают на пол, а затем заливают цементно-песчаной стяжкой. Это связано с тем, что материал горит и выделяет при этом целый перечень вредных веществ.

- экструдированный пенополистирол, вроде ПЕНОПЛЕКСА, так же применяется в условиях, где отсутствует его контакт с огнем.

- пеноплэкс - это экструдированный пенополистирол, обладающий приемлемой прочностью, водоотталкивающими свойствами и другими характеристиками. К сожалению, материал горит, и в частном жилом строительстве применяется весьма редко. Конструкция листов продумана таким образом, что его монтаж обеспечивает сплошную теплоизоляционную поверхность без образования щелей.

Загородные дома и коттеджи чаще всего имеют скатную крышу. При строительстве дома надо уделить особое внимание утеплению такой кровли. Стоит подробно ознакомиться с используемыми материалами и тщательно контролировать процесс утепления. Иначе заказчик никак не сможет проверить качество выполненных работ, пока сама природа не испытает крышу дома.

При устройстве скатных крыш часто допускаются одни и те же типовые ошибки.

Перед установкой кровельного покрытия используют дополнительную гидроизоляцию - это может быть мембрана или плёнка (рисунок 1). Смысл данной гидроизоляции вроде бы понятен: защита от протекания, переувлажнения и конденсата. В правильно проветриваемом пространстве под кровлей, конденсат образовываться не будет. Протечки говорят о низком качестве производства работ. Важной задачей при строительстве и выполнению работ по теплоизоляции и гидроизоляции кровли - обеспечить достаточный воздухообмен непосредственно под крышей дома. Дополнительная гидроизоляция просто не нужна в случае качественно проведенных работ [4-5].

Кроме того, установка такой гидроизоляции может привести к серьёзным проблемам. Если значения показателей паропроницаемости и прочности гидроизоляции не соответствуют данной конструкции крыши, то в холодное время года над утеплителем начнёт скапливаться конденсат. Такой же эффект будет и при неправильной установке гидроизоляционной плёнки. Большой провис плёнки - самая частая ошибка. Величина зазора между слоями гидроизоляции и теплоизоляции не должна нарушаться - не менее 20 миллиметров. Мембраны имеют относительно низкое сопротивление паропроницанию, их допускается устанавливать непосредственно на утеплитель.

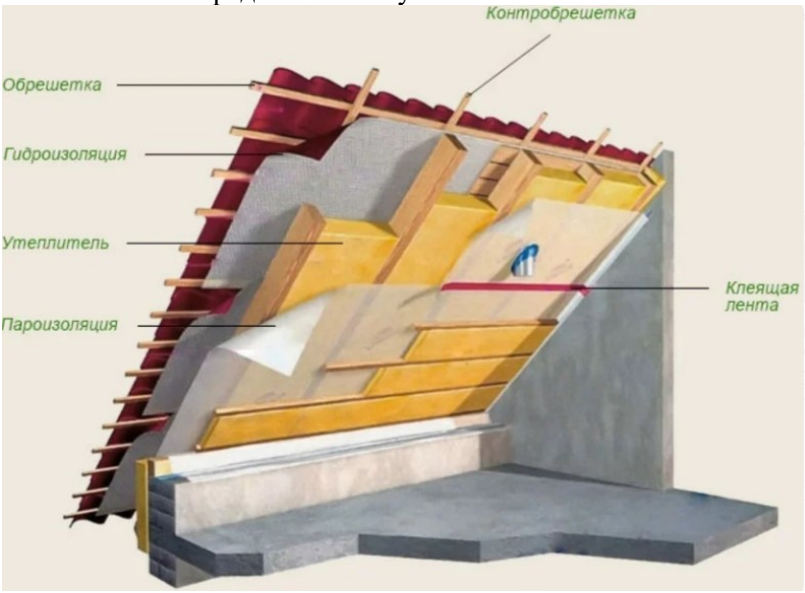


Рис. 1. Установка дополнительного слоя гидроизоляции

Ещё одна ошибка при утеплении кровли: установка теплоизоляции изнутри помещения. При подобном монтаже, намокания теплоизоляции практически не избежать. Для того чтобы материал не вываливался, его вдавливают между стропилами и слой теплоизоляции оказывается слишком близко, а то и вплотную к гидроизоляции [6]. Величина вентилируемого зазора сильно уменьшается и трудно контролируется. Более того, если применяют жёсткие утеплители, то они часто ломаются при установке в распор. Отсюда вытекает следующая ошибка: появление щелей в слое утеплителя.

Так нарушается главный показатель качественного утепления - отсутствие мостиков холода. Подобный дефект появляется в основном

при использовании плитных утеплителей из пенополистирола. Мягкие утеплители из стекловолокна более эластичны, они способны полностью заполнить нужное пространство, не оставляя за собой мостиков холода.

Библиографический список

1. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М.: Госстрой России, ФГУ ЦПП, 2004.

2. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М.: НИИСФ РААСН, 2013.

3. СП 131.13330.2012 Строительная климатология (Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*) - М.: 2000. - 42 с.

4. Ярцев В.П. Об энергетическом потреблении зданий в отопительный период / В.П.Ярцев, С.А.Струлев, А.А.Мамонтов, И.А.Струлева // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2019. № 9-10 (248-249). С. 30-32.

5. Ярцев В.П. К вопросу оценки энергетической эффективности ограждающих конструкций малоэтажных зданий / В.П.Ярцев, С.А.Струлев, А.А.Мамонтов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2019. № 9-10 (248-249). С. 24-27.

6. Ярцев В.П. Сравнительный анализ эффективности применения утеплителей в каркасном домостроении / В.П.Ярцев, А.А.Мамонтов // Кровельные и изоляционные материалы. 2016. №6. С.32-35.

ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ И УСИЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ДЕРЕВА

Прохорова А.В., Сычева Т.Н.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Современные инженерные исследования строительных конструкций показывают, что причиной аварийных разрушений, как правило, становятся одновременные воздействия нескольких факторов. Многие повреждения деревянных конструкций связаны с нарушением общих правил эксплуатации зданий и сооружений. Для элементов деревянных конструкций необходим регулярный контроль за их состоянием, поскольку древесина - материал органического происхождения и подвержен поражению грибами и насекомыми. Загнивание деревянных конструкций возникает в результате увлажнения, из-за дефектов гидроизоляции и несоблюдения температурно-влажностного режима эксплуатации.

Элементы стропильной системы у торцов зданий часто повреждаются из-за протечек в кровле. При возведении различных пристроек и надстроек к существующему зданию могут произойти изменения схем приложения снеговой нагрузки на покрытие и схемы водоотвода с крыши. Если эти вопросы будут решены неграмотно, то конструкции окажутся перегруженными в зоне снегового мешка. Нарушение водостока может привести к загниванию стропильных конструкций в местах опирания.

При обследованиях чердачных помещений выявляется довольно распространенная ошибка при эксплуатации - глухая заделка слуховых окон. Балки чердачных перекрытий в зданиях старой постройки часто оказываются полностью засыпанными шлаком. Такая засыпка приводит к поверхностному загниванию деревянных балок на глубину 2-3 см. Еще одна распространенная ошибка - это обертывание толем опорных концов балок или даже полное обертывание толем балок по всей длине. При этом возникает конденсация влаги на поверхности древесины, и создаются препятствия проветриванию конструкций. Решением данной проблемы может стать укладка слоя гидроизоляции под опорную подушку или опорную часть балки, соприкасающуюся с кирпичной стеной. Также следует обеспечить благоприятный температурно-влажностный режим эксплуатации для конструкций из дерева.

Нарушения технологии при производстве деревянных строительных конструкций, например, изготовление конструкций из сырой древесины (с влажностью более 20%), могут вызвать образование продольных трещин в результате усушки. Такого рода дефекты мало влияют на несущую способность сжатых и изгибаемых элементов, но они становятся опасными в растянутых элементах и в коротких балках.

Необходимость ремонта или усиления строительных конструкций возникает при изменении условий эксплуатации, габаритов здания, увеличении технологических нагрузок в связи с предполагаемой реконструкцией.

Во время проведения усиления конструкций из дерева необходимо решить ряд задач:

- обеспечение требуемой несущей способности, надежности и долговечности элементов конструкций;

- включение в работу элементов усиления и обеспечение их совместной работы с основной конструкцией;

- конструкция элементов усиления не должна изменять положение центра тяжести основного сечения и нарушать центровку элементов в узлах.

Обозначим общие рекомендации для ликвидации повреждений и восстановления конструкций из дерева [1].

При незначительных биологических повреждениях древесины (загнивание на глубину 1 - 3 см) механическим способом удаляют загнивший слой на поверхности конструкции, захватывают здоровые слои на глубину 2...3 см и обрабатывают этот участок антисептиком.

В случае более серьезного грибкового поражения (на глубину до 1/4 сечения элемента) поврежденная часть древесины удаляется полностью с захватом здоровых слоев на глубину 2 ...3 см и прилегающих участков длиной до 0,3 м здоровой на вид древесины. Решение о необходимости усилении ослабленного сечения с помощью накладок принимают после проведения проверочного расчета.

В случаях, когда гнилостные разрушения проникли на глубину более 1/4 сечения (опорные части балок, ферм), рекомендуется полностью выпилить пораженный участок с захватом прилегающих участков длиной до 0,5 м здоровой древесины. При этом ослабленное сечение усиливается или полностью заменяется.

При проведении ремонта стоек сплошного сечения, которые имеют изломы или выпучивание из плоскости, рекомендуется восстановить проектное положение элемента, затем увеличить его жесткость в плоскости изгиба с помощью установки деревянных накладок и прокладок на болтах. Накладки будут располагаться со стороны вогнутости деформированного элемента.

Балки с надрывами растянутых волокон, недопустимыми прогибами (более 1 /200/) можно усилить деревянными накладками на болтах или изменить конструктивную схему введением шпренгеля или установкой промежуточной стойки, как советует Ковальчук Л.М. [3]. Чердачные балки допускается подвешивать к стропильным ногам. При проведении ремонта опорных частей балок применяют деревянные или стальные протезы.

Растянутые элементы ферм можно усиливать с помощью деревянных накладок на болтах или натяжных металлических хомутов, а также дублировать или заменять стальными тяжами. Для ремонта поврежденных сжатых элементов ферм используют накладки на гвоздях и болтах. Опорные узлы ферм усиливают с помощью стальных протезов.

Клееным деревянным конструкциям требуется усиление при механических повреждениях сечений и в случае значительных расслоений по клеевым швам. При механических повреждениях ослабленные участки конструкций перекрываются стальными накладками на болтах

и глухарях или наклеиваются дополнительные слои досок с клеегвоздевой запрессовкой.

Рекомендуются следующие способы усиления клееных конструкций из дерева [1]:

- при местном расслоении отдельных слоев на глубину до 1/3 сечения в опорных узлах сечение перекрывается боковыми накладками из бакелизированной фанеры марки ФБС на эпоксидном клее с гвоздевой или шурупной запрессовкой;

- при сквозном расслоении нескольких клеевых швов на небольших по протяженности участках (2...4 м) элемент усиливается системой из стальных уголков и стяжек или стальными пластинчатыми нагелями и поврежденный участок стягивается хомутами;

- при наличии многих сквозных трещин на локальном участке в опасном сечении можно усилить такой участок натяжными хомутами по типу растянутого стыка конструкции Б. А. Освенского.

Введение в конструктивную схему разного рода затяжек позволяет снизить внутренние усилия и уменьшить опасность дальнейших расслоений. При многочисленных сквозных расслоениях элемента его необходимо заменить полностью.

Одним из методов реконструкции стропильной крыши при увеличении нагрузки на нее является увеличение уклона стропил. В случае, когда имеются значительные дефекты деревянных конструкций, рекомендуют выполнять полную замену элементов междуэтажных перекрытий и стропильной крыши путем установки новых конструкций рядом с поврежденными. При большом количестве поврежденных балок с целью экономии металла применяют стержневые накладки. Накладки заранее изготавливают в виде стальных ферм из уголков и круглых стержней.

Расчет усиления строительных конструкций всегда является сложной инженерной задачей и требует индивидуального подхода.

Библиографический список

1. Калугин А. В. Деревянные конструкции. Учебное пособие (конспект лекций).- М.: Издательство АСВ, 2003. - 224с., с ил.

2. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II- 25-80/ Минрегион России. - М.: ЦНИИСК, 2011. - 88 с.

3. Ковальчук Л.М. Деревянные конструкции - проблемы и решения - Архитектура и Строительство от RIN.RU, 2016.

ГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕТРОВОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КОМПЛЕКСА ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ ОКРУЖАЮЩЕЙ ЗАСТРОЙКИ

Пугачёв М.А., Делягин М.Ю.
ТулГУ, г. Тула, Россия

В настоящее время набирает популярность точечная застройка или застройка небольшими жилыми комплексами в условиях плотной городской застройки, либо освоение ранее неиспользуемой территории в районах города с плотной застройкой. В результате расчета ветровой аэродинамики будущих зданий с учетом окружающей застройки будут получены средние составляющие давлений при различных направлениях ветрового воздействия. Эти данные служат основой для графического анализа полученной обдувки математической модели здания или комплекса.

В соответствии с п.11.1.7 СП 20.13330.2016 для сооружений повышенного уровня ответственности, а также во всех случаях, не предусмотренных в приложении В (иные формы сооружений, учет при надлежащем обосновании других направлений ветрового потока или составляющих общего сопротивления тела по другим направлениям, необходимость учета влияния рядом стоящих зданий и сооружений и т.п. случаях), аэродинамические коэффициенты необходимо принимать на основе результатов продувок моделей сооружений в аэродинамических трубах или по рекомендациям, разработанным специализированными организациями путем выполнения аэродинамических расчётов.

Для расчета использовался пакет SOFiSTiK способный выполнять расчет стационарных и нестационарных ветровых нагрузок. В результате проектирования объемной твердотельной модели в расчетной программе и верификации расчётной схемы были получены аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления c_x и боковой силы c_y во всём рассматриваемом диапазоне углов, формируется представительный набор направлений ветра. Для получения числовых значений в табличном виде и подготовки рекомендаций по назначению аэродинамических коэффициентов давления комплекс был разбит на блоки, для которых определялась средняя составляющая ветрового давления.

Графический анализ, полученный в результате расчета модели, картин распределения давления на поверхности здания позволяет выделить следующие характерные особенности отрывного обтекания здания: - по показателям комфортности пешеходных зон можно сделать качественные выводы об отсутствии в их области явно характерных застойных зон, что свидетельствует об удовлетворительной «проветри-

ваемости»; - наветренные зоны характеризуются уровнем среднего нагружения, давление p ~ 300÷350 Па в области зон торможения потока; - подветренные зоны заторможенного потока характеризуются уровнем p ~ - 150÷-50 Па;

- обнаруживаются локализованные около острых кромок корпусов узкие зоны интенсивного срыва потока с пиковыми величинами p ~ -1400÷-1000 Па;

- на парапетах крыш корпусов так же реализуются интенсивные отрывные течения с p ~ -1400÷-1000 Па

Нормативное значение основной ветровой нагрузки *w* следует определять как сумму средней *wm* и пульсационной *wp* составляющих: *w= wm+ wp.* Средние составляющие ветровой нагрузки *wm* определены в данной работе, пульсационная составляющая *wp* определяется на основе информации о собственных частотах исследуемой конструкции значений *wm* руководствуясь СП 20.13330.2016.

Учитывая зависимость пульсационной составляющей от частотных характеристик здания, определение пульсационной составляющей ветрового воздействия при математическом моделировании или при экспериментальном исследовании при рассмотрении безмассовой модели не представляется возможным. Для получения пульсационной составляющей надлежит использовать подход, принятый в СП 20.133330.2016(раздел 11.1.8), при котором пульсационная составляющая определяется в зависимости от средней составляющей ветрового воздействия. Данный подход реализован в сертифицированных программных комплексах, используемых для расчета конструкций (ЛИРА-САПР, STARK ES, SCAD, MICRO FE и др.). Средние составляющие давлений определены в результате аэродинамического расчёта для каждого рассматриваемого корпуса при различных направления ветрового воздействия. При расчетах по первой группе предельных состояний необходимо учитывать коэффициент надежности по нагрузки и коэффициент надежности по назначению.

В соответствии с разделом 11.2 СП 20.13330.2016 для элементов ограждения и узлов их креплений (в частности, навесных фасадных систем и светопрозрачных конструкций фасадов и покрытий) необходимо учитывать пиковые положительные и отрицательные воздействия ветровой нагрузки, нормативные значения которых определяются по формуле:

$$W_{+-} = {}_{W_0 k(z_e)}\left[1+\xi\left(z_e\right)\right]C_{p,+(-)}V_{+(-)}$$

где $\left(z_e\right)$ эквивалентная высота (см. 11.1.5 СП 20.13330.2016), $k\left(z_e\right)$ $\xi\left(z_e\right)$ коэффициенты, учитывающие, соответственно, изменение дав-

ления и пульсаций давления ветра на высоте (z_e) см. 11.1.6 и 11.1.8 СП 20.13330.2016); $C_{p,+(-)}$ - пиковые значения аэродинамических коэффициентов положительного давления (+) или отсоса $V_{+(-)}$ (-); коэффициенты корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному давлению (+) и отсосу (-).

При расчете ограждений в дополнение к пиковому значению ветрового давления надлежит добавлять нормальное давления w , приложенного к внутренним поверхностям сооружений с проницаемыми ограждениями, открывающимися или постоянно открытыми проемами, в случае если при проектировании предусмотрены отрываемые проемы. Величина аэродинамического коэффициента принимается в соответствии с приложением В.1.9 СП 20.13330.2016. Принимая коэффициент пульсаций в соответствии с таблицей 11.4 для каждого участка здания определяются пиковые положительные и отрицательные воздействия ветровой нагрузки. Полученные значения являются нормативными. При расчетах по первой группе предельных состояний необходимо учитывать коэффициент надежности по нагрузки и коэффициент надежности по назначению.

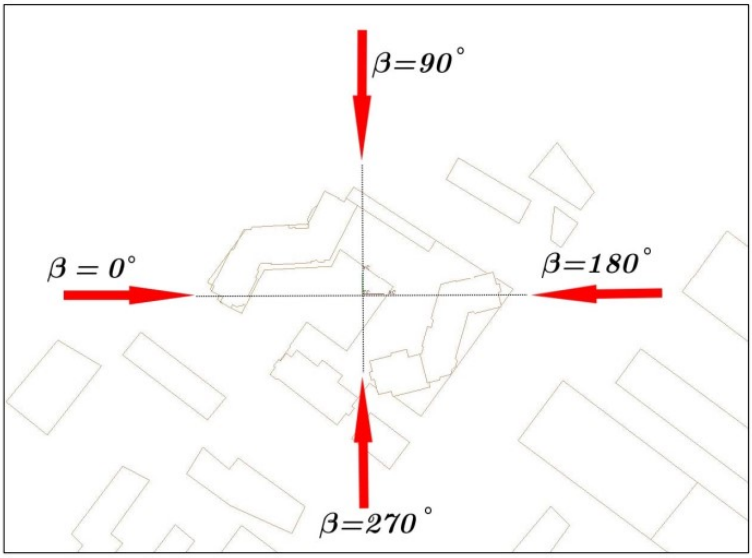


Рис. 1.

На рис. 1 приведён план расчётной геометрии с указаниями направлений ветра β. Предварительные расчёты проведены для всех

направлений ветра β с шагом 15°). В рамках данной статьи приведены две из пяти наиболее характерных с точки зрения ветровой нагрузки направлений ветра: 0°,135°. Все приведённые величины являются средними по времени при установившемся решении.

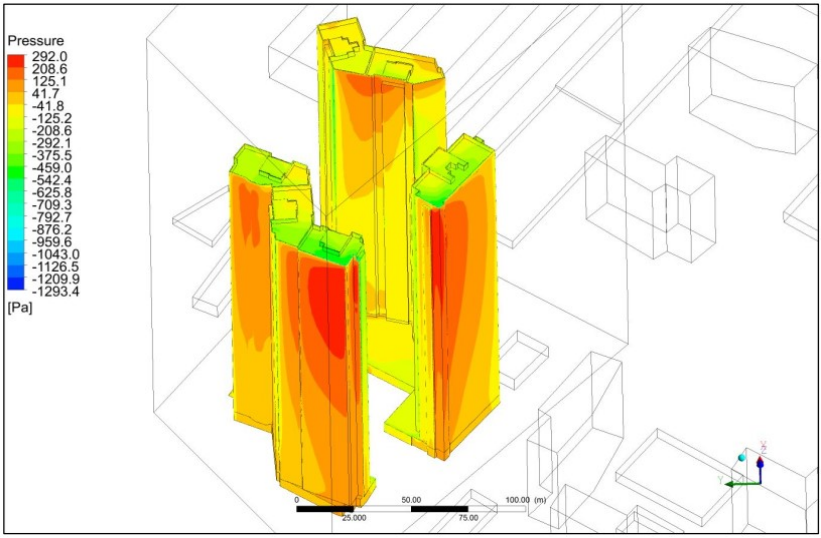


Рис. 2. β=0°, наветренная сторона

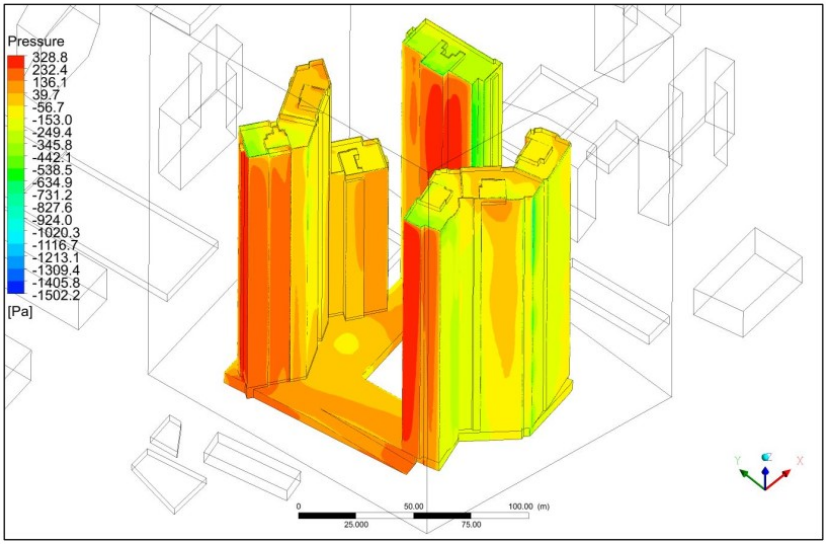


Рис. 3. β=135°, наветренная сторона

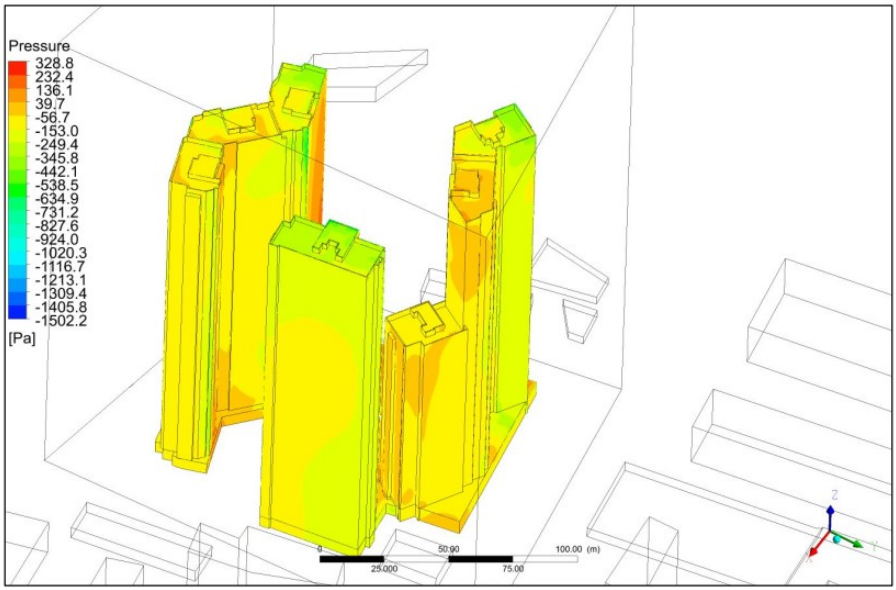


Рис. 4. β=135°, подветренная сторона

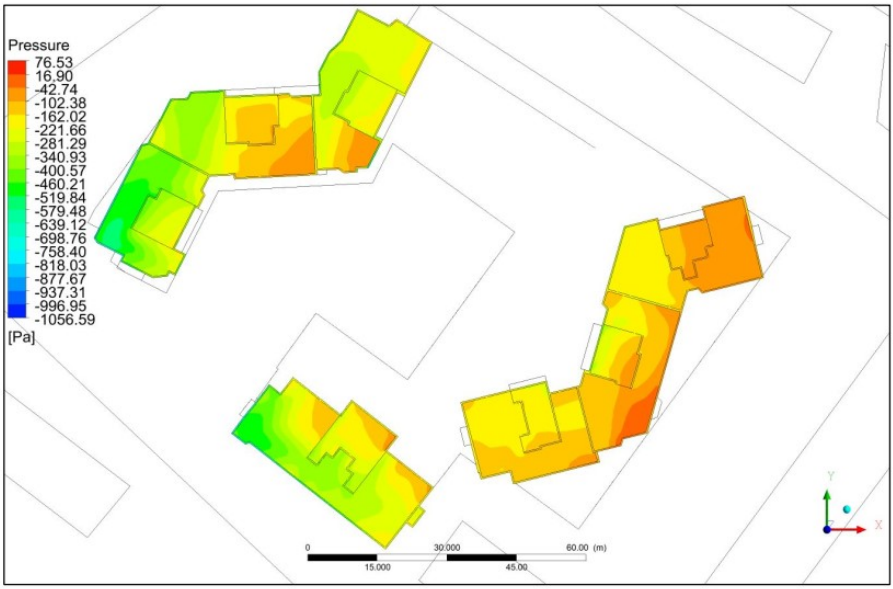


Рис. 5. β=0°, распределение давления на крышах корпусов

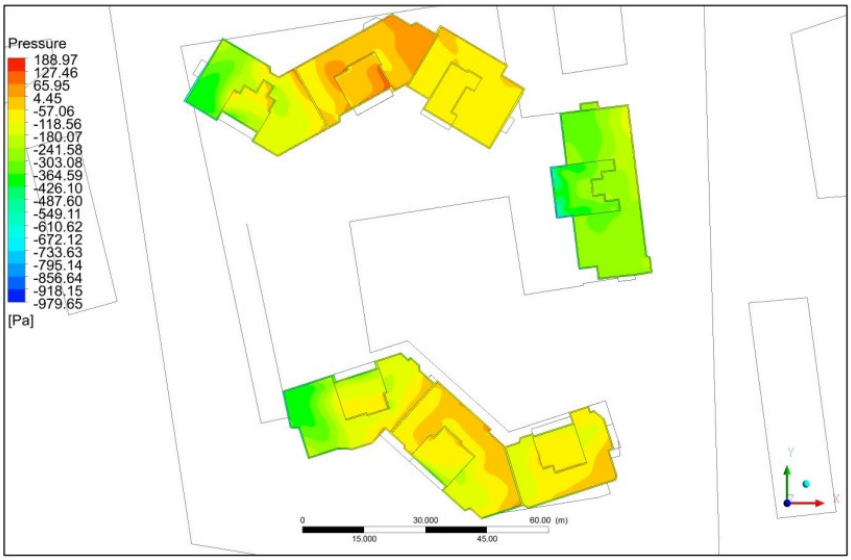


Рис. 6. β=135°, распределение давления на крышах корпусов

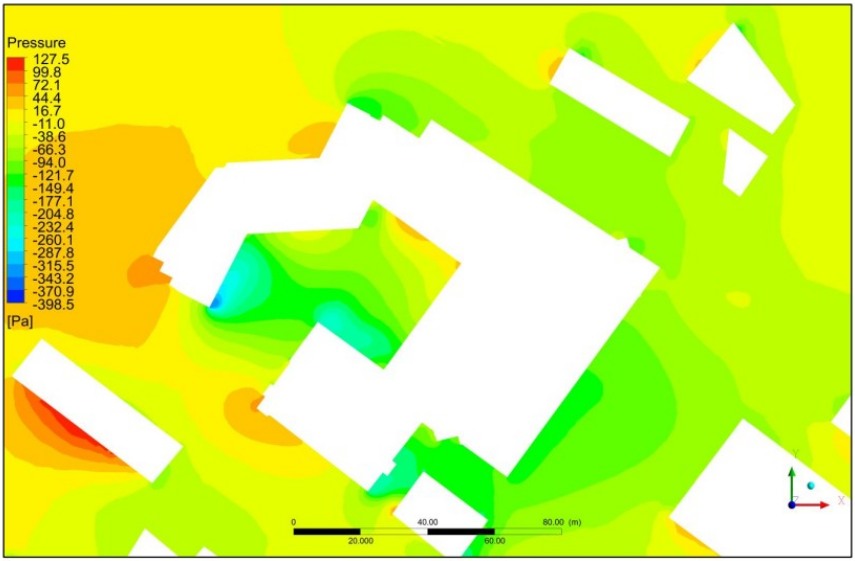


Рис. 7. β=0°, распределение давления, h=+1.5 м

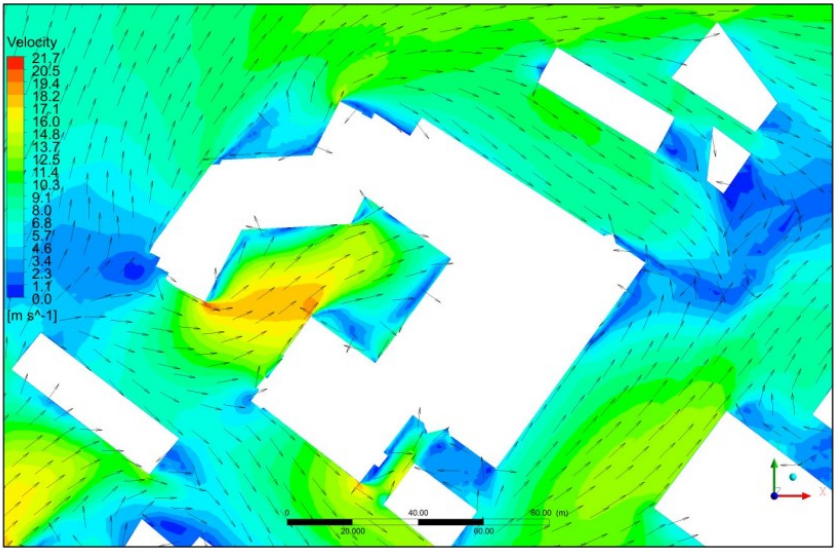


Рис. 8 - β=0°, распределение скорости, h=+1.5 м

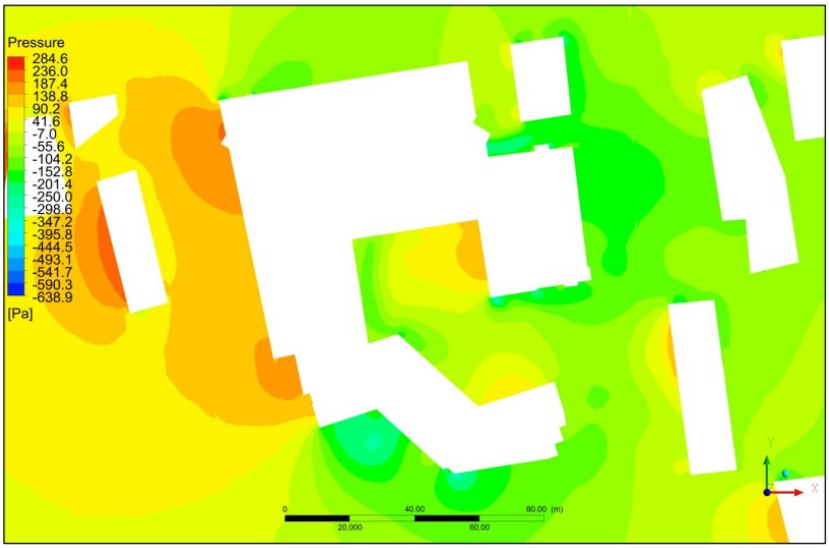


Рис. 9 - β=135°, распределение давления, h=+1.5 м

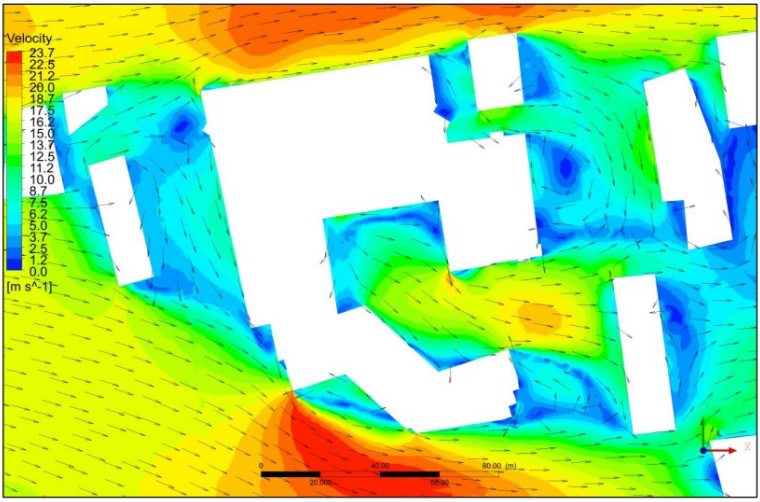


Рис. 10 - β=135°, распределение скорости, h=+1.5 м

Можно сделать следующие выводы:

1. Представлена методика получения аэродинамических коэффициентов.

2. Представлена методика определения пульсационной составляющей ветрового давления.

3. Представлена методика определения пиковых значений ветрового давления на характерных участках объекта с учетов выбранного направления ветра.

4. Представлены результаты графического анализа, полученные в результате математического моделирования ветровой аэродинамики жилого комплекса.

5. Практика параллельных расчётных и экспериментальных работ показывает, что даже расчётные аэродинамические технологи на основе решения уравнений Навье-Стокса могут давать различия с экспериментом в цифрах в диапазоне 10- 30% в зависимости от конфигурации объекта и тапа получаемых характеристик.

Таким образом, данные по распределениям давления на фасадных поверхностях и интегральным осреднённым нагрузкам являются ориентировочными и могут использоваться для оценок проектных решений, а также используется при обработке конфигурации модельного комплекса на ситуационном плане и оптимизации процесса испытания моделей в аэродинамической трубе.

Библиографический список

1. Айрапетов А.Б. Расчётные и экспериментальные исследования обтекания высотных зданий и сооружений атмосферным ветром в условиях городской застройки / А.Б.Айрапетов, В.В.Вышинский, А.В.Катунин // Труды МФТИ. - 2017. - Т. 9. - № 2. - С. 5-12.

2. Железобетонные конструкции. Расчет и проектирование многоэтажного здания в трехмерной постановке задачи / А.П.Яшанов. - ПСС. - 2015.

3. Расчет многоэтажного здания с учетом деформации упругого полупространства и динамических воздействий по действующим нормам Российской Федерации / А.В.Письмак. - ПГУПС. - 2015.

4. СП 20.13330.2016 «Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия».

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОЙ АЭРОДИНАМИКИ

Пугачёв М.А., Делягин М.Ю.
ТулГУ, г. Тула, Россия

В настоящее время набирает популярность точечная застройка или застройка небольшими жилыми комплексами в условиях плотной городской застройки, либо освоение ранее неиспользуемой территории в районах города с плотной застройкой. Особенно остро вопрос стоит в отношении жилых высотных зданий. Для проектирования в таких условиях существует отдельный пункт в СП, который должен быть учтен при проектировании зданий или комплексов. В соответствии с п.11.1.7 СП 20.13330.2016 для сооружений повышенного уровня ответственности, которые указаны в Федеральном законе от 29 декабря 2004 г. N 190-ФЗ "Градостроительный кодекс Российской Федерации"(статья 48, часть 2), а также во всех случаях, не предусмотренных В.1 (иные формы сооружений, учет при надлежащем обосновании других направлений ветрового потока или составляющих общего сопротивления тела по другим направлениям, необходимость учета влияния близстоящих зданий и сооружений, рельефа местности и аналогичные случаи), аэродинамические коэффициенты устанавливаются в рекомендациях, разработанных на основе результатов:

1) физического (экспериментального) моделирования - испытаний в аэродинамических трубах;

2) математического (численного) моделирования ветровой аэродинамики на основе численных схем решения трехмерных уравнений движения жидкости и газа с адекватными моделями турбулентности, реализованных в современных верифицированных лицензионных программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики.

В ходе выполнение аэродинамического расчета необходимо выполнить следующее:

- провести анализ исходной проектной документации;
- провести анализ метео и топографических данных в районе застройки и назначить характеристики ветра согласно СП 20.133330.2016;
- сформировать расчетную модель комплекса и окружающей застройки;
- провести предварительные аэродинамические расчёты комплекса для верификации расчётного метода; - выявить представительный набор направлений ветра;
- формирование расположения «дренажных точек» на компьютерной модели, где будут определяться данные по давлению;
- определить аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления и боковой силы (средние по времени составляющие);
- провести подробные аэродинамические расчёты комплекса для представительного набора направлений ветра с учётом окружающей застройки и профиля ветра;
- определение ветрового давления (средней составляющей) в «дренажных точках» компьютерной модели;
- уточнение аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления и боковой силы по результатам подробных расчётов для представительного набора направлений ветра;

Для расчета использовался пакет SOFiSTiK способный выполнять расчет стационарных и нестационарных ветровых нагрузок. Математическая модель представляет собой систему осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, дополненную уравнениями для турбулентных характеристик. В качестве последних выбраны дифференциальные уравнения полуэмпирической модели переноса сдвиговых напряжений SST, которая является предпочтительной при расчете вихревых и отрывных течений. В работе решается трехмерная нестационарная задача в рамках дискретизации осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Решение задачи происходит в размерном виде. Если за характерный линейный размер

принять характерную ширину наименьшего корпуса комплекса, составляющую b=44 м (ориентировочное значение), характерной скоростью избрать скорость набегающего потока V0, равную 20 м/с, то число Рейнольдса, рассчитанное для скорости 6 м/с составит Re=1,25·107. При таких значениях течение автомодельно по числам Рейнольдса, то есть отсутствует зависимость характеристик течения от скорости (числа Рейнольдса). Поэтому для любой скорости, большей 6 м/с, характер течения идентичен, и величины характеристик течения можно пересчитать из полученных в данной работе величин. Расчет ведётся до величины времени, соответствующей выходу величин интегральных осредненных нагрузок (силы лобового сопротивления и боковые силы на отдельные корпуса) на установившиеся («стационарные») значения.

Для иллюстрации на рис. 1 приведён график установления силы лобового сопротивления в зависимости от количества шагов по времени.

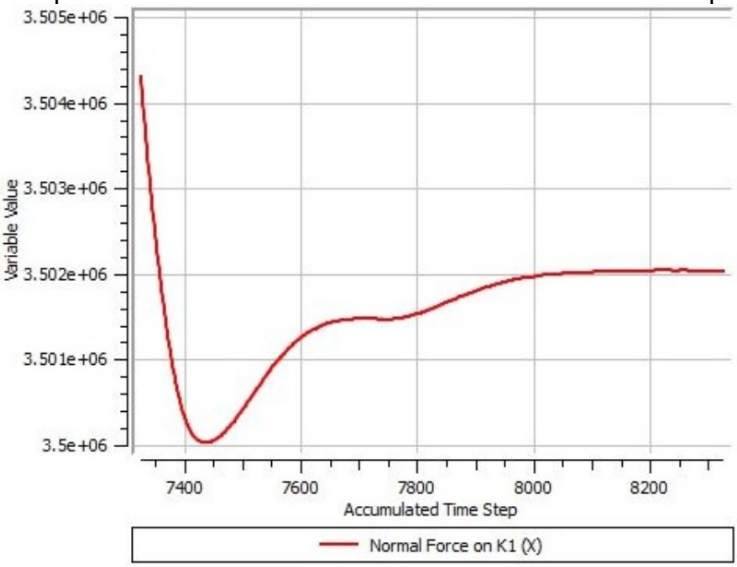


Рис. 1

В результате расчетов получены:

- аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления cx и боковой силы cy;
- величины средних значений давления;
- картины распределения среднего давления на поверхности фасадных систем;

- картины полей средних скоростей («визуализация») комплекса для выявления возможных особенностей обтекания и, в частности, в области пешеходных зон.

На основе предоставленной документации была сделана 3D-модель комплекса с несущественными для получаемых величин аэродинамическихкоэффициентов упрощениями. На основе анализа окружающей застройки была сформирована её 3D-модель. Были выбраны только здания, могущие оказывать влияние на аэродинамику исследуемого корпуса. Геометрия окружающих зданий была упрощена в степени, не влияющей заметно на аэродинамические характеристики исследуемого комплекса. На рисунке 2 приведена заложенная в расчёт 3D-модель комплекса с окружающей застройкой.

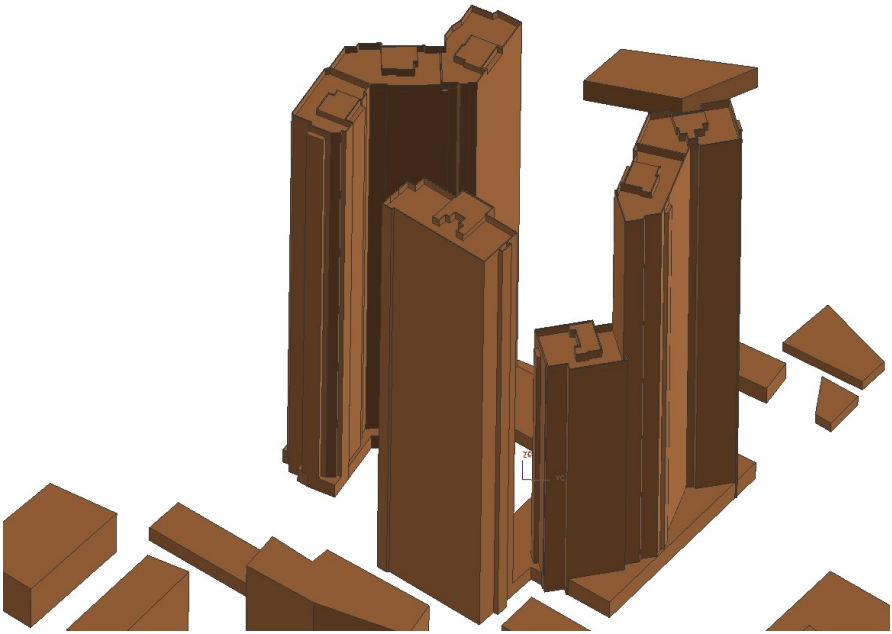


Рис. 2

В расчёт закладывались натурные величины исследуемого комплекса и окружающей застройки Расчётная сетка (РС) состоит из трёх блоков: основной блок (ОБ), блок с окружающей застройкой (БОЗ), внешний блок (ВБ). Блоки связываются в решателе интерфейсом для передачи данных между собой. ОБ включает в себя исследуемую геометрию комплекса, разбивается неструктурированной сеткой (НС) с призматическим подслоем. Для основных расчётов сетка строится с высо-

той первого элемента от стенки не более 1 см. БОЗ включает в себя геометрию окружающей исследуемый комплекс застройки. Выбор включаемой в расчётную область БОЗ геометрии производится методом экспертной оценки (но на расстоянии менее трёх характерных размеров исследуемого комплекса, разбивается неструктурированной сеткой (НС) с призматическим подслоем. ВБ является блоком, на границах которого задаются в решателе граничные аэродинамические условия. Размер блока составляет порядка трёх характерных диаметров БОЗ вперёд по потоку относительно исследуемого комплекса, порядка 10 характерных диаметров БОЗ назад по потоку, порядка трёх характерных диаметров БОЗ по бокам, и порядка 5 характерных диаметров БОЗ вверх. ВБ разбивается исключительно БСС. Сгущение элементов делается к поверхности земли и к интерфейсу между блоками.

К краям области размер элементов сетки специально увеличивается в целях демпфирования численных осцилляций во время расчёта. Внутренний критерий оценки качества сетки “Quality” даёт следующий результат для построенной сетки:

- минимальное значение 0,0009756;
- максимальное значение 1;
- среднее значение 0,7141.

Размеры расчётной области, следующие:

- высота 5 км;
- расстояние до передней границы от комплекса 7 км;
- расстояние до задней границы от комплекса 27 км;
- расстояние до боковых границ от комплекса 6,5 км;

Общий объём расчётной сетки для предварительных расчётов составляет порядка 2.6 млн. ячеек, а для подробного аэродинамического расчёта порядка 22 млн. ячеек

На основании анализа исходных данных тип местности не может быть однозначно отнесен к типу В или С в соответствии с СП 20.13330.2016 Тип В - в соответствии с СП 20.13330.2016 - городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м. Тип С - городские районы с плотной застройкой высотой более 25 м.

Сооружение считается расположенным в местности данного типа, если эта местность сохраняется с наветренной стороны сооружения на расстоянии 30h при высоте сооружения до 60 м и на расстоянии 2 км при высоте выше 60 м. При моделировании принято выбрать граничные условия советующими типу местности В, а учёт в математической

модели рядом расположенных зданий окружающей застройки в радиусе 1000 м (рис. 2) сформирует актуальный ветровой профиль, воздействующий на исследуемый комплекс. В расчёте приняты следующие термодинамические параметры воздуха:

- давление окружающей среды 101325 Па; - температура окружающей среды 288,15° К;

- плотность окружающей среды 1,2248 кг/м3;

На основании отнесения выше местности к типу Б и табл. 11.1 СП 20.13330.2016 (w_0 =0,23) можно определить зависимость w0 k (ze). По этой зависимости задавшись принятыми термодинамическими параметрами среды можно определить граничное условие для профиля скорости набегающего потока. На рисунке 3.6 приведён определённый таким образом и заложенный в расчёт профиль скорости, выше 300 м профиль принят постоянным ввиду отсутствия по нему дополнительной информации. Для исследуемого комплекса, окружающей застройки, поверхности земли поставлено граничное условие: стенка с прилипанием, для боковых и верхних поверхностей внешней области - стенка с проскальзыванием, для выходной границы задано относительное статическое давление равное ноль Па (относительно атмосферного давления).

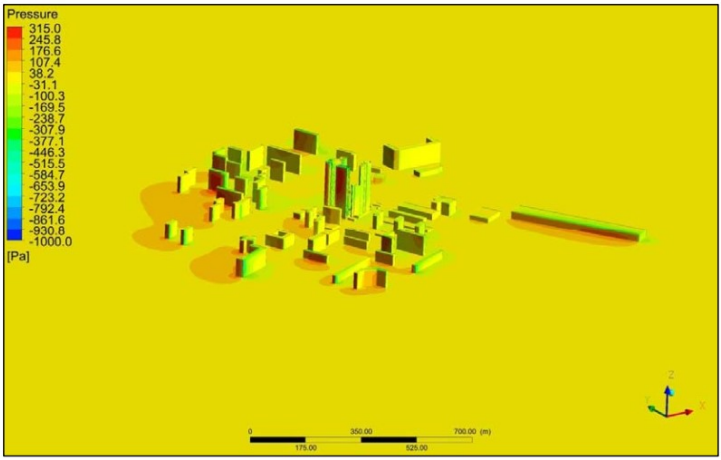


Рис. 3. Распределение давления на окружающую застройку

Расчеты исследуемого объекта выполнялись с учетом окружающей застройки с учетом принятых габаритных размеров расчетной области.

Предварительные расчёты осуществлялись на грубой сетке (порядка 2.6 млн. ячеек, геометрия крыш корпусов упрощена) с шагом 15° по направлениям ветра в диапазоне 360°.

Верификация вычислительной технологии осуществлялась путем контроля давления на поверхности комплекса в областях торможения потока следующим образом:

- взята высота 150 м, для которой непосредственное влияние окружающей застройки за счёт затенения можно считать несущественным;
- для этой высоты комплекс $w_0 k (z_e)$ равен 437 Па;
- давление в точке торможения в случае неравномерного набегающего потока типа приземного ветрового слоя должно составлять не более (0,8÷0,9)*437 Па, т.е. не более 350÷390 Па;
- проверяются значения давления в области торможения потока по всем расчётным углам.

Изучение предварительных результатов показало, что давление в областях торможения не превышают указанных величин, т.о. нефизичности в предварительном расчёте отсутствуют.

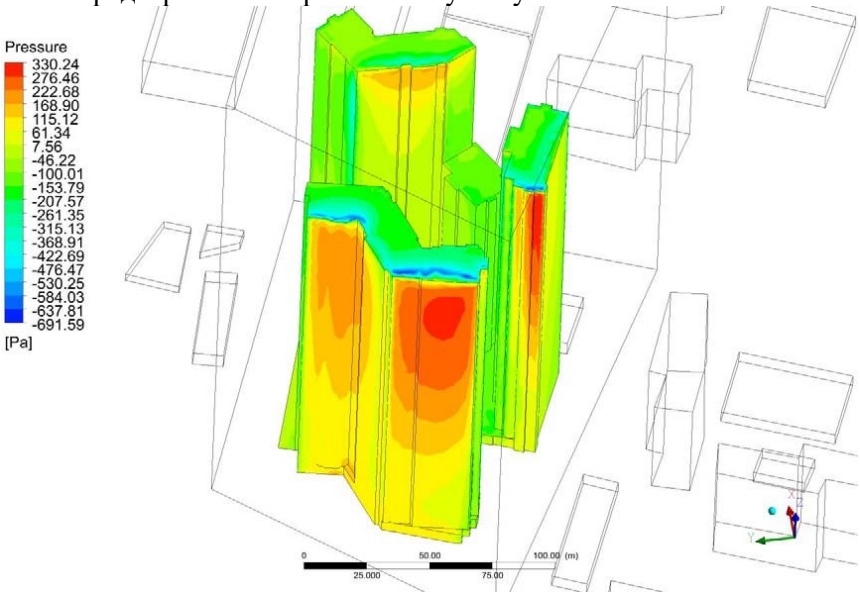


Рис. 4

Следует обратить внимание, что в предварительных расчётах ввиду упрощения геометрии крыш и грубой сетки зоны с большими пиковыми величинами отрицательного давления имеют завышенный размер. После верификации расчётной схемы были получены аэродинамиче-

ские коэффициенты лобового сопротивления $\mathbf{c_x}$ и боковой силы $\mathbf{c_y}$ во всём рассматриваемом диапазоне углов, формируется представительный набор направлений ветра. Выбраны следующие направления ветра: 0°, 45°, 135°, 210°, 330°. Для получения числовых значений в табличном виде и подготовки рекомендаций по назначению аэродинамических коэффициентов давления комплекс был разбит на блоки, для которых определялась средняя составляющая ветрового давления, подробное обозначение зон осреднения для корпусов представлено в приложениях В-Д. Далее были проведены расчёты на представительном наборе направлений ветра на мелкой сетке. Были уточнены полученные аэродинамические коэффициенты $\mathbf{c_x}$ и $\mathbf{c_y}$,. Получены значения давлений на фасадах исследуемого комплекса как в виде распределений давления по фасадам, так и в виде средних значений для блоков. Кроме того, получены поля и векторы скорости, по которым можно проводить оценку комфортности в пешеходных зонах комплекса.

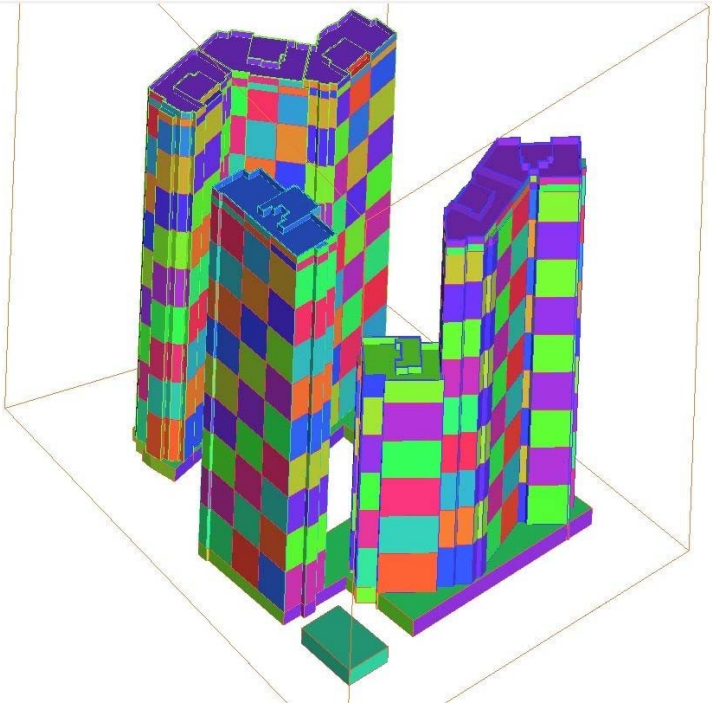


Рис. 5

Для представительного набора направлений ветра была получена полная картина полей скоростей и давлений в потоке. В результате расчетов представлены:

- картины ветрового давления на фасадах комплекса;
- поля давления, поля скорости и векторы скорости для высот +100 и +150 м;
- поля давления, поля скорости и векторы скорости для пешеходных зон на отметках +1,5 м и +7,2 м.

В таблице 1 представлены максимальные значения аэродинамических коэффициентов интегральных аэродинамических сил при наличии окружающей застройки, действующих на комплекс и направления ветра, при которых они реализуются. В таблице приняты следующие обозначения:

$C_{Xзд} = \frac{X_{зд}}{q * S_{зд}}$ – коэф. сопротивления всего корпуса вдоль оси OX (вдоль потока);

$C_{Yзд} = \frac{Y_{зд}}{q * S_{зд}}$ – коэф. поперечного потока аэродинамического силы всего здания корпуса вдоль оси OY (поперек потока)

$C_r = \sqrt{C_{Xзд}{}^2 + C_{Yзд}{}^2}$ – оэффициент суммарного сопротивления.

Табл. 1. Максимальные значения аэродинамических коэффициентов интегральных аэродинамических сил при наличии окружающей застройки, действующих на комплекс.

Корпус комплекса	Коэффициенты	Значение	Направление ветра
1	*CX зд*	1,10	210°
	CY зд	0,45	105°
	CR	1,11	210°
2	*CX зд*	1,23	285°
	CY зд	0,69	0°
	CR	1,31	210°
3	*CX зд*	1,12	45°
	CY зд	0,60	75°
	CR	1,12	45°

Таким образом, выполнено математическое моделирование комплекса жилых зданий; расчетные характеристики полей ветрового обтекания и аэродинамические коэффициенты комплекса являются и автомодельными по числу Re; в результате выполненных расчетов были получены значения средней составляющей ветрового давления на здания, входящие в состав объекта, а так же аэродинамические коэффициенты c_x и c_y,; подготовлены рекомендации по назначению аэродинамических коэффициентов на характерных участках здания; аэродинамическим характеристикам здания свойственен традиционный уровень сопротивления (сила вдоль потока) и, что важно, соразмерная с силой лобового сопротивления боковая «подъёмная» сила (поперёк потока), которая должна быть учтена при проектировании; практика параллельных расчётных и экспериментальных работ показывает, что даже расчётные аэродинамические технологи на основе решения уравнений Навье-Стокса могут давать различия с экспериментом в цифрах в диапазоне 10- 30% в зависимости от конфигурации объекта и тапа получаемых характеристик; данные по распределениям давления на фасадных поверхностях и интегральным осреднённым нагрузкам являются ориентировочными и могут использоваться для оценок проектных решений, а также используется при обработке конфигурации модельного комплекса на ситуационном плане и оптимизации процесса испытания моделей в аэродинамической трубе.

Библиографический список

1. Айрапетов А.Б. Расчётные и экспериментальные исследования обтекания высотных зданий и сооружений атмосферным ветром в условиях городской застройки / А.Б.Айрапетов, В.В.Вышинский, А.В.Катунин // Труды МФТИ. - 2017. - Т. 9. - № 2. - С. 5-12.

2. Железобетонные конструкции. Расчет и проектирование многоэтажного здания в трехмерной постановке задачи / А.П.Яшанов. - ПСС. - 2015.

3. Расчет многоэтажного здания с учетом деформации упругого полупространства и динамических воздействий по действующим нормам Российской Федерации / А.В.Письмак. - ПГУПС. - 2015.

4. СП 20.13330.2016 «Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия».

ВЛИЯНИЕ КОЛЬМАТАЦИИ НА МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В БЕТОНЕ ПРИ ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ

Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Нармания Б.Е.
ИГПУ, г. Иваново, Россия

При жидкостной коррозии гидроксид кальция вымывается из бетона, тогда как почти весь гель кремнекислоты остается в порах изделия, вызывая их частичное закупоривание (кольматацию) [1]. Если в результате протекающей при коррозии реакции образуются нерастворимые или малорастворимые соединения, то они также создают дополнительный эффект кольматации.

Рассмотрим сравнительно простой вид коррозии - магнезиальную. Она обусловлена тем, что гидросиликаты кальция вступают в обменные реакции с ионами Mg^{2+} с образованием малорастворимого в воде гидроксида магния $Mg(OH)_2$ [2]. Пример такой реакции:

$$Ca(OH)_2 + MgCl_2 = CaCl_2 + Mg(OH)_2\downarrow. \quad (1)$$

Исследование масообменных процессов при жидкостной коррозии проводилось на образцах из цемента марки ЦЕМ I 42,5 Н с В/Ц = 0,3 в 2%-ом растворе $MgCl_2$. Концентрация раствора выбиралась согласно СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» поскольку хлоридсодержащие среды являются одними из самых агрессивных по отношению к цементным бетонам.

Результаты исследований, представленные на рис. 1, показывают, что после 70 суток испытаний концентрация катионов Ca^{2+} в жидкой фазе выходит на постоянные значения, а после 150 суток в исследуемой системе наступает состояние близкое к равновесному [3, 4].

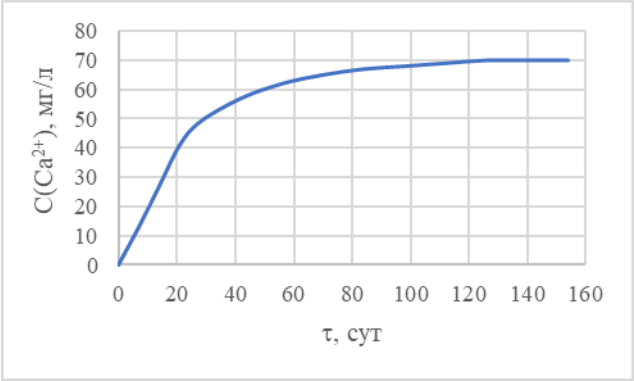


Рис. 1. Кинетическая кривая катионов Ca^{2+} в 2%-ом растворе $MgCl_2$ для образца из цементного камня

С помощью математической модели жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов (выражение (2)), разработанной в рамках научной школы академика РААСН С.В. Федосова [5], произведен расчет профилей концентрации «свободного гидроксида кальция» по толщине образца при коррозии в 2%-ом растворе $MgCl_2$ на разных этапах проведения эксперимента (рис. 2).

$$\begin{aligned}\theta(\bar{x}, Fo_m) = &-\frac{Ki_m^*}{6}(6Fo_m + 3\bar{x}^2 - 1)\\ &+\frac{2Ki_m^*}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n^2}\cos(\pi n\bar{x})\cdot exp(-\pi^2 n^2 Fo_m)\\ &+\int_0^1 \theta_0(\xi)d\xi\\ &+2\sum_{n=1}^{\infty}\cos(\pi n\bar{x})\int_0^1 \theta_0(\xi)\cos(\pi n\xi)d\xi\\ &\cdot exp(-\pi^2 n^2 Fo_m)\\ &+\left(Fo_m + \frac{3\bar{x}^2+2}{6}\right)\int_0^1 Po_m^*(\xi)d\xi\\ &-\int_0^1 Po_m^*(\xi)\cdot\xi\cdot d\xi + \frac{1}{2}\int_0^1 Po_m^*(\xi)\cdot\xi^2\cdot d\xi\\ &-\frac{2}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\cos(\pi n\bar{x})\int_0^1 Po_m^*(\xi)\cos(\pi n\xi)\,d\xi\\ &\cdot exp(-\pi^2 n^2 Fo_m).\end{aligned} \qquad (2)$$

Здесь: n - число членов ряда; ξ - координата интегрирования в диапазоне $0 \le \xi \le \bar{x}$; $Ki_m^* = \frac{q_б \delta}{kC_0\rho_б}$ - модифицированный критерий Кирпичева; $Fo_m = \frac{k\tau}{\delta^2}$ - массообменный критерий Фурье; $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$ - безразмерная координата; $\theta(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C(x,\tau) - C_0}{C_0}$ - безразмерная концентрация; $Po^*(\bar{x}) = \frac{q_v(x)\delta^2}{kC_0\rho_б}$ - модифицированный критерий Померанцева.

Полученные профили концентраций позволяют определить градиенты концентраций переносимого компонента на границе раздела фаз и рассчитать для исследуемой системы «цементный бетон - 2%-ый раствор $MgCl_2$» характеристики массопереноса.

Коэффициент массопроводности k, м^2/с:

$$k = \frac{q}{\rho_0 \frac{dC}{dx}}, . \qquad (3)$$

где q- плотность потока массы вследствие химических реакций, кг/(м^2·с); ρ_0 - плотность твердой фазы, кг/м^3; dC/dx - градиент концентраций переносимого компонента.

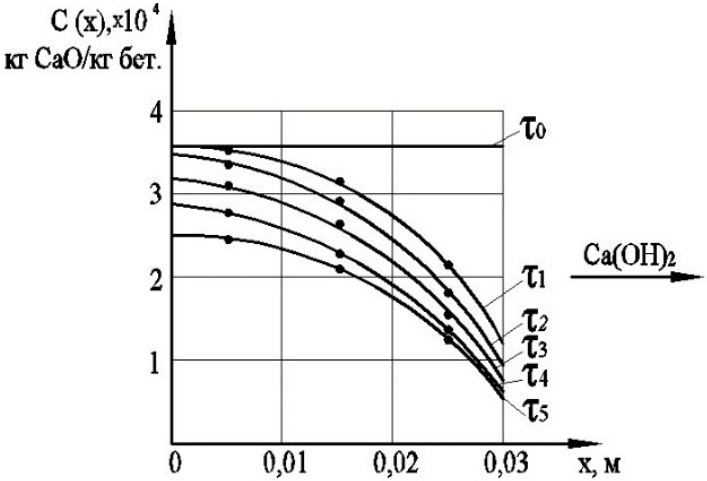


Рис. 2. Профили концентраций $Ca(OH)_2$ по толщине образца в 2%-ом растворе $MgCl_2$ при τ: 1 - 14 сут; 2 - 28 сут; 3 - 42 сут; 4 - 56 сут; 5 - 70 сут

Плотность потока массы веществаqиз исследуемого образца в жидкую среду:

$$q = \frac{\Delta C_{ж}}{S \cdot \tau}, \qquad (4)$$

где $\Delta C_{ж}$ - масса вещества, перешедшего из исследуемого образца в жидкую среду, кг.

Рассчитанные характеристики массопереноса представлены в табл. 1.

Таблица 1. Экспериментально определенные характеристики массопереноса для системы «цементный бетон - 2%-ый раствор $MgCl_2$»

	14	28	42	56	70
Плотность потока «свободного $Ca(OH)_2$» в образце, кг/(м^2·с)	$4{,}29\cdot10^{-7}$	$3{,}00\cdot10^{-7}$	$1{,}13\cdot10^{-7}$	$1{,}07\cdot10^{-7}$	$3{,}39\cdot10^{-8}$
Плотность потока Mg^{2+} в жидкости, кг/(м^2·с)	$2{,}60\cdot10^{-8}$	$4{,}43\cdot10^{-8}$	$5{,}12\cdot10^{-8}$	$5{,}15\cdot10^{-8}$	$5{,}97\cdot10^{-9}$
Коэффициент массопроводности k, м^2/с	$4{,}26\cdot10^{-9}$	$1{,}73\cdot10^{-9}$	$8{,}94\cdot10^{-10}$	$5{,}27\cdot10^{-10}$	$2{,}61\cdot10^{-10}$

На рис. 3 видно, что с течением времени происходит уменьшение коэффициента массопроводности по экспоненциальному закону, что соответствует замедлению массообменных процессов, протекающих в бетоне при жидкостной коррозии, вследствие образования в порах продуктов реакции (1).

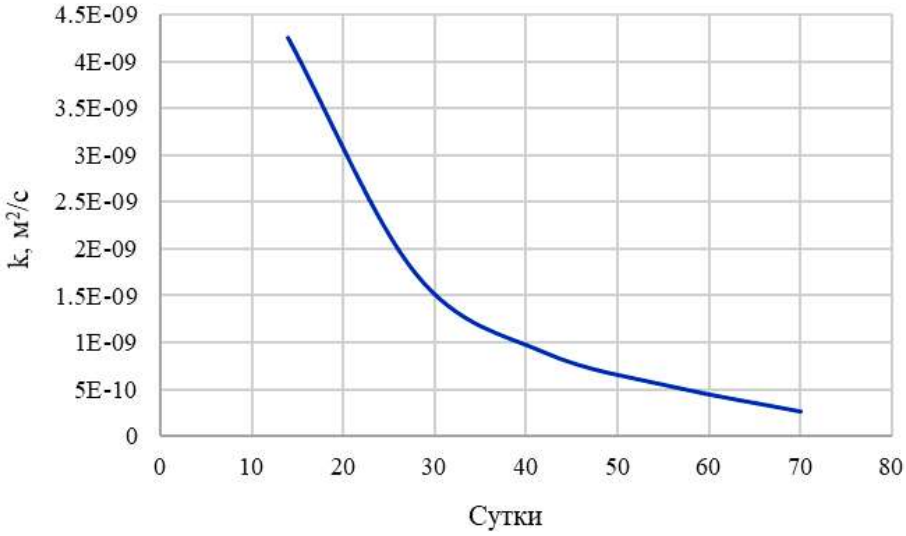


Рис. 3. Изменение значения коэффициента массопроводности в системе «цементный бетон - 2%-ый раствор $MgCl_2$» с течением времени

Имея представления о кинетике массообменных процессов и о механизме естественной кольматации при жидкостной коррозии цемент-

ных бетонов, можно не только прогнозировать долговечность бетонов, но и управлять процессами коррозионной деструкции, влияя на скорость коррозии посредством искусственной кольматации пор и капилляров бетона.

Библиографический список

Иванов, Ф.М. Взаимодействие заполнителей бетона с щелочами цемента и добавок / Ф.М. Иванов, Г.В. Любарская, Н.К. Розенталь // Бетон и железобетон. - 1995. - № 1. - С. 15-18.

Рахимбаев, Ш.М. О выборе типа цемента на основе теории кольматации при сложном составе агрессивной среды / Ш.М. Рахимбаев, Е.Н. Карпачева, Н.М. Толыпина // Бетон и железобетон. - 2012. - № 5. - С. 25-26.

Жидкостная коррозия бетонов в среде с различной степенью агрессивности / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, И.В. Караваев // Вестник гражданских инженеров. - 2017. - № 4 (62). - С. 113-118.

Федосов, С.В. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из бетона, содержащего гидрофобизирующие добавки / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, И.В. Караваев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2017. - № 6 (372). - С. 268-276.

Федосов,С.В. Математическое моделирование процессов коррозиии бетона второго вида в жидких агрессивных средах / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко // Информационная среда вуза: сборник материалов XV Международной научно-технической конференции. - Иваново: ИГАСУ, 2008. - С. 796-801.

КОМПОЗИЦИОННАЯ САМОУПЛОТНЯЮЩАЯСЯ СЫРЬЕВАЯ СМЕСЬ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СВАЙ

Рябов Г.Г., Изотов Е.А.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Самоуплотняющаяся бетонная смесь (СУБС) - смесь, которая без воздействия на неё дополнительной внешней уплотняющей энергии самостоятельно под воздействием собственного веса течет и уплотняется, освобождается от содержащегося в ней воздуха и полностью заполняет пространство между арматурными стержнями и опалубкой, сохраняя при этом гомогенность.

Применение самоуплотняющегося бетона в заводской технологии сборных железобетонных конструкций имеет некоторые преимущества в сравнении с использованием таких бетонов в монолитном варианте

строительства. В частности, с точки зрения улучшения условий труда, снижение уровня шума и вибрации в условиях замкнутого пространства заводского цеха имеет намного больший эффект, чем в условиях строительной площадки. Кроме того, продолжительность транспортировки бетонной смеси в заводских условиях на порядок ниже, чем время доставки смеси от бетоносмесительного цеха на строительную площадку, что снижает риск потери подвижности бетонной смеси или ее расслоения в результате увеличения пластифицирующего эффекта, которое может произойти при использовании поликарбоксилатных суперпластификаторов.

Важным фактором снижения эффективности производства ж/б изделий является большая трудоемкость уплотнения бетонной смеси. Даже при использовании подвижных БС их надежное уплотнение достигается за счет достаточно продолжительного вибровоздействия. Снижение трудоемкости бетонных работ может быть достигнуто за счет использования самоуплотняющихся бетонов, технология которых основана на введении в состав бетона двух дополнительных компонентов - высокоэффективных суперпластификаторов и тонкого наполнителя (инертной минеральной добавки) или высокоактивных пуццолановых добавок, таких, как микрокремнезем, зола-унос [3]. В качестве тонкого наполнителя используются дисперсные отходы дробления горных пород или отходы других производств. Для предотвращения расслоения самоуплотняющихся бетонных смесей в их состав могут дополнительно вводиться модификаторы вязкости [1].

Отличительными особенностями СУБ являются:

- самоуплотняющаяся бетонная смесь хорошо проникает в самые труднодоступные места в опалубке без использования вибраторов или иного уплотнения, обладая высокой текучестью на ранней стадии;

- безвибрационная технология снижает уровень шумового воздействия на человека и окружающую среду в сравнении с обычным бетонированием, что особенно важно при бетонировании в закрытом пространстве;

- уменьшение трудовых затрат (отпадает необходимость уплотнения бетона и затирки поверхности изделий);

- конструкции и изделия, изготовленные из СУБ, отличает плотная структура с полным отсутствием крупных пор;

- относительно низкое водоцементное отношение;

- в составе СУБ применяют композиционные вяжущие или тонкодисперсные минеральные добавки;

- для получения СУБ используют высокоэффективные химические добавки нового поколения: суперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов, при необходимости, в сочетании с пеногасителями и модификаторами вязкости;

- предел прочности при растяжении у бетонов из самоуплотняющихся смесей выше, чем у обычного цементобетона.

К недостаткам СУБ можно отнести следующее:

- сохраняемость СУБС ниже, чем у рядового тяжелого бетона, а длительная транспортировка может привести к потере подвижности смеси или ее расслоению в результате увеличения пластифицирующего эффекта, которое может произойти при использовании поликарбоксилатных суперпластификаторов [3];

- стоимость самоуплотняющегося бетона выше, чем у рядового тяжелого бетона.

На данный момент, в Российской Федерации отсутствует развитая нормативная база по самоуплотняющимся бетонам. Существовавший ранее ГОСТ Р 57345-2016/EN 206-1:2013 «Бетон. Общие технические условия», в котором упоминался СУБ, ныне не действует, а ГОСТ «Бетонные смеси самоуплотняющиеся. Технические условия», по информации полученной от директора НИИЖБ им. А. А. Гвоздева - Кузеванова Дмитрия Владимировича, находится в стадии разработки.

По этой причине, представленный в статье состав разрабатывался на основе ОДМ 218.3.070-2016 Методические рекомендации по разработке рецептуры самоуплотняющегося бетона с заданными свойствами по водонепроницаемости для буронабивных свай // Росавтодор. 2017 и литературе отечественных и зарубежных авторов.

Предъявляемые технические требования к смеси, следующие: разработать состава композиционной смеси - самоуплотняющегося тяжелого бетона для производства гидротехнических свай цельных сплошного квадратного сечения с ненапрягаемой арматурой. Сырьевые материалы должны быть рядовыми. Класс по прочности на осевое сжатие - В30. Марка по осадке конуса - П5 (ОК > 20 см). Марка по расплыву конуса: Р5 (РК 56-62 см). Прочность бетона на 1-е сутки после ТО при t = 45 ± 5 ºС - не менее 65% от проектной. Проектная прочность (32,7 МПа) достигается не позднее 3-их суток после тепловой обработки.

Краткая характеристика сырьевых материалов:

- Портландцемент типа ЦЕМ I класса прочности 42,5, нормальнотвердеющий по ГОСТ 31108-2016;

- Песок по ГОСТ 8736-2014, 2 класса, Мк - 1,71;

- Щебень из плотных горных пород фракций от 5 до 20 мм по ГОСТ 8267-93, марки по дробимости - 1200, марки по морозостойкости - F 200;

- Суперпластификатор (Добавка №1) - MasterGlenium®ACE 430 (высоководоредуцирующая/суперпластифицирующая добавка на основе эфира поликарбоксилата для производства сборных железобетонных изделий и конструкций);

- Модификатор вязкости (Добавка №2) - MasterMatrix® 100 (высокоэффективная добавка на основе водного раствора высокомолекулярного синтетического полимера - модификатор вязкости для подвижных и самоуплотняющихся бетонов);

- Зола-уноса марки КУК-4 по ГОСТ 25818-2017;

- Вода для бетонов и строительных растворов по ГОСТ 23732-2011.

В настоящее время отсутствуют методы расчета состава самоуплотняющихся бетонов нового поколения, кроме рекомендаций по рецептуре обычных самоуплотняющихся бетонов, предложенных профессором Окамурой: насыпной объем заполнителя крупной фракции должен быть не более 50% объема бетона; объемная часть песка в растворе должна составлять 40% [2]. При этом остается незыблемым принцип равенства суммы абсолютных объемов бетонной смеси 1000 литрам [3]. В ОДМ 218.3.070-2016 сказано следующее:

1. Ориентировочные нормы содержания мелкофракционных материалов (< 0,125 мм) (минеральная добавка, цемент, пыль из инертных материалов) в составе СУБС: - для СУБС с наибольшей фракцией зерен 20 мм содержание мелкой фракции ≤ 0,125 мм должно быть не менее 500 кг/м^3;

2. На основании содержания мелкофракционных материалов можно определить следующее содержание цемента и минеральной добавки в зависимости от требуемого качества бетона и используемого песка: - для СУБС с наибольшей фракцией зерен 20 мм содержание вяжущего (цемента и минеральной добавки) ≥ 400-450 кг/м^3;

3. Расход щебня не должен превышать расход песка. Количество песка рекомендуется - 53% от общей массы инертных материалов.

4. В смеси обязательно присутствует наполнитель. Должен применяться минеральный материал, увеличивающий водоудерживающую способность смеси.

5. Химические добавки - 1% от массы цемента.

Таблица 1.1. Разработанные составы СУБ, 1 м^3

Компоненты БС	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Цемент, кг	400	425	450
Зола-уноса, кг	100	75	50
Песок, кг	954	954	954
Щебень, кг	846	846	846
Суперпластификатор (0,9%), кг	3,6	3,8	4,0
Модификатор вязкости (0,1%), кг	0,4	0,4	0,5
Вода, кг	213	218	235

Из каждого разработанного состава было заформовано (без уплотнения и вибрации) по двенадцать образцов-кубиков 100×100×100 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2014, ГОСТ 18105-2018 и ГОСТ 7473-2010 в предварительно очищенные и смазанные формы, отвечающие ГОСТ 22685-89. Укладка смеси производилась сразу после ее приготовления. Кубики подверглись тепловой обработке, на стенде, при температуре t = 45±5 ºС. Время тепловой обработки (ТО) - 20 часов. Распалубка образцов осуществлялась после тепловой обработки. После распалубки образцы хранились при t=20±5ºС, при влажности 90-95%.

Таблица 1.2. Усредненные результаты испытаний по прочности на осевое сжатие

Составы	Данные	1 сут.	2 сут.	3 сут.	28 сут.
Состав 1	Масса	2370	2373	2370	2372
	Прочность, % от проектной	70	83	89	137
	Прочность, МПа	28,4	32,0	34,3	52,7
Состав 2	Масса	2370	2370	2373	2370
	Прочность, % от проектной	79	96	111	130
	Прочность, МПа	30,6	37,1	42,9	49,9
Состав 3	Масса, г	2371	2370	2372	2370
	Прочность, % от проектной	71	84	97	129
	Прочность, МПа	27,3	32,5	37,4	49,8

При производстве железобетонных изделий крайне важны распалубочная прочность и набор прочности изделий в первые трое суток, вследствие чего, кубики испытаны после ТО на 1, 2, 3, 28 сутки.

Испытания проводились согласно ГОСТ 10180-2012. Отклонения по плотности, линейным размерам и массе образцов-кубиков всех составов не превышали допуски ГОСТа. Разрушение осуществлялось на

гидравлическом лабораторном прессе (аттестованном и поверенном в соответствии с графиком поверки оборудования). Результаты испытаний учитывают рабочее сечение и приведены к базовому размеру образца. Усредненные значения собраны в таблице.

По результатам испытаний делаем вывод, что состав 2 показал наилучший результат, так как имеет наибольшую прочность на осевое сжатие на 1, 2, 3 сутки после ТВО, что наиболее значимо при производстве железобетонных изделий.

Библиографический список

1. Коровкин М.О., Гринцов Д.М., Ерошкина Н.А. Исследование самоуплотняющегося бетона для производства железобетонных изделий на универсальном стенде с переставной опалубкой // Инженерный вестник Дона, 2018, №3., С. 8.

2. Оучи М. Самоуплотняющиеся бетоны: разработка, применение и ключевые технологии // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: Труды 1-й Всероссийской конференции по бетону и железобетону. - М.: Готика, 2001., С. 209-215.

3. ОДМ 218.3.070-2016 Методические рекомендации по разработке рецептуры самоуплотняющегося бетона с заданными свойствами по водонепроницаемости для буронабивных свай // Росавтодор. 2017.

КОМПОЗИЦИОННО-СЫРЬЕВАЯ СМЕСЬ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФИБРОБЕТОНА

Рябов Г.Г., Стенякин А.Н.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Отечественный и зарубежный опыт показывают, что очень перспективным направлением в строительстве является применение фибробетонных конструкций различного назначения [1, 2, 3, 4].

Фибробетон - представляет собой традиционный бетон, включающий в себя фибровую арматуру. Дисперсное фибровое армирование позволяет в значительной степени компенсировать главные недостатки бетона - низкую прочность при растяжении и хрупкость разрушения. Фибробетон имеет в несколько раз более высокую прочность при растяжении на изгиб в отличии от традиционного бетона, обладает повышенной устойчивостью и прочностью к нагрузкам, за счет наличия внутри бетона-матрицы равномерно распределенной фибры. При за-

стывании на бетоне не образуется трещин, материал в 2 раза меньше подвержен деформации [4].

Наибольшее влияние на свойства сталефибробетона оказывают геометрические характеристики фибры. Особое значение имеет параметр, который называют геометрическим фактором, характеризуемым отношение длины фибры к ее диаметру. В работах [1,5] отмечается влияние размера заполнителя бетона на предел прочности при сжатии и растяжении при изгибе, поэтому рекомендуется применять при дисперсном армировании стальной фиброй мелкозернистый бетон или использовать щебень с максимальным размером не более 10мм. Наибольшую эффективность проявляют стальные фибры диаметром 0,3-0,7мм и оптимальное отношением длины к диаметру должно быть не менее 50мм.

Данное исследование относится к составам для изготовления фибробетонной смеси и применяется при изготовлении дорожных плит. Основной целью является экспериментально-теоретическое обоснование и разработка рационального способа повышения свойств композиционной сырьевой смеси для изготовления дорожных изделий из фибробетона с использованием стальной фибры.

При лабораторных испытаниях готовили образцы из портландцемента ЦЕМ I/Д0 42,5 Н, соответствующий ГОСТ 31108-2016. Содержание трехкальциевого и двухкальциевого силикатов ($3CaO \cdot SiO + 2CaO \cdot SiO$) составляет не менее 67% массы клинкера, а массовое отношение оксида кальция к оксиду кремния (CaO/SiO) - не менее 2,0. Содержание оксида магния (MgO) в клинкере не более 5,0% массы клинкера. Содержание MgO до 6,0% массы.

Кварцевый песок по модулю крупности относящийся к I классу, по полному остатку на сите 0,63 относится к среднему.

Таблица 1. Зерновой состав песка

Остатки	Ø отверстий сит						Прошло через сито №16
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Частный, г	0	10	25	295	445	205	20
Частный, %	0	1,0	2,5	29,5	44,5	20,5	2,0
Полный, %	0	1,0	3,5	33,0	77,5	98	100

Фибра в соответствии с ГОСТ 14614-83. Применяется фибра «ХЕНДИКС» в виде прямолинейного отрезка проволоки номинальной длиной 50 мм с анкерами в виде отгибов на обоих концах фибры.

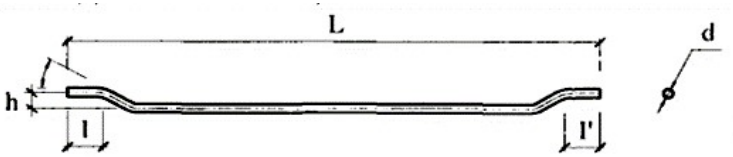


Рис. 1. Стальная фибра

Таблица 2. Характеристика стальной фибры

Наименование показателя	Величина
Диаметр, мм	0,3 ± 0,05
Длина, мм	15,0 ± 1,0
Относительная длина	50
Временное сопротивление разрыву	2450МПа
Количество перегибов не менее	8

Предел исследуемого процентного содержания фибры находился в диапазоне от 0,4% до 3%., по объему. Эффект от влияния стальной фибры оценивался по следующим параметрам: прочности на растяжение при изгибе, сжатие. Вода в соответствии с ГОСТ 23732-2011.

Наиболее важной операцией в технологическом процессе приготовления сталефибробетонных смесей является этап введения в приготовляемую смесь фибры, обеспечивающий их равномерное распределение в объеме матрицы.

Таблица 3. Составы смесей, использованный для изготовления образцов

Компонент	Содержание компонента, %				
	1	2	3	4	5
Портландцемент	21,94	21,85	21,81	21,38	20,59
Песок	65,82	65,55	65,43	64,15	61,59
Вода	11,85	11,80	11,78	11,55	11,12
Фибра	0,40	0,79	0,99	2,91	6,54

В лаборатории ТулГУ для определения предела прочности на сжатие и предел прочно при изгибе, были изготовлены образцы-балочки размером 40×40×160 мм из составов, приведенных в табл. 3, которая содержит соотношение компонентов по массе в %.

Дозирование компонентов смеси производили в три этапа в следующей последовательности: на первом этапе раздельно дозировали и вводили (портландцемент+песок), и перемешивали в сухом виде в течении 30с; на втором этапе равномерно в течернии 30с подавали сталь-

ную фибру в процессе перемешивания и осуществляли дополнительное перемешивание в течении минуты; на третьем этапе добавляли воду и осуществляли окончательное перемешивание в течении 2-3 минут.

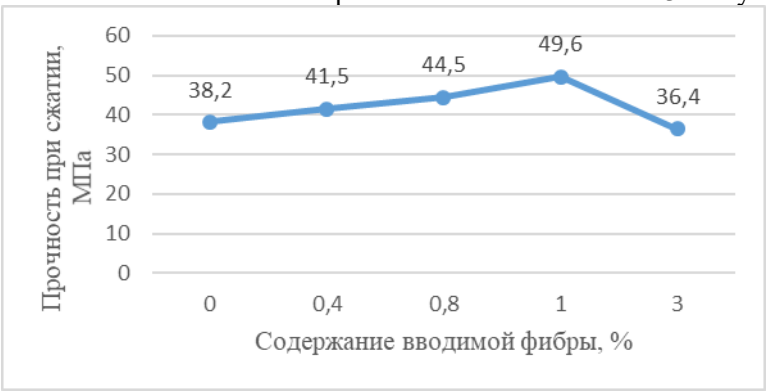


Рис. 2. Зависимость изменений предела прочности при сжатии образцов сталефибробетона при увеличении коэффициента армирования

На рис. 2 мы видим, что по сравнению с контрольным составом m_{fv} = 0% (48,3 МПа) прочность на сжатие при m_{fv} = 0,4% увеличилась на 8,64% до 41,5МПа, при m_{fv} = 0,8% увеличилась на 16,49% до 44,5МПа, при m_{fv} = 1 увеличилось на 29,84% до 49,6 МПа, при m_{fv} = 3% уменьшилось на 4,71% до 36,4МПа. Данные показывают, что наибольшее значение прочности сталефибробетона обеспечивается при уровне объемного армирования m_{fv} = 1% (49,6 МПа). Дальнейшее насыщение бетона-матрицы стальной фибры (свыше 1%) способствует снижению прочности сталефибробетона ниже уровня неармированного бетона.

Анализ рис. 3 показывает, что по сравнению с контрольным составом m_{fv} = 0% (5,56МПа) прочность на растяжение при изгибе при m_{fv} = 0,4% увеличилась на 68,53% до 9,37 МПа, при m_{fv} = 0,8% увеличилась на 79,86% до 10МПа, при m_{fv} = 1% увеличилась на 62,23% до 9,02МПа, при m_{fv} = 3% увеличилась на 53,78% до 8,55 МПа. В дальнейшем увеличение дозирование стальной фибры выше m_{fv} = 0,8% будет только способствовать снижению прочности на растяжение при изгибе.

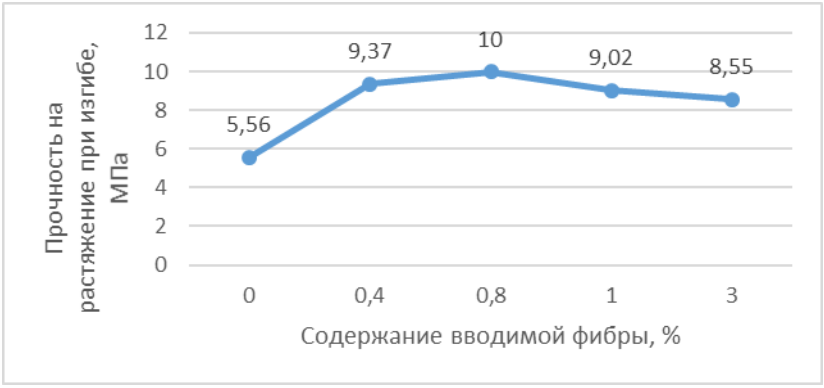


Рис. 3. Зависимость изменений предела прочности на растяжение при изгибе сталефибробетона при увеличении коэффициента армирования

Дисперсное армирование бетона-матрицы класса В40 стальной фиброй «ХЕНДИКС» обеспечивает увеличение прочностных показателей сталефибробетона.

Максимальное увеличение предела прочности при сжатии бетона в возрасте 28 суток (на 29, 84%) до 49,6МПа по сравнению с контрольным составом (без армирования) обеспечивается при коэффициенте армирования m_{fv} = 1%. При коэффициенте армирования m_{fv} = 0,8% прочность образцов на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток повышается на (63,93%) до 10 МПа по сравнению с контрольным составом (без армирования).

Библиографический список

1. Железобетон в XXI веке: Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России, Госстрой РФ, НИИЖБ. - М.: Готика, 2001.

2. ВСН 56-97. «Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций». - М., 1997

3. Сталефибробетонные конструкции зданий и сооружений. Серия «Строительные конструкции». Вып. 7. ВНИИНТПИ. - Москва, 1990.

4. Руководящие технические материалы по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций на фибре, резанной из листа. Госстрой РФ, НИИЖБ. - М., 2003.

5. Ф.Н. Рабинович Дисперсно-армированные бетоны, Стройиздат, Москва, 1989. - 176с.

АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ И НЕДОСТАТКОВ BIM МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Сельдюшов А.А.
МГУ им. Н.П.Огарёва, г. Саранск, Россия

В статье рассматриваются основные преимущества и недостатки использования BIM моделирования при проектировании и строительстве зданий и сооружений, а также перечислены проблемы, с которыми, как правило, приходится сталкиваться проектировщикам при внедрении методов информационного моделирования.

В последние годы в России все больше набирает обороты процесс внедрения информационного моделирования (Building Information Modeling, BIM) в организациях, занимающихся как проектированием, так и строительством зданий и сооружений [1]. Свою популярность BIM получил за счет удобства в выявлении всевозможных коллизий, связанных с геометрическими пересечениями элементов зданий, нарушениями нормируемых расстояний между конструкциями, пространственно-временными пересечениями ресурсов из календарно-сетевого графика строительства. Вовремя найденная и исправленная коллизия, в свою очередь, улучшается качество проекта, а само строительство становится экономичнее.

Созданная BIM модель здания обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами проектирования. Одним из плюсов создания BIM модели является возможность всех участников строительства (от застройщика до заказчика) оперативно согласовывать между собой строительные решения, обсуждать вопросы, возникающие между различными разделами проектируемого здания, осуществлять контроля за графиком выполнения работ, отслеживать изменения, возникающие на строительной площадке, тем самым повышая уровень качества выполненных работ.

Кроме того, объекты в BIM - это непросто 3D модель, а аналитическая модель, способная автоматически трансформироваться в чертежи, спецификации; ее можно загружать необходимыми нагрузками и экспортировать в расчетные программы. Еще одним важным плюсом BIM-технологий является точное проектирование инженерных систем здания, что значительно минимизирует погрешности каких-либо нестыковок между разными разделами здания. Таким образом, перечисленные выше преимущества BIM модели здания значительно упрощают работу проек-

тировщиков по созданию рабочей документации. В результате чего повышается производительность труда, в первую очередь благодаря оптимальному составлению проектно-сметной документации, календарно-сетевого графика и другой документации, которые помогают максимально точно поставлять необходимые ресурсы на строительную площадку и вводить строящиеся объекты в эксплуатацию без задержек [2].

На мой взгляд, главным недостатком BIM моделирования в России является отсутствие опыта в обмене информацией между участниками инвестиционно-строительного проекта (ИСП) по требованиям, изложенным в разделе 7 СП 404.1325800.2018 [3]. Кроме того, на данный момент нет документа, четко регламентирующего требования по прохождению информационной моделью экспертной оценки, которая необходима согласно ст. 49 Градостроительного кодекса РФ [4]. А также отсутствует опыт в проведении процедуры контроля процессов информационного моделирования и качества цифровых информационных моделей, которые должны включать, в том числе, проверки, перечисленные в СП 333.1325800.2017 (подраздел 6.4) [5].

При этом необходимо отметить, что важность скорейшего перехода на BIM-проектирование, а также использование информационных моделей при строительстве зданий и сооружений не вызывает сомнений. Именно на основе информационного проектирования и моделирования можно добиться значительного ускорения проектных работ, а также минимизации проектных ошибок и коллизий на этапе проектирования. Очевидно, что без появления неизбежных сложностей при переходе проектных организаций на BIM-моделирование не обойтись. При этом я уверен, что основные недостатки методов информационного моделирования будут носить, в основном, косвенный характер и устраняться в процессе освоения новых приемов проектирования [6].

Библиографический список

1. Талапов В.В. Технология BIM: суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий. - Москва: ДМК Пресс, 2015. - 410 с.

2. Савченко Р.Н. Сложности внедрения BIM в строительстве / Р.Н.Савченко // Вопросы науки и образования. - 2018. - № 27 (39). - С. 23-26

3. СП 404.1325800.2018 «Информационное моделирование в строительстве. Правила разработки планов проектов, реализуемых с применением технологии информационного моделирования». - Москва: Минстрой Россия, 2018, Стандартинформ, оформление, 2019. - 22 с.

4. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 №190- ФЗ (ред. от 30.04.2021) // СПС «КонсультантПлюс» [Электрон-

ный ресурс]. - Режим доступа: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/

5. СП 333.1325800.2017 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла». - Москва: Минстрой Россия, 2017. - 33 с.

6. Талапов В.В. Основы BIM. Введение в информационное моделирование зданий. - Саратов: Профобразование, 2017. - 392 с.

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА НАВОДОРОЖИВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДИСКА ВРАЩЕНИЯ

Сергеева С.Б., Трещев А.А.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Вращающийся диск является одним из важных элементов машин и механизмов. Диски постоянной толщины встречаются редко, но полученные решения необходимы для упрощенных оценок и сравнений с результатами, полученными различными методами вычислений.

Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что воздействие водорода на ряд материалов конструктивных элементов приводит к появлению в них наведенной неоднородности и разносопротивляемости, меняющейся с течением времени.

Учет воздействия водородосодержащей среды в данной работе построен на основе нелинейных определяющих соотношений изотропных разносопротивляющихся сред, предложенных в работах Матченко Н.М., Толоконникова Л.А., Трещева А.А.

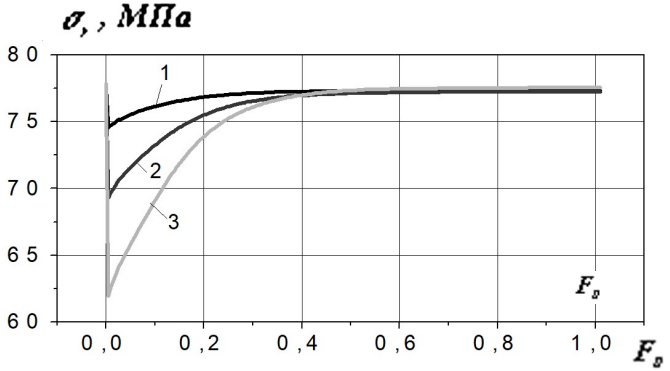


Рис. 1

Для исследования был принят диск вращения без центрального отверстия, радиусом $R = 0,75м$ и толщиной $h = 0,02м$. Диск подвергался совместному воздействию силового нагружения, интерпретируемого как вращение с угловой скоростью $\omega = 43\ об/сек$; двухстороннего температурного поля t=350^{0}C и двухсторонней диффузии водородосодержащей среды. В качестве материала диска был принят титановый сплав $ВТ1-0$.

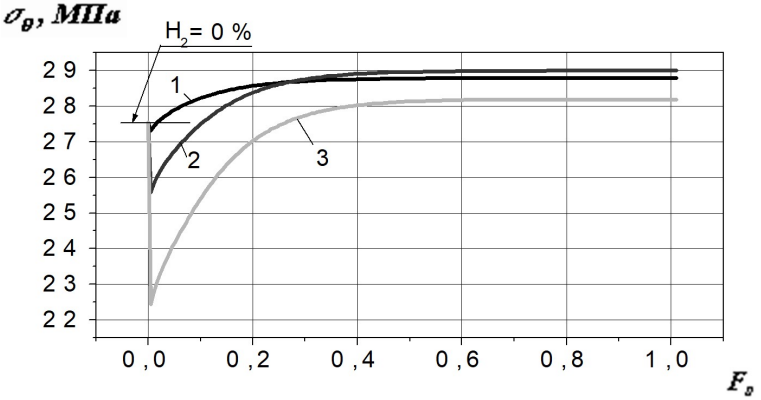


Рис. 2

На рис. 1 и 2 показаны изменения напряжений в течение времени в крайних волокнах центральной части и на наружном контуре диска, соответственно. Кривые 1, 2, 3 характеризуют кинетику изменения напряжений при концентрациях среды $\lambda = 0,01\%$, $\lambda = 0,02\%$ и $\lambda = 0,03\%$. В начальный период времени изменения напряжений достигают величин 20%. Заметим, что уточнение напряжений с учетом воздействия среды концентрацией $\lambda = 0,03\%$, после стабилизации НДС, составляет 2%.

Рассмотрим результаты расчета диска вращения в условиях агрессивной среды с концентрацией $\lambda = 0,03\%$.

Рис. 3 - 5 иллюстрируют распределение напряжений, деформаций и продольных усилий по радиусу диска при фиксированных значениях числа Фурье. Кривые 1, 2, 3 построены при числах Фурье: $F_0 = 0$, $F_0 = 0,005$ и $F_0 = 1$, соответственно.

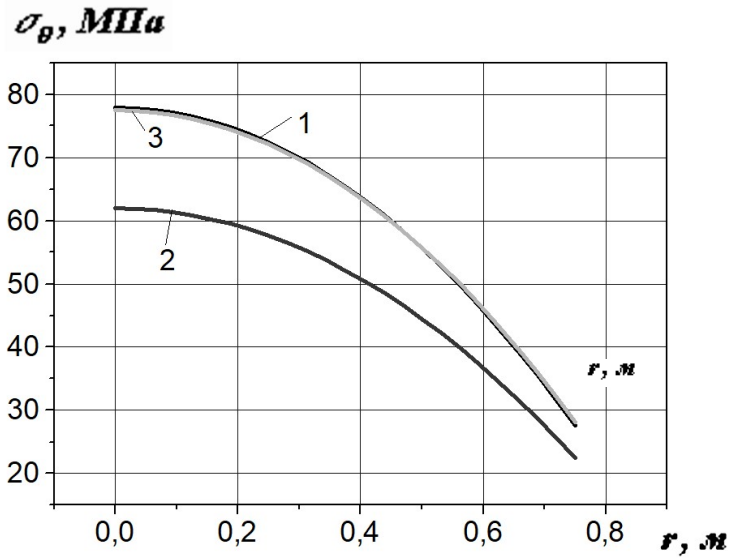

σθ, МПа
80
70
60
50
40
30
20
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
r, м
r, м
1
2
3

Рис. 3

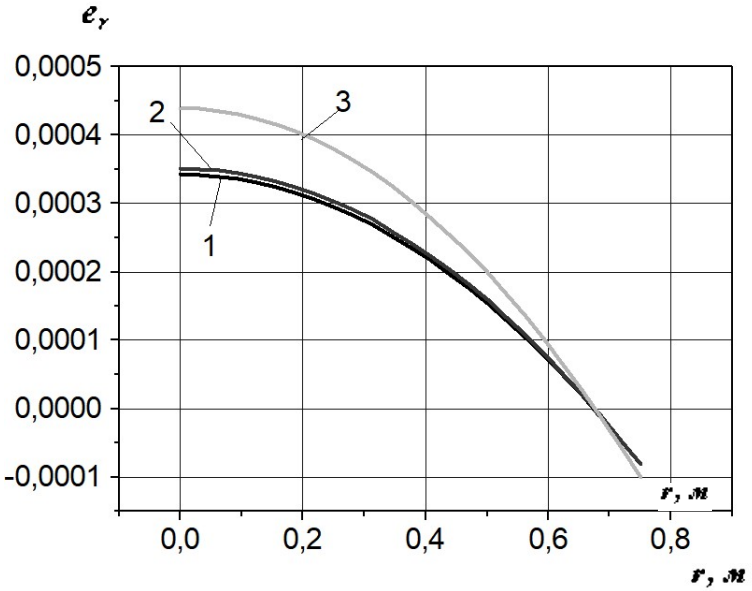

εr
0,0005
0,0004
0,0003
0,0002
0,0001
0,0000
-0,0001
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
r, м
r, м
1
2
3

Рис. 4

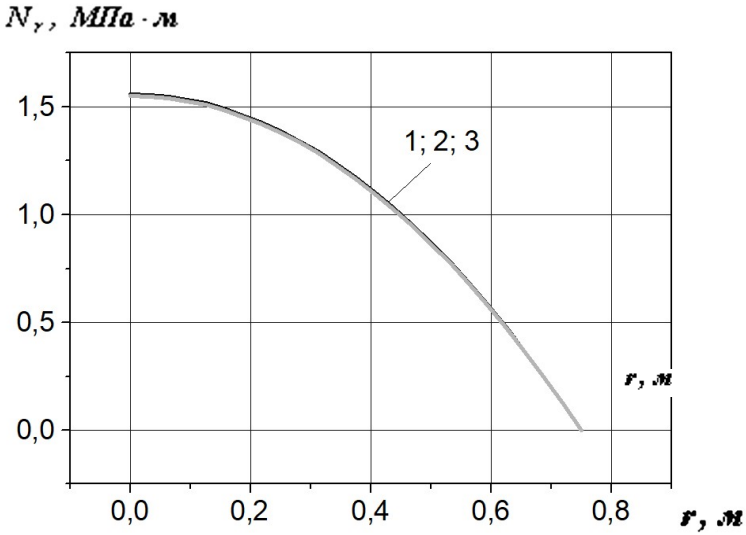


Рис. 5

Распределения напряжений по толщине диска в центральной части и по наружному контуру для различных чисел Фурье, приведены на рис. 6 и 7 соответственно. При этом кривые 1, 2, 3, 4, 5 построены при $F_0 = 0$, $F_0 = 0{,}005$, $F_0 = 0{,}1$, $F_0 = 0{,}3$ и $F_0 = 1$.

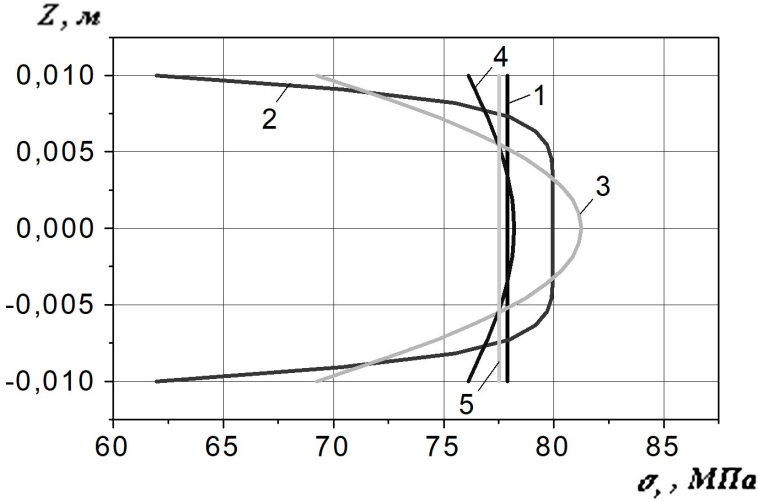


Рис. 6

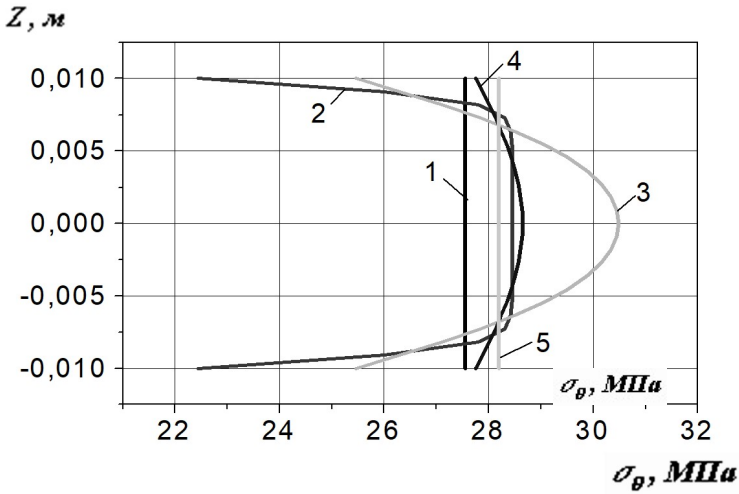


Рис. 7

Анализ полученных результатов расчета дисков вращения приводят к выводу о необходимости учета воздействия агрессивной среды и прослеживанию этого воздействия с течением времени. Это объясняется тем, что для дисков вращения в течение некоторого периода времени, соответствующего большим градиентам концентраций водорода, наблюдается интенсивное изменение характера напряженно-деформированного состояния, достигающее для напряжений 23%. В период интенсивного изменения концентрации среды напряжения в середине толщины диска имеют максимальные значения и превышают напряжения после стабилизации НДС на 7%.

ПРОБЛЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА К ИНФОРМАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТРОИТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА

Синева Н.Ф.
СГТУ имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов.

BIM технология строительных объектов - это процесс, формирующий согласованную, полную и актуальную информацию об объекте в виде структурированной информационной модели, где каждый элемент имеет множество различных технических атрибутивных характеристик, при изменении которых вся информация отображается на всех частях проекта, независимо от того, что это объекты капитального строительства или линейно-протяжённые объекты. Данный набор ин-

формации должен использоваться на всех стадиях жизненного цикла объекта, начиная с инвестиционного замысла, проектирования и возведения, в период эксплуатации, реконструкции и уничтожения. Модель не появляется ни откуда, она формируется постепенно, наполняется и представляется процессом, хранящим всю историю от возникновения модели. Особенностью является то, что модель появляется раньше моделируемого объекта и существует после его исчезновения.

Особенностью BIM является описание всех параметров для используемых в модели объектов: физических и технических свойств, геометрических размеров, взаимосвязей объектов и прочего [1].

В результате это позволяет совместить геометрическую и информационную части проекта в рамках одной модели. Здание - единое целое, в модели происходит обновление всех параметров модели при изменении одного из них. BIM содержит визуализацию в 3D-формате всех систем наряду с расчетами всех вариантов их компоновки (в соответствии с действующими нормами и правилами), и анализ характеристик ОКС с экономической и эксплуатационной точки зрения. Это обеспечивает оптимизацию архитектурных, конструктивных решений. Исключение дублирования информации и ошибок, связанных с передачей и преобразованием информации целостностью баз данных.

Модель работает на основе интеллектуальных элементов - стены, перекрытия, плиты, а не графическими элементами, как в cad-системах. Элементы могут быть в любой момент изменены и модель пересчитывает все характеристики объектов, их точное расположение в пространстве, наличие взаимосвязей между объектами. Автоматическое изменение информации решает задачу контроля внесения изменений, это же обеспечивает поиск эффективного варианта. Важно, что BIM-модель на всем жизненном цикле представляет собой не набор разных файлов, а целостную базу данных. BIM с одной стороны - модель, с другой стороны - технология. BIM и инструмент, это и динамическая база данных, и управление этой базой данных.

Переход к цифровизации строительной отрасли законодательно закреплен и подлежит исполнению. Процесс цифровизации отрасли начат в 2014 году принятием законодательных актов и созданием Стратегии цифровизации отрасли в РФ, которая предполагает законодательно утвержденные этапы. Предусматривается три этапа реализации Стратеги: подготовительный, основной, завершающий. Подготовительный этап реализуется в срок 2019 - 2020 гг. В рамках данного этапа решаются многие вопросы, в том числе создана правовая основа госу-

дарственной поддержки обучения специалистов знаниям в области информационного моделирования в сфере проектирования, строительства и эксплуатации; обеспечено функционирование ГИСОГД (государственные информационные системы обеспечения градостроительной деятельности) РФ, определен ее оператор.

Фактически российская строительная отрасль сейчас находится на втором этапе внедрения BIM-технологии. Российские предприятия пытаются масштабировать технологию на свои проекты, сталкиваясь со всё новыми и новыми проблемами. BIM-технологии для объектов промышленного и гражданского строительства проработаны лучше, чем решения для линейно-протяжённых объектов, за счёт большей распространённости, доступности, количества разнообразных инструментов реализации и нормативных документов, описывающих процессы информационного моделирования зданий и сооружений. При этом правительством РФ уже сейчас поставлена задача третьего уровня - тотальное внедрение BIM-технологии. Законодательно закрепленное название в России: ТИМ - технология информационного моделирования.

В строительной отрасли подготовленных специалистов, способных поддерживать данную технологию и решать связанные с ней задачи, крайне мало. Главная причина такого положения дел связана с отсутствием общепринятых отработанных методик обучения из-за новизны и сложности технологии. Для подготовки специалистов с необходимой квалификацией, конечно, сначала нужны кадры преподавателей, носителей реального знания и личного опыта, способных разработать новые образовательные методики.

Текущая ситуация с подготовкой кадров, способных влиться в процесс информационного моделирования, говорит о наличии проблемы. Строительные ВУЗы в большинстве не готовы дать необходимый пакет знаний о BIM и навыков работы, а значит и подготовить нужных специалистов.

Однако причина не только в этом, она в специфике знаний и навыков. Создался обширный рынок дорогостоящего программного обеспечения (ПО), способного поддерживать технологию BIM, освоить ПО и научить студентов можно лишь отчасти, используя специализированные упрощенные версии, поставляемые разработчиками. Но это дает только навык пользоваться интерфейсом данного конкретного ПО и возможность немного научить проектировщиков основам параметрического моделирования. Но и это только на стадии проектирования жизненного цикла ОКС. Понимания цифровой модели ОКС и подходы к ее

формированию при этом остаются за рамками, а это и есть главное знание. Нет общей концепции преподавания, требования к базовым знаниям. Нет профессиональных компетенций, сформулированных на профессиональном языке BIM-специалиста в образовательных стандартах. У этого много причин.

Если обратиться к опыту стран, где цифровая модель есть у каждого ОКС (например, Великобритания), то можно увидеть, что переходу строительной отрасли к BIM там предшествовал 10-летний период, в течение которого в ВУЗах обучали специалистов [1]. При этом обучение основывалось на предварительно сформированном BIM-стандарте и созданном на его основе стандарте обучения. Был сформирован новый образовательный стандарт для строителей, основанный на BIM-модели. Не только обучение проектировщиков, но и обучение специалистов по возведению ОКС, строительных технологов, организаторов строительных работ было основано на цифровой BIM-модели. Это принесло в Великобритании свои плоды. Еще в 2012-1013 гг. в Великобритании было проведено исследование с участием более чем 1350 профессионалов в области архитектуры, инжиниринга и строительства. Результаты опроса специалистов показали, что 39% из них уже используют BIM в том или ином виде, а 71% согласны с тем, что BIM - это будущее проектной и строительной индустрии [2].

Обсуждение сложившейся ситуации с образованием в строительной отрасли ведется на страницах книг, журналов, в интернете.

Авторы [3] и другие авторы - коллеги по строительному образованию, предлагают расширить перечень компетенций для освоения будущими специалистами управления строительством, для этого необходимо создать базовый курс обучения BIM в строительных ВУЗах, охватывающий весь жизненный цикл объекта строительства, основанный на умении специалистов-строителей работать в команде BIM-проекта.

Представляется, что вопрос надо ставить об изменении образовательного стандарта для строительных специальностей, который должен основываться на переходе отрасли на ТИМ.

Основное внимание государства в сфере цифровизации строительной отрасли сосредоточено в следующих направлениях:

- осуществление градостроительных процедур в цифровом формате (в электронной форме, в электронном виде);

- обеспечение хранения документов градостроительной деятельности в электронной форме;

- сбор и публикация статистики, собираемой автоматически, путем извлечения данных из информационных систем, (далее - цифровая статистика) о процессах в градостроительной деятельности;

- формирование поисково-справочных платформ;

- внедрение технологии информационного моделирования ОКС на всех стадиях жизненного цикла ОКС.

Законом № 342-ФЗ изменен подход к формированию ИСОГД (информационные системы обеспечения градостроительной деятельности) и скорректирован объем информации, подлежащий включению в ГИСОГД (государственные информационные системы обеспечения градостроительной деятельности), речь идет о передаче соответствующей информации на уровень РФ, ГИСОГД в электронной форме. Закон № 342-ФЗ предусматривается формирование электронных ГИСОГД во всех субъектах Российской Федерации не позднее 1 января 2022 года.

Градостроительный кодекс РФ (ГрК РФ) предусматривает возможность в ГИСОГД функции автоматизированной информационно-аналитической поддержки, позволяющей в том числе процедуру утверждения документации по планировке территории, предоставления градостроительного плана земельного участка, разрешение на строительство и на ввод объекта капитального строительства в эксплуатацию и других. Эти радикальные изменения также должны упреждающе обеспечиваться подготовкой специалистов.

Прежде всего, внедрение технологий BIM в России, должно сопровождаться кадровой поддержкой на всех этапах. Поэтому для внедрения BIM-технологий необходима опережающая подготовка кадров. Предлагаются способы совершенствования подготовки строителей для реализации проектов на основе технологий BIM, используя гибкие методы управления и прочие меры.

Должно быть выбрано базовое ПО для ВУЗов, на сегодня - по умолчанию принимаются Autodesk, Ascon, Tekla, Nemetschek, Graphisoft, NanoSoft… Для внедрения технологии BIM необходима подготовка специалистов с новыми функциями: BIM- координатор, BIM- моделер, BIM-менеджер и др. BIM-стандарт - это документ, который содержит требования к процессу информационного моделирования компанией-исполнителем, кадровому составу и ресурсам, задействованным в BIM-проекте, а также конечной BIM-модели. На каком BIM-стандарте учить студентов? На том, который придается к учебной версии BIM-платформы? Она не дает представления о том, как реально научиться формировать BIM-стандарт, это просто некоторый набор.

Технология BIM подразумевает совместный процесс создания информационной модели, в котором участвуют разные проектные подразделения, скоординированные в целостную систему. Поэтому BIM-стандарт описывает также и среду общих данных проекта, наименования рабочих файлов, структуру их организации, процессы обмена внешними данными и данными внутри организации. BIM-стандарт не привязан к какому-либо проекту и не содержит конкретных проектных решений. Его суть в стратегии, регламентирующей работу архитектурного, конструкторского, инженерного и сметного разделов на основе программного обеспечения, выбранного проектной организацией для информационного моделирования.

Представляется правильным, чтобы ведущие строительные ВУЗы выдвинули свои действующие разработки профильных учебных планов и рабочих программ курсов для создания единого стандарта образования строителя в новых базовых условиях строительной отрасли. ВУЗы Москвы, Санкт-Петербурга, Самары, Новосибирска и других профильных частично приступили к подготовке BIM-специалистов и публикуют свои проекты по изменению и адаптации образовательных программ для строителей.

Для составления BIM на единой платформе в [4] предложена методика на основе продукции Autodesk. Обоснована актуальность обучения параметрическому программированию и предложен учебно-тематический план новой дисциплины.

Предложены формы совершенствования обучения BIM: сквозной уровень организации учебного процесса на основе междисциплинарных связей; интегрированное выполнение индивидуальных проектов при обучении BIM-технологиям; имитационное обучение для группового проекта; погружение в работающий BIM-проект под руководством профессионалов; организация многоуровневой системы обучения информационному моделированию.

Важно сотрудничать ВУЗам не только с лидерами по разработке ПО и оборудования, но и с компаниями, имеющими практический опыт разработки, внедрения информационных систем в строительстве с применением ТИМ, разработки программных комплексов. При этом представители разработчиков ПО могут выступать в роли экспертов-практиков, которые будут участвовать в экспертизе учебных курсов для студентов. Но главное - требуется единая концепция, настройка образовательного стандарта к цифровой платформе строительной отрасли, нужен единый централизованный подход к содержанию и мето-

дологии в формировании специалистов-строителей на всех уровнях жизненного цикла строительного объекта.

Нужна общая стратегия, чтобы выпущенный специалист удовлетворял единым требованиям, содержащимся в российском законодательстве о едином цифровом пространстве в строительной отрасли в РФ. Пока нет специалистов, невозможно внедрение BIM. Проблемы строительного образования в настоящий момент надо решать централизованно, эти проблемы носят процедурный характер (какая технология обучения) проблемно-концептуальный характер (какое содержание обучения) и дидактический характер (методически как организовать).

Библиографический список

1. Талапов В.В. Технология BIM: суть и основы внедрения информационного моделирования зданий - М.: ДМК-пресс, 2015. 410 с.

2. Экономическое значение BIM в Европе. Исследование внедрения BIM в трех основных европейских странах: Великобритании, Германии и Франции. Октябрь 2010. bim.construction.com [Электронный ресурс] - http://www.cadmaster.ru/ magazin/articles/cm_56_04.html#hcq=tky3piq

3. Спрыжков А.М., Приворотский Д.С., Приворотская Е.В. Междисциплинарная интеграция BIM и IPD в высшем профессиональном образовании // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. №1-2. http://cyberleninka.ru/article/n/mezhdistsiplinarnaya-integratsiya-bim-i-ipd-v-vysshemprofessionalnom-obrazovanii

4. Гришина Н. М., Чалый Ю.Ю. Проблемы и перспективы BIM в ВУЗах: управление развитием в строительстве: Известия КГАСУ, 2017, № 3 (41)

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ПОСЛЕ ПОЖАРА

Тамразян А.Г., Черник В. И.
НИУ МГСУ, г. Москва, Россия

Постепенное увеличение этажности зданий и плотности застройки современных городов затрудняют доступ пожарных бригад к месту возгорания и оперативное тушение пожаров.

При проектировании железобетонных конструкций необходимо предусматривать дополнительные резервы прочности для обеспечения их огнестойкости и огнесохранности, что предусмотрено действующими нормами.

Для зданий и сооружений в сейсмоопасных районах пожары представляют особую опасность. Здесь можно выделить два варианта соче-

тания воздействий: пожар после землетрясения [1] и землетрясение после пожара [2].

Данный доклад посвящен проблеме сейсмостойкости железобетонных колонн после пожара.

Нормативная документация в настоящее время не содержит рекомендаций по учету последовательного сочетания этих воздействий. На нынешнем этапе развития проблемы ощущается нехватка инженерных методик расчета и проектирования, которые позволили бы обеспечить сейсмостойкость железобетонных конструкций, поврежденных огнем.

Основой при разработке теоретических подходов могут послужить многочисленные данные экспериментальных [3-10] и численных [11] исследований. Обзор и анализ экспериментальных исследований железобетонных колонн после пожара приводиться ниже.

Методика экспериментального определения сейсмических характеристик железобетонных колонн после пожара обычно представляет собой последовательные огневые и малоцикловые динамические или квазистатические испытания.

При проведении огневых испытаний железобетонные образцы помещают в печь. Нагрев образцов в печи производиться по зависимости соответствующей стандартной кривой по ГОСТ 30247-94 или ISO 834 (см. рис. 1). Истинная температурная кривая, однако, будет отличаться от стандартной наличием нисходящей ветви охлаждения.

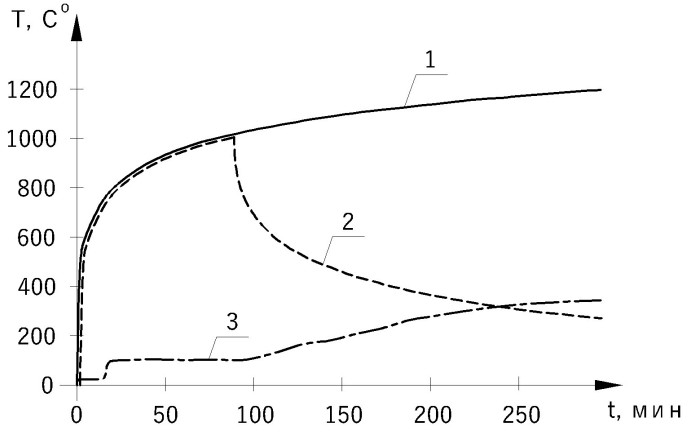


Рис. 1. Изменение температуры по времени, соответствующее:
1 - стандартной температурной кривой по ГОСТ 30247-94;
2 - истинной температурной кривой; 3 - температуре центра бетонного сечения.

При анализе результатов необходимо учитывать не только распределение температур по сечению на пике стандартной кривой, но и принимать во внимание стадию охлаждения. Температура в центре сечения за счет тепловой инерции бетона в стадии охлаждения будет повышаться до тех пор, пока не возникнет тепловое равновесие с наружными слоями [6] (см. рис. 1).

При определение механических характеристик бетонного сечения необходимо ориентироваться на максимальные значения температур, достигнутых в той или иной области поперечного сечения.

Для нахождения распределения температур по сечению на наружных гранях и внутри образца устанавливают термопары. Количество и расположение термопар зависит от градиента температур, который предварительно уточняется теплотехническим расчетом.

Продолжительность стандартного пожара обычно принимается кратной 30 мин, то есть 30, 60, 90, 120 мин и т. д. Это соответствует назначаемым пределам огнестойкости строительных конструкций по ГОСТ 30247-94 (REI).

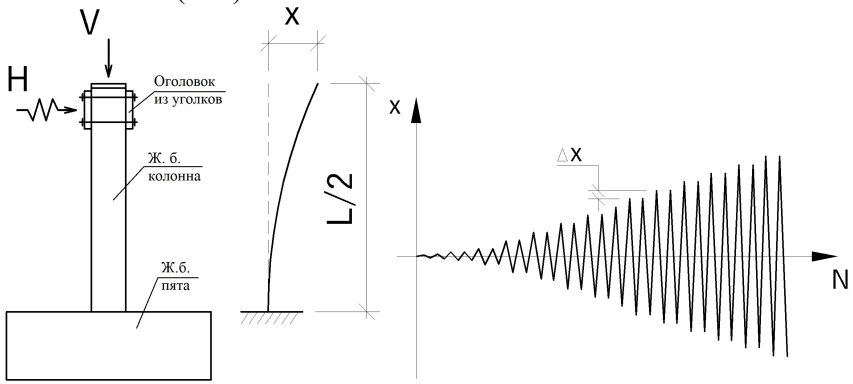


Рис. 2: а) Образец колонны для малоцикловых испытаний;
б) схема малоциклового нагружения по ACI 374.2R-13.

Для контроля остаточной прочности бетона после проведения испытаний на малоцикловую нагрузку с неповрежденных участков железобетонной колонны отбирают керны на всю глубину поперечного сечения. Керны разрезают на отдельные участки и испытывают на сжатие. Такой метод контроля можно применять при небольшом значении вертикальной нагрузки и необходимо контролировать испытанием стандартных кубов, подвергнутых нагреву до разной температуры.

Механические свойства арматурной стали при охлаждении в рассматриваемом температурном диапазоне почти полностью восстанавливаются, поэтому их дополнительного контроля обычно не требуется. Однако, как и в случае с бетоном возможен, отбор образцов с неповрежденных участков для испытаний на растяжение.

Серьезным недостатком существующих экспериментов является отсутствие статической нагрузки во время огневых испытаний. Трещины и сколы, возникающие при высокотемпературном прогреве бетона, развиваются более интенсивно при наличии вертикальной статической нагрузки, что ведет к большей деградации механических характеристик железобетонных колонн [12].

Дальнейшим шагом при экспериментальном определении сейсмических характеристик железобетонных колонн после пожара является проведение испытаний на малоцикловую горизонтальную нагрузку.

В рамных и рамно-связевых конструктивных семах зданий колонны, по мимо восприятия вертикальных нагрузок, выполняют функцию связей сдвига, соединяющих соседние перекрытия. Расчетной схемой такой колонны является стержень, жестко закрепленный по обоим концам [7]. Такая схема является симметричной относительно центра колонны, в котором при сдвиге будет находиться точка перегиба или точка нулевого момента. Поэтому возможно рассматривать только половину колонны - консольный стержень (см. рис. 2а).

Испытания колонн могут проводиться также в составе полномасштабных рам [4, 5].

Для обеспечения анкеровки продольной арматуры и боковой устойчивости колонны предусмотрена уширение (пята). Крепление образца к основанию обычно осуществляется с помощью металлических распределительных балок, которые притягиваются с помощью анкерных болтов [10].

Для передачи вертикальной и горизонтальной нагрузки предусмотрен оголовок из металлических уголков, стянутых шпильками. Подвижность головки вертикального пресса позволяет скомпенсировать горизонтальные перемещения верха колонны и обеспечить центральную передачу продольной силы.

Горизонтальную малоцикловую нагрузку обычно принимают по схеме, рекомендованной в стандарте ACI 374.2R-13. Боковая нагрузка от нулевого значения постепенно увеличивалась после каждого второго цикла до разрушения (см. рис. 2б). Повторение нагрузки на каждом втором цикле необходимо для полной реализации пластических деформаций.

Во время огневых испытаний в бетонном сечении развиваются повреждения. На начальной стадии образуются трещины, вызванные температурными деформациями. Далее на отдельных участках появляются сколы и отслоения бетона в результате повышения порового давления. Эти дефекты существенно снижают сейсмические характеристики колонн.

Выделяют четыре стадии разрушения железобетонных колонн в условиях малоциклового нагружения [3]. Первая стадия сопровождается появлением нормальных трещин, далее происходит разрушение защитного слоя бетона, после этого происходит разрушение центральной части бетонного сечения и окончательный отказ, вызванный потерей устойчивости продольной арматуры. Такой механизм разрушения называется изгибным и является пластичным. Огневое воздействие на железобетонные колонны может изменить их механизм разрушения.

Согласно [4] можно выделить три механизма разрушения колонн: изгибный, сдвиговой и сжато-сдвиговой. При чем отмечается, что рамы, изначально запроектированные на изгибный механизм разрушения в балках, после пожара разрушаются по наклонному сечению колонн. Такое разрушение сопровождается интенсивным трещинообразованием и отслаиванием бетона вдоль продольной арматуры.

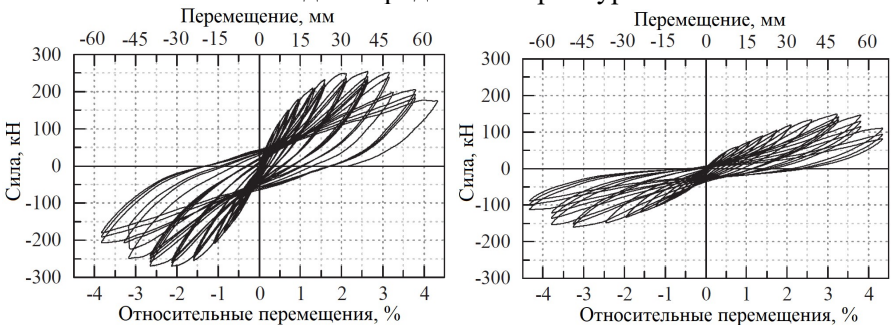


Рис. 3. Гистерезисные кривые для железобетонной одноэтажной рамы: а) не поврежденной пожаром; б) после пожара, по данным [5].

Довольно большую информацию о сейсмическом отклике железобетонных колонн несет гистерезисная кривая при малоцикловом нагружении (см. рис. 3). Данная кривая позволяет определить несущую способность, жесткость и диссипативные свойства конструкции на каждом цикле.

Во всех случаях воздействие пожара приводит к деградации сейсмических характеристик колонн. Наиболее интенсивно это проявляется при пожаре продолжительностью дольше 60 мин.

Деградация жесткости проявляется больше на восходящем участке гистерезисной диаграммы, поскольку на этом этапе активное участие в работе принимает поврежденный огнем бетон.

Работа на нисходящем участке определяется в основном арматурой, механические свойства которой при охлаждении почти полностью восстанавливаются.

Температурные трещины в бетоне, возникающие во время огневых испытаний, уменьшают скорость деградации жесткости колонн, поскольку устраняется хрупкое разрушение, связанное с внезапной потерей жесткости.

Длина зон пластических деформаций (пластических шарниров) колонн при увеличении времени воздействия огня более 30 мин увеличивается. На этот эффект следует обращать внимание при проектировании, обеспечивая мероприятия для повышения пластичности этих зон, например, постановкой косвенного армирования.

Существенным фактором, влияющим на сейсмический отклик железобетонных колонн, является время, прошедшее с момента повреждения пожаром. Известно, что на большом временном промежутке, порядка 10 лет согласно данным [3], механические свойства бетона могут полностью восстановиться. Испытания, проведенные для колонн после 30 и 60 дней после пожара, показали улучшение сейсмических характеристик для более поздней колонны.

В работе [9] исследуется влияние числа обогреваемых граней колонны на ее сейсмический отклик. Было замечено, что при уменьшении числа обогреваемых сторон максимальная температура бетонного сердечника уменьшается. Как следствие, при этом увеличивается несущая способность и суммарная рассеиваемая энергия.

Достаточно эффективным методом улучшения сейсмических характеристик колонн после пожара является применение сталежелезобетонных сечений, когда в центральной части сечения, наименее нагреваемой во время пожара, устанавливается металлический профиль, например, двутавр [8, 10]. За счет стального сердечника сталежелезобетонная колонна имеет значительно белее высокие пластические свойства после пожара.

Приведен анализ экспериментальных исследований железобетонных колонн на малоцикловые нагрузки после пожара.

Сейсмические свойства (несущая способность, жесткость, диссипация энергии и т. д.) колонн, поврежденных огнем, снижаются наиболее интенсивно при продолжительности стандартного пожара более 60 мин.

Снижение сейсмических свойств обосновывается в основном деградацией механических характеристик бетона. Однако, температурные трещины способны оказывать и положительное влияние, уменьшая интенсивность снижения жесткости колонн.

При больших значениях коэффициента осевой нагрузки, которое имеет место для колонн нижнего уровня многоэтажных зданий, требуется учет влияния статической нагрузки во время пожара. При невозможности приложения вертикальной силы на оголовок во время огневых испытаний, авторы данной статьи рекомендуют следующую программу проведения эксперимента: 1) статическое нагружение колонны вертикальной силой и выдержка до стабилизации деформаций; 2) снятие статической нагрузки и огневые испытания в печи по заданной продолжительности стандартного пожара; 3) извлечение образца из печи и незамедлительное нагружение вертикальной статической силой образца, находящегося в нагретом состоянии, до стабилизации деформаций; 4) проведение малоцикловых испытаний до разрушения колонны.

Библиографический список

1. Тамразян А. Г. Технология расчета железобетонных конструкций при пожаре после землетрясения // Бетон и железобетон. - 2020. № 1 (601). С. 49-56.

2. Тамразян А. Г., Черник В. И. Сейсмостойкость железобетонных конструкций после пожара // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. - 2020. С. 123-130.

3. Demir U., Goksu C., Binbir E., Ilki A. Impact of time after fire on post-fire seismic behavior of RC columns // Structures. - 2020. №26. С. 537-548.

4. Li L. Z. и др. Experimental study on seismic performance of post-fire reinforced concrete frames // Engineering Structures. - 2019. № 179. С. 161-173.

5. Li X., Xu Z., Bao Y., Cong Z. Post-fire seismic behavior of two-bay two-story frames with high performance fiber-reinforced cementitious composite joints // Engineering Structures. - 2019. № 183. С. 150-159.

6. Demir U., Green M. F., Ilki A. Postfire seismic performance of reinforced precast concrete columns // Pci Journal. - 2020. №65(6). С. 62-80.

7. Matsudo M., Nishida H., Satoh Y., Takamori N. Flexural and shear test of ultra-high-strength reinforced concrete columns with fire protection after fire heating // J. Struct. Constr. Eng., AIJ. - 2009. № 645. С. 2137-2144.

8. Shi, B., Wang, G., Mao, X. Experimental research on seismic performance of steel reinforced concrete columns after exposure to fire // Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures. - 2017. № 38(5), С. 117-124.

9. Xu Y. и др. Post-fire seismic behaviors of concrete stub columns in different fire exposure cases // Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock. - 2020. № 39(18). С. 11-19

10. Wang G., Zhang D. Experimental Research on the Post-fire Seismic Performance of Steel Reinforced Concrete Columns // Procedia Engineering. - 2017. № 210. С. 456-463.

11. Tamrazyan A., Chernik V. Equivalent viscous damping ratio for a RC column under seismic load after a fire. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2021. №1030 (012095). С. 1-9.

12. Tamrazyan A. G., Avetisyan L. A. Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures // Procedia Engineering. - 2016. № 153. С. 721-725.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГИБКОЙ ПЛАСТИНЫ ИЗ МАТЕРИАЛА, ПРИОБРЕТАЮЩЕГО НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ

Трешев А.А.[1], Ерофеев В.Т.[2], Ерастов В.В.[2], Ерастов А.В.[2], Бобрышев А.А.[3], Шафигуллин Л.Н.[3]

[1]ТулГУ, г. Тула, [2]МГУ им. Н.П.Огарёва, г. Саранск, [3]Набережночелнинский институт КФУ, г. Набережные Челны, Россия

На предприятиях перерабатывающей промышленности: (хлебозаводы, молокозаводы, мясокомбинаты), в зданиях сельскохозяйственного назначения и различных инженерных сооружениях в процессе эксплуатации строительные конструкции испытывают воздействия агрессивной среды биологического характера. Действие биологической среды проявляется многогранно и в итоге характеризуется изменением физико-механических свойств материалов, в частности уменьшением прочностных свойств, изменением геометрических размеров конструкций и отдельных элементов и т. д.

При возведении зданий и сооружений широкое применение находят различные тонкостенные изделия и конструкции. К ним относятся мембранные покрытия, которые выполняют из тонких листов (полос), исполняющих несущие и ограждающие конструкции [1, 2]. Их изготавливают на основе ме-

таллических и других материалов. Перспективными считаются мембраны, изготавливаемые на основе полимерных композиционных материалов [1 - 10]. Исследованию напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций и теоретической оценке их долговечности посвящены работы. Материалы и методы [11 - 14].

Результаты расчетов и их обсуждение: рассмотрим поведение мембраны (рис. 1) из несжимаемого материала, находящегося под воздействием двустороннего диффузионного механизма разрушения, который проявляется в изменении изначального модуля упругости, представляющего функцию времени и координаты по толщине мембраны (рис. 2), т. е.

$$E(z,t)=\begin{cases} E_0(1-(S_1(t)-z)/S_1^{max}) & при\ \ 0\le z\le S_1(t); \\ E_0 & при\ \ S_1(t)<z<h_0-S_2(t); \\ E_0(1-(S_2(t)-z_1)/S_2^{max}) & при\ \ 0\le z_1\le S_2(t), \end{cases} \quad (1)$$

где E_0 - модуль упругости материала в исходном состоянии до начала деградации.

Учитывая совпадения направляющих тензоров в процессе изменения механических свойств материала, взаимосвязь между напряжениями и деформациями $\sigma = E(z,t)\cdot\varepsilon$ для несжимаемых материалов отождествляем с зависимостью между интенсивностями напряжений и деформаций [16]:

$$\sigma_i = E(z,t)\cdot e_i. \quad (2)$$

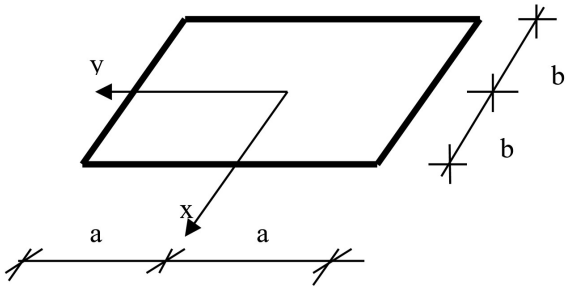


Рис. 1

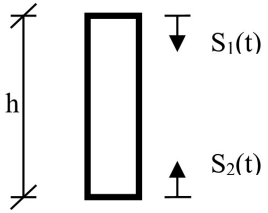


Рис. 2

В общем случае для интенсивности деформаций существует известная зависимость [15]:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}}(B_1 + B_2 z + B_3 z^2)^{0,5}, \tag{3}$$

где

$$B_1 = \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_x \varepsilon_y + \frac{1}{4}\gamma_{xy}^2,$$

$$B_2 = 2\varepsilon_x \aleph_x + 2\varepsilon_y \aleph_y + \varepsilon_y \aleph_x + \frac{1}{2}\gamma_{xy} \aleph_{xy};$$

$$B_3 = \aleph_x^2 + \aleph_y^2 + \aleph_x \aleph_y + \frac{1}{4}\aleph_{xy}^2.$$

Особенностью работы мембраны является то, что в ней возникают только растягивающие усилия, поэтому все члены, содержащие кривизны $\aleph_x, \aleph_y, \aleph_{xy}$, необходимо положить равным нулю.

Связь между деформациями и перемещениями установим в рамках нелинейной теории упругости в соответствии с формализмом Кармана, т. е.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)^2; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial \upsilon}{\partial y} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \omega}{\partial y}\right)^2; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \upsilon}{\partial x} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y}. \tag{4}$$

Приращение полной энергии системы запишем в виде:

$$Э = U - W = \int_V \int_0^{e_i} E(z,t) \cdot e_i de_i dV - \int_A (g_0 \omega + g_x u + g_y \upsilon) dA, \tag{5}$$

где g_0 - вертикальная проекция интенсивности внешней нагрузки; g_x и g_y - проекции интенсивности внешней нагрузки на соответствующие оси.

При действии на мембрану равномерно распределенной нагрузки, перпендикулярной к ее серединной поверхности для функционала (5) имеем:

$$Э = \int_{-a}^{a} \int_{-b}^{b} \frac{2}{3} B_1 \varphi_1(t) dx dy - \int_{-a}^{a} \int_{-b}^{b} g_0 \omega \, dx dy, \tag{6}$$

где $\varphi_1(t) = E_0(h - S_1^2(t)/(2S_1^{\max}) - S_2^2(t)/(2S_2^{\max}))$.

Дальнейшее решение задачи требует задания функции перемещений, которые представим в тригонометрической форме, т. е.

$$\left.\begin{aligned} u &= c\sin\frac{\pi x}{a}\cos\frac{\pi y}{2b};\\ \upsilon &= d\sin\frac{\pi y}{b}\cos\frac{\pi x}{2a};\\ \omega &= \omega_0\cos\frac{\pi x}{2a}\cos\frac{\pi y}{2b} \end{aligned}\right\}. \qquad (7)$$

В результате подстановки представлений (7) в функционал (6) с учетом (3) и (4) получим:

$$\Im = \{c^2\pi^2\left(\frac{b}{a}+\frac{a}{16b}\right)+d^2\pi^2\left(\frac{a}{b}+\frac{b}{16a}\right)+\frac{8}{3}cd-$$
$$-\omega_0^2\left[c\frac{\pi^2}{24a^2b}\left(8b^2-a^2\right)+d\frac{\pi^2}{24ab^2}\left(8a^2-b^2\right)\right]+$$
$$+\omega_0^4\frac{\pi^4}{1024}\cdot\frac{\left(9a^4+2a^2b^2+9b^4\right)}{a^3b^3}\}\frac{2}{3}\phi_1(t)-g_0\omega_0\frac{16ab}{\pi^2}.$$

Переменные c, d, и ω_0 найдем в результате минимизации функционала $\Im$ из следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial\Im}{\partial c}=0;\quad 2c\pi^2\left(\frac{b}{a}+\frac{a}{16b}\right)+\frac{8}{3}d-\omega_0^2\pi^2\frac{\left(8b^2-a^2\right)}{24a^2b}=0;$$

$$\frac{\partial\Im}{\partial d}=0;\quad 2d\pi^2\left(\frac{a}{b}+\frac{b}{16a}\right)+\frac{8}{3}c-\omega_0^2\pi^2\frac{\left(8a^2-b^2\right)}{24ab^2}=0;$$

$$\frac{\partial\Im}{\partial\omega}=0;\quad \varphi_1(t)\frac{2}{3}[-2\omega_0\left(\frac{c\pi^2\left(8b^2-a^2\right)}{24a^2b}+\frac{d\pi\left(8a^2-b^2\right)}{24ab^2}\right)+$$
$$+4\omega_0^3\frac{\pi^4\left(9a^4+2a^2b^2+9b^4\right)}{1024a^3b^3}]-\frac{16g_0ab}{\pi^2}=0. \qquad (8)$$

При известных функциях перемещений (7) нетрудно определить компоненты деформаций (4) и растягивающих напряжений.

Пример 1. Для мембраны со сторонами $2a=2b=12$ м построить зависимость функции прогибов во времени, если: толщина мембраны $h=0{,}08$ м; модуль упругости при $t=0$, $E_0=1{,}2\cdot10^{10}$ Па; функции изменения модуля

упругости во времени (t в годах) с верхней и нижней поверхностей мембраны:

$$S_1(t) = h[1 - \exp(-0{,}0156t)] \quad \text{и} \quad S_2(t) = h[1 - \exp(-0{,}0251t)].$$

С учетом симметрии первые два уравнения в системе (8) тождественны:

$$c = d = \frac{7\omega_0^2\pi^2}{24\,a(17\,\pi^2/8 + 8/3)}.$$

Из третьего уравнения (8) находим:

$$\omega_0 = \left(\frac{24\,g_0 a^2}{\pi^2 \varphi_1(t)\beta_0}\right)^{1/3},$$

где

$$\varphi_1(t) = 9{,}6\cdot 10^8\{1-[1-\exp(-1{,}0156\,t)]^2/0{,}563 - -[1-\exp(-0{,}0251\,t)]^2/0{,}7894\};$$

$$\beta_0 = \frac{\pi^4}{a^2}\left(\frac{5}{64} - \frac{49}{306\pi^2 + 384}\right).$$

Значение прогиба ω_0 в зависимости от параметров g_0 и t представлены в табл. 1 (прогиб приведен в сантиметрах).

Таблица 1. Результаты расчетов

Нагруз-ка кН/м^2	Время эксплуатации, годы				
	0	5	10	15	20
1	0,809	0,816	0,837	0,872	0,922
10	1,742	1,759	1,804	1,878	1,986
25	2,365	2,387	2,448	2,549	2,695
50	2,979	3,007	3,085	3,212	3,396
100	3,753	3,789	3,887	4,047	4,279
250	5,094	5,142	5,275	5,492	5,807
500	6,418	6,479	6,646	6,920	7,317

Следует отметить, что воздействие биологически активной среды необходимо рассматривать в комплексе с другими факторами, влияющими на напряженно-деформированное состояние строительных конструкций. Такими факторами являются: а) силовые воздействия как от проектных, так и не предусмотренных проектным решением нагрузок, возникающие в процессе эксплуатации; б) знакопеременные воздей-

ствия температурных полей в осенние и весенние периоды на материал строительных конструкций; в) неравномерные осадки фундаментов зданий из-за размыва скелета грунта; г) повышенная концентрация агрессивной среды, имеющая химический, электрохимический, электромагнитный или любой другой, отличный от биологического характер; д) повышенная влажность воздуха внутри помещений, создающая микроклимат благоприятный для развития микрофлоры.

Несмотря на многообразие факторов на первом этапе исследования в качестве меры повреждения примем некоторый параметр α. Он характеризует степень поврежденности в зависимости от уровня напряженно-деформированного состояния, удельной энергии деформации, параметров, описывающих взаимодействие биологически агрессивной среды с материалом конструкций и т. д.

В общем случае кинетическое уравнение накопления повреждений можно записать в виде [15]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F(\sigma, \dot{\sigma}, t, T, ж, a^*, p, ...). \qquad (9)$$

Здесь σ - уровень напряжений; $\dot{\sigma}$ - скорость изменения напряжений; t - время; T - температура; $ж$ - параметр, характеризующий свойства агрессивной среды; a^* - удельная энергия деформации; p - влажность окружающей среды.

При изучении напряженно-деформированного состояния тонкой мембраны нами была принята следующая феноменологическая модель накопления повреждений:

$$\frac{d\alpha}{d\phi} = [k\frac{d\sigma}{d\phi} + f(\phi,\sigma)\cdot[\frac{1}{1-\alpha}]^n, \qquad (10)$$

где ϕ - уровень агрессивной среды во время ее действия; σ - уровень напряжений; k и n - константы; $f(\phi,\sigma)$ - функция, удовлетворяющая условию

$$\int_0^{\phi} f(\phi,\sigma)d\phi = (A + Б\phi + B\phi^2 + Г\phi^3 + Д\phi^4)\int_0^{\phi}\sigma(\phi)d\phi = k1(\phi)\int_0^{\phi}\sigma(\phi)d\phi. \qquad (11)$$

Здесь A, $Б$, B, $Г$ и $Д$ - постоянные, определяемые на основе экспериментальных данных.

Пример 2. Пусть для мембраны с размерами в плане 6×6 м и толщиной 0,1 м изменение физико-механических свойств под действием биологиче-

ской среды характеризуется экспериментальными данными, приведенными в табл. 2. Кроме того, материал мембраны подвержен поверхностному одностороннему разрушению, описываемому зависимостью

$$h(\phi) = h_0 \exp(-м\phi), \qquad (12)$$

где $м$ = 0,142- постоянная величина, найденная из эксперимента.

Таблица 2. Экспериментальные данные

Изменение свойств	Уровни агрессивной среды (концентрация x время действия)					
	0,000	0,502	1,004	1,506	2,008	2,51
Разрушающие напряжения, МПа	10	12	9,5	9,2	8,7	8,4
Модуль упругости, МПа	90	120	140	210	298,5	335

В результате расчета на ЭВМ для принятой феноменологической модели (10) получены максимальные растягивающие напряжения (в Н/м^2) (см. табл. 3), возникающие в нелинейно упругой мембране, в зависимости от уровня агрессивности среды и интенсивности действующей равномерно распределенной нагрузки g_0 (Н/м^2).

Таблица 3. Результаты расчета

Величина нагрузки, Н/м^2	Уровни агрессивной среды (концентрация x время действия)				
	0,000	0,502	1,004	1,506	2,008
10	382,6	399,3	418,8	502,7	606,5
35	757,6	874,4	965,3	1159	1398
60	1085	1253	1383	1660	2003
85	1369	1580	1744	2094	2526
110	1626	1876	2071	2486	3000

Выводы: 1. Теоретически изучено поведение мембраны из несжимаемого материала, находящегося под воздействием двухстороннего диффузионного механизма разрушения. Полученное решение отражает работу мембраны с учетом накопления дефектов, влияющих на напряженное состояние.

2. Установлено, что нелинейность полученных результатов проявляется в большей степени по мере накопления дефектов. Так, при отсутствии агрессивной среды отношения максимальных растягивающих напряжений, возникающих в мембране при значениях нагрузок 110 и 10 (Н/м^2), равно 4,25, а для уровня агрессивной среды 2,008 это отношение составляет 4,95.

Библиографический список

1. Кирсанов Н.М. Висячие покрытия производственных зданий / Н.М.Кирсанов. - М.: Стройиздат, 1990 - 124с.

2. Рекомендации по проектированию мембранных покрытий на прямоугольном плане для реконструируемых зданий и сооружений/ ЦНИИСК им. Кучеренко. - М.: Стройиздат, 1989 - 105с.

3. Erofeev, V.T., Density of structure and extent of saturation by water of composites as a factor of change of their durability when freezing and thawing / V.T. Erofeev, A.P. Fedorcov, P.I. Novichkov, B.A. Dmitrievich, V.S. Lesovik, R.V. Ivanovich // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. 10(10). Pp. 25711-25720.

4. 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, V.T. Erofeev, A.N. Shafigullina // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. 10(23). Pp. 43758-43762.

5. Erofeev, V.T. Building Heat-insulating Materials Based on the Products of the Transesterification of Polyethylene Terephthalate and Dibutyltin Dilaurate / V.T. Erofeev, A. Bobryshev, L. Shafigullin, P. Zubarev, A. Lakhno, I. Darovskikh, I. Tretiakov // Procedia Engineering. 2016. 165. Pp. 1455-1459. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.879.

6. Erofeev, V.T. Frame Construction Composites for Buildings and Structures in Aggressive Environments / V.T. Erofeev // ProcediaEngineering. 2016. 165. Pp. 1444-1447. doi: 10.1016/j.proeng. 2016.11.877.

7. Erofeev, V.T., Shafigullin, L., Bobrishev, A. Investigation of Noise - Vibration-Absorbing Polymer Composites Used in Construction. IOP Conference Series: Materials Scienceand Engineering. 2018. 463(4), 042034. doi: 10.1088/1757-899X/463/4/042034.

8. Lesnov, V.V., Erofeev, V.T., Salimov, R.N., Smirnov, V.F. Resistance in filamentous fungi filled by epoxy adhesive and matrix compositions used in carcass concrete. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture & Civil Engineering Construction & Architecture. 2015. 3(27). Pp. 65-72.

9. Erofeev, V.T., Kalashnikov, V., Emelyanov, D., Balathanova, E., Erofeeva, I., Smirnova, O., Tretiakov, I., Matvievskiy, A. Biological resistance of cement composites filled with limestone powders. Solid State Phenomena. 2016. 871. Pp. 22-27. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.871.22.

10. Erofeev, V.T., Fedortsov, A.P., Bogatov, A.D., Fedortsov, V.A., Gusev, B.V. Evaluation of corrosion of alkaliglass composites, predicting their physico-chemical resistance and ways to improve it. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018. 2018-January (2). Pp. 238-246.

11. Startsev, O.V., Makhonkov, A., Erofeev, V.T., Gudojnikov, S. Impact of moisture content on dynamic mechanical properties and transition temperatures of wood. Wood Material Scienceand Engineering. 2017. 12(1). Pp. 55-62. doi: 10.1080/17480272.2015.1020566.

12. Startsev, V.O., Molokov, M.V., Blaznov, A.N., Zhurkovskii, M.E., Erofeev, V.T., Smirnov, I.V. Determination of the heat resistance of polymer construction materials by the dynamic mechanical method. Polymer Science - Series D. 2017. 10(4). Pp. 313-317. doi: 10.1134/S1995421217040141.

13. Travush, V.I., Antoshkin, V.D., Erofeev, V.T. The problem 7 forming triangular geometric line field. MATEC Web of Conferences. 2016. 86,01032. doi: 10.1051/matecconf/20168601032.

14. Travush, V.I., Antoshkin, V.D., Erofeev, V.T. The problem 4 of placement triangular geometric line field. MATEC Web of Conferences. 2016. 86,01031. doi: 10.1051/matecconf/20168601031.

15. Shafigullin, L.N. Calculation of reinforced concrete shell of positive Gaussian curvature, given different resistantance of concrete and cracking / L.N. Shafigullin, A.A. Treschev, V.G. Telichko, V.T. Erofeev // Astra Salvensis. 2017. 2017. Pp. 77-91.

16. Shafigullin, L.N. Concentration of stress on holes in a plate of different resistant material / L.N. Shafigullin, A.A. Treschev, A.V. Romashina, V.T. Erofeev // Astra Salvensis. 2017. 2017. Pp. 213-225.

17. Петров, В.В. Методы расчёта конструкций из нелинейно-деформируемого материала / В.В.Петров, И.В.Кривошеин. - М.: Издательство АСВ, 2009. - 208 с.

18. Ильюшин, А.А. Пластичность. Упругопластические деформации / А.А.Ильюшин. - М.: ОГИЗ, 1948. - 376 с.

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТОГО АНИЗОТРОПНОГО ОСНОВАНИЯ С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Трещев А.А., Бесстрашнов Д.О.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Здания и сооружения через фундамент опираются на грунтовые основания, которые всегда представляют структуру в виде «слоеного пирога» с разными деформационными свойствами слоев. В современных нормативных документах по проектированию оснований и фундаментов СП22.13330.2016 [1], да и в предыдущих версиях СНиПа, этот факт всегда учитывался. Однако, при расчетах в пределах каждого слоя грунта его жесткостные параметры, зачастую, принимались как для изотропной среды, но экспериментальные исследования показывают, что грунтовые породы часто проявляют свойства механической ортотропии. Этот факт обычно проектировщики не учитывают, опираясь на устоявшиеся в фундаментостроения модели.

В представленной работе рассматривается попытка учета ортотропных свойств каждого слоя многослойного основания при его нагружении недеформируемым штампом, каковым моделируется жесткая подошва массивного плитного фундамента. Кроме того, при разработке математической модели учтен общеизвестный факт зависимости деформационных характеристик грунтов от вида напряженного состояния [2, 3], который не рассматривается даже в современных нормах. В качестве уравнений состояния ортотропной деформационно анизотропной среды грунтовых слоев примем модель, сформулированную в рамках нормированных напряжений в главных осях ортотропии и вытекающую из потенциала деформаций [4, 5]:

$$e_{ii} = C_{iiii}\sigma_{ii} + C_{iijj}\sigma_{jj} + C_{iikk}\sigma_{kk}; \qquad \gamma_{ij} = C_{ijij}\tau_{ij} \text{ при } i \neq j, \qquad (1)$$

где $C_{iiii} = A_{iiii} + B_{iiii}\alpha_{ii} + 0,5[B_{iiii}\alpha_{ii}(1 - \alpha_{ii}^2) - B_{jjjj}\alpha_{jj}^3 -$

$$-B_{kkkk}\alpha_{kk}^3 - B_{ijij}\alpha_{ij}^3 - B_{jkjk}\alpha_{jk}^3 - B_{ikik}\alpha_{ik}^3] + B_{iijj}\alpha_{jj}(1 - \alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{jj}) +$$

$$+B_{iijj}\alpha_{kk}(1 - \alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{kk}) - B_{jjkk}\alpha_{jj}\alpha_{kk}(\alpha_{jj} + \alpha_{kk});$$

$$C_{iijj} = A_{iijj} + B_{iijj}(\alpha_{ii} + \alpha_{jj}); \qquad C_{iikk} = A_{iikk} + B_{iikk}(\alpha_{ii} + \alpha_{kk});$$

$$C_{ijij} = A_{ijij} - (B_{iiii}\alpha_{ii}^3 + B_{jjjj}\alpha_{jj}^3 + B_{kkkk}\alpha_{kk}^3) - 2[B_{iijj}\alpha_{ii}\alpha_{jj}(\alpha_{ii} + \alpha_{jj}) +$$

$+B_{jjkk}\alpha_{jj}\alpha_{kk}(\alpha_{jj} + \alpha_{kk}) + B_{iikk}\alpha_{ii}\alpha_{kk}(\alpha_{ii} + \alpha_{kk})]$; $C_{ijkm} = C_{kmij}$;

$(i \to j \to k = 1 \to 2 \to 3)$; $\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S$ - нормированные напряжения в пространстве главных осей ортотропии материала $(i, j = 1, 2, 3)$; σ_{ij} - компоненты тензора напряжений, определенные в главных материальных осях ортотропии; S - норма тензорного пространства, $S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}}$; $\alpha_{ij}\alpha_{ij} = 1$ - условие нормировки тензорного пространства; A_{ijkm}, B_{ijkm} - компоненты тензора податливостей четвертого ранга $(i, j, k, m = 1, 2, 3)$, вычисляемые через технические характеристики материала, установленные из экспериментов на одноосные растяжение и сжатие вдоль главных осей ортотропии и на сдвиг в главных плоскостях: $A_{kkkk} = (1 / E_k^+ + 1 / E_k^-) / 2$; $B_{kkkk} = (1 / E_k^+ - 1 / E_k^-) / 2$; $A_{iijj} = -(\nu_{ij}^+ / E_j^+ + \nu_{ij}^- / E_j^-) / 2$; $B_{iijj} = -(\nu_{ij}^+ / E_j^+ - \nu_{ij}^- / E_j^-) / 2$; $A_{ijij} = 1 / G_{ij}$; $\nu_{ij}^+ / E_j^+ = \nu_{ji}^+ / E_i^+$; $\nu_{ij}^- / E_j^- = \nu_{ij}^- / E_i^-$; $E_k^\pm$, $\nu_{ij}^\pm$, G_{ij} - модули упругости и коэффициенты поперечной деформации вдоль соответствующих главных осей ортотропии и модули сдвига в главных плоскостях (знак плюс относится к растяжению, минус - к сжатию).

Традиционно грунтовое основание моделируется деформируемым полупространством, где дискретно определена лишь дневная поверхность и не ограничена среда по трем направлениям. Однако на современном уровне усложнения физических уравнений и при переходе к цифравизации проектирования целесообразно использовать хорошо зарекомендовавший метод конечных элементов. Однако МКЭ подразумевает наличие дискретной строго детерминированной области. Поэтому при применении МКЭ к расчету основания надо строго определиться с размерами выделенной из полупространства дискретной области. Эта модификация осуществляется рядом последовательных расчетов областей разных размеров по трем пространственным осям, ограничивая окончательно ее для окончательного расчета в зависимости от размеров площадки приложения нагрузки тогда, когда дальнейшее увеличение расчетной области никак не сказывается на результатах, то есть - когда величины получаемых перемещений и напряжений стабилизируются на границах выбранной области.

В нашем случае выбрана область, состоящая из семи слоев со своими отличающимися характеристиками, приведенная на рис. 1, 2 в соответствии с размерами площадки нагружения и величиной нагрузки. Нагрузка от жесткого штампа рассматривается как равномерно распределенная под его плоскостью. Деформационные характеристики всех слоев приведены в табл. 1.

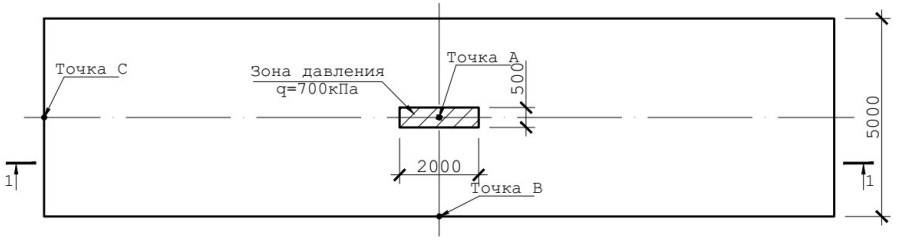


Рис. 1. План полупространства

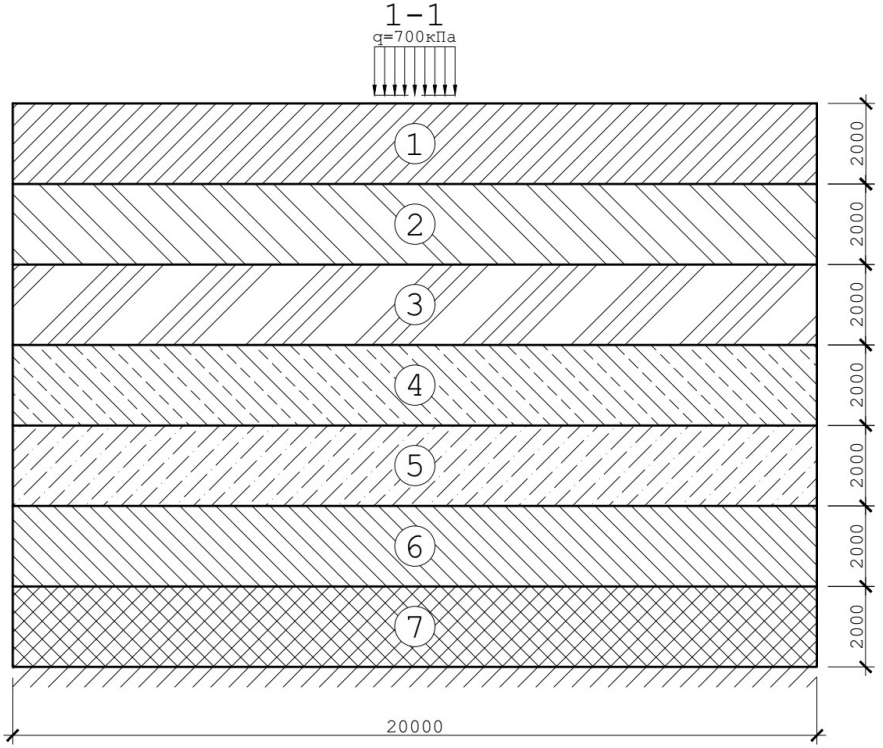


Рис. 2. Разрез полупространства

Табл. 1. Механические характеристики грунтовых слоев

Номер слоя	Механические характеристики (все модули деформации и модули сдвига приведены в МПа, коэффициенты Пуассона безразмерные)								
1	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	31,05	27,95	29,74	24,16	26,35	19,12	10,72	9,39	10,1
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{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}
	40,55	32,42	42,01	29,42	25,35	20,24	14,33	10,6	11,14
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{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}
	80,00	64,15	70,9	55,3	60,0	35,0	27,36	23,81	25,64
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{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}
	10,05	7,5	12,25	9,12	10,35	8,28	3,83	3,92	3,55
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{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}
	120,6	80,4	90,0	78,4	66,3	50,1	35,1	30,2	27,0
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{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}
	60,5	48,4	50,1	30,7	49,15	40,85	18,0	18,9	16,2
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{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}
	28,5	22,1	26,7	24,3	20,9	15,2	9,7	8,23	8,27
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	-	-	-
	0,25	0,22	0,25	0,22	0,31	0,27	-	-	-

В дальнейшем при построении модели использовались изопараметрические, четырехузловые конечные элементы в форме тетраэдра, один из которых приведен на рис. 3.

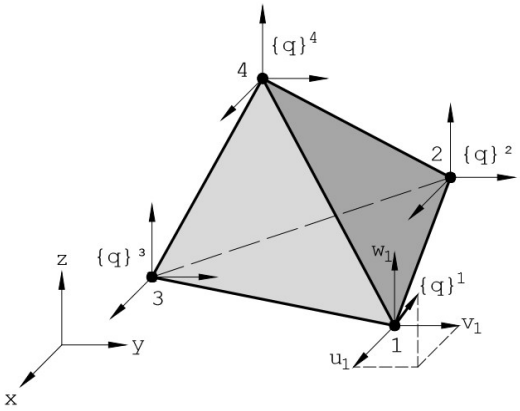


Рис 3. Конечный элемент в виде тетраэдра

Перемещения узлов i-го конечного элемента, принятого вида, описываются вектором-столбцом:

$$\{q\}_i = \left\{ \{q\}_i^{(1)} \{q\}_i^{(2)} \{q\}_i^{(3)} \{q\}_i^{(4)} \right\}, \tag{2}$$

в котором каждый из элементов состоит из трех проекций $\{q\}_i^{(k)} = \left\{ q_1^{(k)} q_2^{(k)} q_3^{(k)} \right\} = \{u_k v_k w_k\}$; u_k, v_k, w_k - перемещения k-го узла вдоль соответствующей оси. Подобным образом описываются узловые реакции i-го конечного элемента:

$$\{R\}_i = \left\{ \{R\}_i^{(1)} \{R\}_i^{(2)} \{R\}_i^{(3)} \{R\}_i^{(4)} \right\}, \tag{3}$$

где каждый из элементов запишется как $\{R\}_i^{(k)} = \left\{ R_1^{(k)} R_2^{(k)} R_3^{(k)} \right\}$.

Связь между выражениями (2) и (3) представляет собой связь вектора узловых перемещений $\{q\}_i$ и усилий $\{R\}_i$ [6], в которой матрица жесткости i-го конечного элемента $[K]_i$ представляется в блочной форме:

$$[K]_i = \begin{bmatrix} [K]_{i1}^{(1)} & [K]_{i1}^{(2)} & [K]_{i1}^{(3)} & [K]_{i1}^{(4)} \\ [K]_{i2}^{(1)} & [K]_{i2}^{(2)} & [K]_{i2}^{(3)} & [K]_{i2}^{(4)} \\ [K]_{i3}^{(1)} & [K]_{i3}^{(2)} & [K]_{i3}^{(3)} & [K]_{i3}^{(4)} \\ [K]_{i4}^{(1)} & [K]_{i4}^{(2)} & [K]_{i4}^{(3)} & [K]_{i4}^{(4)} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где ее типовой блок $\left[K\right]_{ij}^{(k)}$ определится в традиционной форме:

$$\left[K\right]_{ij}^{(k)} = \iiint\limits_{V_i} (\left[B\right]^{(j)})^T \left[D\right]\left[B\right]^{(k)} dV \cdot \quad (5)$$

В уравнении (5) матрица $\left[B\right]$ также имеет блочную структуру:

$$\left[B\right] = \left[\left[B\right]^{(1)}\left[B\right]^{(2)} \ldots \left[B\right]^{(k)} \ldots \left[B\right]^{(n)}\right], \quad (6)$$

где $\left[B\right]^k = \left[\Phi\right]\left[C\right]^{(k)}$, в котором $\left[\Phi\right]$ - матрица дифференциальных операторов, а [C] - матрица интерполяционных функций [6].

Опуская процесс получения матрицы [C] и соответственно - [B], окончательный вид которых приведен в работе [6], отметим, что матрица [D], определяющая связь напряжений с деформациями для ортотропного материала является обратной к тензору податливостей $C_{ijkm} = C_{kmij}$ (1), а именно [D]=[C_{ijkm}]$^{-1}$. Ненулевыми компонентами матрицы [C_{ijkm}] соответствуют классической форме ортотропной среды: C_{1111}, C_{1122}, C_{1133}, C_{2211}, C_{2222}, C_{2233}, C_{3311}, C_{3322}, C_{3333}, C_{1212}, C_{1313}, C_{2323}.

Таким образом, математическая модель расчета деформирования многослойного основания под действием жесткого штампа, слои которого составлены ортотропными средами, проявляющими чувствительность к виду напряженного состояния, полностью сформирована. Расчет по этой модели производится итерационно методом переменных параметров упругости, а в остальном вычислительная процедура ничем не отличается от классического МКЭ с объемными элементами [7].

Библиографический список

1. СП22.13330.2016. Свод правил. Основания зданий и сооружений. - М.: АО Кодекс. - 2021. - 202 с.

2. Вялов, С.С. Вопросы теории деформируемости связанных грунтов / С.С.Вялов // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1966. - №3. - С. 1-4.

3. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С.Вялов. - М.: Высшая школа, 1978. - 447 с.

4. Трещев, А.А. Описание деформирования ортотропных разносопротивляющихся материалов / А.А.Трещев, Ю.А.Монастырев, В.Д.Чибрикина, Ю.А.Завьялова, М.А.Лапшина // Строительная механика и конструкции. - Воронеж: ВГТУ. - 2019. - №1(20). - С. 7-13.

5. Трещев, А.А. Вариант модели деформирования ортотропных композитных материалов / А.А. Трещев, Ю.А. Завьялова, М.А. Лапши-

на // Эксперт: Теория и практика. - Тольятти: АНО «Институт судебной строительно-технической экспертизы» - 2020. - №3(6). - С. 62 - 68.

6. Трещев, А.А. К задаче о давление на грунтовое основание / А.А.Трещев, В.Г.Теличко, П.Ю.Ходорович // Вестник отделения строительных наук РААСН. - М.: РААСН-МГСУ. - 2014. - Вып. 18. - С. 95-99.

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

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА ПРИ НАГРУЖЕНИИ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ ДВУХ ВИДОВ АНИЗОТРОПИИ

Трещев А.А., Дорошенко Д.И.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Высокопрочные композитные материалы являются неотъемлемой составляющей современной техники. К ним относятся полимеры с направленным или хаотическим армированием базальтовыми и стекловолокнами, термомеханические свойства которых не сопоставимы с распространенными стальными и железобетонными конструкциями [1-7], так как обладают структурной анизотропией и при нагружении поразному реагируют на соотношения действующих напряжений. При этом тензор податливостей оказывается не инвариантен к виду напряженного состояния, а поведение таких материалов трактуют как тела с двоякой анизотропией. Наиболее распространенными в технике являются материалы, имеющие структурную ортотропию физико-механических свойств. Традиционные расчетные модели строительной механики, оперирующие с обобщенным законом Гука или соотношениями малых упругопластических деформаций А.А.Ильюшина [8], приводят к ошибкам в рассчитанных количественных характеристиках НДС конструкций и искажают их качественную картину. Указанные факты приводят к снижению точности проектных расчетов конструкций. Поэтому для расчета конструкций из указанных материалов, необходимо оперировать с апробированными моделями, отвечающими экспериментальным фактам.

Рассмотрим простейший вариант тонкостенной конструкции, каковым является замкнутая круговая цилиндрическая оболочка, подвергающаяся равномерному внутреннему давлению. Конкретным вариантом такой конструкции могут служить: котлы под действием парового давления; резервуары под, испытывающие действие внутреннего давления

жидкости или газа; трубопроводы с гидравлическим давлением. Конструкции этих сооружений в период эксплуатации всегда подвергаются температурным изменениям. Как показали предыдущие исследования [9], в большинстве случаев, за исключение особых, достаточно рассмотреть несвязанную постановку термомеханической задачи, которая, и рассмотрена ниже.

Далее в цилиндрической координатной системе с осями $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ рассмотрена круговая цилиндрическая оболочка, выполненная из ортотропного материала, проявляющего деформационную анизотропию [1, 2]. Оси этой системы направим вдоль главных линий ортотропии, габаритные параметры примем следующими: длина L, толщина стенки h, радиус срединной поверхности R. Закрепление оболочки таково, что в одном торце при $\beta_1 = 0$ она жестко защемлена, а противоположном - при $\beta_1 = L$ свободна от закрепления и нагрузки. Термический режим оболочки примем в исходный момент времени с одинаковой температурой во всей конструкции T_0, которая в последующем меняется и окончательно устанавливается с перепадом ΔT между внутренней поверхностью, где возникла температура T_1 и наружной, где температура достигла величины T_2. Интенсивность внутреннего давления принята равной q_3. Соотношение размеров оболочки принято таковым, что справедливость гипотез Кирхогфа-Лява не вызывает сомнения и при этом она относится к классу пологих, то есть ее деформирование описывается следующими зависимости:

а) деформации срединной поверхности:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5\theta_1^2; \quad \varepsilon_2 = v_{,1} + kw + 0,5\theta_2^2; \quad \gamma = v_{,1} + u_{,2} + \theta_1\theta_2, \qquad (1)$$

где $u,\ v,\ w$ - осевые, тангенциальные и радиальные перемещения срединной поверхности; $k = 1/R$ - главная кривизна в исходном состоянии; $\theta_1 = -w_{,1}; \quad \theta_2 = -w_{,2} + kv;$

б) кривизны и крутка срединной поверхности:

$$\chi_1 = -w_{,11}; \quad \chi_2 = -w_{,22}; \quad \tau = -w_{,12}; \qquad (2)$$

в) полные деформации в любой точке оболочки с координатой β_3, измеряемой от срединной поверхности:

$$e_{11} = \varepsilon_1 + \beta_3\chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2 + \beta_3\chi_2; \quad \gamma_{12} = \gamma + 2\beta_3\tau. \qquad (3)$$

Связь деформаций и напряжений примем в соответствии с предложенным в работах [10] потенциалом деформаций. С учетом наличия

перепада температур гипотезы Кирхгофа-Лява сводят уравнения состояния в главных осях ортотропии материала к виду:

$$\begin{aligned} e_{11} &= C_{1111}\sigma_{11} + C_{1122}\sigma_{22} + \alpha_{1T}\Delta T; \\ e_{22} &= C_{1122}\sigma_{11} + C_{2222}\sigma_{22} + \alpha_{2T}\Delta T; \\ \gamma_{12} &= 2e_{12} = C_{1212}\tau_{12}, \end{aligned} \qquad (4)$$

где

$$C_{1111} = (A_{1111} + B_{1111}\alpha_{11}) + 0,5[B_{1111}\alpha_{11}(1-\alpha_{11}^2) - B_{2222}\alpha_{22}^3 - B_{1212}\alpha_{12}^3] +$$

$$+B_{1122}\alpha_{22}(1-\alpha_{11}^2-\alpha_{11}\alpha_{22}); \qquad C_{2222} = (A_{2222} + B_{2222}\alpha_{22}) +$$

$$+0,5[B_{2222}\alpha_{22}(1-\alpha_{22}^2) - B_{1111}\alpha_{11}^3 - B_{1212}\alpha_{12}^3] + B_{1122}\alpha_{11}(1-\alpha_{22}^2-\alpha_{11}\alpha_{22});$$

$$C_{1212} = A_{1212} - (B_{1111}\alpha_{11}^3 + B_{2222}\alpha_{22}^3) - 2B_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11}+\alpha_{22});$$

$C_{1122} = A_{1122} + B_{1122}(\alpha_{11}+\alpha_{22})$; A_{ijkm}, B_{ijkm} - константы, связанные с модулями упругости, коэффициентами поперечной деформации материала в главных осях ортотропии при растяжении, сжатии и модулями сдвига; $\alpha_{ij} = \sigma_{ij}/S$ - компоненты тензора нормированных напряжений; $S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + 2\tau_{12}^2}$ - модуль тензора напряжений; α_{1T}, α_{2T} - коэффициенты линейного температурного расширения в главных осях ортотропии; $A_{kkkk} = (1/E_k^+ + 1/E_k^-)/2$; $B_{kkkk} = (1/E_k^+ - 1/E_k^-)/2$; $A_{ijij} = 1/G_{ij}$; $A_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ + \nu_{ij}^-/E_j^-)/2$; $B_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_k^+ - \nu_{ij}^-/E_j^-)/2$; $\nu_{ij}^+/E_j^+ = \nu_{ji}^+/E_i^+$; $\nu_{ij}^-/E_j^- = \nu_{ji}^-/E_i^-$; $E_k^\pm$, $\nu_{ij}^\pm$ - модули упругости и коэффициенты поперечной деформаций на осевое растяжение и сжатие в главных осях ортотропии; G_{ij} - модуль сдвига в главной плоскости ортотропии; $i,j,k = 1,2$.

Для получения разрешающих уравнений термомеханического нагружения оболочки необходимо привести зависимости (4) к виду:

$$\sigma_{11} = D_{11}e_{11} + D_{12}e_{12} - R_{11} - \varphi_{1T}; \qquad \tau_{12} = D_{66}e_{12} - R_{12};$$

$$\sigma_{22} = D_{12}e_{11} + D_{22}e_{12} - R_{22} - \varphi_{2T}, \qquad (5)$$

где $D_{11} = C_{2222}/\Delta$; $D_{12} = -C_{1122}/\Delta$; $D_{22} = C_{1111}/\Delta$;

$$D_{66} = 1/C_{1212}; \qquad R_{11} = (A_{2222}T_{11} - A_{1111}T_{22})/\Delta;$$

$$R_{22} = (A_{1111}T_{22} - A_{1122}T_{11})/\Delta; \quad R_{12} = T_{12}/A_{1212};$$

$$T_{11} = \{B_{1111}\alpha_{11} + 0,5[B_{1111}\alpha_{11}(1-\alpha_{11}^2) - B_{2222}\alpha_{22}^3 - B_{1212}\alpha_{12}^3] +$$

$$+B_{1122}\alpha_{22}(1-\alpha_{11}^2-\alpha_{11}\alpha_{22})\}\sigma_{11} + B_{1122}(\alpha_{11}+\alpha_{22})\sigma_{22};$$

$$T_{12} = -[(B_{1111}\alpha_{11}^3 + B_{2222}\alpha_{22}^3) - 2B_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11}+\alpha_{22})]\tau_{12};$$

$$T_{22} = B_{1122}(\alpha_{11}+\alpha_{22})\sigma_{11} + \{B_{2222}\alpha_{22} + 0,5[B_{2222}\alpha_{22}(1-\alpha_{22}^2) - B_{1111}\alpha_{11}^3 -$$

$$-B_{1212}\alpha_{12}^3] + B_{1122}\alpha_{11}(1-\alpha_{22}^2-\alpha_{11}\alpha_{22})\}\sigma_{22};\quad \varphi_{1T} = D_{11}\alpha_{1T}\Delta T + D_{12}\alpha_{2T}\Delta T;$$

$$\varphi_{2T} = D_{12}\alpha_{1T}\Delta T + D_{22}\alpha_{2T}\Delta T;\qquad \Delta = A_{1111}A_{2222} - A_{1122}^2.$$

Уравнения равновесия и неразрывности деформаций записываются в традиционной для анизотропных оболочек форме [11], а внутренние моменты и усилия приводятся к срединной поверхности оболочки при $\beta_3 = 0$. Учитывая осесимметричное загружение оболочки при отсутствии крутящих моментов ($\tau_{12} = e_{12} = 0$) и то, что $\beta_3 k << 1$, упростим уравнения равновесия и неразрывности деформаций, приведя к виду:

$$N_{1,1} = 0;\ M_{1,1} - Q_1 - N_1\theta_1 = 0;\ Q_{1,1} - kN_2 + q_3 = 0;\ k\chi_1 + \varepsilon_{2,11} = 0, \quad (6)$$

а из геометрических соотношений сохраним следующие:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5\theta_1^2;\ \ \varepsilon_2 = kw;\ \ \chi_1 = -w_{,11};\ \ e_{11} = \varepsilon_1 + \beta_3\chi_1;\ \ e_{22} = \varepsilon_2, \quad (7)$$

где N_k - осевые усилия средней поверхности оболочки; Q_1 - поперечное усилие; M_1 - изгибающий момент:

$$N_k = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{kk}\, d\beta_3;\quad (k = 1, 2);\qquad M_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11}\beta_3\, d\beta_3. \quad (8)$$

Интегрируя уравнения (5) по толщине оболочки согласно правилам (8), внося результаты в статические уравнения (6), геометрические зависимости (7) соотношение сплошности (6), проведя при этом соответствующую перекомбинацию, получим два дифференциальных уравнений в смешанной форме:

$$k\theta_{1,} + L_{22}N_{2,11} = -\eta_{2,11} - \varepsilon_{2T,11};\quad P_{11}\theta_{1,11} - kN_2 = -q_3 + J_{11,11} + \chi_{1T,11}, \quad (9)$$

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

$$K_{ij} = D_{ij}h;\ P_{ij} = D_{ij}h^3 / 12;\ \eta_1 = L_{11}I_{11} + L_{12}I_{22};\ \eta_2 = L_{12}I_{11} + L_{22}I_{22};$$

$$I_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} R_{ij}d\beta_3;\ J_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} R_{ij}\beta_3 d\beta_3;\ \eta_{iT} = \int_{-h/2}^{h/2} \varphi_{iT}d\beta_3;\ \chi_{iT} = \int_{-h/2}^{h/2} \varphi_{iT}\beta_3 d\beta_3;$$

$$\varepsilon_{1T} = L_{11}\eta_{1T} + L_{12}\eta_{2T};\qquad \varepsilon_{2T} = L_{12}\eta_{1T} + L_{22}\eta_{2T}.$$

Так как по условию задачи торец оболочки при $\beta_1 = L$ защемлен, а торец при $\beta_1 = 0$ полностью свободен, то граничные условия для последнего примут вид: $\theta_1 = 0$; $\varepsilon_1 = 0$; $\varepsilon_2 = 0 \Rightarrow N_2 = -(\eta_2 + \varepsilon_{2T}) / L_{22}$.

Наличие температурного перепада между поверхностями оболочки требует корректировки результатов расчета НДС оболочки [12]. Температурные составляющие задачи определятся из самостоятельного исследования процесса теплопередачи через оболочку, который однозначно описывается уравнением теплопроводности для ортотропного материала:

$$T_{,t} = a_1 \cdot T_{,11} + a_2 \cdot T_{,22} + a_3 \cdot T_{,33}, \qquad (10)$$

где a_1, a_2, a_3 - коэффициенты температуропроводности по направлениям ортотропии; t - текущее время; T - текущая температура.

Рассматривается стационарный процесс с одномерным изменением параметров температуры с перепадом только по толщине оболочки, когда она меняется по одной координате β_3. В результате уравнение теплопроводности упрощается и принимает простейший вид: $T_{,t} = a_3 T_{,33}$, где $a_3 = \lambda / c$ - коэффициент температуропроводности по нормали к криволинейной поверхности оболочки; λ - коэффициент теплопроводности; c - удельная объемная теплоемкость материала. Исследование термомеханической задачи проводится в момент равновесного распределения температуры. В этом случае расчет перепада температур ΔT в оболочке определяется по линейному закону распределения:

$$T(\beta_3) = (T_2 - T_1)\beta_3 / h + (T_1 + T_2) / 2 - T_0. \qquad (11)$$

Помимо граничных условий необходимо задать начальные, когда при $t = 0$ для всей оболочки температура одинакова и равна T_0, а на границах в текущий момент времени при $t = t_k$ устанавливаются температурные параметры T_1 и T_2, соответственно.

Вследствие двойной нелинейности поставленной задачи, ее решение строилось в приращениях искомых функций согласно двухшаговому методу последовательных возмущений параметров В.В.Петрова [13] с привлечением конечно-разностной аппроксимацией производных, интегри-рованием по толщине методом Симпсона, а по нагрузке - Адамса. Система алгебраических уравнений решалась методом Гаусса.

При получении решения конкретной задачи были определены следующие исходные данные: а) длинна оболочки $L = 2{,}0$ м, толщина $h = 0{,}04$ м; диаметр срединной поверхности $2R = 0{,}8$ м; б) интенсивность внутреннего давления $q_3 = 8$ МПа; в) температурный перепад при установившихся показателях внутри оболочки $T_1 = 0°$ С, а снаружи - $T_2 = +30°$ С, когда начальное значение для всей оболочки было $T_0 = 0°$ С; г) материал оболочки - трехармированный тканный полимерный композит марки П36-50 [1], которому соответствуют модули упругости и коэффициенты поперечной деформации вдоль главных осей ортотропии - $E_1^+ = 10{,}3$ ГПа, $E_1^- = 11{,}77$ ГПа, $E_2^+ = 17{,}6$ ГПа, $E_2^- = 18{,}54$ ГПа, $\nu_{12}^+ = 0{,}188$, $\nu_{12}^- = 0{,}215$; коэффициенты теплового расширения $\alpha_1^\pm = 33 \cdot 10^{-5} °\text{C}^{-1}$, $\alpha_2^\pm = 40 \cdot 10^{-5} °\text{C}^{-1}$ [2]. Очевидно, что степень разносопротивляемости по двум направлениям невелика 14,3% вдоль оси β_1 и 5,3% вдоль - β_2 при минимальном перепаде температур.

Рис. 1 - 3 иллюстрируют характерные результаты расчета НДС оболочки с учетом принятых условий. Ошибка в значениях максимальных прогибов, полученных при деформировании с температурным перепадом по сравнению с данными расчета без него, составляет 20,8 %. Напряжения вдоль центральной оси и по окружной на внутренней поверхности оболочки без термического воздействия и при нем полностью совпадают, что обусловлено совпадением температур на этой поверхности в любой момент времени. Осевые напряжения на внешней поверхности в заделке без температурного нагружения меньше, чем при нем на 15 %, но для наибольших напряжений растяжения эта разница достигает 34,6 %. Причем на участке *0,125L-L* воздействие температуры меняет знак напряжений на - противоположный.

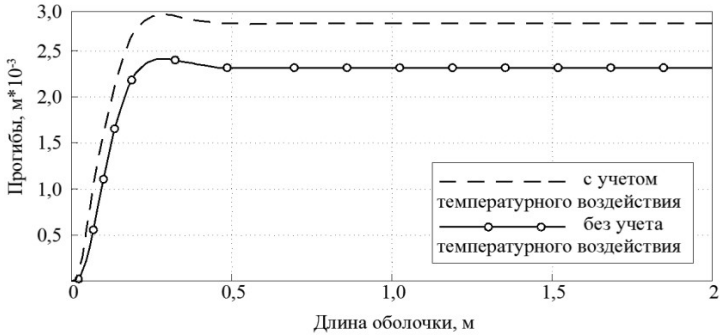


Рис. 1. Прогибы оболочки

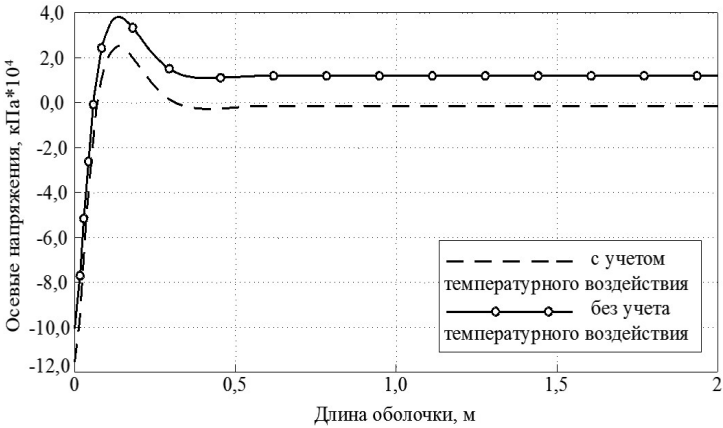


Рис. 2. Осевые напряжения

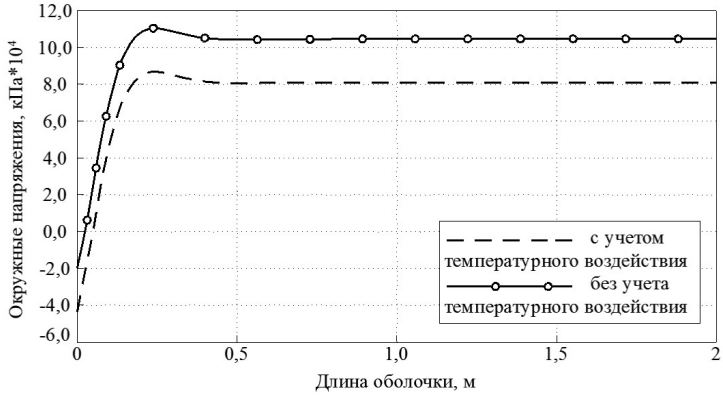


Рис. 3. Окружные напряжения

Окружные напряжения на наружной поверхности оболочки без учета термического воздействия по сравнению с вариантом расчета при нагреве на защемленном торце в 2 и более раз ниже. Максимальные окружные напряжения на внешних волокнах оболочки при нагреве меньше на 21,5 %, чем без него. При больших отличиях в деформационных характеристиках материала оболочки на растяжение и сжатие в главных осях ортотропии погрешность классических теорий возрастает и может достигать 100% по отдельным показателям, а иногда и более [14].

Представленные результаты расчета демонстрируют ощутимое влияние процесса нагрева цилиндрической оболочки с двойной анизотропией, причем наблюдается кардинальное несоответствие получаемых результатов общих классических теорий, которые необходимо модернизировать с учетом универсальных уравнений состояния (4).

Библиографический список

1. Розе, А.В. Трехармированные тканные 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, 1972. - Т. 1. - 1224 с.

3. 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.

4. 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.

5. Shafigullin, L.N. Development of the recommendations on selection of glass-fiber reiforced 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.

6. Ysupova, A.A. Sulfur composite technology from oil refinery waste / A.A. Ysupova, R.T. Akhmetova, A.A. Treshchev, L.N. Shafigullin, A.V. Lakhno, A.A. Bobrishev // International Journal of Applied Engineering Research. - 2016. - Vol. 11. - Issue 5. - №1. . - PP 3057-3061.

7. Ysupova, A.A. 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). - Pp. 1411-1419.

8. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 271 с.

9. Трещёв, А.А. Моделирование оболочки из изотропного разносопротивляющегося графита с помощью объемных конечных элементов с учетом связанности напряжений и температур / А.А. Трещёв, М.Ю. Делягин // Materials Physics and Mechanics. - 2013. - Vol. 17. - No 1. - P. 59-70.

10. Трещев, А.А. Описание деформирования ортотропных разносопротив-ляющихся материалов / А.А.Трещев, Ю.А.Монастырев, В.Д.Чибрикина, Ю.А.Завьялова, М.А.Лапшина // Строительная механика и конструкции. - Воронеж: ВГТУ. - 2019. - №1(20). - С. 7-13.

11. Амбарцумян, С.А. Общая теория анизотропных оболочек / С.А.Амбарцумян. - М.: Наука, 1974. - 446 с.

12. Коваленко, А.Д. Термоупругость / А.Д.Коваленко. - Киев: Вища школа, 1975. - 216 с.

13. Петров, В.В. Неоднородные пологие оболочки с двумя видами нелинейности / В.В.Петров, И.В.Кривошеин // ACADEMIA. Архитектура и строительство. − 2013. − Вып. − № 1. − С. 114-123.

14. Treschev, A.A. Bending of Ring Plates, Performed from an Orthotropic Nonlinear Differently Resistant Material / A.A. Treschev, E.A. Zhurin // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. - 2020. - Vol. 16, Issue 1. - Pp. 130-146.

УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ СЛОИСТЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Трещев А.А., Захарова И.А., Сергеева С.Б., Судакова И.А.
ТулГУ, г. Тула, Россия

В современных условиях ремонтно-строительных работ в дорожном хозяйстве все чаще применяются композитные материалы с добавками полимерных материалов [1-4]. Исследования деформационных свойств ряда монолитных дорожно-строительных материалов, например бетонов на минеральных и органических вяжущих веществах, показывают, что они в большинстве своем имеют разные модули деформаций при сжатии и растяжении. Это свойство особенно ярко проявляется у композитных материалов на основе полимеров, однако и у композиций на основе минеральных вяжущих оно выражается достаточно четко. Эти материалы не подчиняются классическим законам деформирования ввиду чувствительности их свойств от вида напряженного состояния [1, 2]. Кроме того, технология уплотнения асфальтобетонного покрытия дорожными машинами такова, что преобладает их продольно

направленное движение, а это зачастую создает ортотропную структуру дорожной конструкции. Экспериментальные исследования [5, 6] показывают, что коэффициенты разносопротивляемости материалов $k_j = E_j^+ / E_j^-$ (где $E_j^{\pm}$ - модули деформаций на растяжение «+» и сжатие (-) вдоль оси j) может изменяться в пределах от 0,27 до 1,92 [1]. Значение коэффициентов разносопротивляемости зависит от состава композиции, вида и количества вяжущего, хаотического армирования, возраста материала, влажности и ряда технологических факторов.

В настоящее время при расчете дорожных одежд разносопротивляемость и структурная ортотропия композиционных монолитных материалов не учитывается. Однако, как показывают расчеты, общая податливость дорожной одежды при учете структурной и деформационной анизотропии может изменяться в довольно большом диапазоне. В частности, кривая, приведенная на рис. 1, демонстрирует влияние k_j на изгибную жесткость однослойной одежды D. Так изменение этого коэффициента в интервале от 0,8 до 0,5 жесткость снижается на 55 %.

Двойная градуировка на рис. 1 свидетельствует о том, что одному значению жесткости могут соответствовать два значения коэффициентов разносопротивляемости - прямой и обратной [1]. Ясно, что если для расчета принять максимальный модуль деформаций материала в соответствующих направлениях (E_j^+ или E_j^-) и если принять минимальный, то расчетная жесткость дорожной конструкции будет отличаться от реальной и в некоторых случаях на значительную величину. В связи с этим возникает необходимость учета структурно-деформационных особенностей композитных дорожно-строительных материалов при расчете конструктивных слоев дорожной одежды.

Учитывая, что дорожные одежды всегда имеют многослойную конструкцию, важным представляется решение задачи для двухслойного покрытия с полным сцеплением слоев. Интенсивное движение с возрастающими осевыми нагрузками вызвали рост объемов строительства дорог на монолитных основаниях с повышенным межслойным сцеплением, обеспечиваемым конструктивными и технологическими приемами [4].

Здесь рассматривается простейшая техническая задача по деформационному расчету двухслойной дорожной конструкции в виде полосы толщиной h и шириной b, на автомобильную нагрузку (рис. 2). Конечно, чистый изгиб полосы не строго моделирует сопротивление двухслойной дорожной одежды колесным нагрузкам от автомобиля, поэтому задача решается приближенно в модифицированном виде [1, 2].

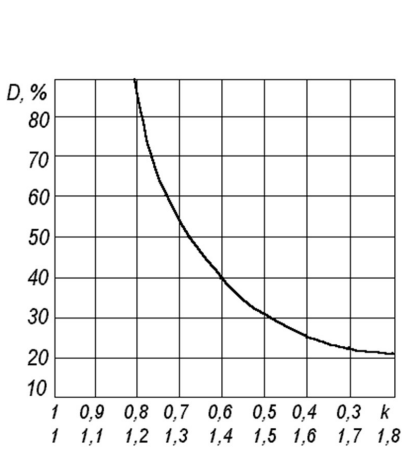


Рис. 1

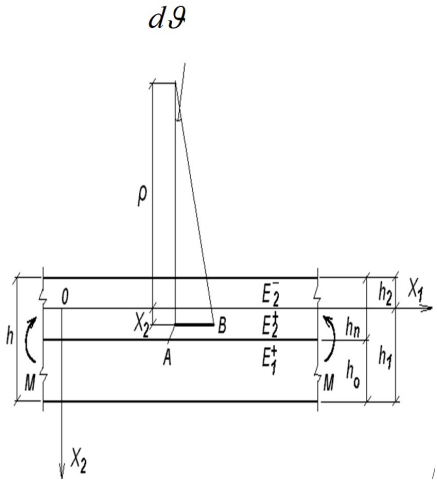


Рис. 2

В качестве уравнений состояния приняты зависимости тензора деформаций и напряжений в главных осях ортотропии, сформулированные в нормированном пространстве [7]:

$$e_{ii} = C_{iiii}\sigma_{ii} + C_{iijj}\sigma_{jj} + C_{iikk}\sigma_{kk}\,;\ \ \gamma_{ij} = C_{ijij}\,\tau_{ij}\ \ \text{при}\ i \neq j\,, \qquad (1)$$

где $C_{iiii} = A_{iiii} + B_{iiii}\alpha_{ii} + 0{,}5[B_{iiii}\alpha_{ii}(1-\alpha_{ii}^2) - B_{jjjj}\alpha_{jj}^3 -$

$$-B_{kkkk}\alpha_{kk}^3 - B_{ijij}\alpha_{ij}^3 - B_{jkjk}\alpha_{jk}^3 - B_{ikik}\alpha_{ik}^3] + B_{iijj}\alpha_{jj}(1-\alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{jj}) +$$

$$B_{iijj}\alpha_{kk}(1-\alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{kk}) - -B_{jjkk}\alpha_{jj}\alpha_{kk}(\alpha_{jj} + \alpha_{kk})\,;$$

$$C_{iijj} = A_{iijj} + B_{iijj}(\alpha_{ii} + \alpha_{jj})\,;\ C_{iikk} = A_{iikk} + B_{iikk}(\alpha_{ii} + \alpha_{kk})\,; \qquad C_{ijij} = A_{ijij} -$$

$$-(B_{iiii}\alpha_{ii}^3 + B_{jjjj}\alpha_{jj}^3 + B_{kkkk}\alpha_{kk}^3) - 2[B_{iijj}\alpha_{ii}\alpha_{jj}(\alpha_{ii} + \alpha_{jj}) + B_{jjkk}\alpha_{jj}\alpha_{kk}(\alpha_{jj} +$$

$$\alpha_{kk}) + B_{iikk}\alpha_{ii}\alpha_{kk}(\alpha_{ii} + \alpha_{kk})];\ \ C_{ijkm} = C_{kmij}\,;$$

$$(i \to j \to k = 1 \to 2 \to 3);\ \ A_{kkkk} = (1/E_k^+ + 1/E_k^-)/2\,;$$

$$B_{kkkk} = (1/E_k^+ - 1/E_k^-)/2\,;\ \ A_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ + \nu_{ij}^-/E_j^-)/2\,;$$

$$A_{ijij} = 1/G_{ij}\,;\ \ A_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ + \nu_{ij}^-/E_j^-)/2\,;$$

$$B_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ - \nu_{ij}^-/E_j^-)/2\,;\ \ \nu_{ij}^+/E_j^+ = \nu_{ji}^+/E_i^+\,;$$

$\nu_{ij}^{-} / E_j^{-} = \nu_{ij}^{-} / E_i^{-}$; G_{ij}, $\nu_{ij}^{\pm}$ - модуль сдвига в главных плоскостях и коэффициенты поперечной деформации вдоль главных осей ортотропии; $\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S$ - нормированные напряжения в пространстве главных осей ортотропии материала; S - норма тензорного пространства, $S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}}$; $\alpha_{ij}\alpha_{ij} = 1$.

Поставленную задачу можно рассматривать как одномерную, когда в контакте слоев полностью обеспечено их сцепление. Очевидно, что основным направлением влияния механических характеристик является ось x_1, то модуль деформаций верхнего слоя (покрытия) - $E_{1;2}^{+}$, $E_{1;2}^{-}$; толщина - h_n, нижнего слоя (основания) соответственно - $E_{1;1}^{+}$, $E_{1;1}^{-}$, h_o. Значения h_1 и h_2 определяют положение нейтрального слоя поперечного сечения $h \times b$. Координатная ось $0x_1$ совпадает с нейтральным слоем сечения. При чистом изгибе кривизна нейтрального слоя определится так: $1/\rho = \vartheta_{,1}$. Относительные деформации слоя АВ (рис. 2), удаленного от нейтральной оси на расстояние x_2, будут равны: $e_{11} = x_2 J_{,1} = x_2 / \rho$, где $\rho -$ радиус кривизны изогнутой нейтральной оси дорожной конструкции. На рис. 2 рассмотрен случай расположения нейтральной оси в верхнем слое, когда растянутая зона захватывает часть слоя покрытия толщиной $h_1 - h_o$ и слой основания толщиной h_o. В сжатую зону попадает оставшаяся часть покрытия толщиной h_2. Тогда напряжения в слоях этих двух зон вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{11(1)}^{+} &= E_{1;1}^{+} x_2 / \rho \quad \text{при} \quad h_1 - h_o < x_2 \le h_1; \\ \sigma_{11(2)}^{+} &= E_{1;2}^{+} x_2 / \rho \quad \text{при} \quad 0 < x_2 \le h_1 - h_o; \\ \sigma_{11(2)}^{-} &= E_{1;2}^{-} x_2 / \rho \quad \text{при} \quad -h_2 \le x_2 < 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Возникающие усилия сводятся к паре сил, а значит, уравнения равновесия приводятся к зависимостям:

$$\int_{-h_2}^{0} \sigma_{11(2)}^{-} b dx_2 + \int_{0}^{h_1 - h_o} \sigma_{11(2)}^{+} b dx_2 + \int_{h_1 - h_o}^{h_1} \sigma_{11(1)}^{+} b dx_2 = 0; \tag{3}$$

$$\int_{-h_2}^{0} \sigma_{11(2)}^{-} b x_2 dx_2 + \int_{0}^{h_1 - h_o} \sigma_{11(2)}^{+} b x_2 dx_2 + \int_{h_1 - h_o}^{h_1} \sigma_{11(1)}^{+} b x_2 dx_2 = M. \tag{4}$$

Объединяя физические уравнения (2) со статическими (3), (4), с учетом, что $h = h_1 + h_2$, при дальнейшем преобразовании, получим уравнения, связывающие деформационные и геометрические характеристики:

$$\begin{cases} h_2 = \sqrt{h_1^2 E_{1;1}^+ / E_{1;2}^- + (h_1 - h_o)^2 (E_{1;2}^+ - E_{1;1}^+) / E_{1;2}^-}; \\ h_1 = h - h_2. \end{cases} \quad (5)$$

Окончательно приходим к разрешающему уравнению:

$$[E_{1;2}^- h_2^3 + E_{1;1}^+ h_1^3 + E_{1;2}^+ (h_1 - h_o)^3 - E_{1;1}^+ (h_1 - h_o)^3]b / 3\rho = M . \quad (6)$$

Из этого уравнения определяется изгибная жесткость двухслойной дорожной конструкции из материала с двоякой анизотропией:

$$D = [E_2^- h_2^3 + E_1^+ h_1^3 + E_2^+ (h_1 - h_o)^3 - E_1^+ (h_1 - h_o)^3]b / 3 . \quad (7)$$

Проинтегрировав уравнение (6) дважды с учетом граничных условий (при $x_1 = 0$: $w_{,1} = 0$, $w = 0$), для максимального прогиба получим:

$$w = Mx_1^2 / D . \quad (8)$$

Тогда для напряжений имеем:

$$\sigma_{11(1)}^+ = E_{1;1}^+ Mx_2 / D ; \qquad \sigma_{11(2)}^+ = E_{1;2}^+ Mx_2 / D ;$$

$$\sigma_{11(2)}^- = E_{1;2}^- Mx_2 / D . \quad (9)$$

Момент от колес автомобиля определится с учетом линейно деформируемого полупространства по формуле Горбунова-Посадова [3]:

$$M = P[0{,}0592 - 0{,}09284 \ln(r / L)] , \quad (10)$$

где r – радиус круга равновеликого отпечатку колеса автомобиля; P – нагрузка на колесо; L – упругая характеристика дорожной конструкции; $L = \sqrt{2D(1 - \nu_{ro}^2) / E_{ro}}$; E_{ro} – модуль деформаций подстилающего слоя грунтового основания; ν_{ro} – коэффициент Пуассона грунта; D – изгибная жесткость дорожной одежды (7).

Данная методика существенно уточняет расчет жестких и полужестких дорожных одежд путем учета двоякой анизотропии монолитных композитных материалов.

Библиографический список

1. Кожухов, А.Г. Учет деформационных особенностей композиционных материалов при расчете дорожных одежд / А.Г.Кожухов,

К.Г.Кожухов // Изв. Вузов. Строительство и архитектура. - 1989. - № 11. - С. 101 - 104.

2. Трещев, А.А. Учет деформационных особенностей композитных материалов при расчете автодорожных одежд / А.А.Трещев, С.Б.Сергеева // Повышение долговечности транспортных сооружений и безопасности дорожного движения. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. - Казань: КГАСУ. - 2008. - С. 152 - 155.

3. Глушков, Г.И. Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог / Г.И.Глушков, В.Ф.Бабков, И.А.Медников - М.: Транспорт, 1987. - 255 с.

4. Михович, С.И. Повышение прочности междуслойного сцепления при ремонте дорожных покрытий / С.И.Михович, М.С.Стороженко, Е.Д.Прусенко // Автомобильные дороги. - М.: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. - 1987. - Вып. 1. - 48 с.

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

6. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещев. - Тула: ТулГУ, 2020. 359 с.

7. 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.

О КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТИНЕ С ОТВЕРСТИЕМ ИЗ МАТЕРИАЛА С АНИЗОТРОПИЕЙ ДВУХ ВИДОВ

Трещев А.А., Сосновцева П.Е.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Многие новые анизотропные конструкционные материалы не подчиня-ются классическим законам их упругопластического деформирования твердых тел, основанным на гипотезе единой кривой «интенсивность напряжений - интенсивность деформаций». Механические свойства этих материалов зависят от вида напряженного состояния, у них могут проявляться зависимость механических характеристик от вида напряженного состояния. Подобными свойствами обладает ряд полимеров, графиты и композиты. Важно также учесть тот факт, что ввиду конструктивных, технологических, экологических и других требований приходится нарушать сплошность элементов строительных конструк-

ций путем устройства отверстий, пазов, вырезов и т. п. В процессе эксплуатации конструкции эти несплошности становятся местами концентрации напряжений. Концентрация напряжений является одним из главных факторов, влияющих на прочность перфорированных элементов, поэтому исследование влияния концентраторов на напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов из анизотропных разносопротивляющихся материалов является актуальной задачей строительной отрасли.

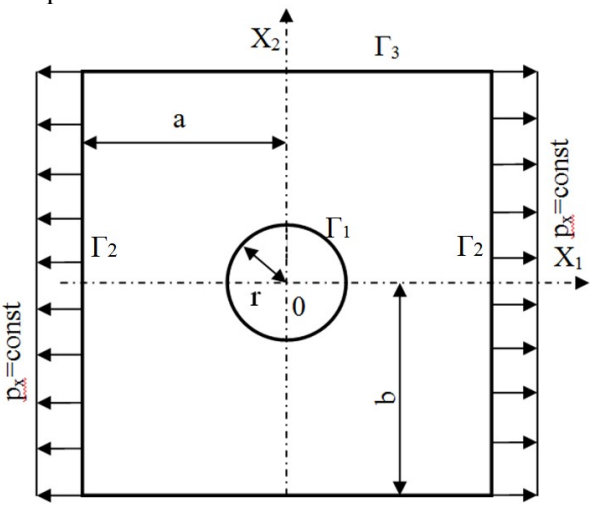


Рис. 1. Расчетная схема пластины

Для построения модели задачи исследования в данной статье рассматривается тонкая физически нелинейная пластина с отверстием радиусом r и толщиной h в направлении оси X_3, находящаяся в равновесии. Она имеет конечные размеры 2a и 2b по направлению основных осей декартовой системы координат X_1 и X_2 и загружена в своей плоскости растягивающей равномерно распределённой по толщине нагрузкой p_x, которая приложена к внешнему контуру Γ_2 в соответствии с рис. 1. Нагружение принято пропорциональным при активной деформации, в связи с чем для описания свойств материала принимаются уравнения состояния, представленные через параметры нормированного пространства напряжений [1].

Функции, описывающие напряженно-деформированное состояние, зависят только от координат X_1 и X_2. Вектор перемещений имеет две ненулевые составляющие $u_1 = u$ и $u_2 = v$ в направлении соответству-

ющих осей. Перемещения $u_3 = w$ в направлении оси X_3 есть, но они имеют второстепенное значение и определяются после решения задачи по формуле: $w = e_{33} x_3$. Деформации e_{33} не зависят от координаты X_3 и малы настолько, что далее не рассматриваются.

Уравнения связи между основными компонентами тензора малой деформации и перемещениями в рамках теории механики сплошных сред, строительной механики и в условиях плоского напряженного состояния принимаются для пластинки в виде:

$$e_{11} = u_{,1}; \quad e_{22} = v_{,2}; \quad \gamma_{12} = u_{,2} + v_{,1}. \tag{1}$$

По всей толщине пластинки и на её плоских поверхностях справедливо равенство:

$$\sigma_{33} = \tau_{13} = \tau_{23} = 0 \tag{2}$$

В состоянии плоского напряженного состояния в ортотропном теле через каждую точку проходят две перпендикулярные плоскости упругой симметрии, в силу чего на основании закона деформирования для разносопротивляющегося материала существуют зависимости [1]:

$$e_{ii} = C_{iiii}\sigma_{ii} + C_{iijj}\sigma_{jj} + C_{iikk}\sigma_{kk}; \quad \gamma_{ij} = C_{ijij}\,\tau_{ij} \ \text{ при } i \neq j, \tag{3}$$

где $$C_{iiii} = A_{iiii} + B_{iiii}\alpha_{ii} + 0{,}5[B_{iiii}\alpha_{ii}(1-\alpha_{ii}^2) - B_{jjjj}\alpha_{jj}^3 -$$

$$-B_{kkkk}\alpha_{kk}^3 - B_{ijij}\alpha_{ij}^3 - B_{jkjk}\alpha_{jk}^3 - B_{ikik}\alpha_{ik}^3] + B_{iijj}\alpha_{jj}(1-\alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{jj}) +$$

$$+B_{iijj}\alpha_{kk}(1-\alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{kk}) - B_{jjkk}\alpha_{jj}\alpha_{kk}(\alpha_{jj} + \alpha_{kk});$$

$$C_{iijj} = A_{iijj} + B_{iijj}(\alpha_{ii} + \alpha_{jj}); \; C_{iikk} = A_{iikk} + B_{iikk}(\alpha_{ii} + \alpha_{kk});$$

$$C_{ijij} = A_{ijij} - (B_{iiii}\alpha_{ii}^3 + B_{jjjj}\alpha_{jj}^3 + B_{kkkk}\alpha_{kk}^3) - -2[B_{iijj}\alpha_{ii}\alpha_{jj}(\alpha_{ii} + \alpha_{jj}) +$$

$$B_{jjkk}\alpha_{jj}\alpha_{kk}(\alpha_{jj} + \alpha_{kk}) + +B_{iikk}\alpha_{ii}\alpha_{kk}(\alpha_{ii} + \alpha_{kk})]; \quad C_{ijkm} = C_{kmij};$$

$$(i \to j \to k = 1 \to 2 \to 3),$$

где $\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S$ - нормированные напряжения в пространстве главных осей ортотропии материала ($i, j = 1,2,3$); σ_{ij} - компоненты тензора напряжений, определенные в главных материальных осях ортотропии; $S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2\tau_{12}^2 + 2\tau_{23}^2 + 2\tau_{13}^2}$ - норма тензорного пространства; $\alpha_{ij}\alpha_{ij} = \alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2\alpha_{12}^2 + 2\alpha_{23}^2 + 2\alpha_{13}^2 = 1$ - условие нормировки тензорного пространства; A_{ijkm}, B_{ijkm} - компоненты тензора

податливостей четвертого ранга ($i,j,k,m = 1,2,3$), вычисляемые через технические характеристики материала, установленные из экспериментов на одноосные растяжение и сжатие вдоль главных осей ортотропии и на сдвиг в главных плоскостях: $A_{kkkk} = (1/E_k^+ + 1/E_k^-)/2$; $B_{kkkk} = (1/E_k^+ - 1/E_k^-)/2$; $A_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ + \nu_{ij}^-/E_j^-)/2$; $B_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ - \nu_{ij}^-/E_j^-)/2$; $A_{ijij} = 1/G_{ij}$; $E_k^{\pm}$, $\nu_{ij}^{\pm}$, G_{ij} - модули упругости и коэффициенты поперечной деформации вдоль соответствующих главных осей ортотропии и модули сдвига в главных плоскостях (знак плюс относится к растяжению, минус - к сжатию); $\nu_{ij}^+/E_j^+ = \nu_{ji}^+/E_i^+$; $\nu_{ij}^-/E_j^- = \nu_{ij}^-/E_i^-$.

Уравнения связи между компонентами тензора малых деформаций и напряжениями в условиях плоского напряжения с учетом равенства (2) в форме метода «переменных параметров упругости» Биргера приводятся к виду [2]:

$$\{e\} = [C]\{\sigma\}, \tag{4}$$

где $\{e\} = \{e_{11}e_{22}\gamma_{12}\}^T$ - вектор-столбец ненулевых деформаций; $[C]$ - матрица податливостей ортотропного разносопротивляющегося материала, зависящих от вида напряженного состояния; $\{\sigma\} = \{\sigma_{11}\sigma_{22}\tau_{12}\}^T$ - вектор-столбец ненулевых напряжений.

Преобразование уравнения (4) с учетом соотношений (1) позволяет получить зависимость между напряжениями и деформациями при плоском напряженном состоянии:

$$\{\sigma\} = [D(\alpha_{ij})]\{e\}, \tag{5}$$

где $[D(\alpha_{ij})] = [C]^{-1}$ - матрица жесткостей материала, зависящая от вида напряженного состояния.

Основные положения и зависимости классической теории упругости остаются справедливыми, поскольку при использовании тех или иных физических соотношений мы не меняем статико-геометрическую природу задачи. Для данной задачи уравнения равновесия при условном отсутствии объемных сил представляются следующим образом [3]:

$$\sigma_{11,1} + \tau_{12,2} = 0; \qquad \tau_{12,1} + \sigma_{22,2} = 0. \tag{6}$$

При статических граничных условиях на контуре пластинки имеем:

$$p_{1\nu} = \sigma_{11}\cos(\nu x_1) + \tau_{12}\cos(\nu x_2);$$
$$p_{2\nu} = \sigma_{22}\cos(\nu x_2) + \tau_{12}\cos(\nu x_1), \quad (7)$$

где $\cos(\nu x_k)$ - косинусы углов между осями x_k и внешней нормалью к площадке, на которую действуют усилия с проекциями $p_{k\nu}$, $(k = 1,2)$.

Очевидно, что сохраняется одно из общих уравнений неразрывности деформаций Сен-Венана:

$$e_{11,22} + e_{22,11} = \gamma_{12,12}. \quad (8)$$

Для решения задачи принимается плоская конечно-элементная модель с двумя степенями свободы в узле. Вся область, ограниченная контуром пластинки, покрывается треугольными симплекс конечными элементами [4]. В предполагаемом месте концентрации напряжений, т. е. около отверстия сетка конечных элементов сгущается. Перемещения в произвольной точке элемента $u(x_1,x_2)$ и $\upsilon(x_1,x_2)$ через перемещения узлов элемента $\{U\}$ представляются следующим образом:

$$\{u \quad \upsilon\}^T = [N]\{U\}, \quad (9)$$

где $\{U\} = \{u_i \quad \upsilon_i \quad u_j \quad \upsilon_j \quad u_k \quad \upsilon_k\}^T$; i,j,k - номера узлов конечного элемента.

Поля перемещений в пределах выбранного в задаче треугольного элемента определяются с помощью интерполяционного полинома первой степени [5]: $u = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 x_2$; $\upsilon = \alpha_4 + \alpha_5 x_1 + \alpha_6 x_2$, а функции формы $[N]$ принимаются в виде:

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_k & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_k \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $N_i = (a_i + b_i x_1 + c_i x_2)/(2\Delta)$, $(i \to j \to k)$, $\Delta -$ площадь треугольного элемента; $a_i = x_{1j}x_{2k} - x_{1k}x_{2j}$; $b_i = x_{1i} - x_{2k}$; $c_i = x_{1k} - x_{2j}$.

Используя уравнения (1) и продифференцированную соответствующим образом матрицу $[N]$, получим зависимости между деформациями элемента и перемещениями его узлов:

$$\{e\} = [B]\{U\}, \quad (11)$$

где $[B]=\frac{1}{2\Delta}\begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{bmatrix}$; $2\Delta=\det\begin{vmatrix} 1 & x_{1i} & x_{2i} \\ 1 & x_{1j} & x_{2j} \\ 1 & x_{1k} & x_{2k} \end{vmatrix}$.

Формулировка принятого МКЭ основана на вариационном принципе возможных перемещений Лагранжа. Потенциальная энергия тела $П$ представляет собой разность внутренней энергии деформации W и работы внешних сил A: $\Pi = W - A$. Энергия деформации элемента объема dV определяется по формуле: $dW = \{e\}^T\{\sigma\}/2$. Без учета массовых сил для выражения работы внешних сосредоточенных и поверхностных сил имеем:

$$A=\{U\}^T\{P\}+\int_S\{U\}^T[N]^T\{p\}dS, \tag{12}$$

где $\{P\}-$ вектор внешней узловой нагрузки в проекциях на оси декартовой системы координат; $\{p\}-$ вектор внешней поверхностной нагрузки в проекциях на оси декартовой системы координат; $S-$ контур внешней границы конечного элемента.

Потенциальная энергия конечного элемента преобразуется к виду:

$$П=1/2\int_V\{e\}^T\{\sigma\,dV-\{U\}^T\{P\}-\int_S\{U\}^T[N]^T\{p\}dS \tag{13}$$

и с учетом формул (12) и (6) - к виду:

$$П=1/2\int_V\{U\}^T[B]^T[D(\sigma)][B]\{U\}dV-\{U\}^T\{P\}-\int_S\{U\}^T[N]^T\{p\}dS. \tag{14}$$

Для плоского напряженного состояния конечного элемента с толщиной h получается следующее общее уравнение метода конечных элементов (после минимизации функционала (14) по вектору $\{U\}$ и приведения распределенной поверхностной нагрузки к сосредоточенным узловым силам):

$$[K]\{U\}=\{P\}, \tag{15}$$

где $[K]=[B]^T[D(\sigma)][B]h\Delta$ - матрица жесткости конечного элемента.

Векторы $\{U\}$, $\{P\}$ (15) рассматриваются как вектор неизвестных узловых перемещений и вектор внешней узловой нагрузки на пластину.

Решение системы алгебраических уравнений рассматриваемой задачи с учетом глобальной матрицы жесткости, полученной сложением матриц жесткости отдельных конечных элементов, и соответствующих граничных условий производится методом Гаусса. Исходная нелиней-

ная задача решается методом «переменных параметров упругости» в сочетании с пошаговыми нагружениями.

В качестве объекта расчета выбрана квадратная пластина размером 120×120 мм, толщиной h = 20 мм с круговым отверстием диаметром 40 мм, загруженная растягивающей равномерно распределенной по толщине нагрузкой интенсивностью $\boldsymbol{p}$ (см. рис. 1) и выполненная из трехармированного тканного полимера П36-50 [6].

Принимая во внимание симметричность задачи, в расчете рассматривалась четвертая часть пластины, а отброшенные части заменялись соответствующими граничными условиями симметрии [7]. Расчетная схема задачи с разбиением на конечные элементы приведена на рис. 2 (числами обозначена нумерация узлов). Количество треугольных конечных элементов составило 1440 шт., число узлов - 778 шт. Решение задачи представлено на рис. 3.

Для анализа результатов были приняты три характерных значения нагрузки с интенсивностью P_1 = 6 МПа, P_2 = 12 МПа, P_3 = 18 МПа. Такой выбор основывался на том, чтобы оценить влияние специфических механических свойств трехармированного тканного полимерного композита П36-50 на разных уровнях их проявления. Интенсивности нагрузки P_1 на рисунке 3 соответствуют кривые, обозначенные цифрой 1, P_2 - цифрой 2, P_3 - цифрой 3. Распределение напряжений, представленное на рис. 3 сплошными кривыми соответствует классическому решению для ортотропных материалов. Штриховые кривые соответствуют решениям, полученным в рамках разработанной математической модели, учитывающей двойную анизотропию материала.

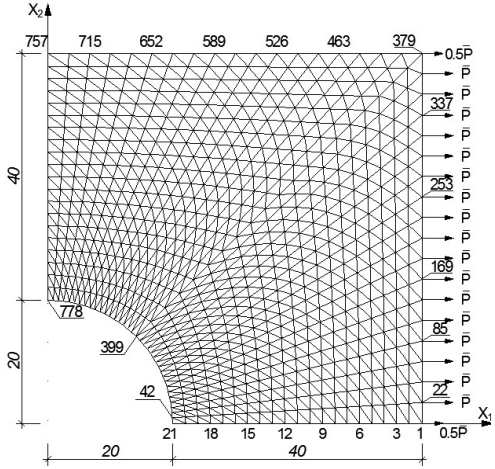


Рис. 2. Расчетная схема задачи с сеткой конечных элементов

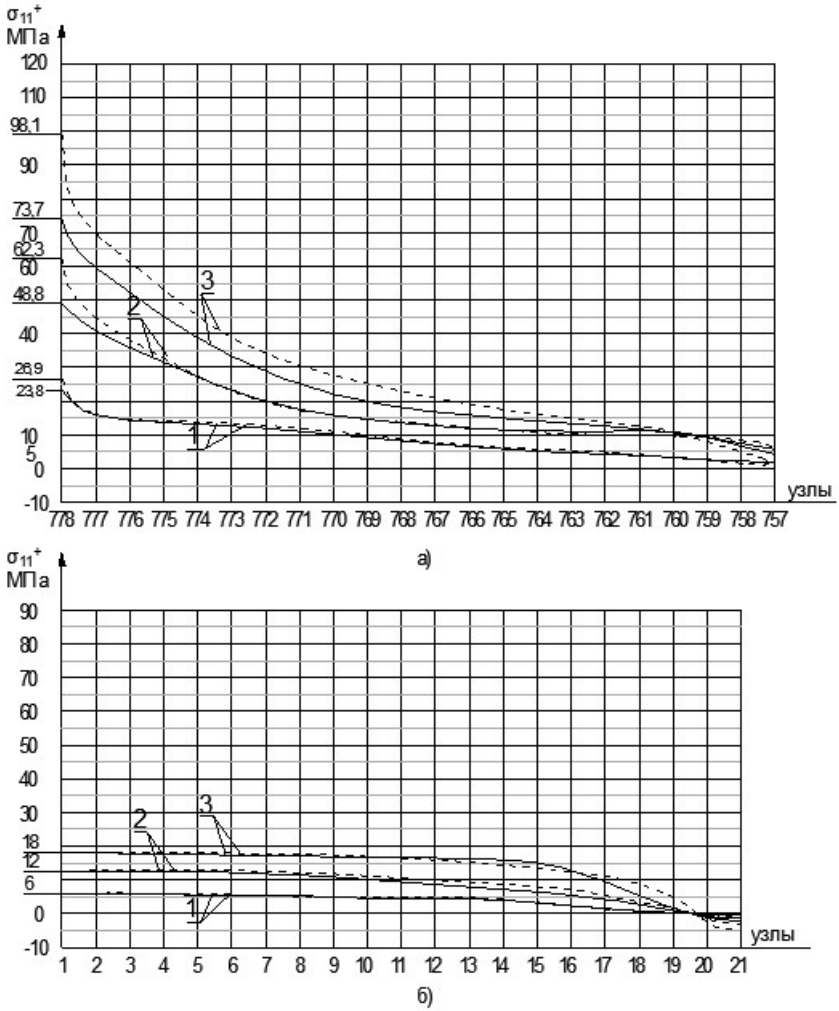


Рис. 3. Нормальные напряжения вдоль X_1 при растяжении: а) по узлам 757-778; б) по узлам 1-21.

Из рис. 3а и 3б видно, что при нагружении с интенсивностью P_1 при деформировании слабо проявляются свойства разносопротивляемости композита П36-50. При этом уровне нагрузки напряжения σ_{11} и σ_{22} слабо отличаются от данных классической теории для ортотропных материалов. Около отверстия, непосредственно в зоне концентрации напряжений разница в значениях напряжений σ_{11} при уровне нагрузки

P_1 не превышает 13,03%, при P_2 -27,66%, при P_3 -33,12%. По мере увеличения действующей нагрузки влияние разносопротивляемости полимера на распределение напряжений прослеживается более явно и становится существенным.

Разница напряжений σ_{22} в аналогичной зоне может достигать 42,3%, но величины этих напряжений существенно ниже σ_{11} (в 2-3 раза).

Результаты решения задачи о концентрации напряжений около отверстия без учета разносопротивляемости материала, полученные с помощью представленной в данной работе математической модели (при обнулении нелинейных членов), и решение, полученное для ортотропного материала с помощью конечно-элементного пакета ANSYS 16.0, неплохо согласуются между собой. Разница в полученных результатах для σ_{11} в зоне концентрации не превышает 6,8%. Данные сравнения подтверждают реальность и физическую непротиворечивость построенной модели.

Неучет явления разносопротивляемости приводит к значительным погрешностям при вычислении основных характеристик напряженно-деформированного состояния перфорированных элементов строительных конструкций. Для получения достоверных результатов инженерных расчетов и для предотвращения возникновения аварийных состояний элементов конструкций и сооружений необходимо учитывать влияние усложнённых свойств материалов.

Библиографический список

1. 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. DOI 10.24411/2686-7818-2020-10027.

2. Петров, В.В., Методы расчета конструкций из нелинейно-деформируемого материала: учеб. пособие / В.В.Петров, И.В.Кривошеин. - М: Изд-во АСВ, 2009. - 208 с.

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

4. Неделин А.В., Напряженное состояние пластинки из дилатирующего материала, ослабленного отверстием / А.В.Неделин, А.А.Трещев // Известия вузов. Строительство. - 2001. - №8. - С. 16-20.

5. Даутов, Р.З. Программирование МКЭ в MATLAB / Р.З.Даутов. - Казань: Изд-во КГУ, 2010. - 71 с.

6. Розе, А.В., Трехармированные тканные материалы/ А.В.Розе, И.Г.Жигун, М.Н.Душин // Механика полимеров, 1970. №3. -С. 471-476.

7. Трещев, А.А, Решение задачи типа Кирша для пластины из анизотропного разносопротивляющегося материала / А.А.Трещев, А.В.Морозова // Научный вестник ВГАСУ. Сер. Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. - Воронеж, ВГАСУ, 2015. - вып.1. - С. 72-79.

ПРОГИБЫ И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СОСТАВНЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН С РАЗЛИЧНЫМ ОПИРАНИЕМ ПО КОНТУРУ

Турков А.В., Ильхаев И.И.
ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

Численные исследования составных двухслойных пластин на податливых связях проводились методом конечных элементов. В ходе численных исследований определение прогибов и частот колебаний проводилось в программном комплексе «ЛИРА САПР». В качестве модели исследования была выбрана прямоугольная двухслойная составная пластина, стороны которой составляла 1 и 1,5 метр. Каждый слой был разбит сеткой на конечные элементы (КЭ) таким образом, что размер каждого конечного элемента составил 100×100 мм (рисунок 1).

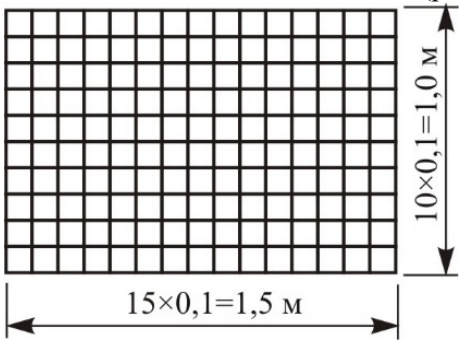


Рис. 1. Разбивка на КЭ слоя пластины в ЛИРА САПР

Толщина пластин задавалась различной: толщина нижней пластины принята постоянной 10 мм, толщина верхней принималась равной 11…20 мм с шагом 1 мм. Пластины связаны между собой поперечными связями (препятствующими сближению и отдалению слоёв) и связями сдвига (рисунок 2). При исследованиях жесткость связей принята постоянной и составляла $EA_{пс}$ = 512000 Н для поперечных связей,

EA_{cc}=10000 Н для связей сдвига. Выбор значений этих параметров обусловлен данными, полученными в предшествующих работах [3]. Расстояние между слоями принималось равным расстоянию между срединными поверхностями слоёв. Плотность материала слоёв принята ρ = 740 кг/м^3. Все исследования производились в предположении упругой стадии работы материала слоев, поперечных связей и связей сдвига.

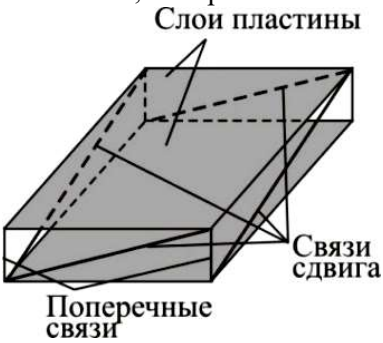


Рис. 2. Конечные элементы составной пластины

Критерием точности во всех исследованиях служил коэффициент K, который определялся по (1):

$$K = \frac{W_0 \cdot \omega^2}{q / m} \quad (1)$$

Эти коэффициенты для прямоугольных пластин с различными схемами опирания по контуру различны.

Пластины загружались равномерно распределенной нагрузкой q = 1 кН/м^2, которая прикладывалась к верхнему слою составной пластины. Для нахождения частот собственных колебаний в узлы конечных элементов прикладывались сосредоточенные массы от собственного веса слоев в зависимости от грузовой площади узла.

Частоты собственных колебаний и максимальный прогиб двухслойной пластины, полученные при расчёте в программном комплексе «ЛИРА САПР» приведены в таблице 1. На основе фактических значений этих параметров был подсчитан коэффициент К. В дальнейшем он сопоставлялся с теоретическим значением этого параметра, приведёнными в [1, 2]. По данным таблицы 1 построены графики изменения максимальных прогибов и частот колебаний в зависимости от отношения толщин t_2/t_1, представленные на рисунках 3 и 4.

Таблица 1 - Численные исследование составных двухслойных прямоугольных пластин с комбинированными граничными условиями

Вид граничных условий	Толщина 1-ой пластины t_1, мм	Толщина 2-ой пластины t_2, мм	Круговая частота основного тона, ω (с-1)	Максимальный прогиб, W0 (мм)	$K=W_0\,\omega^2/(q/m)$	$K_{аналит}=W_o\,\omega^2/(q/m)$ на основе аналит. W_0 и ω	Отклонение К от Каналит (%)
2	3	4	5	6	7	8	9
Ж Ж Ж Ж	10	2	101,972	12,4	1,527	1,610	-2,917
		3	112,675	10,2	1,533		-2,497
		4	118,846	9,210	1,540		-2,053
		5	123,763	8,520	1,545		-1,739
		6	129,319	7,930	1,570		-0,148
		7	136,106	7,230	1,586		0,845
		8	143,743	6,490	1,588		0,967
		10	163,957	5,010	1,595		1,405
		12	190,303	3,750	1,608		2,255
		15	236,578	2,430	1,610		2,404
Ж Ж Ж Ш	10	2	95,27	14,75	1,585	1,603	1,739
		3	97,052	14,2	1,584		1,644
		4	100,451	13,200	1,577		1,220
		5	105,936	11,800	1,568		0,636
		6	117,723	9,520	1,562		0,264
		7	123,752	8,580	1,556		-0,144
		8	135,515	7,090	1,542		-1,052
		10	142,357	6,400	1,536		-1,435
		12	165,446	4,740	1,536		-1,400
		15	205,968	3,050	1,532		-1,671
Ж Ш Ж Ш	10	2	92,7	15,79	1,607	1,596	2,263
		3	94,4	15,1	1,593		1,414
		4	98,612	13,790	1,588		1,065
		5	102,571	12,700	1,582		0,700
		6	114,837	10,040	1,568		-0,213
		7	120,683	9,080	1,566		-0,333
		8	132,384	7,510	1,558		-0,806
		10	139,684	6,710	1,550		-1,329
		12	162,379	4,940	1,542		-1,834
		15	201,986	3,180	1,536		-2,221

Ж Ж Ш Ш	10	2	88,142	16,94	1,558	1,596	-2,367
		3	90,216	16,1	1,551		-2,790
		4	91,922	15,500	1,551		-2,840
		5	94,957	14,700	1,569		-1,669
		6	98,003	13,800	1,569		-1,672
		7	102,83	12,600	1,577		-1,161
		8	108,686	11,300	1,580		-0,975
		10	123,729	8,840	1,602		0,395
		12	143,016	6,680	1,618		1,360
		15	178,672	4,360	1,648		3,257
Ж Ш Ш Ш	10	2	80,384	20,67	1,581	1,589	1,500
		3	81,751	19,92	1,576		1,172
		4	84,562	18,570	1,572		0,913
		5	87,532	17,260	1,566		0,498
		6	93,967	14,900	1,558		-0,018
		7	97,432	13,850	1,557		-0,083
		8	102,974	12,340	1,549		-0,561
		10	108,405	11,130	1,549		-0,602
		12	136,42	7,010	1,545		-0,858
		15	168,872	4,560	1,540		-1,176
Ш Ш Ш Ш	10	2	61,52	35,9	1,609	1,582	2,793
		3	62,14	34,8	1,591		1,662
		4	69,206	27,980	1,587		1,385
		5	70,959	26,500	1,580		0,948
		6	73,659	24,350	1,564		-0,049
		7	76,3	22,600	1,558		-0,461
		8	83,496	18,800	1,552		-0,842
		10	101,027	12,800	1,547		-1,162
		12	123,102	8,610	1,545		-1,288
		15	128,115	7,940	1,543		-1,404

Как показывают результаты исследований, с увеличением толщины одного из слоёв возрастает жёсткость пластины, на что указывает возрастание частот собственных колебаний и снижение максимальных прогибов составной пластины.

Анализ полученных результатов также показывает, что независимо от отношения толщин слоев фундаментальная зависимость (1) выполняется с точностью от +0,308 до -1,912% для двухслойной прямоугольной пластины с комбинированными граничными условиями.

Подтверждение справедливости зависимости (1) для подобных пластин дает возможность получать как основные частоты колебаний на

основе максимального прогиба пластины, так и наоборот, прогиб составной пластины, имеющей разную толщину слоев, на основе частоты её собственных колебаний.

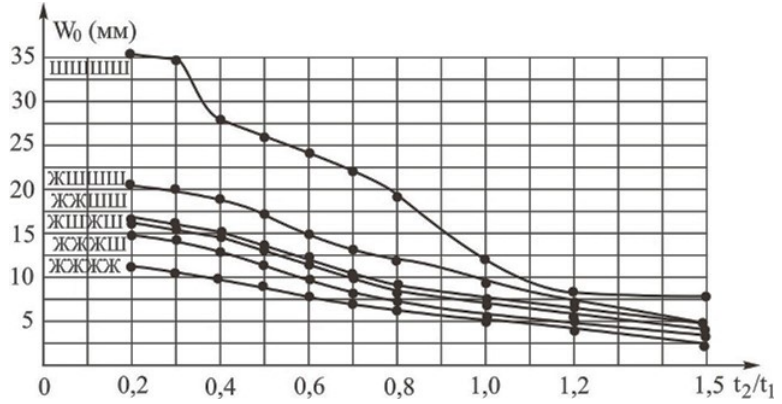
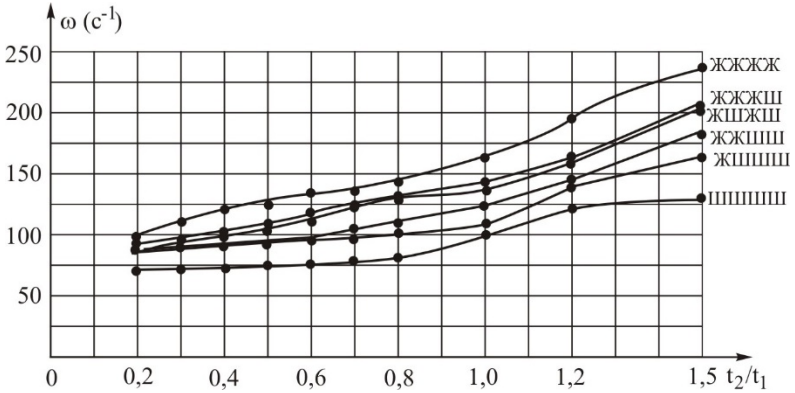


Рис. 3. График изменения максимальных прогибов в зависимости от отношения толщин двухслойной пластины



Рис, 4. График изменения частот собственных колебаний в зависимости от отношения толщин двухслойной пластины

Библиографический список

1. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки [Текст] / А.Р. Ржаницын. - М.: Стройиздат, 1986. - 316 с.

2. Коробко, В.И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок [Текст] / В. И. Коробко. // Изв. вузов. Строительство и архитектура. - 1989. - № 11. - С. 32-36.

3. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний составных квадратных изотропных пластин с различными граничными усло-

виями при изменении жесткости связей сдвига [Текст] / А.В. Турков, К.В. Марфин // Строительство и реконструкция [Текст]. - №3. - 2011. - С. 50-52.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО

Удербаев С.С., Жанатулы С.
КГУ им. Коркыт Ата, г. Кызылорда, Казахстан

К актуальным проблемам промышленности строительных материалов относится разработка местных эффективных строительных материалов, изготовленных на основе местных сырьевых ресурсов и их широкое применение в малоэтажном строительстве. В связи с дефицитностью древесины в Южном Казахстане в качестве органического заполнителя для производства арболита и арболитоподобных материалов, пригодны отходы сельского хозяйства, запасы которых неограничены.

Рассматривая процесс активации как сложную систему, необходимо было учитывать взаимодействие ее с внешней средой и внутреннюю взаимосвязь отдельных элементов системы [1]. Представим схему внешних связей при МЭП активации, как систему, имеющую входные и выходные параметры (рис. 1).

Таким образом, исключая неконтролируемый фактор - шум (Z), математическую модель можно представить системой уравнений [1]:

$$У_i = \phi_i(H, X) \quad (1)$$

Известно, что на активность цементно-зольного вяжущего оказывает соотношение между портландцементом и золой. Поэтому было проверено влияние расхода золы и портландцемента при электромеханохимиечкой активации активации на прочность цементно-зольного камня.

Подбор оптимального состава цементно-зольного, вяжущего был проведен с применением математического метода планирования, в частности был реализован композиционный ротатабельный второго порядка для двух переменных план. В качестве параметра оптимизации была принята прочность цементного камня. Для оценки влияния состава цементно-зольного, вяжущего на его выходной параметр, т.е. при сжатии и для проведения эксперимента в качестве переменных факторов были приняты содержание портландцемента (X1) и золы (X2) (табл. 1):

Таблица 1. Уровни варьирования исследуемых факторов

Наименование исследуемых факторов	Код	Уровни варьирования				
		-1,41	-1,0	0	+1,0	+1,41
Содержание цемента, в мас. %	X_1	50	52,9	60	67,1	70
Содержание золы, в мас. %	X_2	50	47,1	40	32,9	30

В табл. 2 представлен план проведения экспериментов в кодированных и натуральных переменных и приведены результаты экспериментов.

Таблица 2. План и результаты проведения эксперимента

№ пп	Уровни варьирования				Портландцемент, кг	Зола Кызылординской ТЭЦ, кг	Средняя плотность, кг/м^3	Прочность при сжатии в 28-ми суточном возрасте, МПа
	В кодированных переменных		В натуральных переменных					
	X_1	X_2	X_1	X_2				
1	+1	+1	67,1	32,9	1,35	0,7	2095	56,0
2	-1	+1	52,9	32,9	1,15	0,7	1989	53,5
3	+1	-1	67,1	47,1	1,35	0,85	2106	54,1
4	-1	-1	52,9	47,1	1,15	0,85	2015	53,5
5	+1,41	0	70	40	1,4	0,8	2115	55,9
6	-1,41	0	50	40	1,0	0,8	1998	52,9
7	0	+1,41	60	30	1,2	0,65	2104	54,5
8	0	-1,41	60	50	1,2	0,9	2016	52,5
9	0	0	60	40	1,2	0,8	2085	56,9
10	0	0	60	40	1,2	0,8	2098	57,5
11	0	0	60	40	1,2	0,8	2089	57,7
12	0	0	60	40	1,2	0,8	2090	58,0

В процессе выполнения опытов постоянными для всех составов принимались следующие показатели:

- водовяжущее отношение;
- режим активации, включающий время помола, содержание добавки.

Для определения уравнения регрессии и коэффициентов регрессии были использованы формулы:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2, \quad (2)$$

где b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12} - коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{N}; \quad (3)$$

$$bj = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i x_{ji}}{N}, \quad (4)$$

где j = 1, 2, 3 - номера факторов.

Коэффициенты уравнения регрессии получились следующими:

b_0=57,809, b_1=0,9177, b_2=0,5910, b_3=0,4750, b_4=-1,4885, b_5=-1,9407.

Анализ значимости коэффициентов проводился при помощи построения доверительного интервала, который определяется по формуле:

$$\Delta b_i = \pm \ t \ \sqrt{\frac{s^2_{\{y\}}}{N}} \ , \quad (5)$$

здесь t - это табличное значение критерия Стьюдента, а $s^2_{\{y\}}$ - это дисперсия воспроизводимости, N - количество опытов.

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. В нашем случае, доверительный интервал Δb_i=0.698326657 (при критерии Стьюдента $t_{табл.}$=4.303). Проверка адекватности модели (15) проводилась по критерию Фишера:

$$F = \frac{s^2_{ad}}{s^2_{\{y\}}}, \quad (6)$$

где S^2_{ad} - дисперсия адекватности, а дисперсия воспроизводимости $S^2_{\{y\}}$ - эксперимента (ее также называют дисперсией параметра оптимизации), которые, в свою очередь, определяются по формулам (6) и (7).

$$s^2_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta y_i^2}{f} \ , \quad (7)$$

здесь в числителе - остаточная сумма квадратов, а в знаменателе - число степеней свободы f. В планировании эксперимента число степеней свободы для дисперсии адекватности равно числу различных опытов, результаты которых используются при подсчете коэффициентов регрессии, минус число определяемых коэффициентов. В нашем случае, f = 8 - 4 = 4.

$$S^2_{\{y\}} = \frac{\sum_{1}^{N}\sum_{1}^{n}(y_q - y_{cp})^2}{N(n-1)}, \qquad (8)$$

здесь N - число опытов, n - число повторных наблюдений в каждом опыте, а результаты.

Реализация ротатабельного плана второго порядка для двух переменных позволило получить математическую модель зависимости прочности от состава в виде полного квадратного уравнения:

$$R_{сж} = 57{,}81 + 0{,}92X_1 + 0{,}59X_2 + 0{,}475X_1X_2 - 1{,}489X_1^2 - 1{,}941X_2^2.$$

Проверка адекватности полученной модели проводилась по F - критерию, который для модели равен 3,13. Табличное значение при 3 степенях свободы числителя и 2 степенях свободы знаменателя для 5% уровня значимости равно 3,69 [2 - 4]. Поскольку $F_{факт} < F_{табл.}$, то модель адекватно описывает зависимость прочности активированного вяжущего от исследуемых факторов.

Диаграмма зависимости прочности цементно-зольного камня от его состава, характеризуемого расходом золы и портландцемента показана на рис. 1.

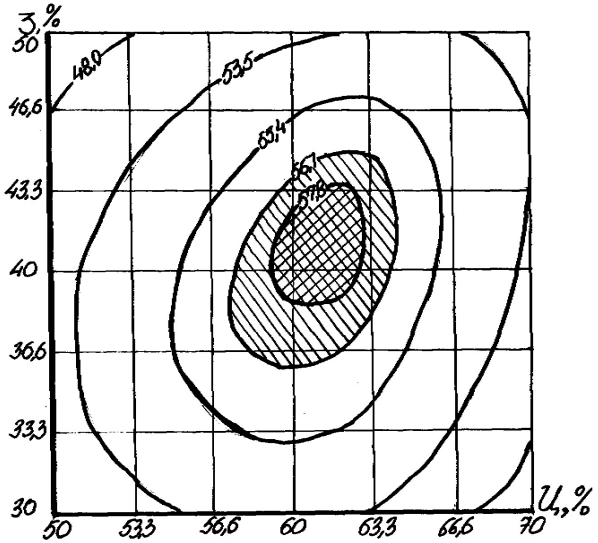


Рис. 1. Зависимость прочности цементно-зольного камня после 28-ми суточного твердения от изменения содержания цемента и золы в вяжущем

На данном рисунке сплошными линиями соединены точки факторного пространства, характеризующиеся одинаковой прочностью. Заштрихованная область факторного пространства характеризует оптимальные составы вяжущего с высокими показателями прочности при сжатии. Из данной диаграммы следует, что высокую прочность при активации цементно-зольного вяжущего можно достигнуть при содержании портландцемента от 60 до 65 % и золы от 38 до 43% от общей массы вяжущего.

Библиографический список

1. Еремин Н.Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов: Учеб. для вузов по спец. «Производство строит. изделий и конструкций». - М.: Высш. шк, 1986. - С. 20 - 22.

2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1971. - С. 145 - 212.

3. Вознесенский В.А. Статистические решения в технологических задачах. Кишинев: Карта Молдавеняскэ, 1968. - 232 с.

4. Зейдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. - М.: Наука, 1967.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТУРА ОБТЕКАЕМЫХ СЕЧЕНИЙ

Черняев А.А.
ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

Обтекаемые сечения различными потоками и средами встречаются во многих областях строительства и специальном машиностроении, где широко изучаются исследуемые при этом характеристики, например аэродинамические, значительное влияние на которые оказывает геометрическая форма выбранного контура.

В работах Коробко А.В. и Колесника И.А. [1, 2] и др. рассматривался прием геометрического моделирования формы контура некоторого сечения с помощью интегрального параметра и названного "коэффициентом формы".

Коэффициент формы плоской области относительно некоторой точки *a*, лежащей внутри области K_{fa}, представляет собой контурный интеграл:

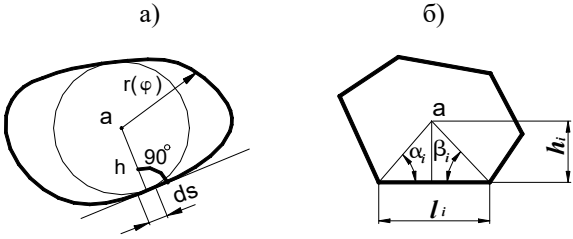
$$K_f = \min \oint_L \frac{ds}{h}, \qquad (1)$$

где *ds* - линейный элемент контура области, *h* - перпендикуляр, опущенный из точки «*a*» к середине элемента *ds* (рис. 1,а).

В случае многоугольной

$$K_f = \min \sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{h_i} = \sum_{i=1}^{n} (ctg\alpha_i + ctg\beta_i), \qquad (2)$$

где n - число сторон многоугольника, а остальные обозначения указаны на рис. 1,б.



а - криволинейный контур; б - многоугольный контур

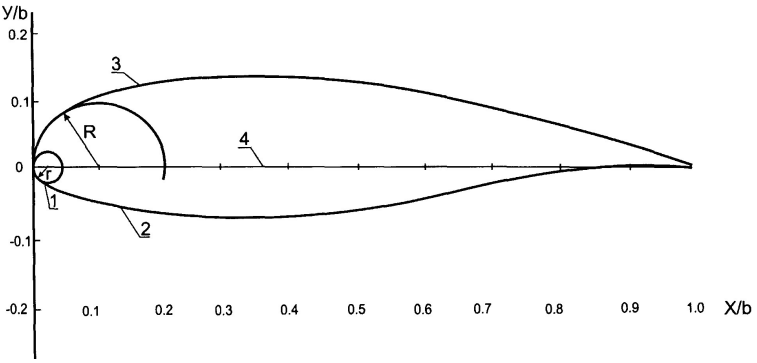
Рис. 1. К определению коэффициента формы произвольного сечения

В работе рассматривается его применение к анализу и сопоставлению характеристик как существующих геометрических контуров обтекаемых сечений: несимметричного профиля, симметричного профиля, выпукло-вогнутых, ромбовидных, клиновидных и др., так и поиску альтернативных.

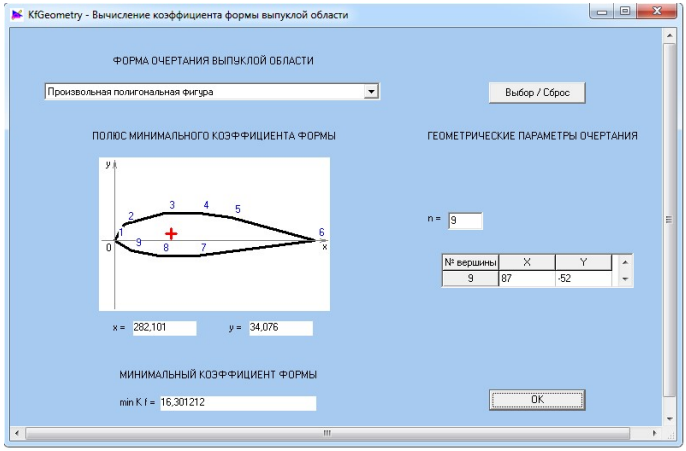
Коэффициент формы (1) может быть вычислен строго математически интегрированием записанного выражения, описывающего некоторыми кривыми или прямыми форму рассматриваемого контура, для широкого круга сечений в работе [1] приводятся уже полученные аналитические выражения, или численно путем разбиения контура на элементарные элементы, в зависимости от требуемой точности.

На рис. 2 показан пример вычисления коэффициента формы численно в специальной программе для сечения из работы [3].

а)



б)



а - сечение из работы [3]; б - рабочее окно программы

Рис. 2. Вычисления коэффициента формы численно

Библиографический список

1. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости / А.В. Коробко. - М.: АСВ, 1999. - 320с.

2. Колесник, И.А. К вопросу о геометрической жесткости кручения секториальных призматических брусьев / И.А. Колесник, А.В. Коробко // Математическое и электронное моделирование в машиностроении. - Киев: Ин-т кибернетики АН УССР. - 1989. - С. 77-84.

3. Пат. 0002581642 Российская Федерация, МПК B64C 3/14. Аэродинамический профиль крыла / А.В. Петров, Ю.Г. Степанов, А.В. Потапчик, Т.Н. Грачева; заявитель и патентообладатель ФГУП "ЦАГИ"; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 4.

О ПОДХОДЕ К АКТУАЛИЗАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ «РЕКОНСТРУКЦИЯ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И ЗАСТРОЙКИ» НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ

Чигинский Д. С.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Задачами освоения дисциплины «Реконструкция зданий, сооружений и застройки», читаемой в ТулГУ, являются, в том числе:

- углубление знаний принципов и методов оценки фактической несущей способности строительных конструкций зданий и сооружения;

- углубления знаний о вариантах и критериях выбора способа восстановления несущей способности конструкций;

- выработка навыков оформления рабочих чертежей строительных конструкций и узлов реконструируемых зданий и сооружений.

В настоящее время российское государство активно подталкивает строительную индустрию к применению технологий информационного моделирования зданий и сооружений (BIM-технологии), что проявляется, например, в принятии Постановлений Правительства РФ №1431 от 15.09.2020 г. [1] и № 331 от 05.03.2021 г. [2], утверждающих некоторые правила формирования и ведения информационных моделей, состав включаемых сведений, а также круг лиц, обеспечивающих формирование и ведение информационных моделей объектов капитального строительства.

Учитывая указанное, очевидна потребность в специалистах, обладающих соответствующими знаниями, умениями и навыками по работе с технологиями информационного моделирования. Дисциплина «Реконструкция зданий, сооружений и застройки» обладает потенциалом для применения инструментария BIM-технологий в рамках практических занятий, который, в том числе, будет содействовать решению указанных выше задач.

Как отмечалось в тезисах [3], результатом процесса информационного моделирования является решение следующих задач применения информационного моделирования (BIM uses): производство цифровых информационных моделей (ЦИМ); проверка и оценка технических решений; пространственная междисциплинарная координация и выявление коллизий; инженерно-технические расчеты; выпуск на основе ЦИМ чертежей и спецификаций.

Предлагаемый подход к актуализации дисциплины заключается в последовательном решении на практических занятиях связанных общими исходными данным задач, которые в совокупности формируют представление студентов о процессе проектирования реконструкции зданий и сооружений. Перечень практических задач может включать в себя следующие блоки:

- ознакомления с объемно-планировочными и конструктивными решениям здания или сооружения, аналог этапа работ по обследованию [4], как правило, предшествующего реконструкции;

- подготовка информационной модели реконструируемого здания (сооружения), в объёме необходимом для выполнения последующих этапов, в том числе включающий создание аналитического представле-

ния, используемого для экспорта/импорта в расчётный (вычислительный) комплекс;

- сбор нагрузок и выполнение поверочного расчёта, с использованием вычислительных комплексов, с учётом требований [4] и сводов правил;

- доработка информационной модели элементами реконструированного здания (сооружения), например, в форме надстройки этажа (яруса);

- расчёт реконструированного здания (сооружения) с проектированием элементов и узлов надстраиваемой части и подбором усиления существующей части здания (сооружения);

- моделирование узлов сопряжения надстраиваемой и существующей частей здания (сооружения) и узлов (элементов) усиления;

- оформления графических материалов на основе подготовленной информационной модели, включающей реконструируемую и надстраиваемую части здания (сооружения), а также узлов и спецификаций.

Для решения указанных практических задач может применяться соответствующее программное обеспечение, в дальнейшем используемое специалистами при проектировании с использованием BIM-технологий: Tekla Structures, Autodesk Revit, Autodesk Navisworks, SCAD Office, ЛИРА-САПР, STARK ES и т. д. При этом следует обратить внимание, что большинство из программных продуктов, реализующих технологии информационного моделирования, обладают возможностями полнофункционального использования для образовательных целей или специальными бесплатными лицензиями, предназначенными для использования преподавателями и студентами.

Описанный подход к дисциплине «Реконструкция зданий, сооружений и застройки» предоставляет возможность сформировать у студентов целостное представление о процессах проектирования строительных конструкций при реконструкции строительных объектов на современном уровне развития информационных технологий.

Библиографический список

1. Постановление Правительства РФ № 1431 от 15.09.2020 г. «Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства». URL: http://government.ru/news/40424/ (дата обращения: 23.06.2021).

2. Постановление Правительства РФ № 331 от 05.03.2021 г. «Об установлении случая, при котором обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства». URL: http://government.ru/docs/all/133174/.

3. Чигинский Д.С. О подходе к формированию дисциплины «Проектная деятельность» на основе применения BIM-технологий // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: материалы XXI Междунар. науч.-технич. конф. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. С. 227-228.

4. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. - М.: Стандартинформ, 2014.

PRINCIPLES OF COMFORTABLE URBAN ENVIRONMENT DESIGNING, TAKING INTO ACCOUNT THE NEEDS OF PEOPLE WITH DISABILITIES

Burilo N.A., Makarikhina I.M., Kapkaikin V.Yu., Logachev Ye.S., Kalpakova Yu.A.

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia

The main problem of the selected area is the aesthetic fragmentation and incompatibility of the established style of a park with shopping and public pavilions.

There is also another issue that may be relevant not only for the recreational territories of the Republic of Crimea. This is the impossibility of adapting commercial facilities at different times of the year and in different climatic conditions.

The question is that similar objects are aimed more at the warm season. Such facilities are usually boutiques with ice cream, refreshing drinks, etc, by their functional purpose. In the winter season, such services become unimportant, but at the same time in vain they occupy territories in parks that can be used for other needs.

Territory issues:

• lack of different structures distribution for different groups of the parks' population;

• public zones have not been formed to find common interests;

• the general identity and design of the architectural environment, corresponding to the park name, is not readable;

• lack of an even distribution of social concentration; underdeveloped areas of contact with water and the existing area of catamarans;

• uncontrollably overgrown landscaping, conflicting with some transit routes;

• the amusement area is in disrepair;

• insufficient number of public areas, united by a common architectural concept that will have the function of dispersing load on the park.

The project goal is to support and introduce the theme of futurism, given by the name of the park, into the environment structure, to create the adaptation of commercial zones to the seasons change.

Tasks are

1. based on the analysis of the territory, define clear boundaries of functional zones and disperse them throughout the park evenly and without conflict;

2. to propose a general style that symbolizes the territory context;

3. to design the main dominants, keeping the existing objects for orientation;

4. in accordance with the deduced zoning from the source data and the identified architectural design, develop the associated LFAs.

5. to decide on the constructive and finishing materials, developed by IAF.

6. to introduce (transform) the established and necessary commercial points of the park.

The main areas of visits and transit routes of various social groups were identified, after analyzing the territory. In order to eliminate conflict situations between generations and the interests of visitors, various conditions were designed that corresponded to the functional purpose. Functional areas that need to be introduced or developed (existing): commercial, sports, playground areas, quiet recreation areas and cultural heritage areas (monuments, memorials).

A terrain relief model was built with division into functional zones, based on the initial data (topographic survey, thermal map of functional loading, etc.). Subsequently, additional transport and pedestrian interchanges (sidewalks, bike paths, and coastal areas) were developed, connected to the terrain by marks, based on existing problems.

Among the main commercial areas, the catamaran rental area stands out, especially in terms of "lack of accommodation". In the conceptual project, it was decided to implement special pavilion for storage and distribution of catamarans. There was a berth area with a ramp on a roller system for comfortable delivery of catamarans from the water to the storage facilities. According to the constructive solution, this pavilion was made of converted and assembled sea containers. The type of foundation, based on the initial geological data and the availability of water resources, was adopted as pile-screw. The ramp and the outer part of the berth were metal structures.

Also, a lack of variety in the amusement zone was revealed, based on a survey of park visitors. In order to increase the possibilities and open up the park to visitors from a bird's eye view and erect a new landmark in the context of the city, a cable car was designed, which could be used as an entertainment attraction. The main load-bearing elements were designed in software Rhinoceros (grasshopper) and connected to the terrain via the Archicad-grasshopper -live-connection bundle. Due to parametric modeling, it was possible to create the most advantageous (for structural and aesthetic reasons) forms of melon elements.

The introduction of new public areas is associated with the island development in the center of the reservoir as the park's architectural dominant. This area has difficulties with reference to the relief and quality of the foundations soil (from geodetic input data). Strengthening the soil in the necessary areas of this site increases the project cost, but this plays a key role in unloading the park territory and simplifies the visitors' movement through the park by constructing new transport and pedestrian interchanges.

The central object of the island is Yu.A. Gagarin monument. This object is located on a round cantilever monolithic platform, which rests on an annular base, gives the image a floating feeling and supports a given futuristic theme. The paths are provided with cascade steps and accompanying ramps for people with limited mobility. The monument itself is made of tubular metal structures on bolted joints. The monument image was also developed, using an algorithm in the "GRASSHOPPER" plugin. Proportions of the rocket parts and the radii of the illuminating rings with the pitch of tubular steel posts were determined.

The second most important of the projected public spaces, but at the same time an important object is the art space "Time to conquer the stars". This space is detached from the main public area of the island, because its functionality is aimed at interacting with young people. You can get to this place through the main paths along the cascading stairs. The constructive scheme of this environment is a tribune with a MAF. Boards of a reduced grade are mounted in a parametric way to the back wall of the ring-tribune, to make the material natural and save. They also have their own functionality - exploitation by the young generation of "graffiti" (topic: "Space exploration"). This allows you to attract and familiarize young people with history, develop interest and rethink in a modern way. The central object is a sym-

bolic exposition, based on the poster of V.P. Viktorova "Our triumph in space is a hymn to the country of the Soviets!", composed of perforated curved sheets and a sea stack stretched on a supporting triangular frame with plastic mounting panels. The sheets, perforated in a parametric way, due to their curvature, choosing different angles, add dynamics to the illustrated illustration. Also on a stretched sea net, panels are attached to the nodes, which are set in motion under the influence of external factors. We managed to revive this art object with such techniques, but it also does not interrupt the natural green environment due to the translucency of perforated and structural materials. Another advantage of this object is the shadow from the wedding of the triangular frame. There is a dial at the base of the art object. In the summer, it is possible to feel the passage of time. This principle is based on the "sundial". That is why this zone is called "Time to conquer the stars."

"Time to conquer the stars."

The lack of evenly distributed public areas in the park prompted the creation of gazebos. The main idea is the ability season changing, to fold these gazebos into a horizontal plane and to carry out various leisure activities (ice slides, towns, sculptures, etc.) in their place. The gazebo can be installed to the trunk of a tree, because there is an open atrium in the center. Also, the atrium can act as a chimney for a fireplace. The object consists of a metal frame with a stretched awning. The awning is fireproof, and also protects the fireplace from external influences of the wind, which prevents the spread of fire.

An important problem is the fragmentation (for aesthetic reasons) of commercial pavilions in the park. Commercial pavilions with matching stylistic focus were developed, using the same technology as public gazebos. The idea is the same - the ability to quickly convert from a horizontal plane to a volume. The same metal frame with a stretched awning copes well with this problem. In the pavilion, the tent itself is the supporting element. The awning is held in tension, due to counterweights installed along the edges of the frame, and it feels like the structure is frozen weightlessly in the air. There is a place for placing a counter and storing goods.

It was found that the older generation needs a quiet rest and feels a lack of such places, based on a survey of visitors. The most suitable territories for such places were identified, based on the introductory the park’s map of the

functional zones neighborhood, taking into account the renewal of the territory. So, a typological model of this zone was developed using parameterization. Parametric modeling played an important role here. In order to optimize binding to the diameter and location of tree trunks, a parameter was collected that also made it possible to automatically model the developed typological models, based on walking distance and optimal private (for privacy) distances. These models consisted of a canopy that was mounted to the tree trunk and a hexagonal wooden seat. The awning canopy was provided with the possibility of folding it towered the center of the trunk, if the visitor did not want to sit in the shade or there were high snow loads. Architecturally, this model resembles an alien phenomenon of nature, united with an earthly tree trunk.

In this study and concept development, calculations were performed to generate a stable and dispersed load on a given park area. Solutions are proposed to reduce the conflict of different age groups' interests. A new "identity" and architectural design of the territory was introduced, corresponding to the theme of the park. The prospects for the park development at different times of the year are revealed, thanks to folding tent structures and zoning, which is supported by an analysis of the territory. The wishes and interests of citizens are taken into account. The park nature has been preserved and improved to the maximum. The possibilities of solving the territory contamination issues were demonstrated. Problematic areas (with large elevation differences) were considered and reequipped for the use of PWDs.

In the long term, it is planned to develop a parametric system that will help at a more automated level, based on the basic design standards, to zone and analyze such territories in a more optimized manner, taking this project as a basis, namely, the methods and approaches to the design of this territory. Also, the typological models developed will be further refined from the functional, production-technical, and climatic side more extensively.

Bibliographic list

1. SP 384.1325800.2018 Constructions construction awning Design rules: set of rules: approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation of August 13, 2018 N 516 / pr and entered into force from February 14, 2019-2019. - 45 p.

2. Ketova E.V., Burilo N.A. influence of environmental factors on the formation of coastal zones in Siberian urbanized territories. MaTEC web of conferences. International scientific conference SPbWOSCE2017 "Business Technologies for sustainable urban development", 2018, Volume 170, p. 6. DOI: 10.1051 / matecconf / 201817004010

3. City and landscape (problems, constructive problems and solutions) - V. V. Vladimirov, E. M. Mikulina, Z. N. Yargina-1986-240 p.

4. Engineering improvement of urban areas-V. E. Bakutis, V. A. Butyagin, L. B. Lunts-1970 - 227 p.

5. Maleeva T V 2015, The Formation of Factors and Conditions for the Sustainable Development of a Large City Based on the Effective Use of Land Resources: Abstract of the dissertation, [Place of defense: St. Petersburg State University of Economics and Engineering], St. Petersburg, p 38

6. Tender documentation (initial data on the project https://disk.yandex.ru/d/LV8RylO8s2oEQQ?w=1.

СОДЕРЖАНИЕ

Андросова Н.Б., Заев А.В.
Учет длительного напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов по наклонному сечению 5

Бараева Л.Р., Юсупова А.А., Медведева Г.А.
Переработка шлама химводоочистки и попутной серы 10

Барковская С.В.
Связь практики и технологических дисциплин бакалавриата профиля «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» 17

Барковская С.В., Пчельникова В.А.
Влияние поверхностно-активных веществ на физико-механические свойства строительного гипса..... 19

Батырев К.Г.
Щебеночно-мастичный асфальтобетон в дорожном строительстве ... 22

Батырев К.К.
Нанокомпозитные полимеры в дорожном строительстве 26

Белов В.В.
Оптимизация влажности сырьевой смеси в технологии прессованных керамических изделий 28

Бордокина Е.А.
Технология и экологические проблемы строительных материалов 38

В.К. Иноземцев, В.И. Редков
Общая устойчивость жесткого сооружения с высоко расположенным центром сил тяжести 40

Валеев Г. В., Чигинский Д. С.
К задаче о наполнении
информационных моделей обследуемых зданий
и сооружений данными о дефектах строительных конструкций 45

Гараников В.В.
Экспериментальное исследование
ползучести конструкционных материалов
при циклическом изменении напряжений и деформаций 48

Гасанов Ш.Г., Рустамханлы Дж.С.
Решение задачи оптимизации несущей
способности безбалочных перекрытий 54

Голубева А.С., Прохорова А.В., Сычева Т.Н.
Проблемы согласованности
проекных решений и готовых строительных объектов 57

Горбачева О.А.
К расчету пластин полигонального очертания в плане 61

Гриднев С.Ю., Подлесных И.С.
Особенности напряженно-деформируемого состояния
пролетного строения при учете изменяющегося во времени
динамического воздействия солнечной радиации 67

Гриднев С.Ю., Прокшиц Е.Е., Сотникова О.А.
Топологическая оптимизация как способ рационального
проектирования строительных конструкций 69

Гриднев С.Ю., Раводин И.В.
Выбор и обоснование
конечно-элементной модели движущейся нагрузки 74

Золотов Н.В., Теличко В.Г., Трещев А.А.
Моделирование железобетонных каркасов сооружений на
многослойном анизотропном упругом основании с учетом
разносопротивляемости и разрушения 78

Козырева Л.В., Балакшин А.В.
Примененние полимерных и композитных материалов
в строительстве пешеходных мостов 84

Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко И.Н., Матченко Н.М.
К вопросу оценки состояния подъемно-поворотного стенда
машины непрерывного литья заготовок 88

Кузнецова В.О.
Анализ воздействия коррозионной водородной среды на НДС
круговой цилиндрической оболочки из титанового сплава 91

Куриен Н.С., Теличко В.Г.
К расчету железобетонных сооружений
на динамические взрывные воздействия 99

Лукашов А.П. Барченкова Н.А.
Расчетный анализ плитно-балочного железобетонного
предварительно напряженного пролетного строения
длиной 18 м при пропуске современных временных нагрузок 107

Маунг Маунг Вин Аунг, Валиев Ш.Н.
Влияние длительных деформаций бетона
на поведение вантового моста в Мьянме 110

Мир-Салим-заде М.В.
Повышение несущей способности стрингерной пластины 114

Петровичев Е.Е., Чигинский Д.С.
Использование программного комплекса
ANSYS MECHANICAL для численного моделирования
задач термоупругости 117

Поддубный А.А., Гордон В.А.
Проектирование малогоборитного
сборно-разборного мостового пролета 121

Полякова А.В.
Типовые ошибки при выполнении работ
по утеплению скатной кровли на основе теплоизоляционного
материала пеноплэкс и пенополистирола 126

Прохорова А.В., Сычева Т.Н.
Проблемы и задачи при обследовании
и усилении строительных конструкций из дерева 129

Пугачёв М.А., Делягин М.Ю.
Графический анализ результатов
ветрового аэродинамического расчета
комплекса высотных зданий с учетом окружающей застройки 133

Пугачёв М.А., Делягин М.Ю.
Математическое моделирование ветровой аэродинамики 141

Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Нармания Б.Е.
Влияние кольматации
на массообменные процессы в бетоне при жидкостной коррозии 151

Рябов Г.Г., Изотов Е.А.
Композиционная самоуплотняющаяся сырьевая смесь
для изготовления гидротехнических свай 155

Рябов Г.Г., Стенякин А.Н.
Композиционно-сырьевая смесь
для изготовления дорожных изделий из фибробетона 160

Сельдюшов А.А.
Анализ преимуществ и недостатков BIM
моделирования зданий и сооружений 165

Сергеева С.Б., Трещев А.А.
Оценка процесса наводороживания и температурного поля
на напряженно- деформированное состояние диска вращения 167

Синева Н.Ф.
Проблемы образования в условиях переходак информационному моделированию жизненного цикла строительного объекта 171

Тамразян А.Г., Черник В. И.
Анализ результатов экспериментального определения сейсмических характеристик железобетонных колонн после пожара..... 177

Трещев А.А., Ерофеев В.Т., Ерастов В.В.
Ерастов А.В., Бобрышев А.А., Шафигуллин Л.Н.
Деформирование гибкой пластины из материала, приобретающего нелинейные свойства под воздействием агрессивной среды 184

Трещев А.А., Бесстрашнов Д.О.
Модель деформирования слоистого анизотропного основания с учетом зависимости его механических свойств от вида напряженного состояния..... 193

Трещев А.А., Дорошенко Д.И.
Модель влияния температурного перепада при нагружении круговой цилиндрической оболочки с учетом двух видов анизотропии..... 199

Трещев А.А., Захарова И.А., Сергеева С.Б., Судакова И.А.
Учет анизотропии композитных материалов в составе слоистых дорожных одежд..... 207

Трещев А.А., Сосновцева П.Е.
О концентрации напряжений в пластине с отверстием из материала с анизотропией двух видов 212

Турков А.В., Ильхаев И.И.
Прогибы и частоты собственных колебаний составных двухслойных прямоугольных пластин с различным опиранием по контуру..... 221

Удербаев С.С., Жанатулы С.
Математическое планирование
оптимального состава цементно-зольного вяжущего 226

Черняев А.А.
Моделирование геометрического контура обтекаемых сечений 230

Чигинский Д. С.
О подходе к актуализации дисциплины
«Реконструкция зданий, сооружений и застройки»
на основе применения BIM-технологий 232

Burilo N.A., Makarikhina I.M., Kapkaikin V.Yu.,
Logachev Ye.S., Kalpakova Yu.A.
Principles of comfortable urban environment designing,
taking into account the needs of people with disabilities..... 235

Научное издание

Сборник материалов XXII Международной
научно-технической конференции
«Актуальные проблемы строительства
и строительной индустрии»
(28-29 июня 2021 г.)

Авторское редактирование

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 22.07.21

Формат бумаги 70×100 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная

Усл. печ. л 20,15

Тираж 100 экз. Заказ 103

Тульский государственный университет

300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95