

Министерство образования Республики Беларусь
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Полоцкий государственный университет)

УДК 001.891.573

№ госрегистрации 20190185

Инв № _____

Проректор по научной работе
к.т.н., доцент

_____ Ю.П. Голубев
« ____ » _____ 2020г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
«Разработка интегрированной системы нелинейного вероятностного
моделирования и прогнозирования надежности строительных
конструкций»
(заключительный)

Задание 3.1.26 государственной программы научных исследований
«Информатика, космос и безопасность» подпрограмма «Научное
обеспечение безопасности человека, общества государства»
на 2018-2020гг.

Начальник ОСНИ

_____ Т.В. Гончарова
« ____ » _____ 2020г.

Научный руководитель
к.т.н., доцент

_____ Д.О. Глухов
« ____ » _____ 2020г.

Новополоцк 2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель,
к.т.н., доцент _____ «__» ____ 20__ г. Д.О. Глухов
(Главы 1-4)

Ответственный
исполнитель,
старший преподаватель _____ «__» ____ 20__ г. Т.М. Глухова
(Глава 3)

Научный сотрудник,
к.т.н., доцент _____ «__» ____ 20__ г. Е.Д. Лазовский
(Глава 1, п.1.6)

Научный сотрудник _____ «__» ____ 20__ г. А.М. Хаткевич
(Глава 1, п.1.5)

Нормоконтролер _____ «__» ____ 20__ г. Л.В. Ищенко

РЕФЕРАТ

Отчет 105 с., 43 рис., 2 табл., 101 источников

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, НАДЕЖНОСТЬ, ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, МАТРИЦА ЖЕСТКОСТИ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Объект исследования или разработки: вероятностная модель строительной конструкции.

Цель работы – математическое, алгоритмическое и программное обеспечение нелинейного вероятностного моделирования и прогнозирования надежности строительных конструкций.

При проведении исследований использовались следующие методы и методологии: теории вероятности и математической статистики; вычислительной математики; численных методов; нечеткой логики.

В результате исследований разработаны новые алгоритмы для вероятностного моделирования строительных конструкций и отдельных ее элементов, учитывающие нелинейные свойства материалов, реологические процессы и процессы деградации свойств, а также вероятностный характер нагрузок и воздействий.

Результаты НИР реализованы в рамках программного комплекса R-Beta 5.0, применяющегося для оценки надежности зданий и сооружений в деятельности проектных организаций Республики Беларусь. Результаты НИР используются на кафедре строительных конструкций УО «Полоцкий государственный университет» при чтении лекций, проведении лабораторных работ, при выполнении дипломных проектов и при проведении научно-исследовательской работы студентов, магистрантов и аспирантов специальности «Промышленное и гражданское строительство».

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	7
1.1 Вероятностные модели в европейских нормах.....	7
1.2 Моделирование случайной величины по результатам детального обследования технического состояния строительных конструкций.....	7
1.3 Алгоритм вероятностной оценки надежности пространственных железобетонных конструкций	8
1.4 Способ представления интегральных характеристик железобетонных элементов нечеткой продукционной системой	13
1.5 Методика расчета сопротивления сжатию коротких армокаменных элементов с учетом физической нелинейности их материалов	17
1.5.1 Распределение относительных деформаций в поперечных сечениях элементов из каменной кладки.....	18
1.5.2 Диаграммы деформирования каменной и армокаменной с поперечным армированием в горизонтальных швах кладки	18
1.5.3 Диаграммы деформирования арматуры	24
1.5.4 Методика расчета сопротивления сжатию коротких армокаменных элементов с учетом физической нелинейности их материалов	25
1.6 Процессы деградации материалов строительных конструкций ...	32
1.6.1 Учет реологических свойств бетона	32
1.6.2 Моделирование предельного коэффициента ползучести с использованием нечеткого логического аппроксиматора	34
1.6.3 Моделирование повреждения конструкций коррозией.....	38
1.6.4 Моделирование воздействия агрессивных сред	39
Выводы к главе 1.....	41
ГЛАВА 2 ГЕНЕРАТОРЫ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И НАГРУЗОК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	42
2.1 Генератор нормально распределенной случайной величины	42
2.2 Генератор логарифмически нормально распределенной случайной величины	43

2.3 Генератор случайной величины с гамма-распределением плотности вероятности	45
2.4 Нагрузки и воздействия на строительные конструкции.....	48
2.5 Теоретические распределения для моделирования нагрузок	49
2.6 Генератор случайной величины распределения Вейбулла	50
2.7 Генератор случайной величины распределения Гумбеля	54
2.8 Контроль качества полученных генераторов псевдослучайных последовательностей	54
Выводы к главе 2.....	56
ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	57
3.1 Учет физической и геометрической нелинейности в конечно-элементных моделях пространственных конструкций.....	57
3.2 Реализация конечно-элементной модели	64
3.3 Вероятностное моделирование нагрузки	71
3.4 Представление разреженных матриц с использованием ассоциативных контейнеров c++ библиотеки stl.....	75
Выводы к главе 3.....	84
ГЛАВА 4 КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ВИДЕОМОНИТОРИНГА ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ	86
Выводы к главе 4.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	98

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов. Изд. 5-е, перераб. и доп. — М.: «Высшая школа», 1977. — 479с.
2. Тур В.В., Пецольд Т.М., Малыха В.В., Марковский Д.М. Многоуровневая система оценки надежности железобетонных конструкций эксплуатируемых и реконструируемых зданий и сооружений // Строительная наука и техника. — 2007. — № 4. — С. 4–19.
3. Казачек В. Г. Проблемы обеспечения надежности железобетонных конструкций при проектировании, обследовании и эксплуатации зданий и сооружений // Строительная наука и техника. — 2007. — № 6. — С. 28—38
4. Чугунков И.В. Система оценки качества (СОК) генераторов псевдослучайных последовательностей / ProblemLab, 17.12.2007 // http://problemlab.ru/p_pub_cok/print/
5. Кнут Д. Искусство программирования. — том 2 / Получисленные алгоритмы, 3-е изд.: Пер. с англ.: Уч. пос. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2000. — 832 с.
6. Marsaglia George Xorshift RNGs / Journal Statistical Software. — 8, Issue 14, 2003.
7. Marsaglia G. DIEHARD Statistical Tests. - <http://stat.fsu.edu/~geo/diehard.html>
8. Gustafson H., Dawson E., Nielsen L., Caelli W. A computer package for measuring strength of encryption algorithms / Journal of Computers & Security. — Vol. 13, №8, 1994
9. <http://www.cyberguru.ru/cpp-sources/algorithms/vytchislenie-gamma-funksii-i-beta-funksii.html>.
10. Линец Г.И., Турлянский Я.В., Калаханов Р.Х. Моделирование законов распределения случайных величин, используемых при проектировании телекоммуникационных сетей / Материалы XI региональной научно-технической конференции «Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону». — Том первый. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. Ставрополь: СевКавГТУ, 2007. — 278 с.
11. S.Gran A Course in Ocean Engineering / Article 4.7 – FATIGUE: Пер. с англ. Панов О.Г. — <http://www.dnv.no/ocean/course.htm>.
12. Гошко С.В. Генерация случайных чисел <http://vx.netlux.org/lib/vsl04.html>, 2005
13. Darmawan M.S. and Stewart M.G. Effect of pitting corrosion on capacity of prestressing wires / Magazine of Concrete Research, 2007, 59, No. 2. — P.131-139.

14. Atadero R.A., Karbhari V.M. Probabilistic Based Design for FRP Strengthening of Reinforced Concrete / SP-230-42: Department of Structural Engineering at the University of California, San Diego. – P.723-742
15. M. Matsumoto, T. Nishimura (2017). “Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator”. ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations. 8 (1): 3-30pp.
16. EN 1990 Eurocode - Basis of structural design. CEN 2002.
17. ISO 2394 General principles on reliability for structures, ISO 1998.
18. CEN, “ENV 1993-1-1: Eurocode 3 Tiel 1-1: Annex Z - Determination of design resistance from tests”, European Committee for Standardisation, Brussels, 1993.
19. Ton Vrouwenvelder Reliability Based Code calibration The use of the JCSS Probabilistic Model Code / Joint Committee of Structural Safety Workshop on Code Calibration, March 21/22, Zurich
20. Арутюнян, Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести / Н. Х. Арутюнян. – М. : Гостехиздат, 1952. – 323 с.
21. Glanwill W.H. Creep of concrete under Load. The Structural Engineering, London, 1933, № 2.
22. Расчёт железобетонных каркасов с учётом истории возведения и нагружения: моногр. / О.Б. Завьялова, А.И. Шеин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 120 с.
23. Бородай Д. И. Оценка долговечности железобетонных элементов мостов на стадии проектирования с учетом воздействия агрессивной среды и напряженно деформированного состояния / Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. Сучасні будівельні матеріали Випуск 2010_1(81)
24. Герсеванов Н. М., Основы номографии, 2 изд., М. — Л., 1932
25. Глаголев Н. А., Теоретические основы номографии, 2 изд., М. — Л., 1936
26. Волошинов, В.А., Волошинов, Д.В. Новые инструментальные средства геометрического моделирования для решения научно-технических задач. Науч.-техн. ведомости СПбГТУ. №3(5). СПб.: СПбГТУ, 1996. С.41.
27. Design Aids For Reinforced Concrete to IS: 456-1978. – Bureau of Indian standards. – Bahadur Shah Zafar Marg: New Dlehi, 12-th reprint 2000
28. V. Trofimov, A. Gloukhov, D. Gloukhov Algorithm of ecological monitoring by fuzzy production rules / 2-nd International Conference Ecology and Society's Development Abstracts.- St.P.: МАНЭБ, 1997.- p.166.
29. Dmitry O. Glukhov Dynamic expert system by fuzzy inference rules to automations an examination of complex objects / Budownictwo i Inzynieria Srodowiska. – Zielonogorsk: Politechnika Zielonogorska, 1998. – ISBN 83-85911-60-X. – P.105-109.
30. Бенин А. В. Конечно-элементное моделирование процессов разрушения и оценка ресурса элементов автодорожного моста с учётом коррозионных повреждений / Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №. 7. – С. 33-42

31. Бородай, Д. И. Прогноз долговечности проектируемых железобетонных мостов : дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / Бородай Денис Игоревич. — Макеевка, 2013
32. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
33. ТКП EN 1991-1-1-2016 (33020) (EN 1991-1-1:2002+AC:2009). Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-1. Общие воздействия. Объемный вес, собственный вес, функциональные нагрузки для зданий. - Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь: Стройтехнорм: Бизнесофсет, 2016. - VII, 38с.
34. ТКП EN 1991-1-3-2009 / НПП РУП «Стройтехнорм». – Минск, 2009. – Ч. 1 – 3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки
35. ТКП EN 1991-1-4-2009 / НПП РУП «Стройтехнорм». – Минск, 2009. – Ч. 1-4. Общие воздействия. Ветровые нагрузки
36. ТКП EN 1991-1-5-2009 / НПП РУП «Стройтехнорм». – Минск, 2009. – Ч. 1-5. Общие воздействия. Температурные нагрузки
37. Haldar, A., and Mahadevan, S. (2000) Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design, Wiley, New York.
38. Cornell C. A. Bounds on the Reliability of Structural Systems / C. A. Cornell // American Society of Civil Engineers : Journal of the Structural Division ASCE. – February, 1967. – Vol. 93, No. ST. – P. 171–200.
39. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
40. Rackwitz, R., and Fiessler, B. Structural Reliability under Combined Random Load Sequences / Computers and Structures, 9. – 1978. – P.489-494
41. Глухов, Д. О. Разделение смеси гауссовых распределений при оценке надежности железобетонных элементов / Д. О. Глухов, Т. М. Глухова // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XXI Международного научно-методического семинара, Брест, 25–26 октября 2018 года : в 2 частях / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Строительный факультет ; редкол.: В. В. Тур [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. – Часть 1. – С. 119–124.
42. Driankov, D. An introduction to fuzzy control / D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank. – Springer-verlag, 1993.
43. Zadeh, Lotfi A. Fuzzy Sets / Lotfi A. Zadeh // Information & Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338 – 353.
44. Общий случай расчета прочности элементов по нормальным сечениям / В. Н. Байков [и др.] // Бетон и железобетон. – 1987. – № 5. – С. 16–18.
45. Дыховичный, А. А. Статически неопределимые железобетонные конструкции / А. А. Дыховичный. – Киев : Будівельник, 1978. – 107 с. К7)

46. Немировский, Я. М. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над трещиной и пересмотр на этой основе теории расчета деформаций и раскрытия трещин / Я. М. Немировский // Прочность и жесткость железобетонных конструкций : сб. ст. – М., 1968. – С. 47–54.
47. Бондаренко, В. М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В. М. Бондаренко, С. В. Бондаренко. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
48. Пильдиш, М. Я. Каменные и армокаменные конструкции зданий / М. Я. Пильдиш, С. В. Поляков. – 2-е изд. – М. : Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1955. – 400 с.
49. Каменные и армокаменные конструкции. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-5.03-308-2017 (33020). – Введ. 01.01.2018. – Минск : Минстройархитектуры, 2017. – 112 с.
50. Онищик, Л. И. Особенности работы каменных конструкций под нагрузкой в стадии разрушения / Л. И. Онищик // Исследования по каменным конструкциям : сб. ст. / М-во стр-ва предприятий тяжелой индустрии СССР.
51. Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81). – 1989. – Утв. 15.08.1985. – М. : (ЦИТП) Госстроя СССР, 1989. – С. 149.
52. Kaushik, Hemant B. Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression / Hemant B. Kaushik, Durgesh C. Rai, Sudhir K. Jain // Journal of materials in civil engineering, ASCE. – 2007. – VOL. 19, September. – P.728–739.
53. Kaushik, Hemant B. Uniaxial compressive stress–strain model for clay brick masonry / Hemant B. Kaushik, Durgesh C. Rai, Sudhir K. Jain // CURRENT SCIENCE. – 2007. – Vol. 92, № 4. – P. 497–501.
54. Яременко, Е. А. Диаграммы деформирования бетона и каменной кладки / Е. А. Яременко, Н. А. Яременко // Вестн. Одес. гос. акад. строительства и архитектуры – 2016. – № 2016. – № 63. – С. 103–109. (95)
55. Costigan, A. An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression / A. Costigan, S. Pavia, O. Kinnane // Journal of Building Engineering. – 2015. – № 4 – P. 283–294. (93)
56. Кашеварова, Г. Г. Натурные и численные эксперименты, направленные на построение зависимости напряжения от деформации кирпичной кладки / Г. Г. Кашеварова, М. Л. Иванов // Приволж. науч. вестн. – 2012. – № 8 (12). – С. 10–15.
57. Иванов, М. Л. Комплексный анализ процессов деформирования и разрушения элементов конструкций зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / М. Л. Иванов ; Ижевский гос. техн. ун-т им. М. Т. Калашникова. – Н. Новгород, 2013. – 24 с.

- 58.Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1 : Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1992-1-1-2009* (0250). – Введ. 10.12.2009. – Минск : Минстройархитектуры, 2015. – 206 с.
- 59.Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций. Часть 1-1 : Общие правила для армированных и неармированных конструкций : ТКП EN 1996-1-1-2016. – Введ. 11.03.2016 (с отменой на территории РБ СТБ EN 1996-1-1-2008). – Минск : Стройтехнорм, 2016. – 109 с.
- 60.Flohrer C. Festigkeits- und Verformungsverhalten von faserbewehrtem Mauerwerk : die Kopie des Abschlußberichtes zum Forschungsarbeit : Schlußbericht zum Forschungsauftrag B II 5 – 800 176-42 / C. Flohrer, H. K. Hilsdorf. – Fraunhofer IRB Verlag : Stuttgart, 2010. – 140 p.
- 61.Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects / Gihad Mohamad [et al.] // Cement & Concrete Composites. – 2007. – № 29. – P. 181–192.
- 62.Stress-Strain behavior of concrete block masonry prism under compression / Mohamad Gihad, Lourenço Paulo Brandão, Roman Humberto Ramos, Barbosa Claudius de Souza et al. // 15th International Brick and Block Masonry Conference [Electronic resource]. – 2012 – Florianópolis, Brazil. – Mode of access: <http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/2012/4C5.pdf>. – Date of access: 13.07.2017.
- 63.Каменные и армокаменные конструкции : СНиП II-22-81* (с изм. №1 и №2 ВУ). – Введ. СССР 01.01.83. – М. : Стройиздат, 2015. – 46 с. Н1
- 64.Каменные и армокаменные конструкции : СНиП II-В.2-71. – Введ. 16.01.1971. – М. : Госстрой СССР. –30 с.
- 65.Аветисян Левон Аветисович Использование шарниров пластичности при расчете зданий на прогрессирующее обрушение в условиях огневых воздействий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-sharnirov-plastichnosti-pri-raschete-zdaniy-na-progressiruyushee-obrushenie-v-usloviyah-ognevyyh-vozdeystviy>.
- 66.UFC 4-023-03 (Including Change 2, June 2013) Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. – 2005-2013.
- 67.Tamrazyan A.G., Avetisjan L.A. Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures Procedia Engineering. № 153 (2016) Vol.721– 725
- 68.Тамразян А. Г. Динамический расчет сжатых железобетонных элементов с учетом огневых воздействий/А. Г. Тамразян, Л. А. Аветисян // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615847. Зарегистрировано в Государственном реестре РФ программ для ЭВМ 26 мая 2015 года.
- 69.Kim, Dae-Jin & Son, Hong-Jun & Yi, Yousun & Hong, Sung-Gul. (2019). Generalized finite element formulation for efficient first-order plastic hinge analysis. Advances in Mechanical Engineering. 11. 168781401983636. 10.1177/1687814019836366.

70. Kheyroddin, Ali & Mortezaei, Alireza. (2008). The effect of element size and plastic hinge characteristics on nonlinear analysis of RC frames. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*. 32. 451-470.
71. Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Лешкевич О.Н. Особенности расчета статически неопределимых железобетонных элементов методом конечных элементов // *Актуальные проблемы расчета зданий, конструкций и их частей: теория и практика: Материалы междунар. науч.-техн. конф.* / Под ред. А.А. Борисевича, С.В. Босакова, Т.М. Пецоляда, Е.М. Сидоровича. – Мн., 2002. – С. 104 – 109.
72. Дыховичный А.А. Статически неопределимые железобетонные конструкции.- Киев: Будівельник, 1978.- 104с.
73. Леонгардт Ф. Предварительно напряженный железобетон/ Пер. с нем. В.Н. Гаранина.- М.:Стройиздат, 1983.-С.169-172.- Перевод изд.:Spannbeton / F. Leonhardt.-Springer- Verlag.-1980.
74. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона.- М.: Стройиздат, 1982.-287 с.
75. Ильин О.Ф., Гвоздев А.А., Семенов П.П. Сопротивление кратковременному действию нагрузки железобетонных элементов произвольной формы из разных бетонов и классов арматуры при простом и косом изгибе и внецентренном сжатии// *Исследование железобетонных конструкций при статических, повторных и динамических воздействиях. Сб. научн. тр. Под ред. С.М. Крылова и И.К. Белоброва.- М., НИИЖБ Госстроя СССР, 1984.-С.3-16.*
76. Гуца Ю.П., Лемьш Л.Л. Расчет деформаций на всех стадиях при кратковременном и длительном нагружениях// *Бетон и железобетон.- 1985.-№11. стр?*
77. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Сапожников М.А. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций.- М.:НИИЖБ,1987. стр?
78. Байков В.Н., Додонов М.И., Расторгуев Б.С. и др. Общий случай расчета прочности элементов по нормальным сечениям. - *Бетон и железобетон.- 1987.-№5.-С.16-18.*
79. Лешкевич О.Н. Прочность, жесткость и трещиностойкость статически неопределимых пространственных стержневых железобетонных конструкций: Дис. ... канд. техн. наук. – Бр., 2003. –126 с.
80. Ильюшин А.А. Пластичность// М.– Л.: Гостехиздат, 1948.– 372с.
81. Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Лешкевич О.Н., Учет физической и геометрической нелинейности в расчете пространственных стержневых конструкций
82. Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Лешкевич О.Н. Программы расчета железобетонных конструкций по проекту СНБ 5.03.01 // *Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных*

- кадров в Республике Беларусь: Сб. трудов VII междунар. науч.-практ. семинара / Под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. – Брест: БГТУ, 2001. – С. 133 – 137.
83. Богоявленский, А.И. Использование форматов хранения разреженных матриц при реализации метода конечных элементов / А.И. Богоявленский // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2017. – № 2. – С. 4–11.
84. Bathe, K.-J. Finite element procedures / K.-J. Bathe. – New Jersey : Prentice Hall, 1995. – 1037 p.
85. Кундас, С.П. Обзор численных методов расчета систем уравнений строительной механики и выбор оптимальной схемы хранения данных для задач большой размерности / С.П. Кундас, Д.О. Глухов, Т.М. Глухова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 6. – С. 79–83.
86. Свириденко, А.Б. Прямые мультипликативные методы для разреженных матриц. Ньютоновские методы / Свириденко А.Б. // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9, № 5. – С. 679–703.
87. Соловьев, С.А. Решение разреженных систем линейных уравнений методом Гаусса с использованием техники аппроксимации матрицами малого ранга / С.А. Соловьев // Вычислительные методы и программирование. – 2014. – Т. 15. – С. 441–460.
88. Отаров, А.О. Решение неустойчивых систем линейных алгебраических уравнений методом дифференциального спуска / А.О. Отаров, Э.П. Уразымбетова, А.А. Отаров // Вестн. Каракалпак. гос. ун-та им. Бердаха. – 2010. – № 3–4 (8–9). – С. 7–15.
89. Есаулов, В.А. Итерационный метод решения систем линейных уравнений с использованием q-градиента [Электронный ресурс] / Есаулов В.А., Д.В. Гринченков, В.А. Мохов // Инженер. вестн. Дона. – 2015. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/iteratsionnyy-metod-resheniya-sistem-lineynyh-uravneniy-s-ispolzovaniem-q-gradienta>
90. Дмитриева, О.А. Оптимизация выполнения матрично-векторных операций при параллельном моделировании динамических процессов / О.А. Дмитриева // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2014. – № 1(26). – С. 94–100.
91. Писсанецки, С. Технология разреженных матриц / С. Писсанецки. – М. : Мир, 1988. – 410 с.
92. High-order unstructured methods for computational aero-acoustics / H. Beriot [et al.]. // Progress in simulation, control and reduction of ventilation noise / VKI. – Sint-Genesius-Rode, 2015.

93. Qi Liang. Fundamental Tests on a Structural Health Monitoring System for Building Structures Using a Single-board Microcontroller / Qi Liang, Akinori Tani, Yuichiro Yamabe // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. – 2015. – Vol. 14, iss. 3 – P. 663–670.
94. Методика сопровождения развития структурных дефектов в цементных системах / Д.Н. Шабанов [и др.] // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки*. – 2018. – № 16. – С. 67–71.
95. Kongshaug, S. Experimental investigation of ASR-affected concrete – The influence of uniaxial loading on the evolution of mechanical properties, expansion and damage indices / S. Kongshaug [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 245.
96. Malekia, M. On the effect of ITZ thickness in meso-scale models of concrete / M. Malekia [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 258.
97. Ahmadi, M. New empirical approach for determining nominal shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams / M. Ahmadi [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 234.
98. Zalegowski, K. Relation between microstructure, technical properties and neutron radiation shielding efficiency of concrete / K. Zalegowski [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 235.
99. Li, P.P. Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete / P.P. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 242.
100. Tesseract: an Open-Source Optical Character Recognition Engine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.linuxjournal.com/article/9676>. – Дата доступа: 13.02.2019.
101. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Издание 3-е, исправл. и доп. – М. : Техносфера, 2012. – 1104 с.