

Моделирование в среде Ansys поведения древесины для оценки ее прочности в реальных конструкциях

*С.А. Еренчинов, А.А. Ефимов, М.В. Кудоманов, А.И. Мартюшева,
Н.Ю. Худышкина*

Тюменский индустриальный университет

Аннотация: В статье представлены результаты численного моделирования работы деревянных конструкций в сравнении с лабораторными и натурными экспериментами. В ходе работы в программном комплексе Ansys Workbench из объемных конечных элементов с вариантным набором физико-механических параметров были созданы численные модели материала, имитирующие поведение реальной древесины. Параметры моделирования были основаны на результатах лабораторных испытаний цельной деревянной балки, результаты моделирования сопоставлены с результатами натуральных испытаний составной деревянной плиты. Моделирование конструкций выполнялось с применением линейной, билинейной и мультилинейной моделей материалов.

Ключевые слова: деревянная балка цельного сечения, составная плита покрытия, билинейная конечно-элементная модель, мультилинейная конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Древесина как материал для несущих строительных конструкций обладает целым рядом важных преимуществ, которые в некоторых случаях обеспечивают древесине определенный приоритет по отношению к классическим конструкционным материалам. К таким преимуществам, например, можно отнести самовозобновляемость древесины, ее доступность и транспортабельность. В [1] в качестве основных факторов, способствующих все большей популярности древесины как строительного материала, рассматривается более высокая по сравнению с другими конструкционными материалами устойчивость к химической агрессии, экологическая безвредность, эстетическая привлекательность, а также впечатляющее отношение прочности к весу. Все эти свойства при надлежащем уходе за существующими природными запасами обеспечивают возможность постоянного активного использования древесины в качестве строительного материала.

Однако при всей совокупности перечисленных сильных сторон древесины как строительного материала не они влияют на решение о выборе древесины, а ее проблемные аспекты [2]. К таковым можно отнести эксплуатационную пригодность и высокую по сравнению с другими конструкционными материалами деформативность. Эксплуатационные проблемы древесины, такие как склонность к гниению и склонность к возгоранию, по мере развития химической промышленности и строительных технологий решаются довольно успешно. Для поисков путей снижения деформативности проводятся многочисленные исследования. Однако сложности в нормировании свойств древесины, связанные с естественным характером ее происхождения, и, как следствие, – с отсутствием возможности надежного прогнозирования ее поведения – до сих пор являются одной из причин, препятствующих широкому использованию древесины в строительных конструкциях.

Для целей проектирования задача определения механических свойств во многом сводится к формированию коэффициентов запаса, которые позволяют исключить многие риски надежности, однако не позволяют полноценно и эффективно использовать ресурс материала в конструкции. Для целей исследования отрабатываются такие математические модели материала, которые при проведении численных экспериментов дают результаты, максимально близкие результатам натуральных экспериментов.

Данное исследование посвящено численному моделированию механических параметров древесины, максимально полно имитирующих ее поведение в реальных конструкциях. Для выбора модели материала, наилучшим образом отражающей поведение материала под нагрузкой было выполнено два этапа работы.

На первом этапе работы в программном комплексе Ansys Workbench была создана модель из объемных конечных элементов для сплошной

деревянной балки. Было рассмотрено три варианта набора физико-механических характеристик. При моделировании объемными конечными элементами использовался КЭ SOLID186 – объемный гексаэдрический квадратичный элемент, имеющий двадцать узлов. По результатам численных испытаний конечно-элементных моделей был выполнен сравнительный анализ полученных результатов с данными лабораторного испытания деревянной балки сплошного сечения из сосны 2-го сорта [3].

На втором этапе работы сравнению подвергались результаты испытаний составной деревянной плиты [4] с результатами численного моделирования в программном комплексе Ansys Workbench. При этом рассматривалось три варианта моделей материала..

Моделирование материала

Численное описание поведения древесины под нагрузкой как конструкционного материала программными комплексами на основе конечно-элементных моделей продолжительный период времени отставало от моделирования поведения таких материалов, как железобетон и, тем более, сталь. Во-первых, до появления возможности индустриального изготовления клееных деревянных конструкций в этом не было особой необходимости – размеры пиломатериалов, а также прочностные и деформативные свойства этого материала, не предполагали его использования для изготовления конструкций значительных размеров и высокой несущей способности. А, во-вторых, наличие природной анизотропии и ползучести затрудняло процесс моделирования. В программных комплексах, локализованных в Российской Федерации и реализующих численные методы, древесина как материал появилась недавно. Однако теоретические обоснования моделирования древесины были сделаны гораздо раньше. Основные принципы конечно-элементного моделирования древесины как конструкционного материала обобщены и представлены в [5].

Данные, приведенные в [6, 7], указывают на то, что моделирование в среде Ansys Workbench материалов, обладающих рядом таких специфических свойств, как анизотропия и ползучесть, позволяет с достаточной степенью точности прогнозировать напряженно-деформированное состояние таких конструкций, приближая результаты прогнозирования к реальным экспериментальным данным.

Работоспособность таких численных моделей подтверждена целым рядом исследований. Например, в [8] представлены результаты численного моделирования цельной деревянной балки в процессе экспериментально-аналитического исследования работы армированных деревянных балок. В процессе исследования выполнено лабораторное испытание и численное моделирование армированной балки, показавшее высокую сходимость с результатами испытания. После чего из численной модели были удалены армирующие элементы и заново выполнен численный эксперимент. Высокая сходимость результатов позволяют считать достоверным выбранный метод численного моделирования деревянных балок.

В данной работе для выбора численной модели материала, наиболее полно имитирующей поведение реальной древесины при работе на изгиб цельной деревянной балки, в ПК Ansys Workbench была создана КЭ модель. Расчет проводился для КЭ модели по трем вариантам модели материала:

– Linear – Линейная модель (L). Данная модель основана на известных результатах испытаний на сжатие вдоль волокон стандартных малых образцов древесины [9]. L-модель использует только линейную часть диаграммы σ - ε , то есть учитывает только линейную стадию работы древесины, которая наблюдается до напряжения, равного 24 МПа.

– Multilinear_Isotropic – Мультилинейная модель (ML). Данная модель также основана на результатах испытаний на сжатие. Однако ML

модель использует не только прямолинейную часть диаграммы σ - ε , но и криволинейную.

– Bilinear_Isotropic – Билинейная модель (BL). Данная модель представляет собой идеальный упругопластический материал. В данном исследовании эта модель была получена упрощением ML модели до двух характерных линейных участков. Первый участок повторяет характер диаграммы σ - ε в упругой стадии – угол наклона примерно равен начальному углу наклона диаграммы ML модели. Переломной точкой диаграммы BL модели является величина напряжения, при которой угол наклона кривой упруго-пластической стадии ML модели приближается к горизонтали. Достигнув этого напряжения, равного 33 МПа, график BL модели получает перелом и становится горизонтальным.

При численном моделировании балки использовался конечный элемент SOLID186. Свойства этого элемента и его назначение подробно описаны в [10].

К настоящему времени накоплен положительный опыт моделирования древесины различными конечными элементами для различных целей. Так, например, в работе [11] приведены результаты численного моделирования деревянных конструкций каркаса лег-кой стеновой панели с помощью конечного элемента Beam188, с последующей верификацией в ходе натурального эксперимента. В работе [12] представлены результаты использования конечного элемента SOLID185 для моделирования узла жесткого стыка слоистых деревянных конструкций. В исследовании, результаты которого приводятся в данной статье, основное внимание уделяется поведению непосредственно древесины, поэтому в качестве конечного элемента выбран 20-узловой элемент.

Моделирование материалов осуществлялось посредством присвоения им определенных физико-механических характеристик. Древесина в целом

задана как ортотропный материал, физико-механические характеристики которого приведены в таблице №1.

Таблица № 1

Параметры моделей древесины (L – ANSYS_Linear,
BL – ANSYS_NL_Bilinear, ML – ANSYS_NL_Multilinear)

Параметры		L	BL	ML
Модуль упругости вдоль волокон	E_x	10000 МПа		
Модуль упругости поперек волокон	E_y E_z	380 МПа		
Коэффициент Пуассона в плоскости XY	ν_{xy}	0,3		
Коэффициент Пуассона в плоскости YZ и XZ	ν_{yz} ν_{xz}	0,018		
Модуль сдвига XY, YZ, XZ	G_{xy} G_{yz}	500 МПа		
Предел прочности на растяжение		15 МПа		
Предел прочности на сжатие		21 МПа		
Предел текучести		-	33 МПа	-
Табулированная зависимость деформаций от напряжений		-	-	см. рис. 1

Для билинейной (BL) и мультилинейной (ML) моделей использовались дополнительные параметры, учитывающие их отличия от линейной модели (L). Для билинейной модели (BL) был использован новый параметр – Предел текучести (Yield Strength), принятый равным 33,0 МПа. Для мультилинейной модели (ML) введена табулированная зависимость деформации от напряжения, основанная на классической диаграмме деформирования древесины при сжатии вдоль волокон σ - ε [9]. Диаграмма представлена на рис. 1.

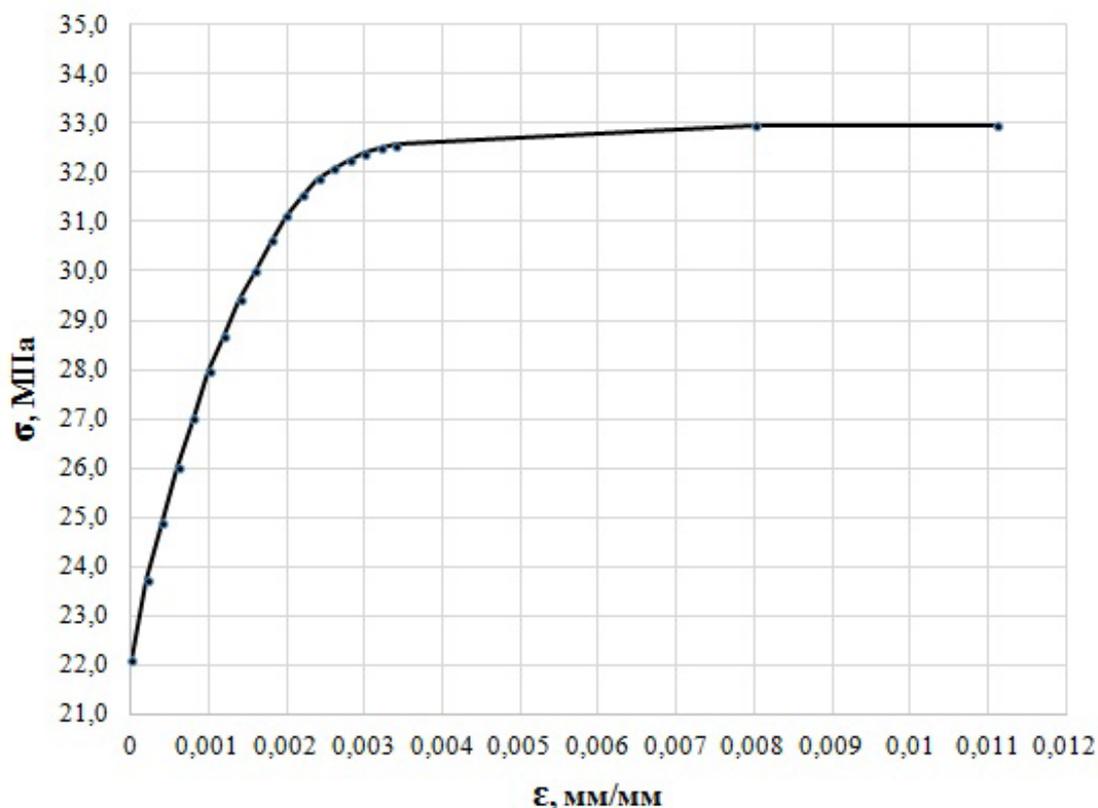


Рис.1. – Диаграмма деформирования древесины при сжатии вдоль волокон

Анализ моделей материала

Для анализа описанных выше моделей материала были использованы результаты лабораторного испытания на изгиб сплошной деревянной балки, которые приведены в [3]. Цель испытания – получение экспериментальных данных о несущей способности и деформативности деревянной балки и о характере ее разрушения.

Расчетная схема испытания в лабораторных условиях – однопролетная балка с шарнирными опорами на расстоянии 1,8 м друг от друга. Схема загрузки – две сосредоточенные силы на расстоянии от опоры равном одной трети пролета. Нагрузка создавалась гидравлическим домкратом через траверсу, имеющую две опоры в третях пролета балки. Балка выполнена из цельного бруса с размерами поперечного сечения 100×100 мм из древесины сосны второго сорта. Испытательный стенд представлен на рис. 2(а).

Нагружение лабораторной модели балки выполнялось ступенями величиной 3,11 кН.

При достижении общей нагрузки на балку 21,77 кН произошла потеря местной устойчивости сжатых верхних продольных волокон балки в зоне чистого изгиба и, как следствие, образовались складки в середине пролета балки. При достижении общей нагрузки на балку 24,89 кН произошло окончательное разрушение с образованием трещин в растянутой зоне балки, имеющих характерную траекторию для растянутой зоны изгибаемых элементов. Момент разрушения балки зафиксирован на рис. 2(б).



Рис.2. – Испытательный стенд лабораторной модели балки (а) и характер ее разрушения (б)

Для анализа описанных выше моделей материала (L, VL и ML) в программном комплексе Ansys Workbench была создана модель цельной деревянной балки из конечных элементов с аналогичными геометрическими размерами и расчетной схемой, как и для балки, испытываемой в лабораторных условиях (см. рис. 3).

С точки зрения статической работы это – шарнирная балка на двух опорах. В ПК Ansys Workbench для шарнирно-подвижной опоры деревянной балки подходят типы контактного соединения Frictionless, а для шарнирно-неподвижной – Rough соответственно [13].

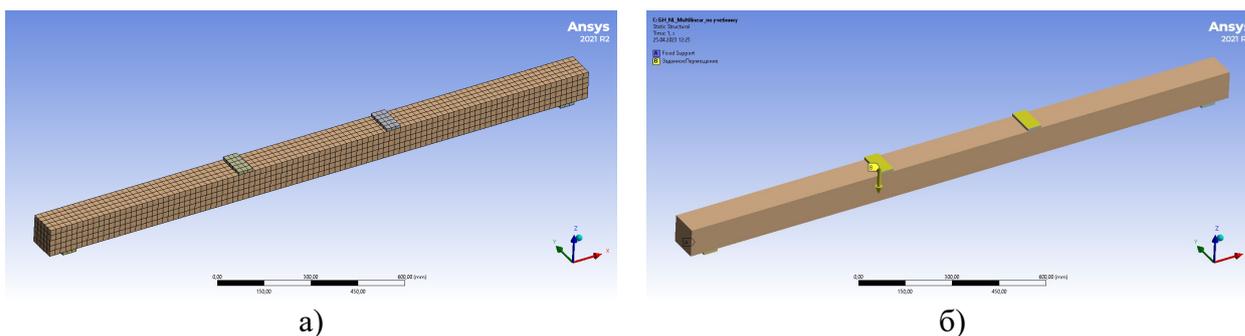


Рис.3. – Конечно-элементная модель (а) и расчетная схема (б) цельной деревянной балки

Нагружение КЭ моделей балки выполнялось ступенями, посредством задания определенной величины перемещения. Величина нагрузки при этом определялась как величина опорной реакции модели в точке приложения нагрузки. Перемещение на каждой ступени нагружения было принято в соответствии с полученными экспериментальными данными, приведенными в таблице №2.

Таблица №2

Экспериментальные данные о величинах перемещений балки на отдельных ступенях нагружения

№ ступени	1	2	3	4	5	6	7	8
Задаваемое перемещение, мм	-3,19	-6,99	-10,12	-13,68	-17,28	-21,12	-26,2	-38,95

Результаты численных испытаний конечно-элементной модели деревянной балки по нормальным напряжениям и деформациям для всех трех вариантов моделей материала представлены в таблице №3.

По результатам испытаний балки в лаборатории и численного моделирования методом конечных элементов построены графики зависимости прогибов от нагрузки, представленные на рисунке №4.

Таблица №3.

Результаты испытаний КЭ модели балки по трем вариантам моделей материала

Вариант модели	Деформированная схема	Распределение нормальных напряжений
L	Максимальный прогиб – 43,0 мм	$\sigma_{\max} = 58,5$ МПа
BL	Максимальный прогиб – 43,6 мм	$\sigma_{\max} = 35,6$ МПа
ML	Максимальный прогиб – 43,8 мм	$\sigma_{\max} = 32,3$ МПа

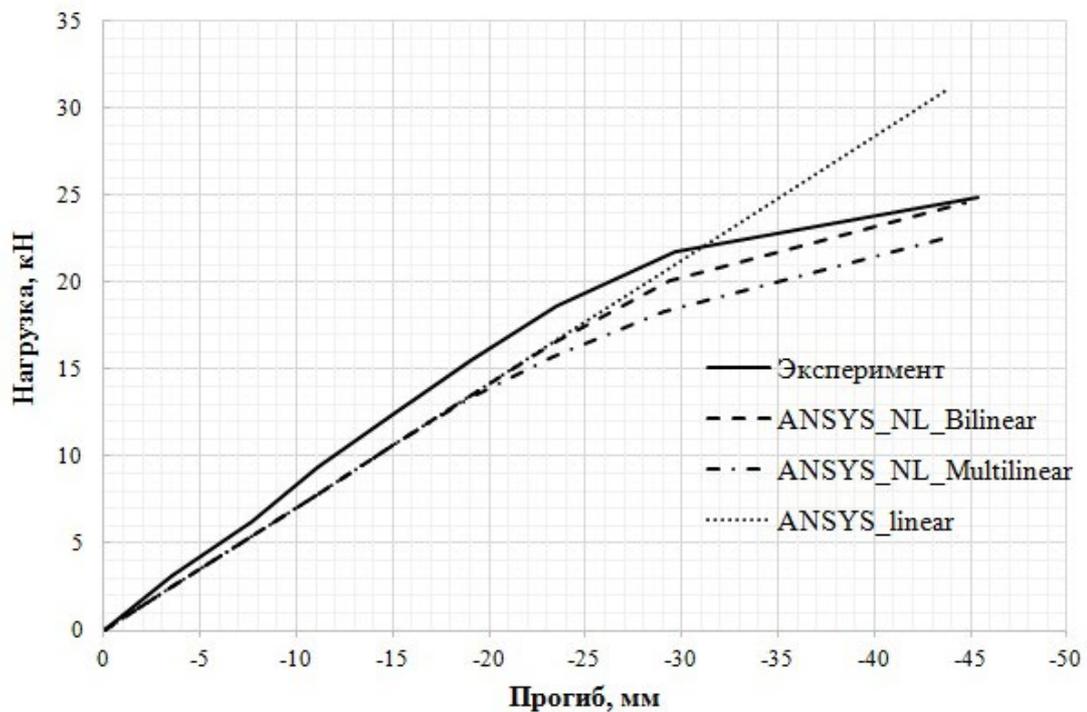


Рис.4. – Графики зависимости деформаций от нагрузки для лабораторной (Эксперимент) и КЭ моделей балки (L – AN-SYS_Linear, BL – ANSYS_NL_Bilinear, ML – ANSYS_NL_Multilinear)

Сравнение графиков позволяет сделать следующие выводы:

- Угол наклона графика деформирования лабораторной модели больше угла наклона аналогичных графиков КЭ моделей. Данный факт можно объяснить тем, что реальный модуль упругости древесины при

кратковременной нагрузке выше нормируемого и принятого в качестве параметра КЭ моделей.

– Графики деформирования VL и ML модели по очертанию совпадают с графиком деформирования лабораторной модели, при этом VL модель показывает меньшие прогибы по сравнению с ML моделью.

– При величине нагрузки, близкой к предельной (25 кН), график деформирования VL модели пересекается с графиком деформирования лабораторной модели. Это означает, что поведение материала по VL модели в упругопластической стадии перестает соответствовать поведению материала в реальной конструкции.

Натурный эксперимент

К перечисленным ранее преимуществам древесины следует добавить свойства, позволяющие использовать древесину в качестве материала для строительных конструкций, эксплуатируемых в особых условиях. В частности, в [14, 15] исследуется положительный опыт использования клееной древесины в конструкциях высотных зданий, эксплуатируемых в сейсмоопасных районах.

Возможность, эффективность, а в некоторых случаях приоритет использования древесины как материала для несущих конструкций, служащих основанием или являющихся составной частью фундаментов, обоснованы в [16]. К таким случаям относится строительство в условиях многолетней мерзлоты, сложность логистики или полное ее отсутствие. Являясь достаточно доступным, возобновляемым и транспортабельным материалом, древесина позволяет решить проблемы устройства фундаментов в условиях многолетнемерзлых грунтов, а также решить транспортные вопросы поставки грузов на вновь осваиваемые территории.

Эффективным вариантом временного решения проблем доставки грузов на вновь осваиваемых территориях со сложными инженерно-геологическими условиями может быть применение плит мобильных дорожных покрытий. Однако не на все виды плит таких покрытий разработана нормативно-техническая документация. Весь процесс создания таких изделий, включающий вопросы проектирования, производства, монтажа и контроля качества некоторых плит мобильных дорожных покрытий, осуществляется или с использованием разработанных производителями технических условий, или на основе натуральных экспериментов по испытанию таких конструкций.

Необходимость проведения натуральных экспериментов по испытанию плит мобильных дорожных покрытий указанного вида вызвана исследованием их напряженно-деформированного состояния в зависимости от величины нагрузки и выявления фактической несущей способности.

В [4] приведены основные результаты и выводы по натурным испытаниям плит мобильных дорожных покрытий нагружением с целью получения данных о несущей способности и деформативности этих конструкций.

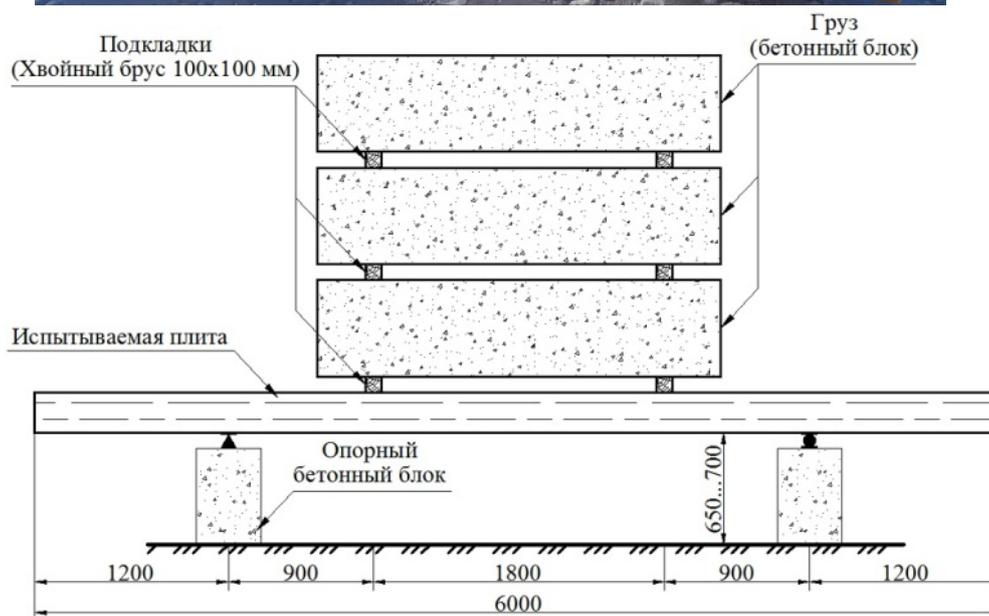
Конструкция, подвергающаяся испытанию, представляет собой трехслойную плиту из взаимно перпендикулярных смежных слоев деревянных досок, каждая поперечным сечением 50×150 мм, уложенных с зазором 50 мм. Длина плиты составляет 6,0 м, ширина – 2,0 м, высота сечения – 0,15 м. Соединение досок выполнено на болтах класса прочности 5.8 диаметром 10 мм. Общий вид плиты и схема натурального эксперимента по испытанию нагружением представлены на рис. 5.

В целом конструкция представляет собой один из вариантов плиты с перекрестным расположением слоев, одним из важных преимуществ такого варианта (особенно для использования в качестве дородных плит) является

сглаживание природной анизотропии древесины за счет перпендикулярного направления волокон в соседних слоях такой конструкции [17].



а)



б)

Рис.5. – Конструкция составной деревянной плиты (а)
и схема натурального испытания (б)

Поведение древесных плит с перекрестным расположением слоев, выявление факторов, существенно влияющих на повышение несущей способности и снижение деформативности таких конструкций к настоящему времени достаточно широко исследовано [18-22]. В основном принципы

конечно-элементного моделирования плит с перекрестным расположением слоев основываются на исследованиях [23]. Есть исследования, посвященные способам учета влияния податливых связей в конечно-элементных моделях плит, способствующих повышению жесткости таких конструкций [24]. Много исследований посвящено изучению влияния на работу плит нагрузений различного характера [25-26].

В данной работе при проведении эксперимента нагрузки на плиту прикладывались ступенями величиной по 20 кН. Период времени на каждой ступени нагружения, в течении которого плита выдерживалась под нагрузкой, составлял не менее 10 мин, на последней стадии нагружения при полной контрольной нагрузке – не менее 30 мин. Величина контрольной нагрузки была определена из условия прочности по максимальным нормальным напряжениям в продольных волокнах наружных слоев досок.

Деформация экспериментальной модели плиты в процессе проведения натурных испытаний представлена на рис. 6.



Рис.6. – Деформация плиты в процессе проведения натурных испытаний

В результате этих испытаний было установлено, что при нагружении плиты до 100 кН график деформирования плиты носит практически линейный характер. Разрушение наступило при нагрузке в 160 кН, после заметного скривления графика деформирования.

Результаты численного моделирования

Для анализа напряженно-деформированного состояния составной деревянной плиты в ПК Ansys Workbench была создана конечно-элементная модель исследуемой плиты (см. рис. 7). Расчетная схема данной модели представляет собой консольно-балочную конструкцию с одним пролетом и двумя консолями. Нагружение КЭ модели плиты выполнялось ступенями, посредством задания определенной величины перемещения в третях пролета плиты. Величина нагрузки при этом определялась как величина опорной реакции модели в точке приложения заданного перемещения.

Перемещение на каждой ступени нагружения было принято в соответствии с полученными экспериментальными данными, приведенными в таблице №4.

Таблица №4

Экспериментальные данные о величинах перемещений плиты на отдельных ступенях нагружения

№ ступени	1	2	3	4	5	6	7	8
Задаваемое перемещение, мм	-10,7	-27,5	-42,1	-59,8	-75,7	-102,2	-127,3	-185,1

В КЭ модели соединение досок плиты выполнялось цилиндрическими элементами, имитирующими болты в установленных местах, контактные поверхности в местах соединения досок задавались без склеивания и трения. Направление волокон древесины наружных слоев плиты – вдоль продольной оси конструкции, направление волокон древесины внутреннего слоя –

поперек оси. Расчетная схема конечно-элементной модели плиты представлена на рис. 8.

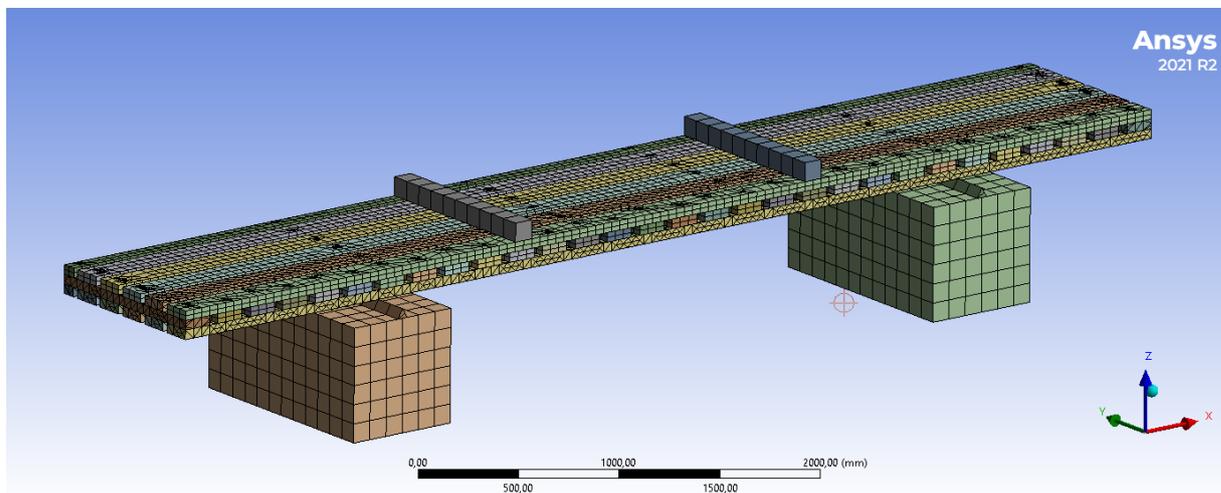


Рис.7. – Сетка КЭ модели составной деревянной ПЛИТЫ

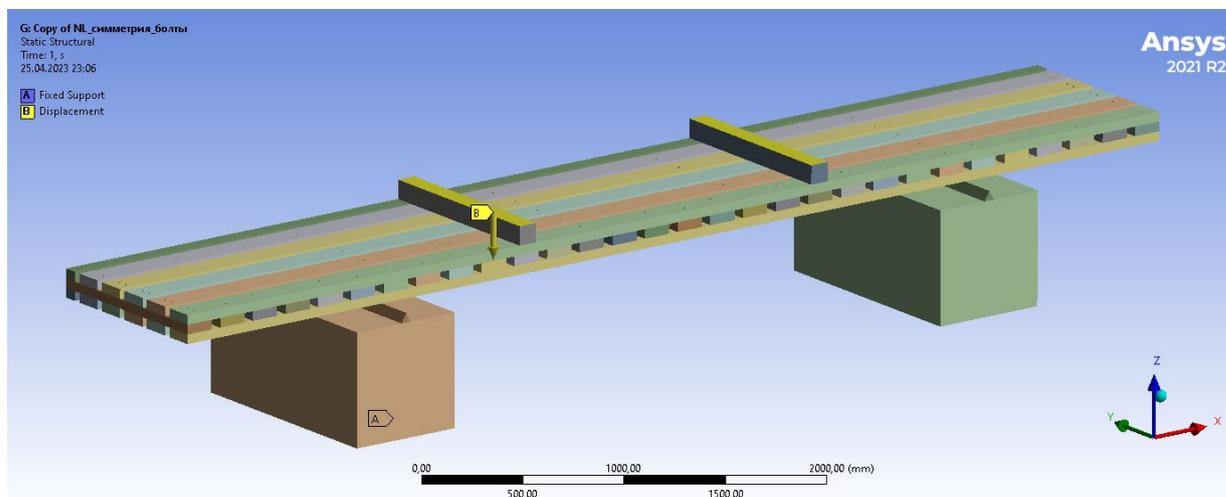


Рис.8. – Расчетная схема КЭ модели плиты

Нагружение КЭ модели плиты выполнялось заданием перемещения в местах приложения нагрузки и продолжалось до момента, пока прогиб пролетной части плиты не достиг значения, на котором произошла потеря несущей способности экспериментальной модели (около 250 мм).

Деформированная схема КЭ модели плиты по ML модели материала представлена на рис. 9.

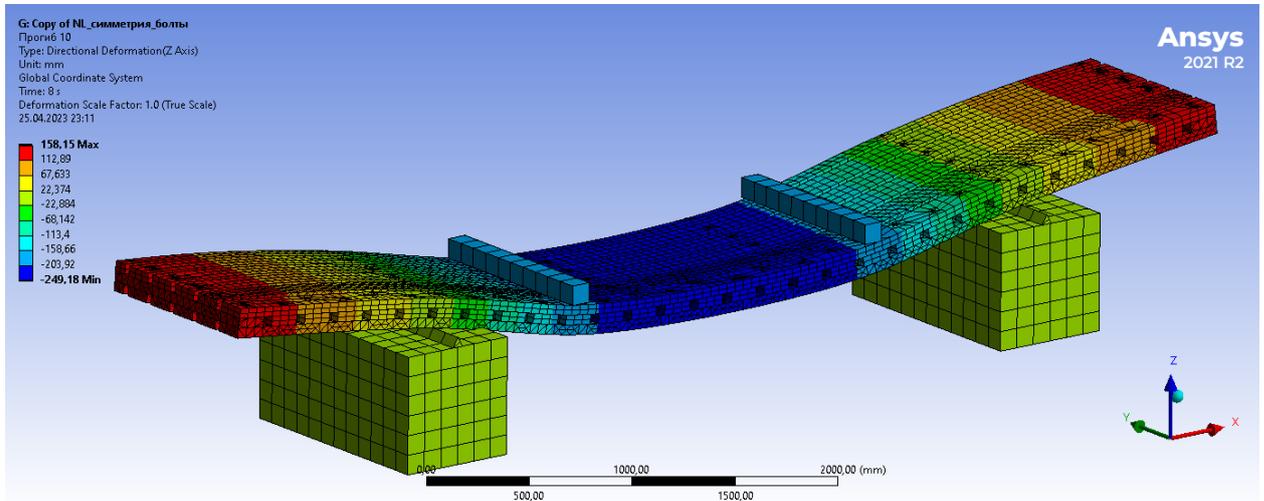


Рис.9. – Деформированная схема КЭ модели плиты по ML модели материала

На рис. 10 приведены графики деформирования для 3-х вариантов моделей плиты:

- экспериментальная модель (плита, участвующая в натурных испытаниях);
- КЭ модель плиты по VL модели материала;
- КЭ модель плиты по ML модели материала.

Сравнивая приведенные графики прогибов, можно отметить, что КЭ модели на начальном этапе приложения нагрузки (до 25 кН) дают одинаковые значения прогибов при одинаковых значениях нагрузки. График прогибов экспериментальной модели на этом этапе немного отличается, показывая чуть меньшие значения прогибов. После достижения нагрузкой значения в 25 кН все три графика расходятся, показывая меньшие прогибы обеих КЭ моделей по сравнению с экспериментальной моделью.

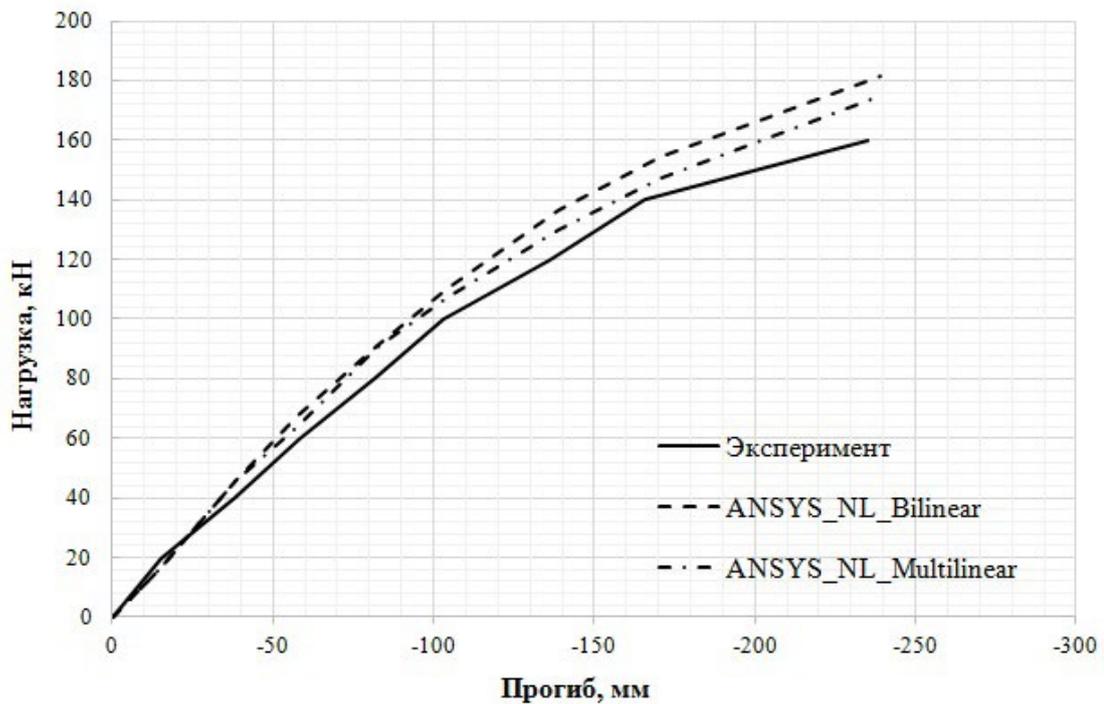


Рис.10. – График зависимости деформаций от нагрузки экспериментальной модели плиты (изображен сплошной линией) и КЭ моделей по BL и ML моделям материала

Выводы

Графики деформирования моделей плиты (рис. 10), показывают хорошую сходимость результатов натуральных испытаний составной деревянной плиты и расчета ее КЭ модели по обоим вариантам моделей материала – как BL, так и ML. Однако графики КЭ моделей показывают меньшие прогибы при одинаковых значениях нагрузки. Эта незначительная разница в прогибах (не более 10 % при нагрузке в 100 кН) объясняется большей податливостью связей между слоями экспериментальной модели плиты, чем в численной модели.

Обе КЭ модели плиты (как BL, так и ML) при численном анализе демонстрируют поведение, адекватное поведению экспериментальной модели плиты в процессе натурального испытания, о чем свидетельствуют графики деформирования всех перечисленных моделей. Однако в предельной точке графика, когда прогиб приближается к значению 250 мм,

КЭ модели показывают большее значение опорной реакции в точках приложения нагрузки. Максимальное отклонение показывает VL модель – 12,5%, у ML модели отклонение меньше – 7,5%. Это означает, что для последующего моделирования древесины в экспериментальных исследованиях новых деревянных конструкций пригодны обе модели – как VL, так и ML.

Графики зависимости деформаций от нагрузки для балок, материал которых выполнен по разным моделям, представленные на рис. 4, показывают незначительное расхождение результатов лабораторных испытаний сплошной деревянной балки и расчета ее конечно-элементной модели по обоим вариантам моделей материала – как VL, так и ML. При этом заметно лучшую сходимость по величине прогибов показывает график деформирования VL модели. Однако этот график пересекается с графиком деформирования лабораторной модели в точке предельного значения нагрузки, то есть поведение VL модели перестает быть адекватным поведению лабораторной модели в пластической стадии работы материала. При этом форма графика деформирования ML модели продолжает повторять форму графика деформирования лабораторной модели балки в пластической стадии. Это означает, что для последующего моделирования древесины в экспериментальных исследованиях новых деревянных конструкций ML модель представляется более пригодной с точки зрения получения данных о возможных способах отказа тех или иных новых деревянных конструкций.

Литература

1. Dickson M., Parker D. Engineered timber and structural form in sustainable design. *Construction Materials*. 2015. № 4 (168). Pp. 161-172.
 2. Fink G., Honfi D., Kohler J., Dietsch P., Basic of Design Principles for Timber Structures. Aachen: Shaker Verlag. 2018. 132 p.
 3. Есипов А.В., Лыкова Я.В., Еренчинов С.А. Экспериментальные
-

исследования усиления цельнодеревянных балок стержневой арматурой в растянутой зоне // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. №1(32). С. 83-89.

4. Демин В.А., Ефимов А.А., Кудоманов М.В., Мартюшева А.И. Экспериментальные исследования работы деревянных и металлодеревянных конструкций временных покрытий дорог и рабочих площадок // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8027.

5. Wood in Civil Engineering. Edited by Concu G.: InTechOpen, 2017. 248 p.

6. Alawadhi E.M. Finite Element Simulation Using ANSYS: CRC Press, Taylor and Francis Group. 2010. 408 p.

7. Huei-Huang Lee. Finite Element Simulation with ANSYS Workbench 16. SDC Publ. 2015. 264 p.

8. Бай В. Ф., Еренчинов С. А., Гач Е. А. Исследование работы деревянной балки, армированной стальными пластинами // Архитектура, строительство, транспорт. 2023. №2 (104). URL: cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-raboty-derevyannoy-balki-armirovannoy-stalnymi-plastinami.

9. Арленинов Д.К., Буслаев Ю.Н., Игнатъев В.П., Романов П.Г., Чахов Д.К. Конструкции из дерева и пластмасс. М.: Издательство АСВ, 2002. 280 с.

10. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

11. Togay A., Anil Ö., Karagöz Ü., Ediz I., Durucan C. Finite-element analyses of light timber-framed walls with and without openings. ICE Proceedings Structures and Buildings. 2017. № 8(170). Pp. 555-569.

12. Водяников М.А., Кашеварова Г.Г. Численное и экспериментальное моделирование жесткого стыка слоистых деревянных конструкций // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. № 2(17). С. 84-92.

13. Минигалеева С.А., Еренчинов С.А., Худышкина Н.Ю. Анализ работы деревянной балки с разными моделями опор // Новые технологии - нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Тюмень, 02–04 июня 2021 года. Том II. Т.: Тюменский индустриальный университет, 2021. С. 146-148.

14. Черных А.Г., Белаш, Т.А., Цыгановкин В., Ковалевский А.В. О возможности использования деревянных конструкций в строительстве зданий повышенной этажности в сейсмических районах // Architecture and Engineering. 2023. №1(8). С. 60-69.

15. Belash, T.A. Ivanova, Zh.V. Timber frame buildings with efficient junction designs for earthquake-prone areas. Magazine of Civil Engineering, 2019. № 8 (92), Pp. 84-95.

16. Бубенчиков Э.А., Сергуничева Э.М. Применение многоточечных платформенных фундаментов из поперечно-клееной древесины в условиях вечной мерзлоты Красноярского края // Известия вузов. Строительство. 2022. № 9. С. 18-26.

17. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. 224 с.

18. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, смоделированной как составная пластина // Архитектура, строительство, транспорт. 2023. № 3 (105). С. 25-32.

19. Трошин М.Ю., Турков А. В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции,

приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, 24–25 ноября 2022 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 515–519.

20. Трошин М. Ю., Турков А. В. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной // Вестник МГСУ. 2023. №3 (18) С. 391–400.

21. Трошин М. Ю., Турков А. В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной // Строительство и реконструкция. 2023. № 3 (107). С. 35–41.

22. Chernova, T.P., Melekhov, V.I. Behavior of timber-timber composite structure connected by inclined screws. Magazine of Civil Engineering. 2023. № 4(120). Article no. 12004. 10 p.

23. Ржаницын, А. Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат. 1986. 316 с.

24. Shen Y., Schneider J., Stiemer S. F., Ren X. Failure modes and mechanical properties of bracket anchor connections for cross-laminated-timber // MATEC Web of Conferences. 2019. № 11(275):01011. URL: researchgate.net/publication/331709903_Failure_Modes_and_Mechanical_Properties_of_Bracket_Anchor_Connections_for_Cross-Laminated-Timber.

25. Christovasilis I. P., Brunetti M., Follesa M. Evaluation of the mechanical properties of cross Laminated timber with elementary beam theories compression // Construction and Building Materials. 2016. № 122. URL: researchgate.net/publication/304355276_Evaluation_of_the_Mechanical_Properties_of_Cross_Laminated_Timber_with_Elementary_Beam_Theories.

26. Бубис А., Гизятуллин И.Р., Хворова А.Н., Петров И.Ю.

Особенности поведения древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. №2. С. 62-80.

27. Рогожина, А. В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7690

References

1. Dickson M., Parker D. Construction Materials. 2015. № 4 (168). Pp. 161-172.
2. Fink G., Honfi D., Kohler J., Dietsch P., Basic of Design Principles for Timber Structures. Aachen: Shaker Verlag. 2018. 132 p.
3. Esipov A.V., Lykova YA.V., Yerenchinov S.A. Akademicheskij vestnik UralNIIProekt RAASN. 2017. №1(32). Pp. 83-89.
4. Demin V.A., Efimov A.A., Kudomanov M.V., Martyusheva A.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8027.
5. Wood in Civil Engineering. Edited by Concu G.: InTechOpen, 2017. 248 p.
6. Alawadhi E.M. Finite Element Simulation Using ANSYS: CRC Press, Taylor and Francis Group. 2010. 408 p.
7. Huei-Huang Lee. Finite Element Simulation with ANSYS Workbench 16. SDC Publ. 2015. 264 p.
8. Baj, V. F., Erenchinov, S. A., Gach, E. A. Arhitektura, stroitel'stvo, transport, 2023. №2 (104). URL: cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-raboty-derevyannoy-balki-armirovannoy-stalnymi-plastinami.
9. Arleninov D.K., Buslayev YU.N., Ignat'yev V.P., Romanov P.G., Chakhov D.K. Konstruktsii iz dereva i plastmass. M., 2002. 280 p.

10. Basov K.A. ANSYS: Spravochnik pol'zovatelya. M., 2005. 640 p.
 11. Togay A., Anil Ö., Karagöz Ü., Ediz I., Durucan C. ICE Proceedings Structures and Buildings. 2017. № 8(170). Pp. 555-569.
 12. Vodyannikov M.A., Kashevarova G.G. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. №2 (17): Pp. 84-92.
 13. Minigaleeva S. A., Erenchinov S. A., Hudyshkina N. YU. Novye tekhnologii - neftegazovomu regionu: Tyumenskij industrial'nyj universitet, 2021. Pp. 146-148.
 14. Chernyh, A.G., Belash, T.A., Cyganovkin, V., Kovalevskij, A.V. Architecture and Engineering. 2023. № 1(8). Pp. 60-69.
 15. Belash, T.A. Ivanova, Zh.V. Magazine of Civil Engineering, 2019. № 8 (92). Pp. 84-95.
 16. Bubenchikov E.A., Sergunicheva E.M. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2022. № 9: Pp. 18-26.
 17. Ashkenazi E. K. Anizotropiya drevesiny i drevesnyh materialov. M. Lesnaya promyshlennost', 1978. 224 p.
 18. Troshin M.YU., Turkov A.V. Arhitektura, stroitel'stvo, transport. 2023. № 3 (105). Pp. 25-32.
 19. Troshin M.YU., Turkov A.V. Arhitekturno-stroitel'nyj i dorozhno-transportnyj komplekсы: problemy, perspektivy, innovacii: Sibirskij gosudarstvennyj avtomobil'no-dorozhnyj universitet (SibADI), 2022. Pp. 515–519.
 20. Troshin M.YU., Turkov A.V. Vestnik MGSU. 2023. № 3 (8). Pp. 391–400.
 21. Troshin M.YU., Turkov A.V. Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2023. № 3 (107). Pp. 35–41.
 22. Chernova, T.P., Melekhov, V.I. Magazine of Civil Engineering. 2023. № 4(120). Article no. 12004.
 23. Rzhanicyn, A. R. Sostavnye sterzhni i plastinki. M.: Strojizdat. 1986.
-



316 p.

24. Shen Y., Schneider J., Stiemer S. F., Ren X. MATEC Web of Conferences. 2019. № 11(275):01011. URL: researchgate.net/publication/331709903_Failure_Modes_and_Mechanical_Properties_of_Bracket_Anchor_Connections_for_Cross-Laminated-Timber.

25. Christovasilis I. P., Brunetti M., Follesa M. Construction and Building Materials. 2016. № 122. URL: researchgate.net/publication/304355276_Evaluation_of_the_Mechanical_Properties_of_Cross_Laminated_Timber_with_Elementary_Beam_Theories.

26. Bubis A., Gizyatullin I. R., Hovorova A. N., Petrov I. YU. Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2022, № 2. Pp. 62–80.

27. Rogozhina A. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7690.

Дата поступления: 21.05.2025

Дата публикации: 25.07.2025