

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента Тюкалова Юрия Яковлевича на диссертационную работу Завьялова Ивана Сергеевича на тему «Совершенствование редуцированных алгоритмов расчета пластин при статических и динамических воздействиях с помощью МКЭ в форме классического смешанного метода», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика (технические науки)

### **Актуальность темы диссертационного исследования.**

В рамках современного проектирования и анализа строительных конструкций, метод конечных элементов (МКЭ) занимает доминирующую позицию в качестве метода численного моделирования. Однако, масштабирование расчетных моделей влечет за собой существенное увеличение размерности соответствующих систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), что создает серьезные вычислительные сложности, связанные с особенностями получаемых МКЭ моделей. Традиционные подходы к решению СЛАУ оказываются малоэффективными при работе с разреженными и плохо обусловленными матрицами, а также в задачах, требующих многократных расчетов или динамического анализа. Кроме того, наблюдается тенденция к развитию гибридных формулировок МКЭ, сочетающих преимущества различных подходов для повышения точности и эффективности расчетов. В связи с этим, разработка и совершенствование специализированных алгоритмов, обеспечивающих высокую скорость и устойчивость решения СЛАУ в контексте МКЭ, представляет собой актуальную и востребованную область исследований, направленную на повышение эффективности и точности численного моделирования строительных конструкций.

В качестве основы для разработки расчетных алгоритмов в диссертационном исследовании выбран метод конечных элементов в форме классического смешанного метода. Этот метод зарекомендовал себя как эффективный инструмент решения ряда инженерных задач, что подтверждается в работах научного руководителя соискателя и других исследователей, представляющих научную школу, созданную В.А. Игнатьевым.

Таким образом, дальнейшее развитие и усовершенствование данного подхода являются актуальной научной задачей, ориентированной на повышение его точности и расширение области практического применения. Одним из направлений этого процесса является совершенствование и разработка алгоритмов редуцирования систем линейных алгебраических уравнений при расчетах конструкций зданий и сооружений.

Диссертационная работа объединена общей целью — разработка редуцированных

алгоритмов расчета на прочность пластин, а также анализ эффективности этих алгоритмов путем решения известных верификационных примеров и сравнения результатов расчетов с данными, полученными другими авторами.

Поставленная цель была достигнута в результате решения следующих задач:

1. Разработка базового алгоритма редуцирования систем линейных алгебраических уравнений, получаемых на основе метода конечных элементов в форме классического смешанного метода (КСМ) при расчете пластин на статическое и динамическое воздействие.

2. Разработка специализированных и комбинированных алгоритмов редуцирования СЛАУ, получаемых на основе МКЭ в форме КСМ при расчете пластин на статическое и динамическое воздействие.

3. Разработка комплексного подхода к расчету пластин на упругом основании с изменяющейся жесткостью, находящихся под статическими нагрузками, основанного на редукции основных неизвестных и методе компенсирующих нагрузок в рамках МКЭ в форме КСМ.

4. Проведение численного анализа эффективности разработанных алгоритмов по сравнению с алгоритмами, реализующими подходы и методы других исследователей.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Структура и логика диссертационной работы соответствуют поставленным задачам исследования, что свидетельствует о ее цельности и последовательности. Разработанные автором алгоритмы расчета реализованы в соответствии с требованиями теории алгоритмов. Достоверность полученных количественных результатов подтверждается путем верификации на основе известных тестовых задач, включающей сравнение с аналитическими решениями и результатами, опубликованными другими исследователями. В целом, научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, представляются обоснованными и аргументированными.

**Научная новизна положений, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, заключается в следующем:**

1. Впервые разработан и формализован базовый унифицированный алгоритм редуцирования СЛАУ, получаемой с помощью метода конечных элементов в форме классического смешанного метода.

2. Разработан ряд специализированных алгоритмов, используемых для расчета пластин при статических и динамических воздействиях, реализуемых редуцирование СЛАУ на основе

различных интерполяционных полиномов.

3. Разработан комплексный подход к расчету плит на упругом основании с изменяющейся жесткостью, основанный на редуцировании основных неизвестных и методе компенсирующих нагрузок при расчете с помощью МКЭ в форме классического смешанного метода.

4. Выбраны численные характеристики эффективности алгоритмов и произведено сравнение результатов расчета пластин с различными видами граничных условий, с помощью предложенных автором и другими известными алгоритмами расчета.

**Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации.** Теоретическая значимость полученных автором результатов заключается в разработке и теоретическом обосновании новых алгоритмов редуцирования СЛАУ, получаемых на основе МКЭ в форме классического смешанного метода. Данные алгоритмы расширяют теоретические основы этой формы МКЭ для решения задач, связанных с расчетом пластин под статическими и динамическими нагрузками.

Практическая значимость полученных результатов состоит в разработке и реализации редуцированных алгоритмов расчета пластин с помощью программных комплексов расчета.

Имеется акт внедрения результатов данной диссертационной работы в учебный процесс на кафедре «Строительная механика» Волгоградского государственного технического университета.

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах. Из них: 7 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международной наукометрической базе данных «Scopus». Кроме того, имеются 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты исследований обсуждались на семинарах и конференциях различного уровня, в том числе международных.

**Личный вклад автора** заключается в расширении теоретических основ МКЭ в форме классического смешанного метода в области редуцированных алгоритмов расчета пластин; создании пакетов прикладных программ для расчета прочности тонких изгибаемых пластин при статических и динамических воздействиях; выполнении анализа численных результатов расчета пластин при различных вариантах граничных условий и различных вариантах воздействий.

**Соответствие содержания автореферата диссертации.** Содержание автореферата соответствует главным положениям диссертации.

### **Общие замечания по диссертационной работе.**

1. Предложенный в диссертации алгоритм редуцирования системы линейных уравнений метода конечных элементов в смешанной форме рассматривается на примерах расчета прямоугольных пластин с разбиением на относительно небольшое, по современным меркам, количество прямоугольных конечных элементов и регулярных сетках. Возможно ли использование предложенного алгоритма, или его модификации, при нерегулярных сетках и для пластин переменной жесткости? Какова будет ширина ленты редуцированной системы линейных уравнений при предложенном алгоритме по сравнению с шириной ленты метода конечных элементов в перемещениях? Также представляет интерес вопрос о возможности применения, с целью развития, предлагаемого подхода к расчету пластин произвольной формы.

2. При оценке эффективности предложенных алгоритмов в качестве критериев были использованы параметры точности численных результатов в характерных узлах сетки и порядок соответствующей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

В рамках дальнейших исследований целесообразно включить в анализ показатель вычислительной сложности, выраженный во времени решения задачи, что позволит обеспечить более полное представление о производительности алгоритмов. Кроме того, рекомендуется провести оценку точности полученных решений во вспомогательных узлах после выполнения процедуры обратного хода. Это позволит более детально изучить распределение погрешности в конечном элементе модели.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Завьялова Ивана Сергеевича. В целом работа выполнена на высоком научном уровне и является законченным научным исследованием. Автореферат соответствует диссертации и в достаточной степени даёт представление об основных положениях работы.

### **Заключение.**

Диссертация и полученные результаты соответствуют специальности 2.1.9. Строительная механика (технические науки): п. 4 (Численные и численно-аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях).

Считаю, что диссертация Завьялова Ивана Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук, является научно квалификационной работой, в которой автором решается задача совершенствования редуцированных алгоритмов расчета пластин на основе

МКЭ в форме классического смешанного метода, что соответствует требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

**Основные публикации** официального оппонента, доктора технических наук, доцента Тюкалова Юрия Яковлевича в рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. Tyukalov, Yu. The beam finite element with five nodal degrees of freedom [Text] / Yu. Tyukalov // Magazine of Civil Engineering. – 2024. – Vol. 17, No. 4(128). – DOI 10.34910/MCE.128.2. – EDN JWNDWM.
2. Tyukalov, Yu. Y. Bulk Theory Elasticity Finite Element Based on Piecewise Constant Approximations of Stresses [Text] / Yu. Y. Tyukalov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2023. – Vol. 19, No. 1. – P. 168-177. – DOI 10.22337/2587-9618-2023-19-1-168-177. – EDN GEJBRL.
3. Tyukalov, Yu. Triangular prism finite element based on piecewise constant stress approximations [Text] / Yu. Tyukalov // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 5(121). – DOI 10.34910/MCE.121.5. – EDN HVMLLJ.
4. Тюкалов, Ю. Я. Принципы построения решения на основе функционала дополнительной энергии [Текст] / Ю. Я. Тюкалов // Технические и Естественные науки: сборник статей международной научной конференции, Санкт-Петербург, 27 октября 2022 года. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦПРАЗВИТИЕ», 2022. – С. 20-21. – EDN UZYRDH.
5. Тюкалов, Ю. Я. Произвольный четырехугольный конечный элемент для пластин с учетом сдвига [Текст] / Ю. Я. Тюкалов, Д. А. Варанкина // Общество. Наука. Инновации (НПК-2022): Сборник статей XXII Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х томах, Киров, 11–29 апреля 2022 года. Том 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2022. – С. 516-522. – EDN NYICTJ.
6. Tyukalov, Y. Y. Stability Analysis Method of Flat Rod Systems, Based on Forces Approximations [Text] / Y. Y. Tyukalov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 168. – P. 3-12. – DOI 10.1007/978-3-030-91145-4\_1. – EDN YXMMLQ.
7. Tyukalov, Yu. Ya. Quadrilateral Finite Element for Thin and Thick Plates [Text] / Yu. Ya. Tyukalov // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2021. – No. 5(98). – P. 9802. – DOI 10.4123/CUBS.98.2. – EDN UECPUI.
8. Tyukalov, Y. Y. Finite element model of bending plate with considering shear

deformations [Text] / Y. Y. Tyukalov // AIP Conference Proceedings : 29, Perm, 07–09 октября 2020 года. – Perm, 2021. – P. 050012. – DOI 10.1063/5.0059516. – EDN PAWWZG.

9. Tyukalov, Yu. Arbitrary quadrangular finite element for plates with shear deformations [Text] / Yu. Tyukalov // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 7(107). – DOI 10.34910/MCE.107.7. – EDN NULXKP.

10. Тюкалов, Ю. Я. Конечно-элементная модель изгибаемой пластины с учетом сдвиговых деформаций [Текст] / Ю. Я. Тюкалов // Математическое моделирование в естественных науках: Тезисы XXIX Всероссийской школы-конференции, Пермь, 07–09 октября 2020 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. – С. 125. – EDN HRYUEC.

11. Tyukalov, Yu. Ya. Method of plates stability analysis based on the moments approximations [Text] / Yu. Ya. Tyukalov // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – No. 3(95). – P. 90-103. – DOI 10.18720/MCE.95.9. – EDN WRNNOI.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
по специальности 2.1.9. (05.23.17)  
Строительная механика, доцент,  
профессор кафедры «Строительные  
конструкции и машины»

Тюкалов Юрий Яковлевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет» (ФГБОУ ВО ВятГУ), кафедра «Строительные конструкции и машины»

Почтовый адрес: 610000, РФ, Приволжский федеральный округ, Кировская область, г. Киров, ул. Московская, д.36

Тел.: 8 (8332) 64-65-71 E-mail: info@vyatsu.ru

Подпись Ю.Я. Тюкалова заверяю

Ученый секретарь ученого совета  
ФГБОУ ВО «Вятский  
государственный университет»

«13» 03 2025



И.В. Ходырева

« 06 » ЛИСТОВ	Вх. № 04-67-29 « 25 » 03 2025г. ВолгГТУ
------------------	---

Председателю  
Диссертационного совета 24.2.282.05,  
созданного на базе Волгоградского  
государственного технического  
университета,  
доктору технических наук, профессору  
Калашникову С.Ю.

Уважаемый Сергей Юрьевич!

Я, Тюкалов Юрий Яковлевич, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Завьялова И.С. на тему «Совершенствование редуцированных алгоритмов расчета пластин при статических и динамических воздействиях с помощью МКЭ в форме классического смешанного метода», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика. Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

#### Сведения об официальном оппоненте

Фамилия, имя, отчество	Тюкалов Юрий Яковлевич
Ученая степень, наименование отрасли науки, научных специальностей, по которым защищена диссертация	доктор технических наук по специальности 2.1.9. (05.23.17) Строительная механика
Ученое звание	доцент
Полное наименование организации, являющееся местом работы в момент предоставления отзыва, должность	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет» (ФГБОУ ВО ВятГУ) Факультет строительства и архитектуры кафедра «Строительные конструкции и машины», профессор
<b>Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных журналах и изданиях за последние 5 лет</b>	
1. Tyukalov, Yu. The beam finite element with five nodal degrees of freedom [Text] / Yu. Tyukalov // Magazine of Civil Engineering. – 2024. – Vol. 17, No. 4(128). – DOI 10.34910/MCE.128.2. – EDN JWNDWM.	
2. Tyukalov, Yu. Y. Bulk Theory Elasticity Finite Element Based on Piecewise Constant Approximations of Stresses [Text] / Yu. Y. Tyukalov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2023. – Vol. 19, No. 1. – P. 168-177. – DOI 10.22337/2587-9618-2023-19-1-168-177. – EDN GEJBRL.	
3. Tyukalov, Yu. Triangular prism finite element based on piecewise constant stress approximations [Text] / Yu. Tyukalov // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 5(121). – DOI 10.34910/MCE.121.5. – EDN HVMLLJ.	
4. Тюкалов, Ю. Я. Принципы построения решения на основе функционала дополнительной энергии [Текст] / Ю. Я. Тюкалов // Технические и Естественные науки: сборник статей международной научной конференции, Санкт-Петербург, 27 октября 2022 года. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного	

профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2022. – С. 20-21. – EDN UZYRDH.

5. Тюкалов, Ю. Я. Произвольный четырехугольный конечный элемент для пластин с учетом сдвига [Текст] / Ю. Я. Тюкалов, Д. А. Варанкина // Общество. Наука. Инновации (НПК-2022) : Сборник статей XXII Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х томах, Киров, 11–29 апреля 2022 года. Том 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2022. – С. 516-522. – EDN NYICTJ.

6. Tyukalov, Y. Y. Stability Analysis Method of Flat Rod Systems, Based on Forces Approximations [Text] / Y. Y. Tyukalov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 168. – P. 3-12. – DOI 10.1007/978-3-030-91145-4\_1. – EDN YXMMLQ.

7. Tyukalov, Yu. Ya. Quadrilateral Finite Element for Thin and Thick Plates [Text] / Yu. Ya. Tyukalov // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2021. – No. 5(98). – P. 9802. – DOI 10.4123/CUBS.98.2. – EDN UECPUI.

8. Tyukalov, Y. Y. Finite element model of bending plate with considering shear deformations [Text] / Y. Y. Tyukalov // AIP Conference Proceedings : 29, Perm, 07–09 октября 2020 года. – Perm, 2021. – P. 050012. – DOI 10.1063/5.0059516. – EDN PAWWZG.

9. Tyukalov, Yu. Arbitrary quadrangular finite element for plates with shear deformations [Text] / Yu. Tyukalov // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 7(107). – DOI 10.34910/MCE.107.7. – EDN NULXKP.

10. Тюкалов, Ю. Я. Конечно-элементная модель изгибаемой пластины с учетом сдвиговых деформаций [Текст] / Ю. Я. Тюкалов // Математическое моделирование в естественных науках: Тезисы XXIX Всероссийской школы-конференции, Пермь, 07–09 октября 2020 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. – С. 125. – EDN HRYUEC.

11. Tyukalov, Yu. Ya. Method of plates stability analysis based on the moments approximations [Text] / Yu. Ya. Tyukalov // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – No. 3(95). – P. 90-103. – DOI 10.18720/MCE.95.9. – EDN WRNNOI.

Доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Строительные конструкции  
и машины» ФГБОУ ВО «Вятский  
государственный университет»

Ю.Я. Тюкалов

Подпись Ю.Я. Тюкалова заверяю  
Ученый секретарь ученого совета  
ФГБОУ ВО «Вятский  
государственный университет».



И.В. Ходырева

«11» 03 2025 г.

« 02 » ЛИСТОВ	Вх. № 04-67-28 «25» 03 2025 г. ВолгГТУ
------------------	--