

КОНСТРУКЦИИ С ОДНОСТОРОННИМИ СВЯЗЯМИ: КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ПРИЛОЖЕНИЙ В ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧАХ

* Работа выполнена в рамках реализации научных мероприятий Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012-2016 гг.

STRUCTURES WITH UNILATERAL CONSTRAINTS: AN OVERVIEW OF CALCULATION METHODS AND THEIR APPLICATIONS IN ENGINEERING PROBLEMS

I. Rumyantseva

Annotation

A classification of methods of calculation of structures with unilateral constraints is proposed. Five groups of methods of calculation of such structures briefly discussed. Progress in the improvement of the methods and relevance of further research is fixed.

Keywords: unilateral constraints, contact problems, numerical modeling, linear complementarity problem.

Румянцева Ирина Евгеньевна
Ст. преподаватель,
Петрозаводский государственный
университет

Аннотация

В обзоре предложена классификация методов расчета конструкций с односторонними связями. Кратко рассмотрены пять групп методов расчета таких конструкций. Отмечен прогресс в совершенствовании данных методов и актуальность продолжения исследований.

Ключевые слова:

Односторонние связи, контактные задачи, численное моделирование, линейная задача дополненности.

В данной работе представлен краткий обзор подходов к расчету конструкций с односторонними связями.

Принципиальное отличие конструкций с односторонними связями от конструкций с двусторонними связями заключается в том, что любая односторонняя связь, в зависимости от воздействий на конструкцию, может находиться в одном из двух возможных и заранее неизвестных состояний ("включено" или "выключено"), в то время как двусторонняя связь всегда находится в состоянии "включено". Изменение воздействия конструкцию может приводить к переходу односторонних связей из одного состояния в другое, что и приводит к эволюционным задачам строительной механики [1].

Как следствие, расчетные схемы конструкций данного класса могут изменяться в зависимости от воздействий. Если расчетная схема конструкции с односторонними связями определена, то дальнейший расчет не отличается от обычного расчета конструкции с двусторонними связями. Соответствующая расчетная схема получила в русскоязычной литературе название "рабочая

схема"[2].

Необходимость расчета таких конструкций в технологических и технических задачах часто встречается в инженерной практике. Проблемы расчета конструкций с односторонними связями сохраняют свою актуальность в связи с усложнением задач, возникающих в инженерной практике. Кроме того, новые возможности для развития методов расчета появляются как результат совершенствования компьютерных технологий, в рамках которых создаются инструменты, применение которых позволяет преодолевать ранее бытовавшие представления об избыточности сложности некоторых методах расчета.

Вопросы расчета конструкций с односторонними связями исследуются многими авторами в многочисленных работах, большая часть которых опубликована в статьях и книгах на английском языке. В данной статье рассматривается только часть работ, опубликованных, главным образом, в российских изданиях. Предпринята попытка классификации подходов, на основе которых построены эти работы. Эти подходы могут быть распределены по следующим группам.

Группа 1.

Исторически первые методы расчета были разработаны в докомпьютерный период и базировались на физически обоснованных моделях функционирования конструкций с односторонними связями [2]. Эти методы не гарантировали сходимости вычислений к искомому решению задачи, что показано в книге [3].

Группа 2.

Развитие компьютерных технологий, сопровождавшееся распространением методов квадратичного программирования на новые инженерные приложения, привело к продолжающемуся с 1960-х годов формированию отдельного направления в расчетах конструкций с односторонними связями [4, 5]. Новые результаты в данном направлении, демонстрирующие эффективное использование современных компьютерных технологий в качестве инструмента исследования не вполне очевидных закономерностей функционирования конструкций с односторонними связями, представлены в статье [6]. При этом решение задач выполнено с использованием Mathcad, приведено семь примеров расчета балок и плит с односторонними связями, в том числе с зазорами в упругих односторонних связях.

Группа 3.

Первоначально методы квадратичного программирования могли восприниматься как избыточно сложные в инженерных расчетах конструкций с односторонними связями, что стимулировало поиски других подходов. Один из таких подходов появился примерно через два десятилетия и базируется на сведении исходной задачи расчета конструкции с односторонними связями к линейной задаче дополненности [7]. Инженерные приложения задач дополненности рассмотрены, например, в обзоре [8]. В данном направлении получены новые результаты, позволившие решить ряд прикладных задач [9]. При этом расчет сводится к решению линейной задачи дополненности. Существует множество методов и алгоритмов решения данной задачи [8, 10], из которых в данной работе принят во внимание метод, основанный на использовании жордановых исключений. В этом случае основная проблема заключается в выборе разрешающего элемента при выполнении жордановых исключений [11, 12]. Развитие данного метода привело к обосно-

ванию энергетического критерия очередности перехода односторонних связей из возможного состояния в действительное состояние [13, 14]. Положительным качеством данного критерия является его индифферентность к размерности величин, используемых при его несложном вычислении [15].

Группа 4.

К четвертой группе в данном обзоре отнесены методы, в которых для численного моделирования одностороннего контакта используются, соответственно, контактные конечные элементы. Этот подход достаточно универсален, применяется в расчетах конструкций с односторонними связями при статических и динамических воздействиях. Например, в статье [16] предложен численный подход к расчету конструкций с односторонними связями при динамических воздействиях. Алгоритм расчета построен на основе пошагового моделирования (по времени) с использованием контактных конечных элементов равного типа, приведены примеры и анализ результатов расчета.

Группа 5.

К пятой группе в данном обзоре отнесены методы [17], основная идея которых базируется на подходах, отличающихся от рассмотренных в четырех указанных выше группах. Например, в статье [18] предложен метод расчета упругих систем с односторонними связями, основанный на введении в систему восстанавливающих сил. Эти силы прикладываются в точках, в которых не выполняются условия одностороннего контакта. Восстанавливающие силы прикладываются одновременно ко всем ложным связям. Рассмотрен пример расчета силового взаимодействия упругих звеньев волновой зубчатой передачи, приведен анализ эффективности предложенного метода.

Задачи устойчивости конструкций с односторонними связями [19] требуют отдельного рассмотрения.

Применение современных методов расчета конструкций с односторонними связями открывает новые возможности решения инженерных технических и технологических задач, например, рассмотренных в статьях [20–29].

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильков Г.В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма // Ростов-на-Дону: ИнфоСервис, 2003. 180 с.
2. Рабинович И.М. Вопросы теории статического расчета сооружений с односторонними связями // М.: Стройиздат. 1975. 144 с.
3. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. 4-е изд., перераб. // М.: Издательство СКАД СОФТ. 2011. 736 с.

4. Moreau J. J. Quadratic programming in mechanics: dynamics of one-sided constraints //SIAM Journal on control. 1966. Т. 4. № 1. С. 153–158. <http://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/0304014?journalCode=sjcodc.2>
5. 011Гордеев В. Н., Перельмутер А. В. Расчет упругих систем с односторонними связями, как задача квадратичного программирования //В сб.:Исследования по теории сооружений. 1967. № 15. С. 208–215.
6. Аверин А.Н., Пузаков А.Ю. Расчет систем с односторонними связями //Строительная механика и конструкции. 2015. Т. 1. № 10. С. 15–32.
7. Ким Т. С., Яцура В. Г. Расчет систем с односторонними связями как задача о дополнителности // Строительная механика и расчет сооружений. 1989.№3.С. 41–43.
8. Ferris M. C., Pang J. S. Engineering and economic applications of complementarity problems//SIAM Review. 1997. Т. 39. № 4. С. 669–713.
9. Ловцов А.Д. Разработка методов решения задач строительной механики с учетом трения и односторонних связей // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт–Петербургский политехнический университет. Санкт–Петербург, 2006. 32 с.
10. Zheng H., Li X. Mixed linear complementarity formulation of discontinuous deformation analysis //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – Т. 75. – С. 23–32.
11. Колесников Г.Н. Об очередности жордановых исключений в алгоритмах моделирования механических систем с односторонними связями // Депонированная рукопись № 2028–В2003 21.11.2003. 12 с.
12. Колесников Г.Н. Дискретные модели механических и биомеханических систем с односторонними связями //М-во образования Рос. Федерации, Петрозавод. гос. ун-т. Петрозаводск, 2004. 204 с.
13. Колесников Г.Н., Раковская М.И. Энергетический критерий очередности перехода односторонних связей в действительное состояние //Обзор прикладной и промышленной математики. 2006. Т. 13. С. 652.
14. Колесников Г.Н., Раковская М.И. К обоснованию энергетического критерия очередности перехода односторонних связей механических систем из возможного состояния в действительное состояние // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 2015. № 4. С. 80–81.
15. Раковская М.И. Численное моделирование механических систем с односторонними ограничениями поступательных и вращательных степеней свободы // 2-я Международная конференция "Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела" (8–11 декабря 2009 года, г.Казань, Казанский государственный университет), труды конференции, Казань, 2009. С.302–305.
16. Лукашевич А.А., Розин Л.А. О решении контактных задач строительной механики с односторонними связями и трением методом пошагового анализа // Инженерно–строительный журнал. 2013. № 1 (36). С. 75–81.
17. Иванов Ю.С. Алгоритмы расчета сил взаимодействия элементов упругих систем с односторонними связями //Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 3. С. 68–71.
18. Люминарский И.Е., Люминарский С.Е. Метод расчета линейных систем, ограниченных односторонними связями, при статическом нагружении // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2009. № 2. С. 84–90.
19. Гольдштейн Ю.Б. Линеаризованная задача устойчивости стержневой конструкции с односторонними связями //Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 2011. № 2. С. 66–71.
20. Колесников Г.Н. Алгоритм декомпозиции линейной задачи дополнителности и его применение для моделирования соударений балансов в корообдирочном барабане //ResourcesandTechnology. 2013. Т. 10. № 2. С. 111–138.
21. Колесников Г.Н., Девятникова Л.А., Дослехова Н.А., Васильев С.Б. Уточненная модель влияния длины баланса, измельчаемого в дисковой рубительной машине, на размеры частиц древесной щепы //Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 105. С. 413–425.
22. Колесников Г.Н., Дослехова Н.А. Закономерности соударений и качество очистки балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане //Фундаментальные исследования. 2013. № 10–15. С. 3328–3331.
23. Питухин А.В., Васильев С.Б., Панов Н.Г., Колесников Г.Н. Наноструктура клея и прочность древесно–стружечных плит //AustrianJournalofTechnicalandNaturalSciences. 2014. № 7–8. С. 22–24.
24. Суханов М.А., Андреев А.А., Колесников Г.Н. Сравнительная прочность при сдвиге клеевых и цементно–песчаных швов, соединяющих блоки из древесно–цементного материала //Современные научные исследования и инновации. 2014. № 7 (39). С. 94–97.
25. Андреев А.А., Васильев С.Б., Колесников Г.Н., Сютёв В.С. Влияние новой полимерно–минеральной добавки на прочность древесно–цементного материала для малоэтажного строительства //Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 2–2 (7–2). С. 292–296.
26. Гаврилов Т.А. Исследование эффективности работы оборудования для тонкого измельчения мясо–рыбных кормов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 87. С. 112–122.
27. Девятникова Л.А., Васильев С.Б., Колесников Г.Н. Влияние технологии раскря балансов на фракционный состав щепы // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. № 3 (86). С. 120–124.
28. Зайцева М.И., Девятникова Л.А., Никонова Ю.В., Колесников Г.Н. Информационные технологии в научно–исследовательской работе студентов технических факультетов // В сборнике: Информационная среда ВУЗа XXI века. Материалы VII Международной научно–практической конференции. Петрозаводск, 2013. С. 86–89.
29. Питухин А.В., Панов Н.Г., Колесников Г.Н., Васильев С.Б. Влияние добавки нанопорошкашунгита в клеевой раствор для изготовления трёхслойных древесностружечных плит на их физико–механические свойства //Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 147.