

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 624.072.2.044/.046(043.3)

ДМИТРИЕВА
Ксения Владимировна

**РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОЙ ГИБКОЙ СТЕНКИ
В УПРУГОМ ОСНОВАНИИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.17 – «Строительная механика»

Минск 2017

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель

БОСАКОВ Сергей Викторович,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
РУП «БелНИИС»

Официальные оппоненты:

КРАВЧУК Александр Степанович,
доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры био- и наномеханики Белорусского государственного университета;

ТАРАСЕВИЧ Алексей Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
декан факультета инновационной деятельности, управления и финансов УО «Брестский государственный технический университет»

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

Защита состоится 30 июня 2017 г. в 12⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.09 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220114, г. Минск, проспект Независимости, 150, корпус № 15, ауд. 808, e-mail: nrak@bntu.by, тел/факс 265-96-97.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «__» мая 2017 г.

Ученый секретарь
совета по защите
диссертаций

Рак Н.А.

© Дмитриева К.В., 2017
© Белорусский национальный
технический университет, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Строительство глубоких котлованов всегда считалось одной из наиболее сложных задач подземного строительства. В последнее время актуальность задачи возросла в связи с появившимся и ежегодно растущим спросом на подземные многоуровневые паркинги, расположенные под строящимися жилыми домами и метро мелкого заложения. В условиях плотной городской застройки проведение таких земляных работ практически невозможно без выполнения предварительного комплекса мероприятий по ограждению и креплению стен котлованов.

По условиям строительства и эксплуатации подпорные и ограждающие сооружения испытывают сложный характер нагрузжений и перемещений. Поэтому при проектировании таких сооружений необходимо учитывать совместную работу грунтового основания и самой конструкции.

Задачи о взаимодействии конструкции с деформирующимся основанием представляют одну из важных областей современной строительной механики. Наиболее полно отражены решения таких задач для линейно-деформируемой конструкции, взаимодействующих с линейно-деформируемым основанием с наиболее простыми геометрией и физико-механическими свойствами.

Необходимость совместных расчетов основания и взаимодействующих с ним конструкций заложена в нормативных документах и актуальна не только для уникальных объектов, но и для рядовых зданий и сооружений. До настоящего времени недостаточно исследованными остаются вопросы влияния физической и конструктивной нелинейностей при расчете конструкций в упругом основании.

Целью настоящей работы является построение новой численно-аналитической методики расчета нелинейно-упругой гибкой стенки, заглубленной в линейно-упругое весомое основание с несимметричным ломаным очертанием контура. В качестве диаграммы деформирования принимается нелинейный закон, связывающий изгибающий момент и кривизну в поперечном сечении стенки.

Для оценки корректности и достоверности новой методики расчета гибкой стенки в упругом основании, предлагаемой автором диссертации, производится сопоставление результатов теоретических исследований автора с теоретическими и экспериментальными результатами исследований других авторов, полученных для частных случаев поставленной задачи. Расчет гибкой стенки с учетом ее физической нелинейности, заданной нелинейно-упругим законом деформирования, заглубленной в упругую полуплоскость со сложным очертанием контура, при учете ее собственного веса, должен давать более точные результаты при оценке напряженно-деформированного состояния стенки по сравнению с имеющимися результатами, не учитывающими указанные особенности.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Работа выполнялась в рамках:

ГБ 06-267. Тема: Разработка методов расчета напряженно-деформируемых состояний и оптимизация стержневых и континуальных систем, решение задач прочности, надежности и устойчивости (2006–2010 гг.).

ГБ 11-263. Тема: Компьютерное моделирование задач расчета сооружений на прочность, жесткость и колебания в нелинейной постановке (2011–2016 гг.).

Актуальность темы диссертации

Строительство новых линий метрополитена, возведение подземных паркингов, устройство подпорных стенок, удерживающих от обрушения массив грунта на местностях с уклоном, приводит к необходимости устройства подпорных и ограждающих конструкций, которые по характеру работы можно отнести к несущим конструкциям, взаимодействующим с упругим основанием. При проектировании таких сооружений необходимо учитывать совместную работу основания и самой конструкции. Важной задачей при расчете конструкций в упругом основании является учет нелинейно-упругого деформирования материала конструкции, необходимость которого заложена в нормативных документах. Однако конкретных методик по реализации нелинейных расчетов действующие нормы и правила не содержат. Теория расчета таких задач в общей постановке в полной мере. Практически отсутствуют работы, в которых учитывается образование щели на контакте основания и изгибаемой конструкции, а также сложное очертание границы упругого основания, в которую заглублена конструкция. Одним из малоизученных аспектов является учет нелинейных законов деформирования материала конструкции, заглубленной в упругое основание.

Указанные факты подтверждают актуальность темы диссертационной работы, а полученные результаты позволяют решить целый ряд инженерных задач, относящихся к проектированию шпунтовых и фундаментных стенок.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является усовершенствование методики расчета гибкой стенки, заглубленной в упругое основание, путем учета: несимметричного ломаного очертания контура основания, возникновения разрыва сплошности между стенкой и основанием, нелинейно-упругой работы материала стенки.

В соответствии с этой целью в работе были поставлены следующие задачи:

- вывод формул, позволяющих получить численные решения заданной точности для определения перемещений границ упругого плоского клина со свободными гранями от действия сосредоточенных сил и от действия равномерно-распределенной нагрузки;
- разработка алгоритма определения перемещений границ щели в упругой полуплоскости с ломаным контуром от действующей на ее грани равномерно-распределенной нагрузки;
- разработка новой методики численного расчета линейно-упругой гибкой стенки в линейно-упругом невесомом основании с учетом разрыва сплошности на контакте основания и изгибаемой конструкции;
- разработка новой методики численного расчета нелинейно-упругой гибкой стенки в линейно-упругом невесомом основании с ломаным контуром;
- разработка новой методики численного расчета линейно-упругой гибкой стенки в линейно-упругом весомом основании;
- сравнение результатов расчета автора с результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов, полученных для частных случаев поставленной задачи.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – нелинейно-упругая гибкая стенка в линейно-упругом основании с ломаным очертанием контура под действием внешней нагрузки.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние нелинейно-упругой гибкой стенки в линейно-упругом основании с ломаным очертанием контура под действием внешней нагрузки.

Гипотезы и допущения

При расчете гибкой стенки в упругом основании вводятся следующие гипотезы (предположения) и допущения:

- стенка в упругом основании находится в условиях плоской деформации;
- в качестве модели основания принимается упругая полуплоскость со сложным, ломаным очертанием внешнего контура, в качестве модели грунта – однородная, изотропная, линейно-упругая сплошная среда;
- касательные напряжения на контакте стенки и упругого основания не учитываются;
- на расчетной схеме стенка представляется в виде балочной плиты, учитывающей физическую нелинейность материала, в качестве закона деформирования которого выбрана нелинейно-упругая функциональная зависимость, связывающая изгибающий момент и кривизну для нормального сечения балочной плиты.

Методология и методы проведенных исследований

При получении формул для определения перемещений границ упругого плоского клина применяется метод специальной аппроксимации, изложенный в работах В.М. Александрова.

Для расчета гибкой стенки в упругом основании используется численно-аналитический способ, где в качестве внешнего алгоритма используются метод дискретизации области контакта, а в качестве внутреннего алгоритма для уточнения жесткостных параметров используется деформационная модель материала стенки в виде аналитической зависимости между изгибающими моментами и кривизной нормального сечения стенки.

Для расчета системы «гибкая стенка – упругое основание» с дискретным представлением области контакта используется смешанный метод строительной механики, а для определения напряжений на контакте между двумя клиньями, образующими полуплоскость с ломаным очертанием, применяется метод сил.

Результаты теоретических исследований подтверждены методом численного моделирования исследуемого объекта.

Научная новизна

1) Впервые получены формулы для определения перемещений границ упругого плоского клина с произвольным углом раствора от сосредоточенных сил не в интегральной форме, а в виде приближенного решения заданной точности, выраженного в виде простых, легко интегрируемых и дифференцируемых функций.

2) Впервые используется в качестве модели основания упругая полуплоскость со сложным очертанием наружного контура.

3) Разработана новая методика итерационного расчета нелинейно-упругой изгибаемой стенки в упругой полуплоскости с ломаным несимметричным очертанием наружного контура.

4) Впервые для расчета конструкций в упругом основании в качестве закона нелинейно-упругого деформирования гибкой стенки используется нелинейная функциональная зависимость между изгибающим моментом и кривизной нормального сечения стенки, выраженная в виде произведения экспоненты на полином 5-ой степени от кривизны.

5) Впервые обнаружено наличие двух точек раздела граничных условий на стенке при учете ломаного контура границы полуплоскости, что не учитывалось ранее при расчете стенки в упругой полуплоскости с прямолинейной границей. Причем установлено, что с увеличением гибкости стенки верхняя точка нулевых напряжений смещается ближе к вершине стенки, а нижняя точка – ближе к низу стенки.

6) Впервые доказано, что при учете односторонних связей на контакте упругого основания и гибкой стенки значения изгибающих моментов, поперечных сил и перемещений в сечениях стенки увеличиваются.

7) Разработана новая методика итерационного расчета гибкой вертикальной стенки, находящейся в упругой весомой полуплоскости под действием горизонтальной нагрузки, которая доказывает незначительное влияние собственного веса материала основания на распределение внутренних сил в сечениях гибкой стенки, заглубленной в упругое основание с ломаным очертанием контура.

Практическая значимость полученных результатов

Полученные результаты уточняют параметры напряженно-деформированного состояния изгибаемой в линейно-упругом основании нелинейно-упругой стенки, что позволяет принимать на практике технически и экономически обоснованные решения. Применение предложенной методики позволяет решать важные прикладные задачи расчета и проектирования несущих конструкций, взаимодействующих с упругим основанием. Приведенные алгоритмы, методики, зависимости могут непосредственно применяться в практических расчетах.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- Формулы для определения перемещений границ упругого плоского клина с произвольным углом раствора от действия сосредоточенных сил и равномерно-распределенных нагрузок, позволяющие получить численное решение заданной точности. Окончательные формулы имеют компактный вид, содержат элементарные функции и могут быть использованы при решении разнообразных контактных задач для клиновидных оснований.

- Новая методика численного расчета линейно-упругой гибкой стенки, заглубленной в линейно-упругое основание со сложным ломаным очертанием контура при учете разрыва сплошности на контакте упругого основания и изгибаемой стенки.

- Новая аналитическая аппроксимация закона нелинейно-упругого деформирования $M_i = f(1/\rho_i)$ для железобетонной стенки в упругом основании выраженная в виде произведения экспоненты на полином 5-ой степени от кривизны, которая позволяет более полно учесть действительную работу материала за пределами его линейно-упругой работы.

- Новая методика численного расчета нелинейно-упругой гибкой стенки, заглубленной в линейно-упругое основание с ломаным очертанием контура.

- Новая методика численного расчета линейно-упругой гибкой стенки, заглубленной в линейно-упругое весомое основание с ломаным очертанием контура.

Личный вклад соискателя

Диссертационная работа и положения, выносимые на защиту, основаны на личном вкладе автора. Соискателем были проанализированы применяемые в мировой практике модели упругого основания, методы решения контактных задач для конструкций, заглубленных в грунт или лежащих на грунтовом основании, способы учета различного рода нелинейностей в расчетах таких систем, выявлены неразрешенные вопросы, приняты гипотезы и допущения, сформулированы основные задачи исследования и определены пути их реализации. Публикации, написанные без соавторов [3, 4, 6, 7, 8, 9], подготовлены соискателем самостоятельно и основаны на результатах теоретических исследований, их численной реализации и сопоставлении с существующими решениями. В работах, опубликованных совместно [1, 2, 5, 10], соавтором является научный руководитель Босаков С.В., который осуществлял общее руководство и оказывал содействие при подведении итогов по результатам проведенной соискателем теоретической работы.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике» (56-ая научно-техническая конференция профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БНТУ, Минск, 4–7 февраля 2003 г.); VIII Республиканская научно-техническая конференция студентов и аспирантов (Минск, 9–10 декабря, 2003 г.); 2-я Международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике» (57-ая научно-техническая конференция профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БНТУ, Минск, 24–28 мая 2004 г.); 3-я Международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике» (58-ая научно-техническая конференция профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БНТУ, Минск, 6 апреля 2005 г.); Научная конференция учащихся, студентов и аспирантов, посвященная 85-летию БНТУ (Минск, 15–17 ноября 2005 г.); Международная научно-технической конференция молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 18–19 нояб. 2010 г.); Международная научная конференция «Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур» (Минск, БГУ, 16–20 сент. 2013 г.); Международная научно-технической конференция «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 27–28 апр. 2017 г.).

Опубликованность результатов

Основные положения диссертации опубликованы в 12-ти работах, из них 5 статей в научных изданиях, соответствующих перечню ВАК Республики Беларусь, общий объем – 1,75 авторских листа (в том числе 3 статьи опубликованы единолично); 7 других публикаций, из которых 5 (из них одна в соавторстве) – статьи в сборниках научных трудов, 2 (из них одна в соавторстве) – тезисы

докладов в сборниках материалов международных конференций, общий объем – 0,8 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из титульного листа; оглавления; введения; общей характеристики работы; основной части, представленной шестью главами; заключения; списка использованных источников; приложений. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, в том числе 96 страниц основного текста; 52 рисунка, 9 таблиц, 143 наименования в списке использованных источников, из которых 12 авторских работы, 4 приложения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обосновывается актуальность разработки новой методики расчета физически нелинейной гибкой стенки, заглубленной в упругое весомое основание со сложным ломаным очертанием контура. Отражается место, соответствующее предмету диссертации, среди других исследований в области решения задач о взаимодействии конструкции с деформируемым основанием и указывается конкретное направление, по которому необходимо проводить исследования.

В **первой главе** производится аналитический обзор литературы по теме диссертационного исследования. Анализируются применяемые в мировой практике модели упругого основания, методы расчета конструкций, лежащих на упругом основании или заглубленных в него, способы учета различного рода нелинейностей в расчетах таких систем.

На основе анализа работ, выполненных ранее другими исследователями, были сформулированы вопросы, которые остались неразрешенными.

Например, фундаментная стена глубокого заложения была рассчитана Гаффаровым К., задача о гибкой опоре в грунтовой среде была решена при помощи различных методов Снитко А.Н., Мустафьевым А.А., Кирилловым В.М. Однако, указанные исследования проводились без учета разрыва сплошности упругого основания. В работах Нуллера Б.М., Попова Г.Я., Шавлакадзе Н. Н. при решении контактной задачи для упругого клина, подкрепленного полубесконечной гибкой балкой, конструкция предполагается полностью сцепленной с упругим основанием, а, следовательно, допускается возникновение растягивающих напряжений на контакте клина и балки. В диссертационной работе учитывается односторонний контакт на границе стенки с упругим основанием, расчет предполагается строить в конструктивно-нелинейной постановке, что более соответствует реальным условиям на контакте ограждающей конструкции и грунта.

В работах Какосимида Н.Ф., Ограновича А.Б., Репникова Л.Н., Лазаревой И.В., Готман А.Л., Зарецкого Ю.К., Босакова С.В. задачи о взаимодействии конструкций с упругим основанием решались для полупространства и полуплоскости с прямой границей. В диссертационной работе автор предлагает решение для стенки находящейся в более общих граничных условиях – очертание полуплоскости предполагается в виде ломаного контура.

Обзор существующих работ показал, что практически отсутствуют публикации, связанные с расчетом конструкций в упругом основании с учетом физической нелинейности материала конструкции. Развитию методики расчета контактных

задач при наличии физической нелинейности посвящены, например, работы Бурковского В.Л., Иванова О.Г., Шлычкова С.В., Габриелян Г.Е. Законы нелинейно-упругого деформирования конструкционного материала в перечисленных работах и в наиболее популярных программных комплексах, таких как Лира и Plaxis, представлены в виде экспоненциальной или кусочно-линейной зависимостей.

В качестве закона нелинейно-упругого деформирования в диссертационной работе соискателя используется нелинейная зависимость, связывающая изгибающие моменты и кривизны в сечениях стенки, построенная путем аппроксимации соответствующей диаграммы, полученной экспериментальным путем для реального напряженно-деформированного состояния конструкции. Аналитическая зависимость между изгибающим моментом и кривизной в предлагаемом виде не была замечена автором ни в одном из обозреваемых источников и используется впервые.

Во второй главе впервые выводятся формулы, дающие численные значения заданной точности при определении перемещений границ упругого плоского изотропного клина со свободными гранями от действия сосредоточенных и распределенных нагрузок, приложенных к границе клина (рисунок 1) [6-8]. Предполагается, что клин находится в условиях плоской деформации.

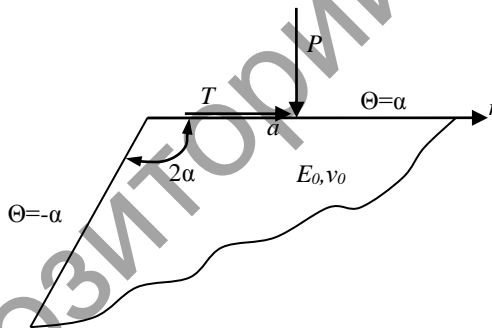


Рисунок 1. – Загрузка плоского упругого клина нормальной и касательной к грани сосредоточенными силами

Перемещения границ такого клина находим на основании известных выражений для напряжений, полученных Я.С. Уфляндом в виде комплексных интегралов, при использовании метода специальной аппроксимации, изложенного в работах В.М. Александрова. Анализ сходимости точного и аппроксимированных выражений для подынтегральных функций позволяет сделать вывод о допустимости использования в инженерных расчетах не более трех первых слагаемых в выражениях для подынтегральных функций [8].

Используя значения табличных интегралов, получены окончательные выражения для искомых перемещений. Например, для окружных перемещений грани клина, где приложена сила P , выражение имеет вид

$$V_{\Theta=\alpha} = \frac{2P(1-\nu_0^2)}{\pi E_0} \left(-\ln \left| \frac{\frac{\pi}{a^2}A(\alpha) - r^2 \frac{\pi}{a^2}A(\alpha)}{\frac{\pi}{a^2}A(\alpha)} \right| + \frac{\pi}{8\alpha} a_1 \operatorname{sech}(C(\alpha, a, r)) + \right. \\ \left. + \left(\frac{\pi}{8\alpha} \right)^3 a_3 \frac{1-sh^2(C(\alpha, a, r))}{ch^3(C(\alpha, a, r))} + \left(\frac{\pi}{8\alpha} \right)^5 a_5 \frac{sh^4(C(\alpha, a, r)) - 18sh^2(C(\alpha, a, r))}{ch^3(C(\alpha, a, r))} + \dots \right) \quad (1)$$

$$\text{где } a_1 = -\frac{16\alpha^3(2-\alpha A(\alpha))}{3B(\alpha)} - \frac{4}{3A(\alpha)};$$

$$a_3 = \frac{256\alpha^7(\alpha A(\alpha)-2)}{9(B(\alpha))^2} - \frac{128\alpha^5(\alpha A(\alpha)-3)}{15B(\alpha)} + \frac{16\alpha^4}{45(A(\alpha))^3} + 8\alpha^2 \cdot a_1;$$

$$a_5 = -\frac{64}{945(A(\alpha))^5} + \frac{1024\alpha^7(48\alpha^4 + 46\alpha^2 \sin^2 2\alpha + 3\sin^4 2\alpha)}{945(B(\alpha))^3} - \\ - \frac{256\alpha^8(160\alpha^4 + 88\alpha^2 \sin^2 2\alpha + 3\sin^4 2\alpha)}{945(B(\alpha))^3} A(\alpha) + 32\alpha^4 \cdot a_1 + 8\alpha^2(a_3 - 8\alpha^2 \cdot a_1);$$

$$A(\alpha) = \frac{4\alpha + \sin 4\alpha}{4\alpha^2 - \sin^2 2\alpha}; B(\alpha) = 4\alpha^2 - \sin^2 2\alpha; C(\alpha, a, r) = \frac{\pi}{8\alpha} \ln \frac{a}{r}.$$

Отметим, что для клина со свободными гранями выражение (1) дает только относительное перемещение грани $\Theta = \alpha$.

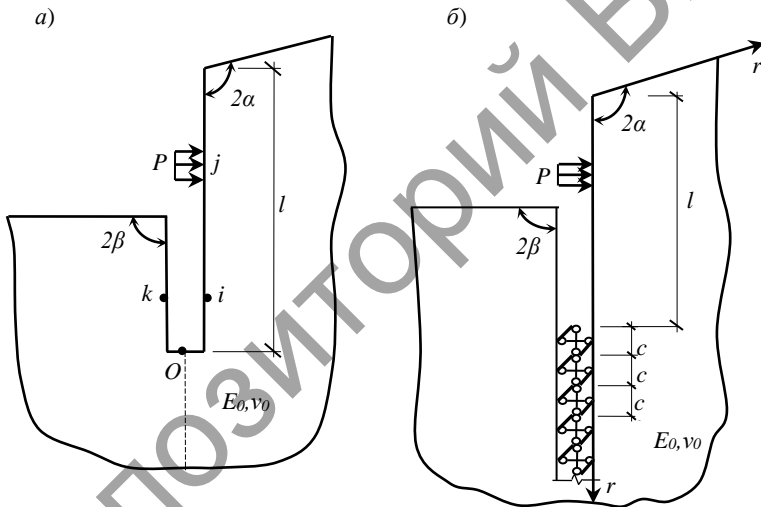
В диссертации также найдены перемещения границ плоского клина от действия сосредоточенной силы при других типах граничных условий: для клина с жестко защемленной и свободной гранями, для клина с шарнирно опертой и свободной гранями.

Формулы для определения перемещений в плоском клине со свободными гранями от действия распределённой на участке $[c, d]$ нагрузки, находятся путем интегрирования полученных ранее выражений для определения перемещений границ плоского клина от сосредоточенных сил [7]. При этом интегрирование выполняется отдельно на каждом из трех участков: при $r > d$; при $c \leq r \leq d$ и при $r < c$. Окончательные формулы имеют самостоятельное значение [4], содержат элементарные функции, легко интегрируются и дифференцируются.

Разработан алгоритм определения перемещений границ щели в упругой полуплоскости с ломаным контуром [1, 10]. Для этого рассматривается щель в упругой полуплоскости с ломаным, несимметричным очертанием контура (рисунок 2, а), на грань которой действует единичная горизонтальная нагрузка, равномерно распределённая по участку щели. Щель делит упругую среду на два плоских клина, между которыми действуют нормальные и касательные напряжения. Для определения этих напряжений сплошной контакт между плоскими клиновидными основаниями

заменяется контактом в отдельных точках путем введения связей Б.Н. Жемочкина по двум взаимно перпендикулярным направлениям (рисунок 2, б). В расчете можно учесть только ограниченное число связей на контакте между клиньями. Исследования показали, что для обеспечения необходимой точности достаточно учитывать присутствие связей на сорока участках, что составляет порядка $3l$ (см. рисунок 2, б).

Для определения усилий в удаляемых связях составляется система канонических уравнений, коэффициенты при неизвестных которой определяются при помощи полученных ранее выражений для перемещений от распределенных нагрузок. В результате численных исследований установлено, что точка, относительно которой определяются перемещения границ щели, должна находиться на достаточном удалении от места приложения нагрузки. Показано, что перемещения следует определять относительно точки, находящейся на границе между клиньями, но удаленной от вершины щели (точка O на рисунке 2, а) на расстояние порядка $20..30$ длин области, на которой учитывается контакт между плоскими клиньями.



а) модель; б) расчетная схема

Рисунок 2. – Щель в упругом основании с ломаным контуром

В третьей главе разработана новая методика итерационного расчета линейно-упругой стенки в линейно-упругой полуплоскости с ломаным несимметричным очертанием наружного контура [1].

Вначале рассматривается абсолютно жесткая стенка в упругой среде, которая находится в условиях плоской деформации (рисунок 3).

Будем считать стенку как бы вставленной в образованную в грунте щель (см. рисунок 3). При повороте стенки вследствие невозможности возникновения растягивающих напряжений на контакте стенки и грунта, будут возникать разрывы

сплошности грунтовой среды, а края щели, возникающей в упругой среде, не будут смыкаться. Расчетная схема рассматриваемой задачи будет иметь вид, изображенный на рисунке 4. Такая расчетная схема соответствует двум точкам нулевых напряжений k и m , или точкам раздела граничных условий. Положение этих точек (границ областей контакта стенки с упругой средой) заранее не известны, в чем и состоит сложность поставленной задачи. Для расчета используется смешанный метод. В качестве неизвестных берутся усилия X_i во введенных связях, горизонтальное перемещение u_0 и угол поворота φ_0 вершины стенки на поверхности основания.

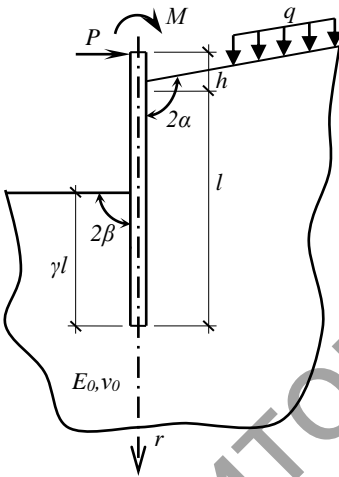


Рисунок 3. – Жесткая стенка в упругой полуплоскости под действием внешней нагрузки

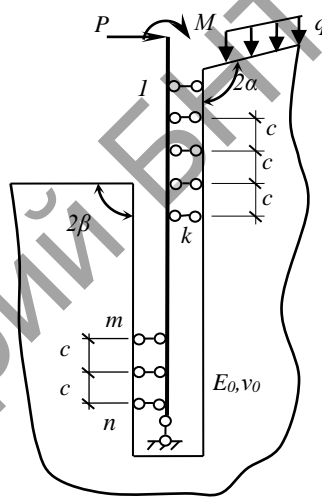


Рисунок 4. – Расчетная схема стенки в упругой среде

Расчет стенки ведется итерационным путем. Задаётся начальное положение точек раздела граничных условий k и m , или точек нулевых напряжений (см. рисунок 4), т. е. номера участков, на которых усилия во введенных связях получаются равными нулю. Далее решается система канонических уравнений метода сил, где коэффициенты при неизвестных и свободные члены канонических уравнений определяются на основании алгоритма определения перемещений границ щели в упругой полуплоскости. Полученное решение системы анализируется. Если усилия во всех введенных связях получаются отрицательными и не происходит перекрытия граней щели, то данное решение является искомым. В противном случае задаётся новое положение точек раздела k и m , и расчет повторяется. На рисунке 5 отражено изменение контактных напряжений при переходе от одной итерации к другой для частного случая рассматриваемой задачи. На рисунке 6 показаны результаты расчета для жесткой стенки.

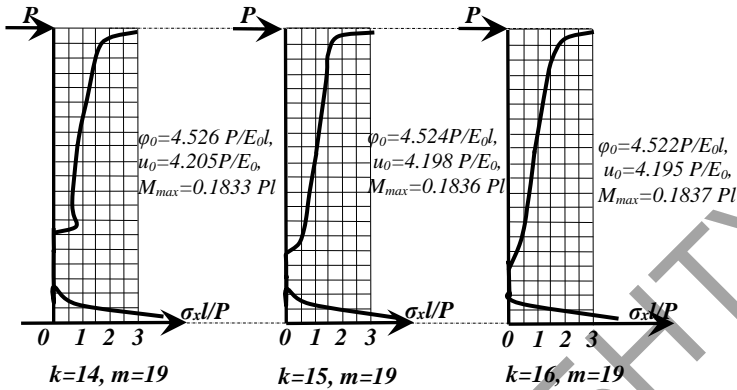


Рисунок 5. – Изменение контактных напряжений по длине стенки на разных итерациях

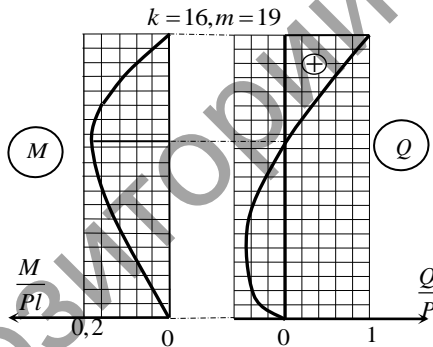


Рисунок 6. – Эпюры поперечных сил и изгибающих моментов

Далее производится расчет в предположении, что стенка обладает гибкостью. Коэффициенты при неизвестных для системы канонических уравнений метода сил определяются с учетом деформаций изгиба стенки. Для этого вводятся дополнительные слагаемые $\xi \cdot \omega_{i,j}$ и $\xi \cdot \omega'_{i,j}$, которые определяют прогибы гибкой стенки в основной системе смешанного метода.

Здесь: $\xi = \frac{E_0 \cdot l^3}{D}$ – показатель гибкости; D – цилиндрическая жёсткость стенки, тм;

$$\omega_{i,j} = \frac{a_i^2(3a_j - a_i)}{6l^3}, \text{ при } a_i < a_j, \quad \omega_{i,j} = \frac{a_j^2(3a_i - a_j)}{6l^3}, \text{ при } a_i > a_j,$$

где a_i и a_j – расстояния от вершины стенки до точки i или точки j стенки, соответственно (см. рисунок 2, а), м.

Исследование влияния гибкости стенки на ее напряженно-деформированное состояние позволило сделать следующие выводы:

1) Впервые обнаружено наличие двух точек раздела граничных условий на стенке при учете ломаного контура границы полуплоскости, что не учитывалось при расчете стенки в упругой полуплоскости с прямолинейной границей.

2) При расчете жесткой стенки в упругом основании с учетом разрыва сплошности основания значение максимального изгибающего момента в сечении стенки увеличивается на 35% по сравнению с расчетом без учета разрыва сплошности упругого основания.

3) С увеличением показателя гибкости стенки ξ от 0 до 20 значение максимального изгибающего момента в сечении стенки уменьшается на 15%, а значение максимального контактного напряжения – увеличивается на 25%, точка нулевых напряжений k смещается ближе к границе основания (вершине стенки), а точка m – ближе к вершине щели.

В четвертой главе разработана новая методика итерационного расчета нелинейно-упругой гибкой стенки в линейно-упругой полуплоскости [2-3, 9-11].

Согласно нормативным документам для расчета железобетонных конструкций по второй группе предельных состояний допускается использовать диаграмму деформирования конструкции, связывающую изгибающий момент и кривизну. Исходными данными для построения диаграммы ‘момент-кривизна’ являются геометрические характеристики сечения, марка бетона и класс арматуры. С помощью программы БЭТА 3.2 (авторы Т.М. Пецольд, Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов) зависимость изгибающего момента от кривизны определяется как функция, заданная рядом узловых точек (рисунок 7). Аналитическое выражение зависимости « $M - 1/\rho$ » находим с помощью программного пакета «Mathematica 6.0», заменяя истинную функцию $M(1/\rho)$ – аппроксимирующей функцией:

$$M(1/\rho) = B_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho} + e^{-k \frac{\rho_0}{\rho}} \cdot \left(B_1 \frac{\rho_0}{\rho} - B_3 \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^3 + B_5 \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^5 \right), \quad (2)$$

где $\rho_0 = 1\text{м}$, а B_0 – начальная жесткость сечения стенки (см. рисунок 6), тм.

Для железобетонной стенки из бетона класса С25/30 с размерами сечения $b \times h = 1\text{м} \times 0.6\text{м}$ и армированием $10\varnothing 25\text{ S500} + 10\varnothing 20\text{ S500}$ хомуты $\varnothing 8\text{ S245}$ получено: $B_0 = 86103\text{ тм}$, $B_1 = 76787\text{ тм}$, $B_3 = 6.91 \cdot 10^9\text{ тм}$, $B_5 = 2.11 \cdot 10^{15}\text{ тм}$, $k = 1000\text{ тм}$.

На основании полученной диаграммы по предыдущему расчету создается массив кривизн для каждого участка стенки. Затем по полученному массиву кривизн и соответствующим значениям изгибающих моментов на каждом участке составляется массив жесткостей $B_i^{(z)}$ для нелинейного расчета,

$$B_i^{(z)} = \frac{\partial M((1/\rho))^{(z)}}{\partial (1/\rho)_i}, \quad (3)$$

где $i = (1, n)$ – номер участка стенки, $z = 1, 2, \dots$ – номер итерации нелинейного расчета.

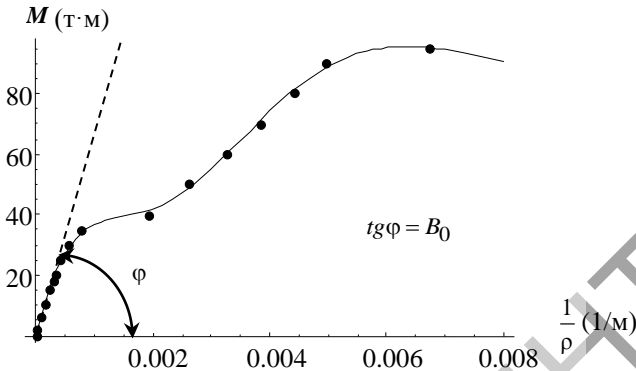


Рисунок 7. – Диаграмма зависимости изгибающего момента от кривизны, заданная рядом узловых точек, и график аналитической зависимости «момент–кривизна»

Расчетная схема имеет такой же вид (см. рисунок 4), как и для линейной постановки задачи. Однако для нелинейного расчета жесткость стенки на каждом участке будет иметь свое значение, следовательно, меняются и значения прогибов стенки на каждом участке в основной системе:

$$y_{i,j}^{(z)} = \sum \int \frac{M_i^{(z)} \cdot M_j^{(z)}}{B_i^{(z)}} dx. \quad (4)$$

Таким образом, конструктивно нелинейный расчет нелинейно-упругой стенки в линейно-упругой среде заменяется итерационным линейным расчетом стенки кусочно-постоянной жесткости.

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока значения искомых усилий $X_i^{(z)}$ на двух соседних итерациях не совпадут в пределах допустимой точности, при этом значения $X_i^{(z)}$ не должны принимать положительные значения, а также не происходит перекрывание граней щели.

Анализ результатов расчета нелинейно-упругой стенки в линейно-упругом основании позволяет сделать следующие выводы: при переходе к нелинейному расчету значение максимального изгибающего момента в сечении стенки уменьшается на 30%, а значения относительного горизонтального и углового перемещений на поверхности упругой среды увеличиваются на 15%.

В пятой главе разработана новая методика итерационного расчета линейно-упругой гибкой стенки, находящейся в линейно-упругой весомой полуплоскости [5, 12].

Предварительно определяются перемещения границы плоского упругого клина от собственного веса материала клина (рисунок 8).

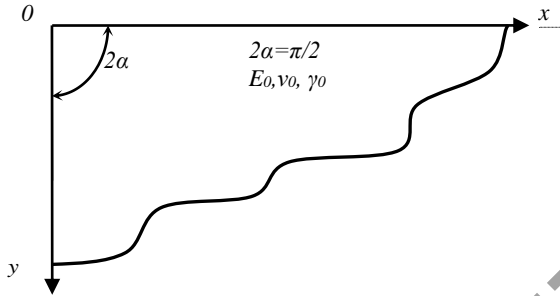


Рисунок 8. – Четвертьплоскость, нагруженная силами собственного веса

Выражение для полной потенциальной энергии клина \mathcal{E} складывается из суммы потенциальной энергии деформаций упругой системы U и работы внешних объемных сил Π с обратным знаком:

$$\mathcal{E} = U - \Pi, \quad (5)$$

$$\text{где } U = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \left[\lambda (\varepsilon_x + \varepsilon_y)^2 + 2\mu (\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2) + \mu \gamma_{xy}^2 \right] dx dy; \quad (6)$$

$$\Pi = \gamma_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} v \varepsilon_y dx dy;$$

где v – вертикальные перемещения точек клина, λ, μ – коэффициенты Ламе.

Задаемся перемещениями точек упругой четвертьплоскости:

$$u = e^{-\frac{x}{l}} \frac{y}{l} \left(a_0 + a_1 \frac{x}{l} + a_2 \frac{y}{l} \right); \quad (7)$$

$$v = G \left(\frac{y}{l} \right)^2 + e^{-\frac{x}{l}} \frac{y}{l} \left(b_0 + b_1 \frac{x}{l} + b_2 \frac{y}{l} \right),$$

где $G = \frac{(1-\nu_0^2) l^2}{2E_0} \gamma_0$; a_i, b_i – неизвестные постоянные.

С использованием соотношений Коши для плоской задачи теории упругости строится функционал полной потенциальной энергии системы \mathcal{E} , а затем по методу Ритца неизвестные постоянные выражения (7) определяются решением системы:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial a_k} = 0; \\ \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial b_k} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Изложенный подход по определению перемещений в упругой весомой четвертьплоскости может быть распространен на определение перемещений для плоского клина с любым углом α . Изменения будут касаться только лишь выбора координатных функций в выражениях (7).

Дальнейший расчет стенки в упругом основании с учетом собственного веса материала основания совпадает с алгоритмом расчета для стенки в невесомом основании. Учет собственного веса материала основания осуществляется на этапе определения напряжений на контакте между клиньями, образующими упругую полуплоскость с ломаным очертанием контура. Для этого вводится дополнительное слагаемое при определении свободных членов канонических уравнений метода сил, представляющее собой перемещение границы плоского упругого клина от собственного веса материала клина.

Был выполнен расчет жесткой (таблица 1) и гибкой (таблица 2) стенки, при различных показателях гибкости, что позволило сделать вывод о качественном соответствии результатов расчета стенки в невесомом и весомом основании. Учет собственного веса материала упругой полуплоскости незначительно (расхождение не более 1,5% (таблица 1)) влияет на распределение внутренних сил в сечениях жесткой стенки, заглубленной в упругое основание с ломаным очертанием контура. Точка экстремума на эпюре моментов для стенки в упругой *весомой* полуплоскости сдвигается вверх на величину порядка 0,05*l* относительно положения экстремума при расчете стенки в упругой *невесомой* полуплоскости. На контакте стенки с полуплоскостью образуется раздел граничных условий в двух точках, причем в случае весомой полуплоскости положение этих точек смещено на величину порядка 0,05*l* к вершине стенки по сравнению с их положением для невесомой полуплоскости.

Таблица 1. – Результаты расчета жесткой стенки

Результаты расчета жесткой стенки:	$\frac{M_{\max}}{P \cdot l}$	$\frac{E_0 \cdot l}{P \cdot (1 - \nu_0^2)} \phi_0$	$\frac{E_0}{P \cdot (1 - \nu_0^2)} u_0$	k m
в упругом весомом основании	0,186	1,89	1,8	14 18
в невесомом упругом основании	0,184	4,2	3,54	16 19

Таблица 2. – Результаты расчета гибкой стенки в упругой весомой полуплоскости при различных показателях гибкости ξ

ξ	k m	$\frac{M_{\max}}{P \cdot l}$	$\sigma_{\max} \frac{l}{P}$	$\frac{E_0 \cdot l}{P \cdot (1 - \nu_0^2)} \phi_0$	$\frac{E_0}{P \cdot (1 - \nu_0^2)} u_0$
0	14 18	0,1857	2,85	1,89	1,8
20	14 18	0,164	3,308	3,41	2,09
80	12 18	0,143	4,952	6,57	2,66
100	11 18	0,118	5,25	7,36	2,79

В 6-й главе для оценки корректности линейного и нелинейного расчетов, полученных по описанной автором методике, было выполнено моделирование и решение поставленной в диссертационном исследовании задачи при помощи программы Ли́ра 9.6, реализующей МКЭ (рисунок 9) [5, 12].

Сопоставление результатов расчета на ПК Ли́ра 9.6 с результатами расчета по методике автора показало, что в линейной постановке при учете собственного веса грунтового основания расположение точек нулевых напряжений получается одинаковым. Результаты расчета для гибкой стенки в упругой весо́мой полуплоскости, полученные численно-аналитическим авторским методом, качественно согласуются с результатами расчета на ПК Ли́ра 9.6, реализующего МКЭ. Расхождение по максимальным изгибающим моментам в сечениях стенки составляет, например, не более 5% (рисунок 10).

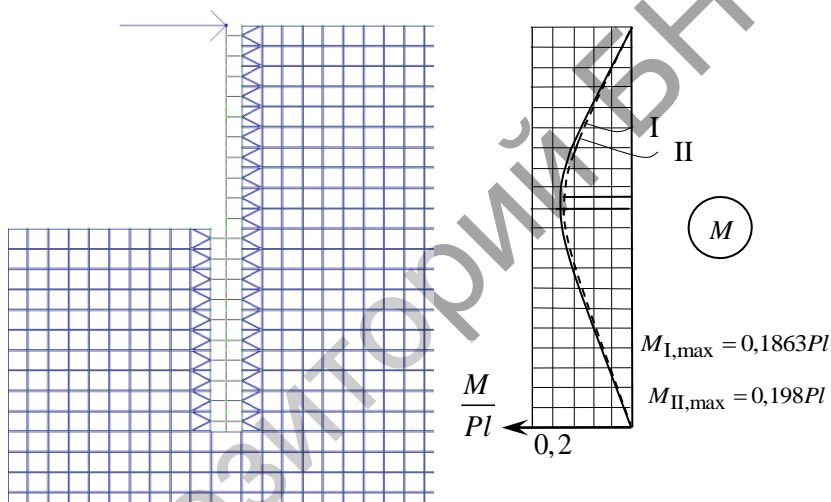


Рисунок 9. – Расчетная схема для программного комплекса Ли́ра (фрагмент)

I – результат, полученный по авторской методике;
 II – результат, полученный при помощи ПК-Ли́ра 9.6
 Рисунок 10. – Эпюры изгибающих моментов для гибкой стенки в весо́мой полуплоскости

Проведено также сопоставление результатов расчета гибкой стенки в упругом основании по предлагаемой новой методике с теоретическими и экспериментальными исследованиями других авторов.

Например, в работе К.В. Сливец приведены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния системы «ограждение-грунт» с использованием нелинейных упругопластических моделей основания, а также дано сравнение полученных результатов с данными натурных наблюдений.

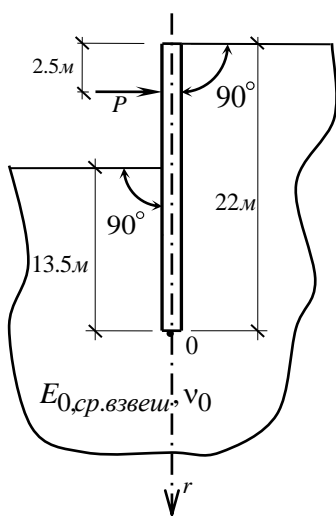
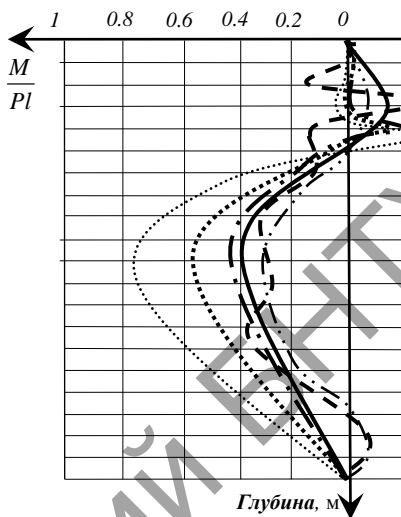


Рисунок 11. – Горизонтально нагруженная гибкая стенка в упругой весовой полуплоскости



- — — — — результат, полученный по авторской методике;
- - - - - результат, полученный по данным инклинометров;
- результат, полученный по методу Якоби;
- результат, полученный способом коэффициента постели, постоянного с глубиной;
- - - - - результат, полученный для идеальной упругопластической модели с критерием прочности Кулона-Мора и для нелинейной упругопластической модели Hardening Soil Model, реализованной в программе Plaxis;
- · - · - · результат, полученный для нелинейной упругопластической модели, реализованной в программе FEM-Models

Рисунок 12. – Сравнение данных, полученных на опытной площадке, с результатами расчетов по различным методам, приведенным в диссертации Сливец К.В.

Для сопоставления с приведенными результатами, в диссертационной работе была поставлена и решена аналогичная задача с применением методики автора настоящей диссертации (рисунок 11). При этом в качестве модуля деформации E_0 принимается средневзвешенное значение, полученное по данным статического зондирования на участке опытной площадки:

$$E_{0,ср.взвеш} = \frac{\sum E_{0,i} \cdot H_i}{H} . \quad (9)$$

Полученные эпюры изгибающих моментов при этом качественно согласуются с приведенными выше результатами (рисунок 12), показывая результаты близкие к натурным наблюдениям [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В результате выполненного комплекса численно-аналитических исследований получены новые научные численно-теоретические результаты, имеющие важное значение для развития методов расчета физически нелинейных конструкций, заглубленных в упругое основание и взаимодействующих с ним.

Разработана новая методика расчета гибкой физически нелинейной стенки в упругом основании с ломаным граничным контуром, отличающаяся:

1. Учетом образования плавающей границы контакта стенки с основанием, что приводит к перераспределению сил взаимодействия и, как следствие, к увеличению экстремальных значений внутренних сил и перемещений в стенке [1, 2].

2. Дискретной физической моделью взаимодействия двух упругих клиньев, образующих единое упругое основание со щелью [1, 2].

3. Разработанным алгоритмом поиска точек разрыва граничных условий на контакте стенки с основанием [2, 3].

4. Впервые полученными формулами для определения перемещений границ плоского упругого клина со свободными гранями от действия сосредоточенных сил и распределенной нагрузки [6, 7, 8], которые имеют самостоятельное значение и могут быть использованы для решения плоских контактных задач теории упругости, например для расчета балок на упругом основании [4].

5. Результатами качественного и количественного анализа распределения сил взаимодействия и перемещений в системе «стенка (гибкая / жесткая) – основание» [5, 9, 10, 11, 12].

Применение предложенной методики позволяет решать важные прикладные задачи расчета и проектирования несущих конструкций, взаимодействующих с упругим основанием.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Изложенная в работе методика расчета нелинейно-упругой гибкой стенки в упругом основании, позволяет рассчитывать по прочности и деформациям шпунтовые и фундаментные стенки, заглубленные в упругое основание со сложным ломаным контуром поверхности. Приведенные алгоритмы, методики, зависимости могут применяться в практических расчетах.

Результаты научно-исследовательской работы были приняты ОАО Минскметрострой для внедрения в практику проектирования на объекте «Участок продления первой линии Минского метрополитена от ст. Петровщина до ст. Малиновка», а также были внедрены в учебный процесс УВО «Белорусский государственный университет транспорта», что подтверждается соответствующими актами внедрения. Результаты исследований и разработанная методика итерационного расчета нелинейно упругой гибкой стенки в упругой несомой полуплоскости были внедрены в проектную документацию УП институт «Белжелдорпроект» при проектировании объекта «Электрификация направления Молодечно – Гудогай – госграница», что подтверждено актом о практическом использовании результатов исследования в строительстве.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в рецензируемых научных журналах Республики Беларусь

1. Босаков, С. В. Конструктивно нелинейный расчет горизонтально нагруженной жесткой стенки в упругой среде / С. В. Босаков, К. В. Дмитриева // Строительство и архитектура : материалы XI Междунар. науч.-метод. межвуз. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», Брест, 25–27 нояб. 2004 г. : прил. [к] Вестн. Брест. гос. техн. ун-та : [в 2 ч.] / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: П. С. Пойта (гл. ред.) [и др.]. – Брест, 2004. – Ч. 1. – С. 121–125.
2. Босаков, С. В. Расчет горизонтально нагруженной железобетонной стенки в упругой среде с учетом конструктивной нелинейности / С. В. Босаков, К. В. Дмитриева // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 75–80.
3. Дмитриева, К. В. Расчет горизонтально нагруженной физически нелинейной стенки в упругой среде с учетом конструктивной нелинейности / К. В. Дмитриева // Строит. наука и техника. – 2006. – № 5. – С. 31–36.
4. Дмитриева, К. В. Контактная задача для штампа на упругом клине со свободными гранями / К. В. Дмитриева // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. – 2010. – № 4. – С. 24–29.
5. Дмитриева, К. В. Расчет жесткой стенки в упругой несомой полуплоскости / К. В. Дмитриева // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 6. – С. 493–503.

Статьи в сборниках статей, трудов Республики Беларусь

6. Дмитриева, К. В. Перемещения в плоском клине со свободными гранями от действия сосредоточенных сил / К. В. Дмитриева // Рефераты докладов международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (56-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БНТУ) : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2003. – Т. 2. – С. 9.
7. Дмитриева, К. В. Перемещения в плоском клине со свободными гранями от действия распределенной нагрузки / К. В. Дмитриева, С. В. Босаков // НИРС – 2003 : VIII Респ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 9–10 дек. 2003 г. : тез. докл. :

в 7 ч. / редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2003. – Ч. 4 : Архитектура, строительство, транспортные коммуникации, аграрно-технические и аграрно-инженерные науки. – С. 66.

8. Босаков, С. В. Функции Грина для клиновидных моделей упругого основания. / С. В. Босаков, К. В. Дмитриева // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : междунар. сб. науч. тр. / Беларус. гос. ун-т трансп. ; редкол.: И. А. Кудрявцев (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2005. – С. 34–40.

9. Дмитриева, К. В. Изгиб физически нелинейной стенки в грунте / К. В. Дмитриева // Материалы научной конференции учащихся, студентов и аспирантов, посвященной 85-летию БНТУ, Минск, 15–17 ноября 2005 г. / Беларус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2005. – С. 105–110.

10. Дмитриева, К. В. Анализ напряженно-деформированного состояния шпунтовой стенки в упругой среде с учетом конструктивной и физической нелинейностей / К. В. Дмитриева // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 18–19 нояб. 2010 г. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2010. – С. 8–11.

11. Дмитриева, К. В. Анализ напряженно-деформированного состояния гибкой стенки в упругой среде с учетом конструктивной и физической нелинейностей / К. В. Дмитриева // Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур : материалы междунар. науч. конф., Минск, 16–20 сент. 2013 г. / Беларус. гос. ун-т ; редкол.: Г. И. Михасев, Х. Альтенбах (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 258–260.

12. Дмитриева, К. В. Методика расчета заглубленной в упругое весомое основание нелинейно-упругой стенки / К. В. Дмитриева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 27–28 апреля 2017 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 242–243.

РЭЗІЮМЭ

Дзмітрыева Ксенія Уладзіміраўна

Разлік нелінейна-пругкай гнуткай сценкі ў пругкай аснове

Ключавыя словы: кантактная задача, плоская дэфармацыя, гнуткая сценка, пругкая паўплоскасць, фізічная нелінейнасць, аднабаковыя сувязі, нелінейна-пругкі закон дэфармавання.

Мэта работы: распрацоўка новай метадыкі разліку нелінейна пругкай гнуткай сценкі у пругкай аснове з ламаным абрысам контуру.

Атрыманы новыя формулы для вызначэння перамяшчэнняў межаў пругкага плоскага кліна з адвольным вуглом раствору ад засяроджаных сіл і ад дзеяння раўнамерна-размеркаванай нагрузкі, якія дазваляюць атрымаць набліжанае рашэнне зададзенай дакладнасці і выражаныя ў выглядзе простых функцый, якія лёгка інтэгруюцца і дыферэнцыруюцца.

Пастаўлена і вырашана кантактная задача пра ўзаемадзеянне лінейна пругкай гнуткай сценкі ў пругкай паўплоскасці з ламаным абрысам знешняга контуру. Улічана ўзнікненне плавальнай мяжы кантакту сценкі з асновай, што прыводзіць да пераразмеркавання сіл узаемадзеяння і; як вынік, да павелічэння экстрэмальных значэнняў унутраных сіл і перамяшчэнняў у сценцы. Распрацаваны алгарытм пошуку кропак разрыву межавых умоў на кантакце сценкі з асновай.

Пастаўлена задача пра напружана-дэфармаваны стан нелінейна пругкай гнуткай сценкі ў пругкай паўплоскасці са складаным ламаным абрысам знешняга контуру і прапанавана новая лікава-аналітычная метадыка яе разліку ў выглядзе ітэрацыйнага працэсу. Знешнія ітэрацыі ажыццяўляюцца па метады дыскрэтызацыі кантактнай зоны. На кожным кроку знешніх ітэрацый ажыццяўляецца ўнутраны алгарытм, звязаны з дэфармацыйнай мадэллю матэрыялу сценкі. У якасці закона нелінейна-пругкага дэфарміравання гнуткай сценкі выкарыстоўваецца новая нелінейная функцыйная залежнасць паміж выгінальнымі момантамі ў нармальных сячэннях сценкі і крывізной яе сярэдняй паверхні, выяўленая ў выглядзе здабытку экспаненты на падліном 5-ай ступені ад крывізны.

Атрыманы новыя вынікі якаснага і колькаснага аналізу размеркавання сіл узаемадзеяння і перамяшчэнняў у сістэме «сценка (гнуткая / цвёрдая) – аснова». Пры рэалізацыі новай метадыкі разліку гнуткай сценкі ў пругкай аснове выкарыстоўваецца праграмы пакет для сімвальных вылічэнняў «Mathematica 6.0».

Вынікі даследаванняў і распрацаваная метадыка ітэрацыйнага разліку нелінейна пругкай гнуткай сценкі ў пругкай важкай паўплоскасці былі ўведзены ў навучальны працэс УВА «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт транспарта». Выкарыстоўванне прапанаванай метадыкі дазваляе выпашаць важныя прыкладныя задачы разліку і праектавання апорных канструкцый, што ўзаемадзеіваюць з пругкай асновай.

РЕЗЮМЕ

Дмитриева Ксения Владимировна

Расчет нелинейно-упругой гибкой стенки в упругом основании

Ключевые слова: контактная задача, плоская деформация, гибкая стенка, упругая полуплоскость, физическая нелинейность, односторонние связи, нелинейно-упругий закон деформирования.

Цель работы: разработка новой методики расчета нелинейно упругой гибкой стенки в упругом основании с ломаным граничным контуром.

Получены новые формулы для определения перемещений границ упругого плоского клина с произвольным углом раствора от сосредоточенных сил и от действия равномерно-распределенной нагрузки, позволяющие получить численное решение заданной точности и выраженные в виде простых, легко интегрируемых и дифференцируемых функций. Впервые в качестве модели основания предлагается дискретная физическая модель взаимодействия двух упругих клиньев, образующих единое упругое основание со щелью.

Поставлена контактная задача о взаимодействии линейно упругой гибкой стенки в упругой полуплоскости с ломаным очертанием наружного контура. Учтено образование плавающей границы контакта стенки с основанием, что приводит к перераспределению сил взаимодействия и, как следствие, к увеличению экстремальных значений внутренних сил и перемещений в стенке. Разработан алгоритм поиска точек разрыва граничных условий на контакте стенки с основанием.

Поставлена задача о напряженно-деформированном состоянии нелинейно упругой гибкой стенки в упругой полуплоскости со сложным ломаным очертанием наружного контура и предложена новая численно-аналитическая методика ее решения в виде итерационного процесса. Внешние итерации осуществляются по методу дискретизации контактной зоны. На каждом шаге внешних итераций осуществляется внутренний алгоритм, связанный с деформационной моделью материала стенки. В качестве закона нелинейно-упругого деформирования используется новая нелинейная функциональная зависимость между изгибающими моментами в нормальных сечениях стенки и кривизной её срединной поверхности, выраженная в виде произведения экспоненты на полином 5-ой степени от кривизны.

Получены новые результаты качественного и количественного анализа распределения сил взаимодействия и перемещений в системе «стенка (гибкая / жесткая) – основание». При реализации методики расчета гибкой стенки в упругом основании используется программный пакет для символьных вычислений «Mathematica 6.0».

Результаты исследований и разработанная методика итерационного расчета нелинейно упругой гибкой стенки в упругой весомой полуплоскости были внедрены в учебный процесс УВО «Белорусский государственный университет транспорта». Применение предложенной методики позволяет решать важные прикладные задачи расчета и проектирования несущих конструкций, взаимодействующих с упругим основанием.

SUMMARY

Dmitrieva Ksenia Vladimirovna

Calculation of the nonlinear-flexible wall in the elastic base

Keywords: contact problem, plane deformation, flexible wall, elastic half-plane, physical non-linearity, one-way links, nonlinear elastic deformation law.

Objective: development of the new method of the flexible wall calculating, recessed in the elastic base with complicated broken outline contour.

New formulas are obtained for determining the movement of the boundaries of an elastic flat wedge with an arbitrary solution angle from concentrated forces and from the action of a uniformly distributed load, allowing one to obtain a numerical solution of a given accuracy and expressed in the form of simple, easily integrable and differentiable functions. For the first time, a discrete physical model of interaction of two elastic wedges, forming a single elastic base with a slit, is proposed as a base model.

It was set the contact problem on the interaction of a linearly elastic flexible wall in an elastic half-plane with a broken outline contour. The formation of the floating boundary of the contact of the wall with the base is taken into account, which leads to a redistribution of the interaction forces and as a consequence to an increase in the extreme values of internal forces and displacements in the wall. It is developed an algorithm for finding the points of discontinuity of the boundary conditions at the contact of the wall with the base.

It is posed the problem of the stress-strain state of a nonlinearly elastic flexible wall in an elastic half-plane with a complex broken outline contour and it is proposed a new numerical-analytical method for its solution in the form of an iterative process. External iterations are carried out by the method of discretization of the contact zone. At each step of the outer iterations, it is implemented an internal algorithm associated with the deformation model of the wall material. As a law of nonlinear elastic deformation is used a new nonlinear functional relationship between the bending moments in the normal sections of the wall and the curvature of its middle surface, expressed as the product of the exponent on the fifth-degree polynomial of curvature.

New results of qualitative and quantitative analysis of the distribution of interaction forces and displacements in the system "wall (flexible / rigid) - base" are obtained. By implementing the methodology for calculating a flexible wall in an elastic base, it is used software package for symbolic calculations "Mathematica 6.0"

The research results and the developed method of iterative calculation of a nonlinearly elastic flexible wall in an elastic weighty half-plane were introduced into the educational process of the Belarusian State Transport University. The application of the proposed methodology allows to solve important applied problems of calculation and design of load-bearing structures interacting with an elastic base.

Научное издание

ДМИТРИЕВА
Ксения Владимировна

РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОЙ ГИБКОЙ СТЕНКИ
В УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.17 – «Строительная механика»

Подписано в печать .05.2017 г. Формат 60x84 ¹/₁₆
Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Печать: ризография.
Объем: 1,35 усл. печ. л.; 1,3 уч.-из. л.
Тираж 80 экз. Заказ № _____

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.