

**На правах рукописи**



**МИКЛУШ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ**

**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ  
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С БАЛЛАСТИРОВОЧНЫМИ  
УСТРОЙСТВАМИ**

**Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Москва - 2015**

Работа выполнена в Закрытом акционерном обществе "Газпром СтройТЭК Салават" (ЗАО "Газпром СтройТЭК Салават").

**Научный руководитель:**

**Решетников Александр Данович**, доктор технических наук.

**Официальные оппоненты:**

**Колотилев Юрий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора ООО "Промышленно-коммерческая фирма «Вертикаль»";

**Химич Виталий Николаевич**, кандидат технических наук, главный инженер ООО "СпецГазСервис".

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВПО "Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина".

Защита состоится «        » февраля 2015 г. в 13.30 часов на заседании диссертационного совета Д 511.001.02, созданного на базе ООО "Газпром ВНИИГАЗ", по адресу: 142717, Московская область, Ленинский район, поселок Развилка.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО "Газпром ВНИИГАЗ" и на сайте: [www.vniigaz.ru](http://www.vniigaz.ru).

Автореферат диссертации разослан " \_\_\_\_ " декабря 2014 г.

**Ученый секретарь**

**диссертационного совета,  
кандидат технических наук**



**Курганова Ирина Николаевна**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** На современном этапе развития газотранспортной системы приоритетным способом поддержания работоспособности магистральных газопроводов (МГ) является широкое внедрение эффективных методов технологического проектирования строительного производства в различных инженерно-геологических условиях, в том числе инновационных разработок в области организационных и технологических решений строительства и ремонта МГ в заболоченной и обводненной местности. Большой объем ремонта МГ (более чем 5000 км/год) обуславливает своевременность реализации современных технологических решений, обеспечивающих эксплуатационную надежность системы МГ.

Задача увеличения годовых объемов и качества строительных и ремонтных работ может быть решена за счет разработки методов усовершенствования технологического проектирования строительства в сложных инженерно-геологических условиях, а также разработки новых методических решений в определении показателей устойчивости участков МГ, вызванных эксплуатационными нагрузками и воздействиями. Поэтому разработка методов оценки работоспособности участков МГ с балластировочными устройствами в сложных инженерно-геологических условиях с учетом реальных природно-климатических условий строительства и ремонта является актуальной темой диссертационного исследования.

**Цель диссертационной работы** - разработка методов оценки работоспособности участков магистральных газопроводов с балластировочными устройствами с использованием современных информационных технологий, что должно существенно расширить возможности анализа эксплуатационной надежности газопроводов.

### **Задачи исследования:**

- анализ методик расчета показателей устойчивости участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях заболоченных и обводненных грунтов;

- разработка методик расчета параметров балластировки для обеспечения работоспособности участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях с использованием диаграмм нагрузка - перемещение для грунта;

- совершенствование методики и алгоритма расчета показателей устойчивости участка МГ в сложных инженерно-геологических условиях с использованием функционально-аналитического описания механических свойств грунта;

- формирование системы проектирования в части применения балластирующих устройств при строительстве и ремонте МГ с учетом сложных инженерно-геологических условий;

- разработка принципов практической реализации системы проектирования применения балластирующих устройств (в частности, утяжелителя УБГЗ) при строительстве и ремонте МГ в сложных инженерно-геологических условиях.

**Научная новизна.** Систематизированы нормативно-технические подходы к решению задач проектирования закрепления участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях путем эффективного использования балластирующих устройств.

Разработана иерархическая структура обоснования критериев оценки и принципов использования балластирующих устройств на участках МГ в сложных инженерно-геологических условиях, обеспечивающая устойчивость участков МГ на заболоченных и обводненных грунтах.

Впервые разработана методика аналитического представления механических характеристик грунтов с использованием вероятностных показателей, позволяющая выполнять расчет показателей устойчивости участков МГ в обводненной местности с использованием диаграмм нагрузка - перемещение.

Разработана методика расчета показателей устойчивости участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях с учетом упругости грунта основания и функционально-аналитическим описанием механических свойств грунта.

Впервые разработан пакет прикладных программ для проектирования использования балластирующих устройств при строительстве и ремонте МГ в сложных инженерно-геологических условиях, позволяющий в кратчайшие сроки оценить эффективность реализации балластирующих технологий и подготовить рекомендации по условиям их практического осуществления.

**Защищаемые положения.** Представление принципов использования балластирующих устройств в сложных инженерно-геологических условиях при нормировании показателей устойчивости участков МГ в виде иерархической структуры.

Обоснование выбора показателей балластировки участков МГ в заболоченной и обводненной местности для создания условий их работоспособности на основе аналитического представления механических характеристик грунтов с использованием вероятностных показателей.

Методика исследования показателей устойчивости участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях с учетом упругости грунта основания и функционально-аналитическим описанием механических свойств грунта.

Обоснование комплексной системы проектирования применения балластирующих устройств при строительстве и ремонте МГ в сложных инженерно-геологических условиях с оценкой эффективности

реализации балластирующих технологий и возможностью подготовки рекомендаций по условиям их практического осуществления.

**Практическая значимость** заключается в разработке методов и средств оценки работоспособности участков МГ с балластировочными устройствами в сложных инженерно-геологических условиях с использованием информационных технологий. Комплекс разработанных алгоритмов и методик в виде пакетов прикладных программ (РАР\_003 и РАР\_006) снижает продолжительность работ по строительству и ремонту линейной части МГ, начиная от планирования работ и заканчивая сдачей объекта в эксплуатацию с заданным качеством и высокими показателями эксплуатационной надежности.

Разработанная система балластировки с использованием грунтозаполняемых контейнеров (УБГЗ) может быть реализована при производстве строительных и ремонтных работ на участках МГ на обводняемой местности. Использование УБГЗ в сложных инженерно-геологических условиях дает возможность повысить экономическую эффективность строительного производства. Снижение затрат на 1 км газопровода соответственно составляет: 43% ( $D_o = 1020$  мм); 56% ( $D_o = 1220$  мм) и 74% ( $D_o = 1420$  мм).

Методы и средства анализа работоспособности участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях были использованы предприятиями ООО "Инвестстройэкология" и ООО "Промышленно-коммерческая фирма "Вертикаль"" при выполнении капитального ремонта линейной части магистрального газопровода Уренгой - Ужгород (2370,8 км - 2468,4 км).

Результаты исследований использованы при разработке следующих нормативно-методических документов:

- технические условия ТУ № 4832-007-58183933-2007 - устройства балластирующие грунтозаполняемые (УБГЗ), ОАО "Газпром", Москва, 2007;

- методика проведения испытаний устройств балластирующих грунтозаполняемых (УБГЗ) с последующим получением протокола сертификационных испытаний УБГЗ № 621/1148-2008 от 26.08.2008 года, выданного испытательным центром "Композит-Тест", ЗАО "Центр сертификации "Композит-Тест", 2008.

Практическая значимость основных результатов диссертации подтверждается имеющимися справками об опытно-промышленном внедрении.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались на: международной научной конференции "Перспективные вопросы мировой науки" (Болгария, г. София, 2012); 8-ой международной конференции "Трубопроводный транспорт - 2012" (г. Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ), 2012); международной научной конференции "Перспективные разработки науки и техники". - (Польша, г. Пшемьсль, 2012); международной научной

конференции "Актуальные научные разработки" (Болгария, г. София, 2013); международной научной конференции "Современные научные достижения" (Чехия, г. Прага, 2013); международной научной конференции "Современные тенденции технических наук" (г. Уфа, 2013).

**Публикации:** по теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 7 в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ, получен 1 патент и 4 свидетельства, которые зарегистрированы в установленном порядке Федеральной службой по интеллектуальной собственности.

**Структура и объем работы.** Диссертация включает введение, четыре главы, общие выводы, содержит 138 страниц, в том числе таблиц - 1, рисунков - 41, библиография - 133 наименования.

**Содержание диссертации соответствует** п.1 и п.2 паспорта специальности 25.00.19 – строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

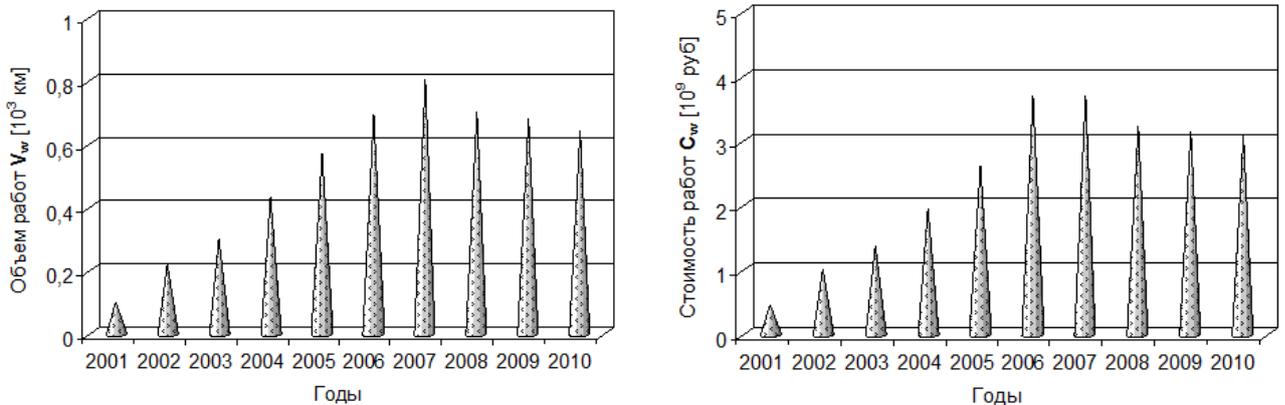
**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, научная и практическая значимость работы, приведены ее краткая аннотация и основные результаты.

**В первой главе** представлен анализ методик расчета конструктивных показателей обеспечения устойчивости участков МГ на обводненных грунтах, сформулированы цель и задачи исследований.

Научные основы мониторинга технологических характеристик сооружения и ремонта МГ были заложены трудами Березина В.Л., Бородавкина П.П., Бабина Л.А., Быкова Л.И., Васильева Г.Г., Велиюлина И.И., Гумерова А.Г., Короленка А.М., Ращепкина П.С., Решетникова А.Д., Телегина Л.Г., Шарыгина В.М., Харионовского В.В., Халлыева Н.Х. и других ученых, которые обосновали методы и средства закрепления подземных МГ на проектных отметках путем использования различных типов балластирующих устройств.

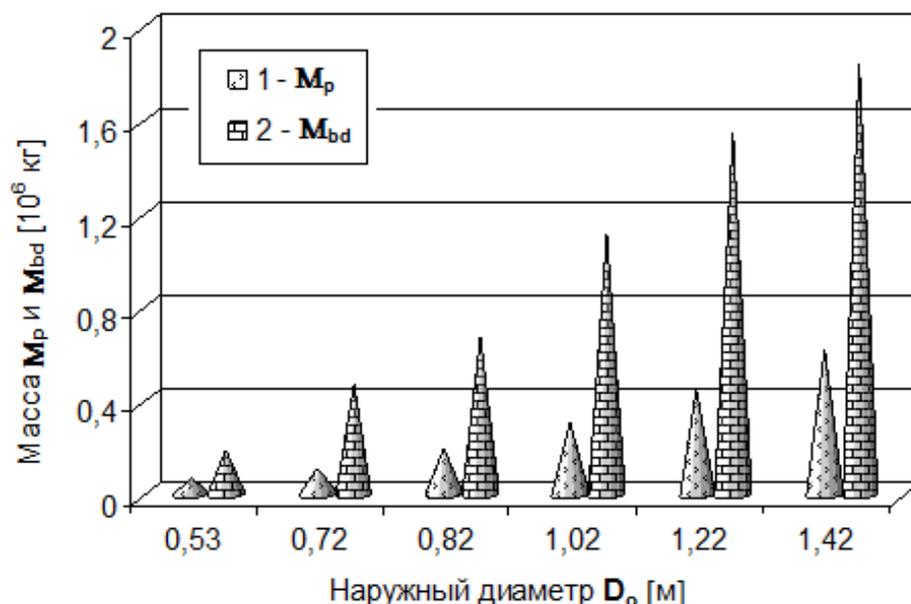
Объемы и стоимость работ по балластировке МГ в последние годы значительно возросли (рис. 1). При эксплуатации МГ в сложных условиях Западной Сибири осуществляются комплексные организационно-технические мероприятия по восстановлению устойчивости линейной части. При этом основными причинами потери устойчивого положения МГ являются следующие: низкое качество производства работ в процессе строительства и ремонта; отступление от проектных решений; несоответствие количества балластирующих устройств; несоответствие шага установки балластирующих устройств; несоблюдение глубины установки анкерных устройств; несоответствие реальных физико-механических свойств грунтов расчетным; ошибки при проектировании; некорректное определение области применения балластирующих устройств; применение грунтов засыпки на

размываемых участках и склонах; применение анкерных устройств на глубоких болотах; применение седловидных балластирующих устройств на малых водных преградах; ошибки при инженерно-геологических изысканиях.



**Рис. 1.** Объем ( $V_w$ ) и стоимость ( $C_w$ ) работ по обеспечению устойчивости участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях

Следует отметить о увеличении затрат на балластировку МГ в связи с их сплошной переизоляцией, когда в процессе производства работ необходимо выполнять демонтаж и замену установленных при строительстве железобетонных утяжелителей и анкерных устройств, а также восстанавливать проектную балластировку. Здесь значительное влияние на стоимость балластировки оказывают и затраты на транспортировку утяжелителей к месту выполнения работ, так как их вес на 1 км МГ любого диаметра в 3 раза превышает вес труб (**рис. 2**).



**Рис. 2.** Масса транспортируемых к месту производства работ труб ( $M_p$ ) и устройств балластирующих ( $M_{bd}$ )

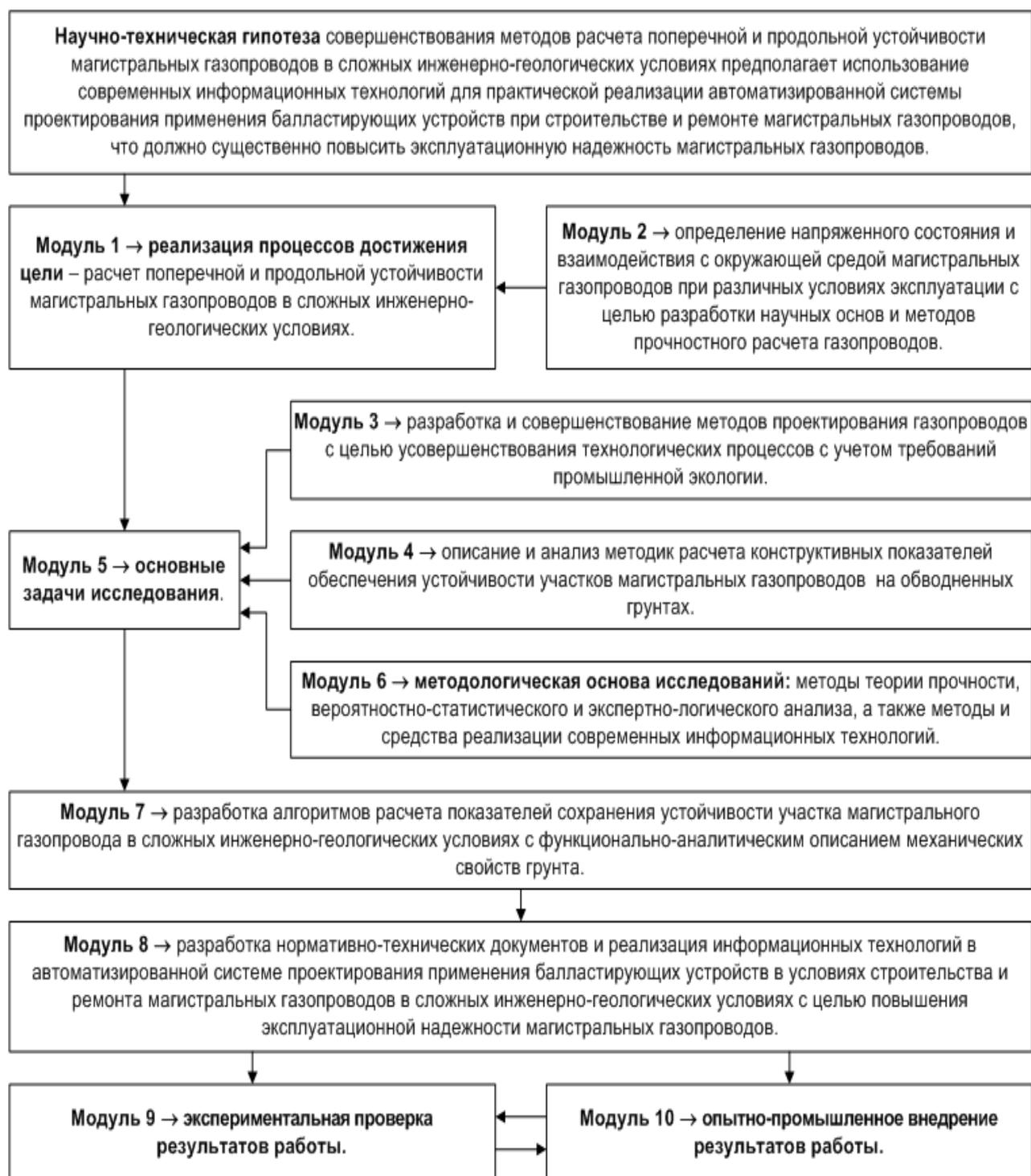
На современном этапе функционирования газотранспортной системы требуется поиск новых методов проектирования конструктивных схем МГ, которые бы обеспечивали устойчивость линейной части в обводненной местности при минимальных затратах на ресурсы, а также высокое качество и надежность выполнения.

Анализ положений нормативно-технических документов, которые устанавливают принципы расчета технологических показателей закрепления МГ на проектных отметках, показал, что в сложных инженерно-геологических условиях необходимо использовать не только методы расчета с детерминированными коэффициентами надежности, но и статистические методы с вероятностным описанием реальных характеристик грунтов и состояния линейной части МГ.

Таким образом, формулировку основных задач исследования обуславливает определенное несоответствие отраженных в нормативных документах методов проектирования технологических характеристик закрепления МГ на проектных отметках и специфического напряженного состояния участка МГ в сложных инженерно-геологических условиях. На основе научного анализа существующих методик проектирования показателей закрепления МГ на проектных отметках, существующих типов балластирующих устройств и материалов определены пути совершенствования методов расчета поперечной и продольной устойчивости МГ. Методическая иерархическая структура исследования приведена на **рис. 3**.

**Вторая глава** посвящена разработке методик расчета конструктивных показателей для создания условий работоспособности участков МГ в обводненной местности. При этом, предложено функционально-аналитическое представление механических характеристик грунтов с использованием вероятностных показателей, разработан алгоритм расчета конструктивных показателей устойчивости участков МГ в обводненной местности с использованием диаграмм нагрузка - перемещение, а также исследованы принципы сохранения работоспособности участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях.

Для функционально-аналитического представления механических характеристик грунта: удельного веса грунта ( $\gamma$ ), удельного сцепления грунта ( $c$ ) и угла внутреннего трения ( $\varphi$ ) следует определиться с методологией решения поставленной задачи: реализация вероятностно-статистического подхода с доверительной вероятностью  $\alpha_{ср}$ ; реализация подхода с использованием плотности распределения случайной величины. Реализация вероятностно-статистического подхода для определения расчетных характеристик грунта  $X_c$  предполагает использование нормативного значения этой характеристики  $X_n$  и соответствующего коэффициента надежности  $k_{gr}$ .

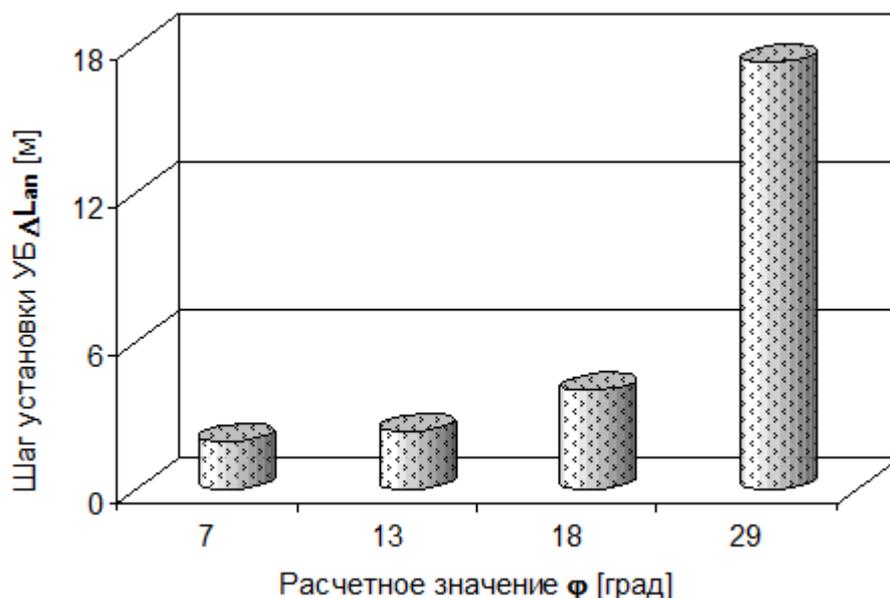


**Рис. 3.** Методическая иерархическая структура исследования

Величина шага балластирующих устройств  $\Delta L_{\text{бд}}$  при различных расчетных  $\varphi$  для обеспечения устойчивости участка МГ в обводненной местности приведена на **рис. 4**.

Здесь следует констатировать тот факт, что в рассматриваемом расчете отсутствует такая величина, как протяженность балластируемого участка. При этом показана существенная роль расчетного значения угла внутреннего трения грунта: увеличение

величины  $\varphi = 7^\circ$  до  $\varphi = 13^\circ$  или  $\varphi = 18^\circ$  приводит к возрастанию величины минимального шага установки балластирующих устройств  $\Delta L_{bd}$  соответственно в 1,4 и 2,1 раза.



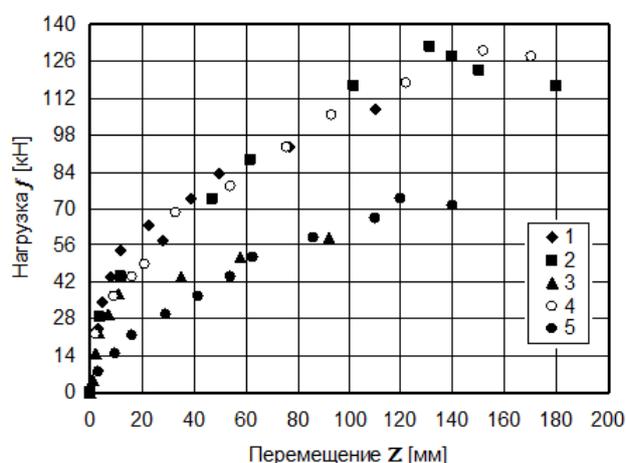
**Рис. 4.** Величина шага балластирующих устройств  $\Delta L_{bd}$  при различных расчетных  $\varphi$

Методология реализации расчетов с определенной величиной доверительной вероятности позволяет учитывать случайность в варьировании показателей и компенсировать эту случайность эмпирическими коэффициентами надежности.

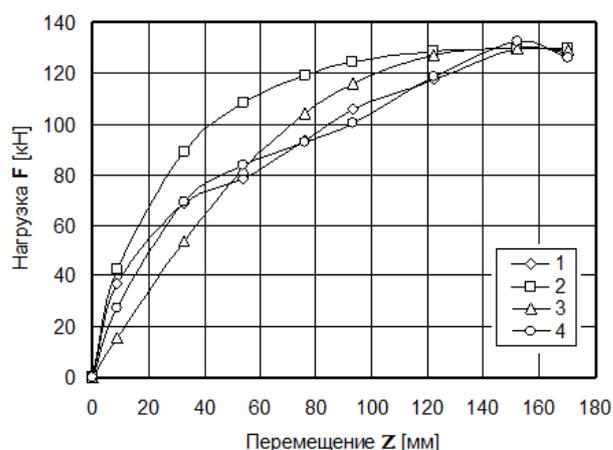
Здесь следует отметить, что такой подход вполне справедлив для вполне определенной функции распределения рассматриваемого показателя, в частности, функции распределения Гаусса. Так, распределение Стьюдента будет стремиться к нормальному распределению при  $N \rightarrow \infty$ , что свидетельствует об объективной взаимосвязи количества определений и коэффициента надежности. Другой подход более трудоемкий, но реализация такого подхода с использованием современных информационных технологий вполне реальна, это определение функции распределения случайного показателя и использование этой функции распределения во всех расчетах с заданной вероятностью в неравенствах анализа надежности. Эта величина вероятности и будет задавать степень надежности конструкции, т.е. снижение или увеличение этой вероятности будет означать уменьшение или рост надежности конструкции.

Кроме того, можно воспользоваться функционально-аналитическим представлением поведения балластирующего устройства (анкера) в грунте при действующих на него выдергивающих нагрузок. Для получения экспериментальных данных производилось внедрение винтового анкерного устройства ( $D_{an} = 0,4$  м - диаметр лопасти анкера) в грунт машиной для заглубления анкеров ВАГ-101. Измерения нагрузок

осуществлялось с использованием прогибомера. Внедрение винтового анкерного устройства производилось до глубины  $2,4 \div 2,5$  м, что составляет  $\sim 6 \cdot D_{ан}$ . Перемещение балластирующего устройства измерялось прогибомерами с точностью до 0,1 мм, установленными на реперных опорах. Основные принципы экспериментальных исследований поведения балластирующего устройства (анкера) в грунте ( $\gamma_{gr} = 27000 \text{ Н/м}^3$ ;  $\varphi = 22$  град;  $C_{gr} = 18000 \text{ Н/м}^2$ ;  $\varepsilon = 0,55$ ) заложены в положениях нормативно-технических документах. Полученные данные обеспечили возможность построения корреляционного поля экспериментальных величин нагрузки ( $f$ ) и перемещения ( $Z$ ) при испытании балластирующих устройств (рис. 5, где 1  $\rightarrow$  № 1 - номер эксперимента, 2  $\rightarrow$  № 2, 3  $\rightarrow$  № 3, 4  $\rightarrow$  № 4 и 5  $\rightarrow$  № 5).



**Рис. 5.** Корреляционное поле экспериментальных величин нагрузки ( $f$ ) и перемещения ( $Z$ ) при испытании балластирующих устройств



**Рис. 6.** Графическое представление диаграммы "нагрузка - перемещение" для балластирующего устройства

Графическое сопоставление экспериментальных и теоретических данных в виде диаграммы "нагрузка - перемещение" для балластирующего устройства приведено на рис. 6, где 1 - экспериментальные данные  $f_{e,max} = 129980 \text{ Н}$ ,  $Z_{e,max} = 0,152 \text{ м}$ , 2 - расчет по регрессионной зависимости (1)  $f_{c,max} = 130046 \text{ Н}$ ,  $A = 151984 \text{ Н}$ ,  $B = 0,0138 \text{ м}$  и  $H = 0,391$ , 3 - расчет по регрессионной зависимости (2)  $f_{c,max} = 129980 \text{ Н}$ ,  $f_0 = 259960 \text{ Н}$ ,  $Z_0 = 0,152 \text{ м}$ , 4 - расчет по регрессионной зависимости (3)  $f_{c,max} = 132453 \text{ Н}$ ,  $A = 536200 \text{ Н}$ ,  $B = 1307400 \text{ Н}$ ,  $C = 1521500 \text{ Н}$ ,  $D = 617800 \text{ Н}$ :

$$f = (A/B) \cdot Z \cdot \exp[-(Z/B)^H] ; \quad (1)$$

$$f = f_0 \cdot (Z/Z_0) \cdot [(Z/Z_0)^2 + 1]^{-1} ; \quad (2)$$

$$f = A \cdot Z_{rel} + B \cdot Z_{rel}^2 + C \cdot Z_{rel}^3 + D \cdot Z_{rel}^4 . \quad (3)$$

Отклонение экспериментальных данных от величин, полученных с помощью регрессионных зависимостей не превышает 2% в точке, соответствующей предельному перемещению балластирующего устройства. Достаточно хорошее качественное и количественное описание изменения пространственного положения балластирующего устройства в грунте свидетельствует о возможности использования полученных регрессионных зависимостей (1) - (3) в методиках расчета показателей обеспечения устойчивости участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях.

Теория прочности и устойчивости сложных технических систем предполагает введение такой величины, которую можно трактовать как надежность системы. В рассматриваемом случае такой величиной можно считать  $P(\Delta L_{bd} < \Delta L_{bd(*)})$  - вероятность обеспечения пространственного положения участка МГ в обводненной местности на заданных проектных отметках, т.е. в процессе проектирования необходимо определить такие величины  $\Delta L_{bd}$  и  $\Delta L_{bd(*)}$ , при которых реализуется условие надежности при заданной вероятности  $P$ :

$$P(\Delta L_{bd} < \Delta L_{bd(*)}) = P \quad (4)$$

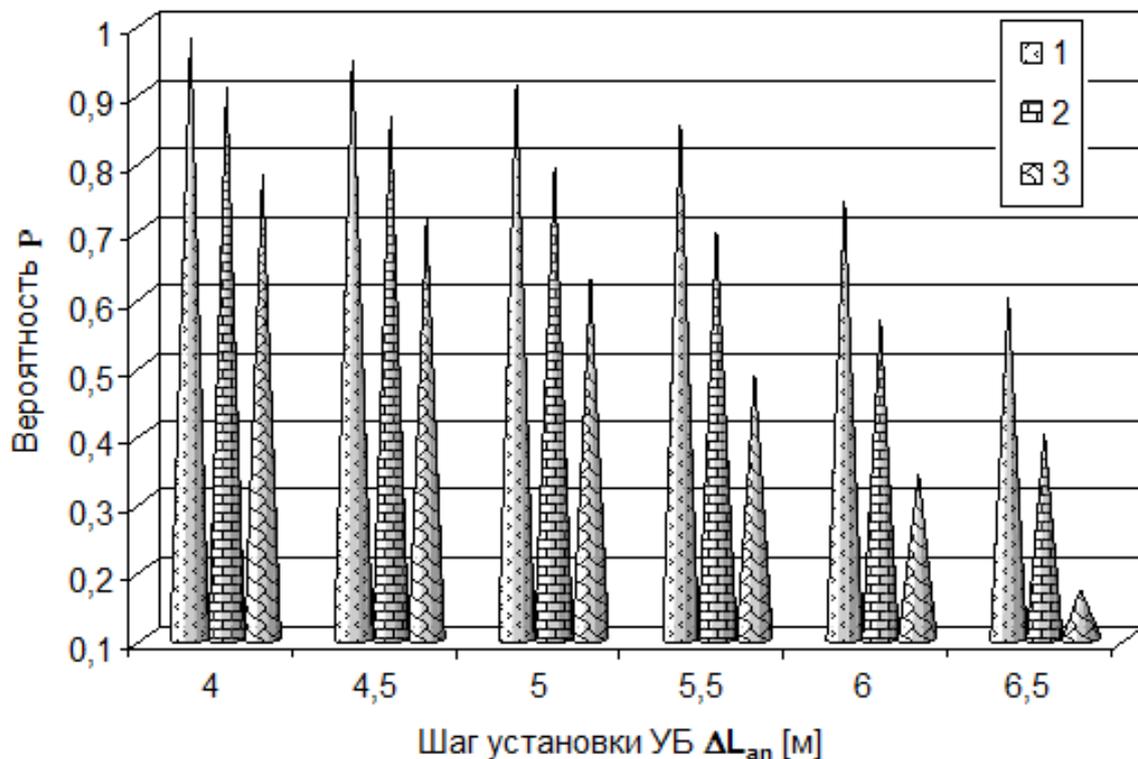
Численное моделирование позволяет определить величины  $f_{\max, i=1, N}$ ,  $Z_{i=1, N}$  и  $\gamma_{i=1, N}$ . С этими величинами выполняется расчет показателей устойчивости участка МГ ( $N$  расчетов) и реализуется определенное событие, одно из которых - участок сохранит заданное пространственное положение ( $M$  случаев), другое - участок не сохранит заданное пространственное положение. Метод Монте-Карло - это многократная реализация изложенного выше алгоритма с получением количественного результата с заданными исходными показателями.

Таким образом, вероятность обеспечения пространственного положения участка МГ в обводненной местности на заданных проектных отметках будет равна:

$$P(\Delta L_{bd} < \Delta L_{bd(*)}) = P = M/N \quad (5)$$

Реализация метода Монте-Карло (количество испытаний 2000) представлена на **рис. 7**, где шаг установки  $i = 1, 2, \dots, N$  балластирующих устройств  $\Delta L_{bd}$ , протяженность участка  $L$  (1 -  $L = 100$  м, 2 -  $L = 300$  м, 3 -  $L = 500$  м) и вероятность обеспечения пространственного положения участка МГ в обводненной местности на заданных проектных отметках взаимосвязаны. Снижение надежности закрепления участка МГ наблюдается в большей мере при увеличении протяженности участка  $P(\Delta L_{bd} = 5,5 \text{ м}; L = 500 \text{ м}) - P(\Delta L_{bd} = 5,5 \text{ м}; L = 100 \text{ м}) = 36\%$ , и в

меньшей при возрастании шага установки балластирующих устройств  $P(\Delta L_{bd} = 4,5 \text{ м}; L = 100 \text{ м}) - P(\Delta L_{bd} = 5,5 \text{ м}; L = 100 \text{ м}) = 10\%$ .



**Рис. 7.** Вероятность обеспечения пространственного положения участка МГ в обводненной местности на заданных проектных отметках

Сохранение работоспособности участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях предполагает оценку вероятности надежной эксплуатации забалластированного участка  $L$ , где балластирующие устройства установлены с определенным шагом  $\Delta L_{bd}$ , а технологические показатели балластировки учитывают заданную вероятностную обеспеченность. Вероятность обеспечения пространственного положения участка МГ в обводненной местности  $P$  на заданных проектных отметках можно моделировать функционально-аналитическими зависимостями (в частности, регрессионными).

**Третья глава** посвящена исследованию показателей устойчивости участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях на основе моделирования участка с учетом упругости грунта основания. Разработан алгоритм расчета показателей сохранения устойчивости участка МГ в сложных инженерно-геологических условиях с функционально-аналитическим описанием механических свойств грунта и выполнен анализ показателей устойчивости.

Расчетная схема участка МГ в сложных инженерно-геологических условиях с учетом упругости грунта основания представляет собой три отрезка бесконечного стержня:  $-\infty < X < 0$  - участок первый  $Y_1(X)$ ;  $0 \leq X \leq$

$L$  - участок второй  $Y_2(X)$  - участок МГ в заболоченной или обводненной местности ( $L$  - протяженность участка);  $L < X < \infty$  - участок третий  $Y_3(X)$ . Грунт на  $Y_1(X)$  и  $Y_3(X)$  имеет упругие свойства, а состояние грунта на  $Y_2(X)$  - пластическое. В соответствии с методом перемещений представим функцию прогиба в виде:

$$Y(X) = Y_1(X) \Leftrightarrow -\infty < X < 0 ; \quad (6)$$

$$Y(X) = Y_2(X) \Leftrightarrow 0 \leq X \leq L ; \quad (7)$$

$$Y(X) = Y_3(X) \Leftrightarrow L < X < \infty . \quad (8)$$

Согласно гипотезе Фусса – Винклера, реакция упругого основания в каждой точке пропорциональна прогибу балки  $P = -k \cdot Y$ , где  $Y$  – просадка основания,  $k$  – коэффициент постели. Принимая гипотезу Фусса – Винклера, моделируем участки  $Y_1(X)$  и  $Y_3(X)$  балками в упругой среде. Участок  $Y_2(X)$  моделируется балкой в условиях поперечного изгиба, которая находится под воздействием нагрузки (выталкивающей)  $R$ , которая равномерно распределена по длине  $L$ , и сил (сосредоточенных)  $P_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) - силы реакций связей в точках расположения балластирующих устройств.

Итак, необходимо найти перемещение ( $i$ -ая связь)  $\delta_{ij}$  от единичной силы ( $j$ -ая связь). Для участка  $Y_2(X)$  приложенную в точке  $X_j$  нагрузку запишем в виде сосредоточенной единичной силы. Таким образом, рассматриваем задачу с равномерно распределенной нагрузкой  $R = 1$ , решение которой - величина прогибов во всех точках бесконечного стержня, а уравнения изогнутой оси на участках  $Y_1(X)$ ,  $Y_2(X)$  и  $Y_3(X)$  с учетом модуля упругости ( $E$ ) и момента инерции ( $J$ ), а также условия граничные и сопряжения будут иметь вид:

$$E \cdot J \, d^4 Y_1(X) / dX^4 + \Lambda \cdot Y_1(X) = 0 \Leftrightarrow -\infty < X < 0 ; \quad (9)$$

$$E \cdot J \, d^4 Y_2(X) / dX^4 = P_i \cdot \delta(X - X_j) + R \Leftrightarrow 0 \leq X \leq L ; \quad (10)$$

$$E \cdot J \, d^4 Y_3(X) / dX^4 + \Lambda \cdot Y_3(X) = 0 \Leftrightarrow L < X < \infty . \quad (11)$$

$$Y_1(-\infty) = Y_1'(-\infty) = 0 ; \quad (12)$$

$$Y_3(\infty) = Y_3'(\infty) = 0 ; \quad (13)$$

$$Y_1(0) = Y_2(0) ; Y_1'(0) = Y_2'(0) ; Y_1''(0) = Y_2''(0) ; Y_1'''(0) = Y_2'''(0) ; \quad (14)$$

$$Y_2(L) = Y_3(L) ; Y_2'(L) = Y_3'(L) ; Y_2''(L) = Y_3''(L) ; Y_2'''(L) = Y_3'''(L) . \quad (15)$$

Поиск решений дифференциальных уравнений  $\{Y_1(X), Y_2(X), Y_3(X)\}$  с условиями граничными и сопряжения основан на методах численного интегрирования указанных дифференциальных уравнений.

Обозначая перемещение в точках  $X_i$  через  $\delta_{ij}$  (краевая задача с единичной силой) и  $\delta_{iR}$  (краевая задача с единичной распределенной нагрузкой), получаем для прогибов  $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$  под действием  $P_1, P_2, \dots, P_N$  и распределенной нагрузки  $R$  систему уравнений

$$Z_i = \delta_{i1} \cdot P_1 + \delta_{i2} \cdot P_2 + \dots + \delta_{ik} \cdot P_k + \dots + \delta_{iN} \cdot P_N + \delta_{iR} \cdot R ; \quad (16)$$

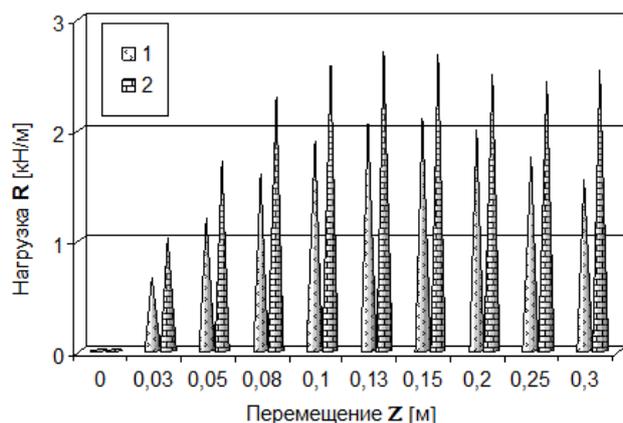
$$P_i = f_{0i} \cdot (Z_i/Z_{0i}) \cdot [(Z_i/Z_{0i})^2 + 1]^{-1} . \quad (17)$$

Здесь  $\delta_{ik}$  - перемещение в краевой задаче с единичной силой вместо силы  $P_k$  - сила реакции балластирующих устройств, а  $\delta_{iR}$  - перемещение в краевой задаче с единичной распределенной нагрузкой  $R = 1$ .

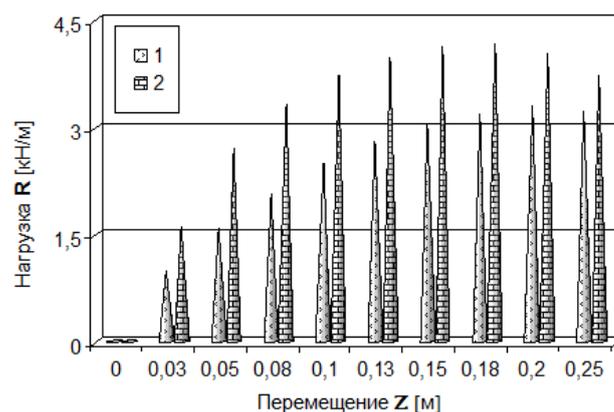
Анализ показателей устойчивости участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях выполняется по результатам полученного решения, т.е. по представлению нагрузки  $R$  и перемещения  $Z$  в виде диаграммы состояний участка длины  $L$  в обводненной местности с балластирующими устройствами. В рассматриваемом случае участок МГ в обводненной местности  $Y_2(0 \leq X \leq L)$  представляет собой стержень с неподвижными жесткими опорами по концам с балластирующими устройствами ( $N = 1$  и  $N = 2$ ):  $D_0 = 1,42$  м;  $\delta = 0,0165$  м;  $E \cdot J = 3,75 \times 10^6$  кН·м<sup>2</sup>;  $L = 100$  м;  $f_0 = 300$  кН и  $Z_0 = 0,15$  м.

На **рис. 8** и **рис. 9** приведено графическое представление состояния участка МГ в обводненной местности с балластирующими устройствами: 1 - грунт по концам обводненного участка находится в упругом состоянии ( $V_{opt\_1}$ ); 2 – обводненный участок жестко закреплен по концам ( $V_{opt\_2}$ ). Из результатов расчетов следует, что в случае  $V_{opt\_1}$  величина предельной нагрузки на 15% меньше, чем в случае  $V_{opt\_2}$ , в тоже время предельное перемещение больше.

Рассматривая  $V_{opt\_2}$  с вариациями шага установки балластирующих устройств  $\Delta L_{bd}$  (1 -  $X_1 = 0,33 \cdot L$ ,  $X_2 = 0,66 \cdot L$ ; 2 -  $X_1 = 0,4 \cdot L$ ,  $X_2 = 0,6 \cdot L$ ; 3 -  $X_1 = 0,42 \cdot L$ ,  $X_2 = 0,58 \cdot L$ ; 4 -  $X_1 = 0,45 \cdot L$ ,  $X_2 = 0,55 \cdot L$ ), получаем взаимосвязь  $\Delta L_{bd}$  и величины предельно допустимой поперечной нагрузки  $R(*)$  (**рис. 10**). Видно, что уменьшение величины  $\Delta L_{bd}$  с  $\Delta L_{bd} = X_2 - X_1 = 25$  м до  $\Delta L_{bd} = 10$  м способствует росту предельно допустимой поперечной нагрузки  $R(*)$  на 13%.

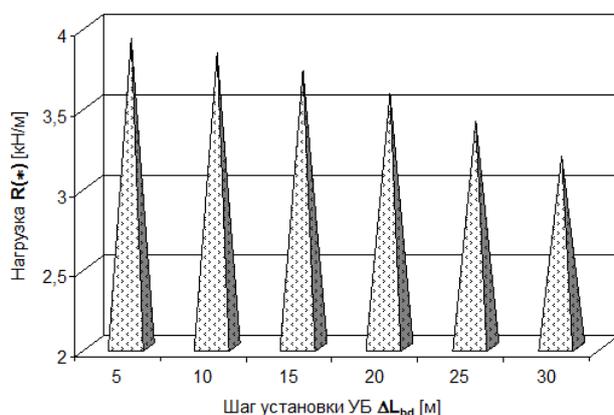


**Рис. 8.** Диаграмма нагрузка - перемещение (одно балластирующее устройство)

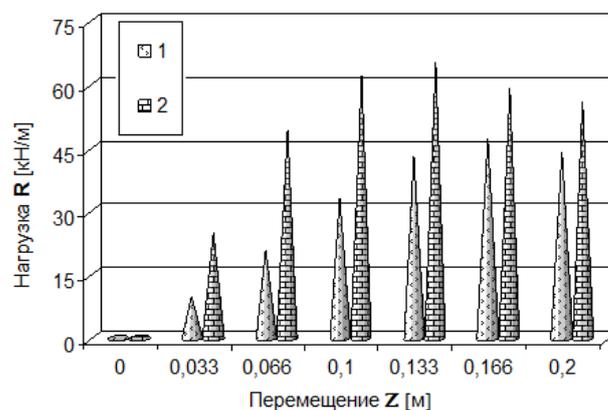


**Рис. 9.** Диаграмма нагрузка - перемещение (два балластирующих устройства)

На рис. 11 (1 –  $V_{opt\_1}$  и 2 –  $V_{opt\_2}$ ) результаты расчетов соответствуют случаю равномерной установки балластирующих устройств ( $N = 20$  и  $\Delta L_{bd} = 5$  м). Представлены результаты расчетов, которые соответствуют случаю равномерной установки балластирующих устройств ( $N = 20$  и  $\Delta L_{bd} = 5$  м). При численном моделировании можно изменять величину  $\kappa$  (коэффициент постели) и при  $\kappa \rightarrow \infty$  рассматривать  $V_{opt\_2}$ . При сохранении грунтом упругих свойств, предельно допустимая поперечная нагрузка  $R(*)$  уменьшается на 25%, а вот предельное перемещение увеличивается на 20%.



**Рис. 10.** Изменение величины  $\Delta L_{bd}$  с увеличением предельно допустимой  $R(*)$



**Рис. 11.** Равновесное состояние участка  $Y_2(0 \leq X \leq L)$  при равномерной установке балластирующих устройств

При численном моделировании можно изменять величину  $\kappa$  (коэффициент постели) и при  $\Lambda \rightarrow \infty$  рассматривать  $V_{opt\_2}$ . При сохранении грунтом упругих свойств, предельно допустимая поперечная нагрузка  $R(*)$  уменьшается на 25%, а вот предельное перемещение увеличивается на 20%. Следует отметить, что модель  $V_{opt\_1}$  имеет

большую свободу в перемещениях, в то время  $R(*)$  меньше для модели, где упругость грунта сохраняется. Такая модель адекватно отражает процесс изменения пространственного положения участка МГ в обводненной местности. Модель  $V_{opt\_1}$  лучше, чем модель стержня с жестким закреплением  $V_{opt\_2}$ .

**В четвертой главе** диссертации выполнено формирование автоматизированной системы проектирования применения балластирующих устройств в условиях строительства и ремонта МГ в сложных инженерно-геологических условиях. Дана оценка характеристик применения балластирующих устройств и приведена структура автоматизированной системы проектирования применения балластирующих устройств. Исследованы условия практической реализации системы проектирования при строительстве и ремонте МГ.

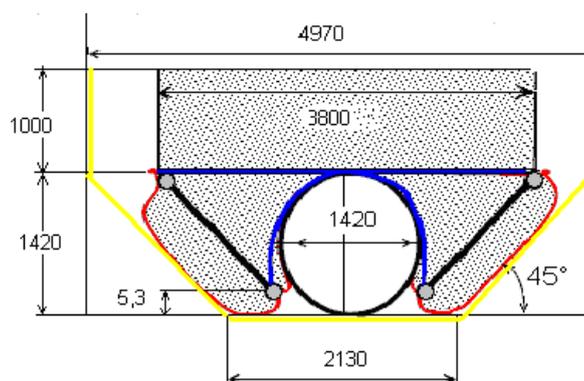
Расчет прочностных и деформационных характеристик устройства балластирующего грунтозаполняемого (УБГЗ) выполнялся с учетом: характеристик используемых материалов; условий нагружения при опытно-промышленных испытаниях; теоретического анализа и обоснования возможных причин нарушения работоспособности УБГЗ на основе использования метода конечных элементов с определением матриц жесткости, при этом были зафиксированы конечные элементы, используемые для расчета и анализа конструкций УБГЗ, а также конечно-элементная модель УБГЗ. Целью указанного расчета является:

- качественное описание процесса функционирования устройства УБГЗ и выяснение причин возможного нарушения работоспособности конструкции;
- численное моделирование напряженно-деформированного состояния устройства УБГЗ с целью количественной оценки величин напряжений и деформаций возникающих в элементах конструкции;
- многовариантный расчет различных исполнений рамы устройства с целью сравнения их прочностных характеристик;
- выработка практических рекомендаций по рациональному проектированию УБГЗ и по назначению рациональных конструктивных и физико-механических параметров конструкции, обеспечивающих ее работоспособность.

Условия нагружения устройства балластирующего грунтозаполняемого (УБГЗ) при опытно-промышленных испытаниях следует определять с учетом его конструктивных характеристик, которые представлены на **рис. 12**.

Для расчета напряженно-деформированного состояния УБГЗ в работе применен метод конечных элементов. Представленные расчеты проведены с помощью методов компьютерного инжиниринга и пакетов прикладных программ комплекса ANSYS  $\Leftrightarrow$  LS-DYNA. Метод конечных элементов базируется на идее представления сложного объекта как набора простых составляющих – конечных элементов. Применительно к

расчету рассматриваемой конструкции представляется рациональным использовать конечный элемент в виде пространственной балки.



**Рис. 12.** Габаритный чертеж и конструктивные характеристики установленного в траншее устройства балластирующего грунтозаполняемого (УБГЗ)

Анализ результатов прочностного расчета балластирующего устройства УБГЗ позволяет констатировать следующее: условия моделирования балластирующего устройства, реализованные при численном анализе, дают заниженную оценку прочности конструкции; конструкция балластирующего устройства в базовом варианте удовлетворяет условиям статической прочности - коэффициент запаса составляет 1,043; конструкция балластирующего устройства в альтернативном варианте оказывается примерно на 17% более нагруженной - коэффициент запаса для этого варианта оказывается 0,933, что меньше 1; наиболее опасными участками являются участки соединения верхней и наклонной стоек рамки - по этой причине исполнение соединительного узла по схеме труба в трубе оказывается предпочтительным с позиций прочности; предварительная оценка конструкции позволяет утверждать, что за счет профилирования стоек можно будет повысить прочностные характеристики балластирующего устройства на 20÷50% при ограничениях по массе конструкции.

Информационно-аналитическое обслуживание строительных и ремонтных операций при использовании балластирующих устройств предполагает интенсивное применение средств вычислительной техники и телекоммуникаций для осуществления процессов сбора, корректировки и обработки исходных данных параллельно с процессами вычислений и генерации вариантов решения технологической задачи. Важным является формирование структуры базы знаний и соответствующих баз данных в строгом соответствии с целями принятия решений. Пакет прикладных программ (ППП) "Балластировка" является приложением Windows 7/8/Server 2012, разработан с учетом современных требований к построению интерактивных человеко-машинных интерфейсов.

ППП может быть использован в условиях информационной системы предприятия как в среде стационарных автоматизированных рабочих

мест пользователей, так и в среде мобильных вычислительных средств, что расширяет область применения ППП на класс задач, решаемых в полевых условиях на участке газопровода. Функциональные возможности ППП доступны посредством использования иерархического меню, а также с помощью экранных кнопок ("плиток"), удобных для работы с тактильно-чувствительными экранами. Работа пользователя-эксперта с ППП направляется последовательностью применения программных модулей, лежащей в основе структуры системы и описанной в интерактивном руководстве пользователя (модуль 1).

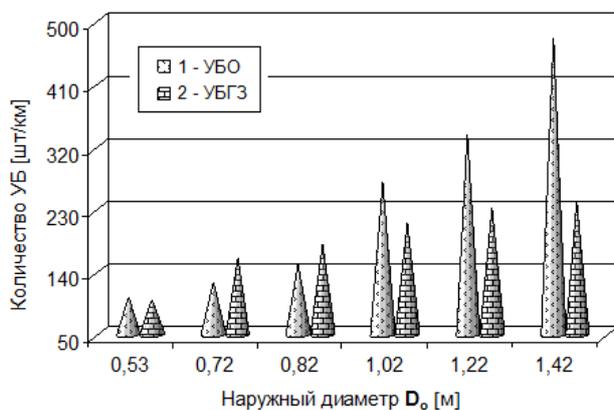
Иерархическая структура реализации алгоритма ППП "Балластировка" (рис. 13), разработанного для решения задач автоматизированного проектирования производства строительных и ремонтных работ при закреплении участков МГ в заданном проекте пространственном положении в сложных инженерно-геологических условиях, включает в себя программные модули, выполняющие расчетные функции, формирующие графические и текстовые элементы, предоставляющие нормативную, справочную и архивную информацию, что позволило реализовать комплексный подход при подготовке проектной и технической документации с учетом нормативных требований.



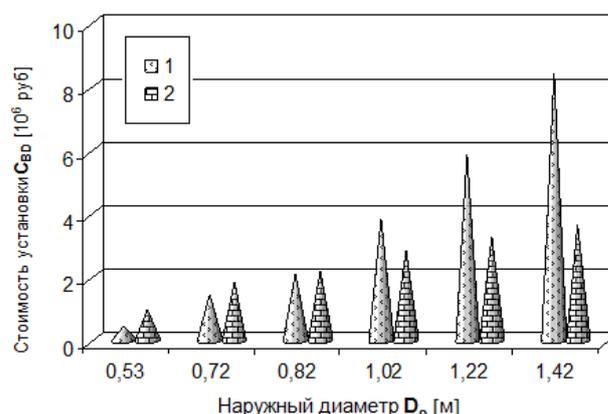
**Рис. 13.** Иерархическая структура реализации алгоритма

Разработанная конструкция утяжелителя УБГЗ обеспечивает включение дополнительных объемов грунта, участвующего в балластировке. Предполагаемое техническое решение позволяет не только сократить расход сборного железобетона, но и повысить производительность строительных и ремонтных работ при ремонте МГ в сложных инженерно-геологических условиях без снижения эксплуатационной надежности линейной части. Это обусловлено зависимостью количественного сокращения балластировочных конструкций на МГ (рис. 14, где 1 - устройство балластирующее УБО, 2 - устройство балластирующее УБГЗ).

Использование грунтозаполняемых контейнеров (УБГЗ) в сложных инженерно-геологических условиях дает возможность повысить экономическую эффективность производства строительных и ремонтных работ (рис. 15). Так, снижение затрат на 1 км газопровода соответственно составляет: 43% для газопровода с  $D_o = 1020$  мм; 56% для газопровода с  $D_o = 1220$  мм и 74% для газопровода с  $D_o = 1420$  мм.



**Рис. 14.** Зависимость количественного сокращения балластировочных конструкций (УБ) на участках МГ в сложных инженерно-геологических условиях



**Рис. 15.** Зависимость стоимости установки балластирующих устройств  $C_{BD}$  от наружного диаметра ( $D_o$ ): 1 - железобетонные утяжелители охватывающего типа (УБО); 2 - устройство балластирующее грунтозаполняемое (УБГЗ)

Таким образом, разработанная система балластировки с использованием грунтозаполняемых контейнеров (УБГЗ) может быть реализована при производстве строительных и ремонтных работ на участках МГ в сложных инженерно-геологических условиях, т.е. на обводняемой местности и болотах любого типа.

### Общие выводы по диссертационной работе

1. Разработана иерархическая структура анализа критериев и принципов использования балластирующих устройств на участках МГ в

сложных инженерно-геологических условиях, обеспечивающая устойчивость участков МГ на заболоченных и обводненных грунтах.

2. Разработана методика аналитического представления механических характеристик грунтов с использованием вероятностных показателей, позволяющая выполнять расчет показателей устойчивости участков МГ в обводненной местности с использованием диаграмм нагрузка - перемещение.

3. Разработана методика расчета показателей устойчивости участков МГ в сложных инженерно-геологических условиях с учетом упругости грунта основания и функционально-аналитическим описанием механических свойств грунта.

4. Выполнен анализ конструктивных особенностей утяжелителя УБГЗ. Конструкция обеспечивает включение дополнительных объемов грунта, участвующего в балластировке. Предполагаемое техническое решение позволяет не только сократить расход сборного железобетона, но и повысить производительность строительно-монтажных работ при ремонте МГ в сложных инженерно-геологических условиях без снижения эксплуатационной надежности линейной части.

5. Впервые разработана система проектирования применения балластирующих устройств при строительстве и ремонте МГ в сложных инженерно-геологических условиях с использованием пакета прикладных программ, позволяющая в кратчайшие сроки оценить эффективность реализации балластирующих технологий и подготовить рекомендации по условиям их практического осуществления.

6. Результаты диссертационного исследования, включающие методы и средства оценки работоспособности участков магистральных газопроводов с балластировочными устройствами в сложных инженерно-геологических условиях с использованием современных информационных технологий, апробированы и внедрены в практику организации строительного производства при ремонте магистрального газопровода Уренгой - Ужгород (2370,8 км - 2468,4 км). Использование комплекса разработанных методик снижает продолжительность работ по строительству и ремонту линейной части МГ, начиная от планирования работ и заканчивая сдачей объекта в эксплуатацию с заданным качеством и высокими показателями эксплуатационной надежности.

Результаты диссертационной работы представлены в следующих публикациях:

1. Миклуш А.С. Восстановление функций распределения технологического риска в условиях регламентации безопасных расстояний от магистральных газопроводов (РАР\_001) / Арбузов Ю.А., Воеводин И.Г. и др. - Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012661115 от 7 декабря 2012 г.

2. Миклуш А.С. Формирование изменений специальных технических условий на безопасные расстояния от магистральных газопроводов с учетом модели опасной зоны (РАР\_002) / Воеводин И.Г., Арбузов Ю.А. и др. - Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012661116 от 7 декабря 2012 г.

3. Миклуш А.С. Количественный анализ несущей способности анкерного устройства в условиях изменения коэффициента пористости грунта (РАР\_003) / Воеводин И.Г. - Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012661117 от 7 декабря 2012 г.

4. Миклуш А.С. Математическое моделирование изменения напряженно-деформированного состояния участка магистрального газопровода на слабонесущих грунтах // Арбузов Ю.А., Воеводин И.Г. и др. Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2013. - № 1(21). - С. 31-36.

5. Миклуш А.С. Алгоритм расчета технологических параметров закрепления магистральных газопроводов на слабонесущих грунтах // Арбузов Ю.А., Воеводин И.Г. и др. Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2013. - № 1(21). - С.36-41.

6. ПМ № 131515 (РФ). Система анализа количественных показателей экологического риска в информационной среде при эксплуатации магистральных газопроводов / Крылов П.В., Миклуш А.С., Арбузов Ю.А. и др. - Опубликовано 20.08.2013 БИ № 23.

7. Миклуш А.С. Количественная оценка показателей нормирования закрепления участка магистрального газопровода анкерными устройствами // Арбузов Ю.А., Воеводин И.Г. Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2013. - № 2(22). - С.19-25.

8. Миклуш А.С. Асимптотическое решение уравнений в задачах продольной устойчивости участка магистрального газопровода // Воеводин И.Г. - Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2013. - № 2(22).- С.42-46.

9. Миклуш А.С. Управление формированием отчетов в пакете прикладных программ для оценки очередности ремонтных работ на магистральных газопроводах // Воеводин И.Г., Крылов П.В. - Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2013. - № 4(24). - С.43-49.

10. Миклуш А.С. Использование информационных технологий для мониторинга решений по закреплению участков магистральных газопроводов в обводненных грунтах // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2013. - № 8.- С.49-51.

11. Миклуш А.С. Моделирование устойчивости магистральных газопроводов в обводненных грунтах в системе автоматизированного проектирования // Ремонт, восстановление, модернизация.- 2013.- № 11. - С.49-50.

12. Миклуш А.С. Количественный анализ поперечной устойчивости магистральных газопроводов в условиях изменения несущей

способности балластирующих устройств (РАР\_006) / Воеводин И.Г. -  
Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ  
№ 2014612516 от 27 февраля 2014 г.

Подписано к печати " 27 " ноября 2014 г.

Заказ № 4264

Тираж 100 экз.

1 уч.-изд.л. ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО "Газпром ВНИИГАЗ"  
по адресу: 142717, Московская область,  
Ленинский р-н, п. Развилка, ООО "Газпром ВНИИГАЗ"