

УДК 621.644

## Требования к исходным данным, необходимым для моделирования воздействия ледовой экзарации на заглубленные трубопроводы

М. А. Наумов<sup>1</sup>,Д. А. Онищенко<sup>2</sup>, кандидат физико-математических наук

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

*Рассматривается задача об определении оптимальной глубины заложения морского трубопровода в северных морях в условиях ледовой экзарации дна. Выполнен анализ совокупности исходных данных, необходимых для корректной постановки задачи и ее решения, выделены определяющие факторы. Предложена инженерная методика, использующая метод конечных элементов, для оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода, заглубленного в грунт, при воздействии на дно килей ледяных образований заданной осадки.*

**Ключевые слова:** морской трубопровод, ледовая экзарация, киль тороса, борозды выпаживания, глубина заложения, инженерная методика, метод конечных элементов.

### Введение

Стратегия ОАО «Газпром» в области добычи нефти и газа относит акватории северных морей России к приоритетным регионам добычи газа на долгосрочную перспективу [8]. Морские геолого-разведочные работы в настоящее время ведутся «Газпромом» в акваториях Печорского и Карского морей (в том числе в Обской и Тазовской губах), на шельфе острова Сахалин. Использование морских трубопроводов, которые являются безопасным и экономически эффективным способом транспортировки углеводородных ресурсов на рынки, в суровых условиях указанных регионов в значительной степени осложняется «ледовым» фактором. В частности, при проектировании арктических трубопроводов необходимо учитывать такое опасное явление, как ледовая экзарация (употребляется также термин «ледовое выпаживание»), при котором подводные части массивных ледяных образований (торосов, стамух, айсбергов) воздействуют на морское дно и могут повреждать размещенные там инженерные объекты, что приводит к необходимости заглублять

трубопроводы в донный грунт. На рис. 1 показано изображение поверхности морского дна, подверженного ледовой экзарации, полученное с помощью гидролокатора бокового обзора.

Изучению явления ледовой экзарации и соответствующим проблемам проектирования морских трубопроводов посвящено большое количество работ (см., например, [6, 10, 13, 14]). Соответствующий обзор может быть предметом отдельной обширной публикации, поэтому в настоящей работе приводятся лишь несколько ссылок, по которым можно получить представление о проблеме в целом и о подходах к решению возникающих задач. Считается, что ледовая экзарация (без учета айсбергов) может иметь место вплоть до глубин моря 40—50 м, при этом максимальная глубина борозд зависит от региона и может достигать 4—5 м, а ширина — нескольких десятков метров.

В этой связи отметим, что в октябре 2012 г. введены в эксплуатацию системы магистральных газопроводов «Бованенково — Ухта», по которым с Ямала, в том числе по участку подводного перехода через Байдарацкую губу, транспортируется газ Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Максимальная глубина моря

<sup>1</sup> e-mail: M\_Naumov@vniigaz.gazprom.ru.

<sup>2</sup> e-mail: D\_Onishchenko@vniigaz.gazprom.ru.

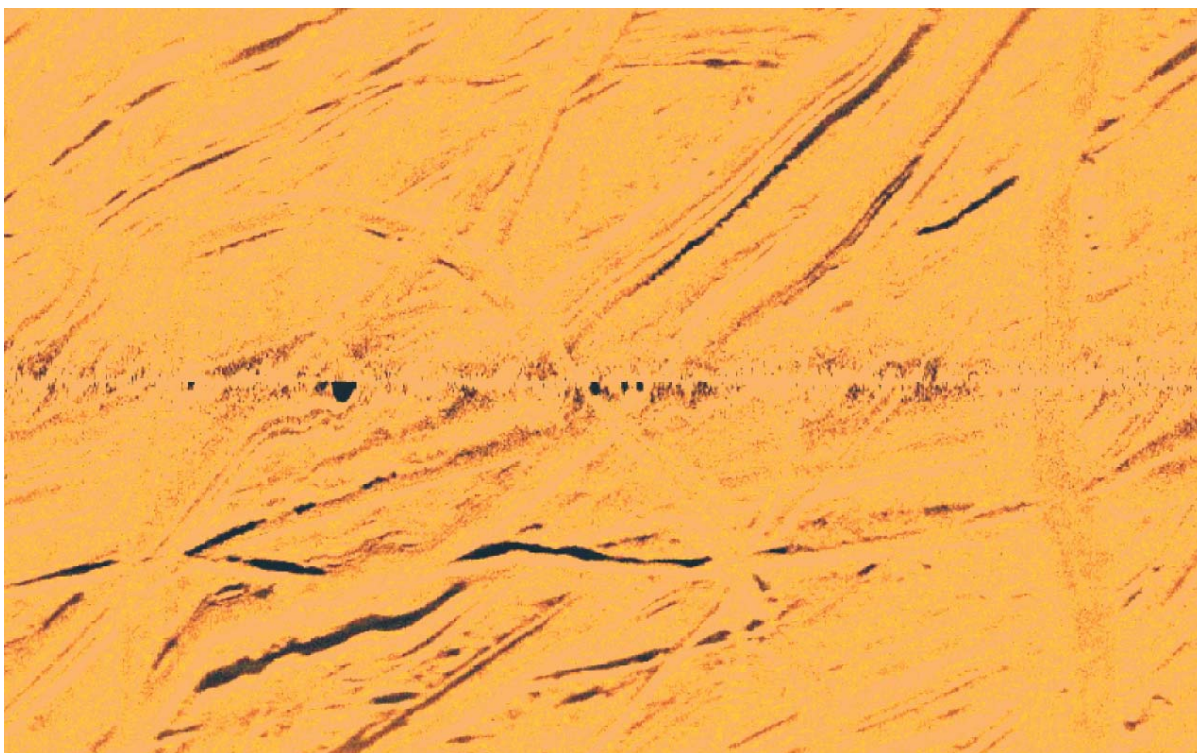


Рис. 1. Морское дно, подверженное ледовой экзарации

в створе перехода общей длиной около 65 км составляет 23 м, при этом в ходе инженерных изысканий на дне были обнаружены многочисленные борозды ледового выпаживания глубиной до 2 м [6]. Это первый в мире морской магистральный газопровод, который проложен в районе с активными ледо-экзарационными процессами, и наблюдения за состоянием дна в окрестностях трассы могут дать ценную информацию об их количественных характеристиках.

Как уже отмечено, наличие ледяного покрова и потенциальное взаимодействие льда с морским дном создает значительные инженерные сложности при проектировании, строительстве и обслуживании подводных морских трубопроводов. Основные из них связаны с определением критериев механической прочности заглубленного трубопровода и выбором способов укладки трубопровода в траншею, обеспечивающих необходимый уровень надежности и безопасности, а также соответствующих логистическим и экономическим требованиям.

Определение оптимальной глубины заложения трубопровода, которая в некотором смысле представляет собой компромисс с точки зрения экономики и безопасности, является ключевым фактором при проектировании подводных систем транспорта углеводородов в акваториях северных морей. Так как полномасштабные исследования поведения грунта и воздействий на трубопровод в процессе ледовой экзарации — крайне затруднительная задача, необходимо прибегать к численному моделированию.

В настоящей статье на основе анализа предшествующего опыта численного моделирования процесса ледовой экзарации с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и собственных исследований предлагается инженерная методика оценки безопасной глубины заложения трубопровода и описывается совокупность исходных данных, необходимых для выполнения соответствующих расчетов. Кроме того, приводится краткая информация о механизмах формирования и структуре торосов, являющихся «ответственными исполнителями» данного природного процесса.

### Механизмы формирования торосов

Ледяные торосы формируются в процессе взаимодействия двух ледяных полей, которые называют торошением [16]. Торосы можно разделить на несколько типов в зависимости от реализующегося механизма (схемы) их образования. Например, выделяют торосы сжатия, образующиеся в процессе сжатия на границе двух ледяных полей, и торосы сдвига, когда одно ледяное поле перемещается относительно другого в направлении, параллельном линии их контакта. Перед началом собственно торошения часто наблюдается наслоение одного ледяного поля на другое (его разновидность — процесс зубчатого наслоения), что характерно для тонкого молодого льда. Надвигание одного поля на другое вызывается различными факторами, среди которых определяющими являются ветровые воздействия и воздействия течений. Перечисленные

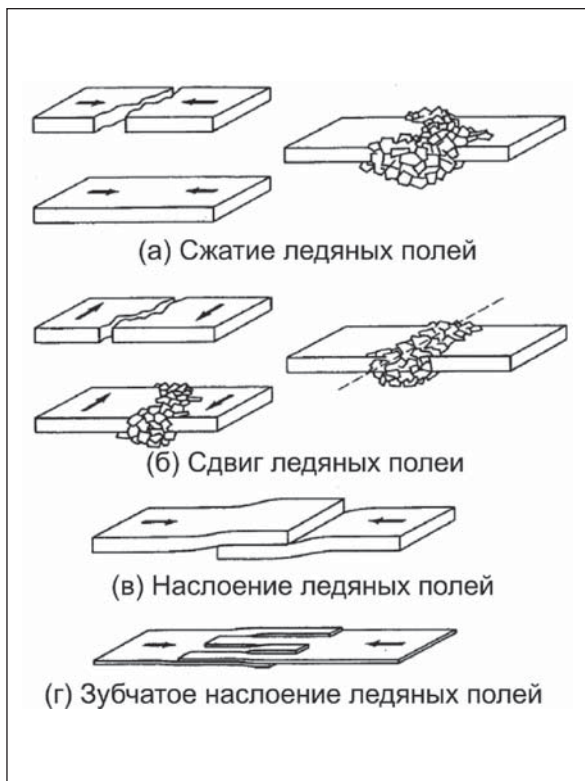


Рис. 2. Схемы взаимодействия ледяных полей при торшении

схемы взаимодействия ледяных полей при образовании торосов показаны на рис. 2.

Натурные наблюдения показывают, что достаточно часто торосы имеют форму гряды (тогда, строго говоря, согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации следует применять термин «грядообразование» [16]). Гряда торосов занимает протяженную область на поверхности ровного ледяного покрова, так что можно говорить о ее ширине и длине. При возникновении сжатия в ледяном покрове гряды торосов формируются вдоль линий контакта льдин и могут быть достаточно сильно искривленными (рис. 3). С другой стороны, в зонах сдвиговых деформаций и вдоль развоид могут формироваться гряды торосов, ориентированные в одном выделенном пространственном направлении, при этом их длина иногда достигает сотен километров [12]. В то же время встречаются области, в пределах которых ледяной покров по всей площади представляет собой беспорядочное нагромождение обломков (торосистый лед).

Структурно торосы состоят из блоков (обломков) льда, которые образуются в ходе разрушения ледяных полей при их взаимодействии друг с другом. У сформировавшегося тороса выделяют три части: парус тороса, киль тороса и консолидированный слой [11]. Парусом называют часть тороса, расположенную над водой, килем — часть, расположенную под водой, а консолидированный слой представляет



Рис. 3. Формирование гряды торосов (<http://www.arctic.noaa.gov/ice-rubble-pressure.html>; дата обращения: 18.03.2013)

собой сходящуюся часть килля тороса, образовавшуюся из погруженных в воду блоков льда в процессе консолидации. Иногда в состав консолидированного слоя входит неразрушенный ровный лед. Строение тороса схематично изображено на рис. 4.

Именно кили торосов, воздействуя в ходе дрейфа в составе ледяного покрова на донный грунт, и производят «выпахивание» дна.

Заметим, что торос представляет собой ледяное образование (ЛО), находящееся на плаву, в то время как стамуха (другое ЛО, также образованное из обломков льда) — это неподвижное в процессе своего формирования нагромождение обломков льда, расположенное на мели, но потенциально способное перейти в плавучее состояние в результате действия различных гидрометеорологических факторов.

### Процесс ледовой экзарации

Ледовая экзарации начинается, когда плавучее ЛО, сформировавшееся на относительно большой глубине моря, вследствие дрейфа смещается в область меньших глубин. Взаимодействие ЛО, киль которого внедряется в морское дно, с донным грунтом является многофакторным процессом. Основное его содержание — совершение дрейфующим ЛО механической работы по деформированию и разрушению донного грунта вследствие расходования начальной кинетической энергии ЛО, а также за счет ее подкачки извне вследствие воздействия внешних



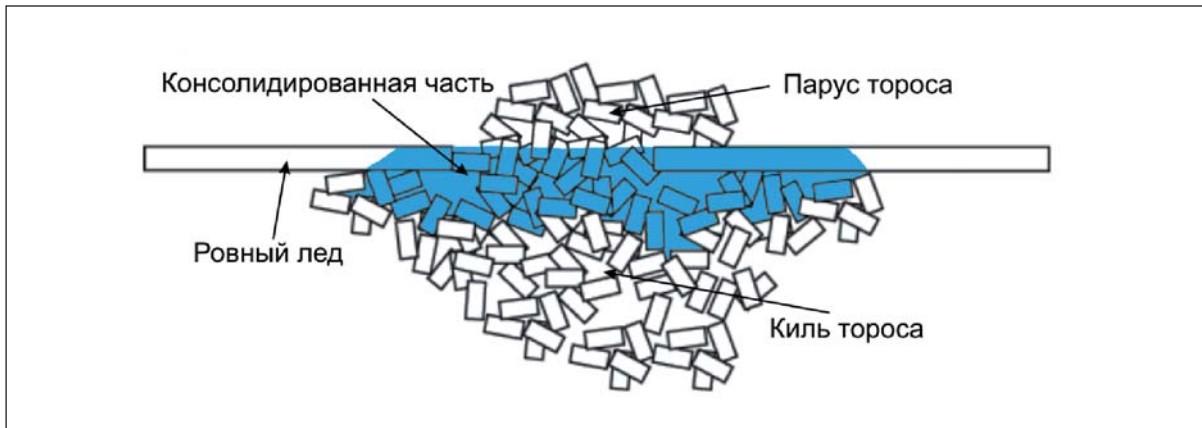


Рис. 4. Структура тороса

движущих сил (течения, ветер, надвигающиеся ледяные поля). При этом нужно учитывать возможность изменения потенциальной энергии ЛО из-за его смещения по вертикали, а также расходование энергии на возможное разрушение кия ЛО. Корректное математическое моделирование всего процесса, гарантирующее соблюдение энергетического баланса между всеми указанными компонентами, обеспечивается правильным выбором определяющих уравнений.

К основным факторам, от которых зависят геометрические размеры экзарационных борозд, следует отнести характеристики донных грунтов, поскольку именно они определяют затраты энергии на образование борозды данных глубины и протяженности при заданных форме и размерах кия воздействующего ЛО. Начальная кинетическая энергия ЛО определяется его массой и скоростью, которые в момент начала процесса выпахивания представляют собой случайные величины. Прочностные характеристики кия ЛО, а также внешние движущие силы также являются случайными. Кроме того, большое влияние на формирование экзарационной борозды оказывает локальная форма поверхности ЛО в зоне контакта с грунтом, так что этот фактор также требуется учитывать в том или ином виде. В свою очередь, влияние на развитие экзарации оказывает и рельеф дна, поскольку он определяет генеральное направление, откуда могут приходить торосы с глубокими киями. Таким образом, процесс ледовой экзарации может реализовываться по разным сценариям (схемам), и его моделирование применительно к условиям конкретного района представляет собой весьма непростую задачу, для корректной постановки и дальнейшего решения которой требуется значительный объем исходных данных разнопланового характера.

#### Опасности для трубопровода

В процессе экзарации морского дна килем тороса траектория борозды может пересекать трассу подводного трубопровода. Раньше считалось, что для обеспечения безопасной эксплуатации

трубопровода достаточно избежать прямого контакта между килем ледового образования и трубой. При таком подходе достаточно определить экстремальные значения глубины борозд в рассматриваемом районе и, исходя из этого, выбрать глубину заложения трубопровода в грунт. Однако дальнейшие исследования показали, что давление, оказываемое в процессе выпахивания основанием кия на грунт, может вызывать смещение отдельных объемов грунтовой массы под килем и в его окрестности в вертикальном и поперечном направлениях. Перемещение грунта порождает нагрузку на заглубленный трубопровод и способно вызывать его смещение в сторону от проектного положения. На рис. 5 показана схема выпахивания дна килем ЛО с иллюстрацией профиля смещения грунта в вертикальном направлении [3].

В случае, когда трубопровод недостаточно заглублен, возможен прямой контакт кия тороса с трубой. В настоящей статье данный сценарий не рассматривается. Вместе с тем отметим, что разработка методического и расчетного аппарата для анализа возможных вариантов и количественных характеристик повреждения трубопровода при прямом воздействии ледяных образований является актуальной, поскольку такой сценарий должен быть исследован при проектировании трубопровода в рамках анализа риска. Контакт со льдом возможен также, если трубопровод укладывается в траншею без обратной засыпки или при недостаточных мерах по предотвращению его всплытия, а также в случае возможного размыва грунта в районе прохождения трубопровода.

#### Исходные данные, необходимые для моделирования процесса ледовой экзарации

Как следует из вышеизложенного, для назначения глубины заложения трубопровода прежде всего необходимо оценить возможную глубину ледового выпахивания. Напомним, что проектировщик оперирует с расчетными значениями величин, которые

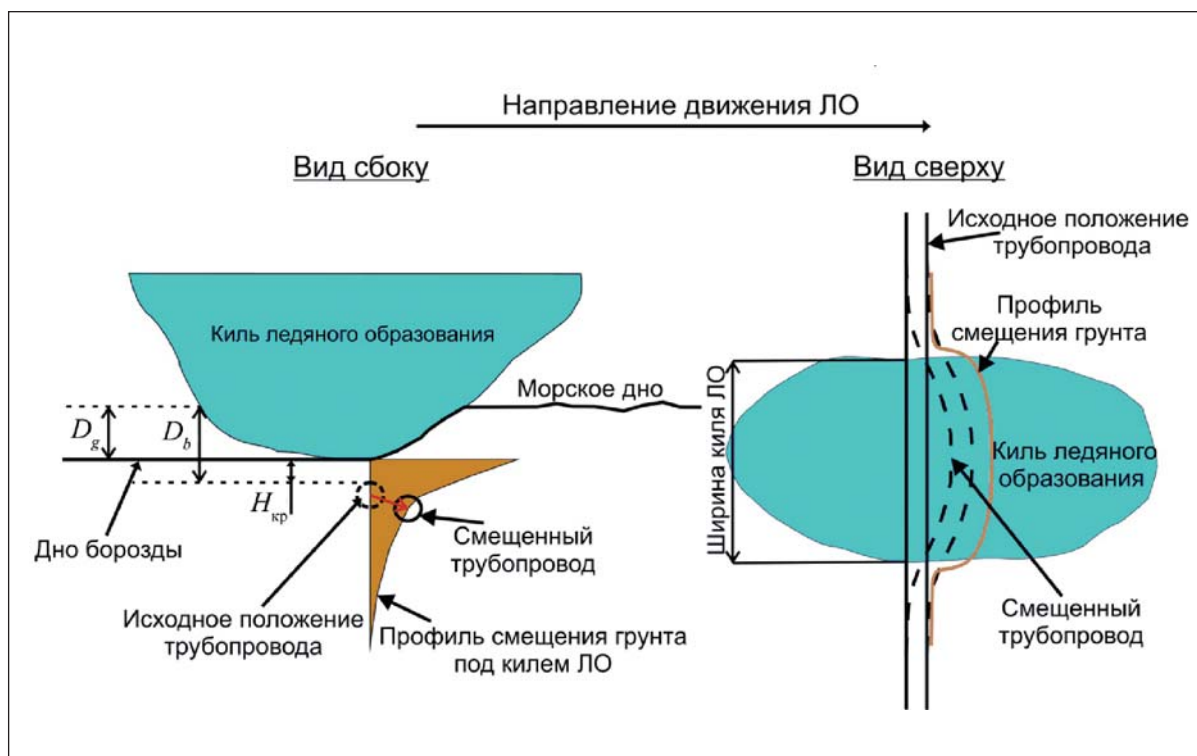


Рис. 5. Схема выпаживания дна килем ледяного образования

влияют на выбор проектных и конструкторских решений. Например, в данном случае ему требуется расчетное значение глубины ледовой экзарации, которое определяется примерно так: это такое значение  $D_g^*$ , вероятность превышения которого (или, иначе, вероятность появления борозды глубиной больше, чем  $D_g^*$ ) в течение одного года равна  $10^{-4}$  (или, возможно,  $10^{-3}$  либо другому значению — это должно определяться требованиями соответствующих регламентов и норм).

Таким образом, для получения расчетной глубины ледовой экзарации в районе трассы проектируемого трубопровода необходимо либо иметь данные наблюдений за продолжительный период в объеме, достаточном для применения стандартных статистических процедур (что в настоящее время на практике нереализуемо по причине редкой повторяемости актов экзарации в заданном районе), либо разрабатывать специальные методики, позволяющие посредством математического моделирования определять расчетные геометрические параметры (в частности, глубину) борозд выпаживания на дне интересующей акватории на основе анализа лишь текущего состояния морского дна. Отметим, что соответствующие задачи опять-таки достаточно тесно связаны с задачами оценки риска.

На рис. 6 в качестве примера исходной информации, на основе которой необходимо получать расчетные параметры экзарационных борозд, показаны фрагмент съемки дна с помощью гидролокатора

бокового обзора в районе прокладки подводного заглубленного в грунт трубопровода (рис. 6а) и характерный кадр эхограммы, полученной методом акустического профилирования (рис. 6б). На рис. 6а видно, что грунт обратной засыпки над недавно проложенным трубопроводом поврежден бороздой выпаживания. Это свидетельствует о том, что экзарационный процесс имел место уже после прокладки трубопровода.

Далее рассмотрим исходные данные, необходимые для моделирования воздействия ледовой экзарации на заглубленные трубопроводы при использовании метода конечных элементов. По-видимому, определяющие среди них — физико-механические свойства донного грунта до глубины примерно 10 м и физико-механические свойства грунта обратной засыпки. Эти данные используются для построения МКЭ-модели грунта, окружающего трубопровод и контактирующего с килем тороса. В разных математических моделях грунта используются, вообще говоря, различные наборы определяющих параметров. В частности, для ряда наиболее распространенных моделей грунта требуются следующие параметры механических свойств: модуль упругости  $E$ , сцепление  $c$  и угол внутреннего трения  $\varphi$ .

Морфометрические параметры ледяных образований также являются важными входными данными для расчетов. Следует отметить: результаты расчетного моделирования, описанные ниже, показали, что локальная форма килей тороса в зоне контакта «киль — грунт» весьма существенно влияет на

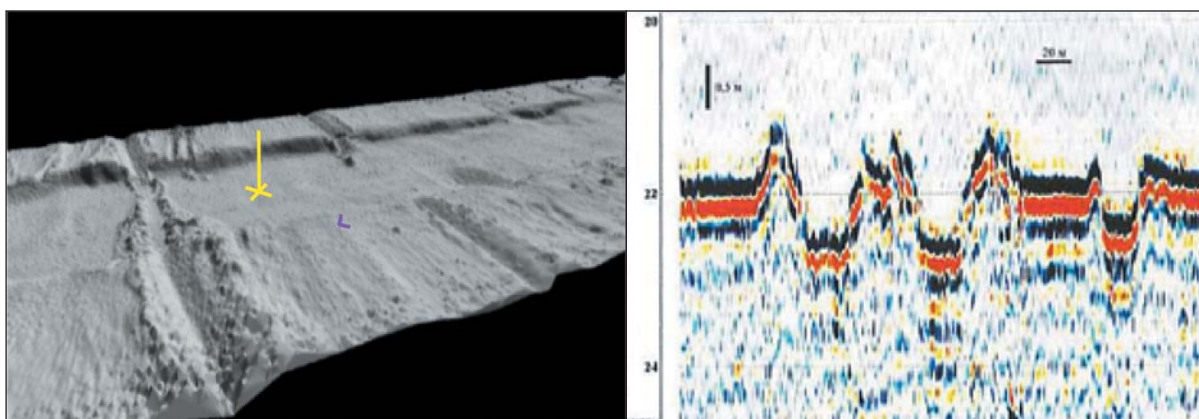


Рис. 6. Идентификация и измерение параметров экзарационных борозд: съемка гидролокатором бокового обзора (а), акустическое профилирование (б)

характер деформирования грунта и интенсивность воздействия на заглубленный трубопровод.

На рис. 7 представлена фотография тороса (стамухи), обнаруженного на мели в Тугурском заливе (Охотское море) [2]. Красной пунктирной линией показана осредненная граница боковой поверхности кия данного ЛО, а голубой линией очерчен контур кия, которые, что неудивительно, значительно разнятся. Важным обстоятельством при моделировании процесса выпахивания является именно локальная геометрия кия в зоне его контакта с грунтом, поэтому использование в этих расчетах усредненных показателей формы кия ЛО некорректно.

Данные о батиметрии, т. е. о рельефе дна, также как и характеристики глобальной прочности килей ЛО, являются факторами, которые, вообще говоря, накладывают определенные ограничения на возможную глубину борозд выпахивания в районе трассы проектируемого трубопровода. Применение соответствующих подходов, учитывающих эти факторы, может оказаться особенно актуальным в случае отсутствия достаточного количества натуральных измерений глубины борозд экзарации. Рассмотрение данных вопросов выходит за пределы настоящей статьи.

Далее описывается МКЭ-модель взаимодействия кия ЛО с донным грунтом и трубопроводом в предположении о неразрушаемости кия и отсутствии

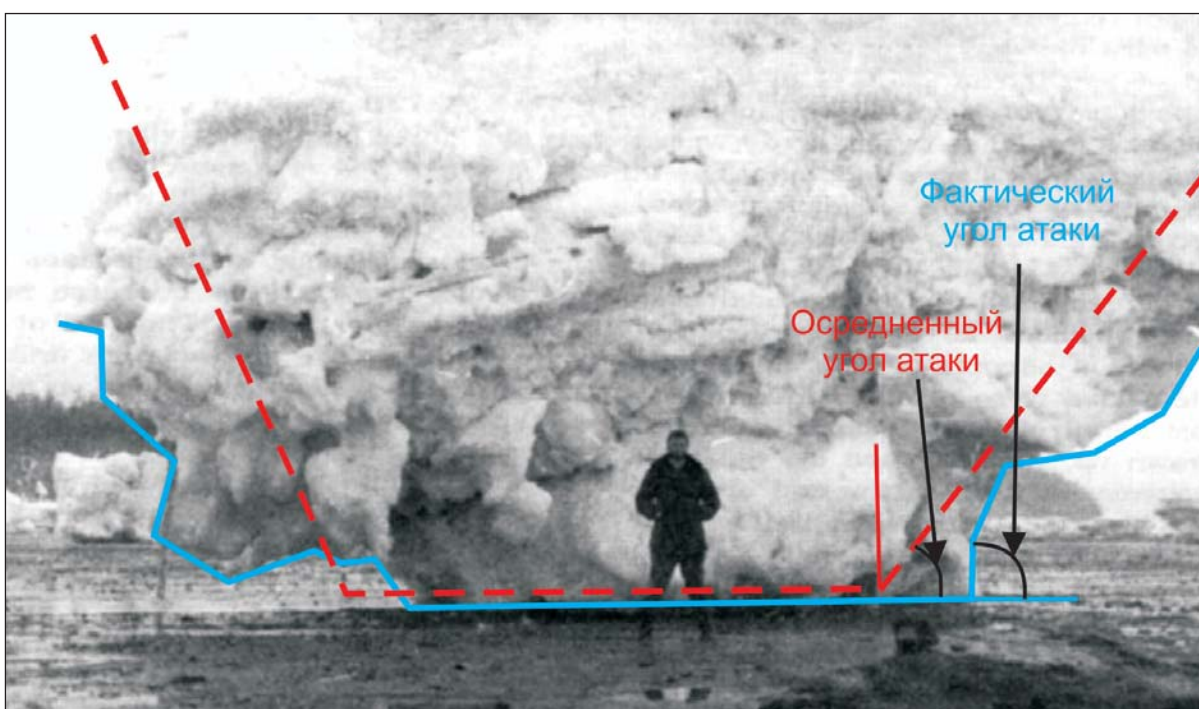


Рис. 7. Ледяное образование, севшее на мель [3]

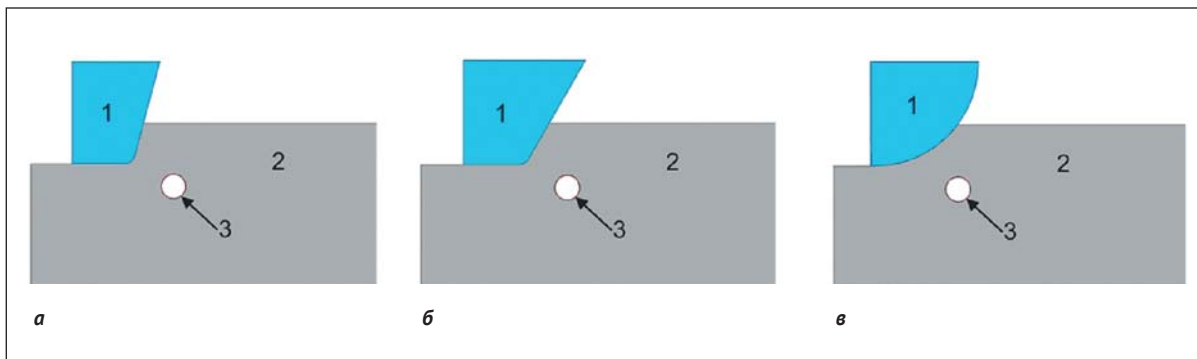


Рис. 8. Расчетные схемы с килем различной формы: 1 – киль тороса, 2 – донный грунт, 3 – трубопровод

вертикального смещения ЛО в процессе выпахивания дна, которое в расчетах представлено горизонтальной поверхностью.

**Моделирование ледовой экзарации**

Моделирования системы «киль — грунт — труба» выполняется с помощью метода конечных элементов. Напряженно-деформированное состояние (НДС) заглубленной в грунт трубы зависит при ледовом выпахивании от нескольких параметров: глубины заложения трубопровода (т. е. расстояния от верхней образующей трубы по поверхности морского дна), глубины выпахивания дна килем ЛО, локальной формы киля ЛО, характеристик донного грунта. Как следует из схемы, показанной на рис. 5, задача о деформировании трубопровода является существенно трехмерной. К настоящему времени опубликовано достаточно много работ, в которых представлены результаты по МКЭ-моделированию задачи в полной трехмерной постановке (см., например, [10, 13] и ссылки в них). Исследование соответствующих моделей является очень трудоемким.

Авторы настоящей работы предлагают упрощенный подход, основанный на предположении, что условия в случае широкого киля НДС в массиве грунта, находящегося в зоне влияния киля, достаточно близки к условиям плоскодеформированного состояния, т. е. существенно не изменяются вдоль трубопровода. В то же время сам трубопровод, претерпевающий пространственный изгиб (поскольку на него действует поперечная нагрузка в зоне экзарации, а вдали от этой зоны его смещения стеснены недеформированным грунтом), предлагается отдельно моделировать линейными элементами балочного типа с системой нелинейных связей со специально подобранными жесткостями. Таким образом, в первом расчетном блоке решается плоская задача о воздействии киля на массив грунта (труба при этом включается в расчетную схему, но практически не влияет на общую картину деформирования грунта). Затем во втором расчетном блоке в качестве нагрузки на трубу используются результаты первого расчета. Такая схема является консервативной, несколько

завышая деформации и напряжения трубопровода, но зато позволяет выполнить детальный анализ картины деформирования грунта в зоне контакта киля с грунтом и грунта с трубой за счет применения в плоском случае очень мелких расчетных сеток (недоступных при 3D-моделировании) и требует принципиально меньших трудозатрат, что делает возможным выполнение многопараметрического анализа задачи.

Рассмотрим сначала плоскую (двумерную) постановку задачи. Случай плоской деформации соответствует ситуации, когда активная часть киля, непосредственно участвующая в процессе выпахивания, имеет по фронту достаточно большую протяженность. Если же киль относительно узкий, то результаты расчетов в двумерной постановке дадут консервативную (по запасу прочности) оценку смещений и напряжений в трубе.

Система «киль — грунт — труба» схематично изображена на рис. 8. Модель, разработанная в рамках конечно-элементного вычислительного комплекса ANSYS, позволяет изменять форму и размер киля, глубину выпахивания и глубину заложения трубы. Последнее, в частности, означает, что можно задавать величину зазора между верхней образующей трубы и основанием киля. Задача решается в статической постановке с учетом больших перемещений и деформаций.

К левой боковой грани киля прикладывается давление. Его интенсивность последовательными итерациями выбирается таким образом, чтобы в грунте возникли ярко выраженные линии скольжения (характерный признак наступления предельного состояния) и избыточные деформации. При выполнении данных условий считается, что грунт теряет свою несущую способность. Предполагается, что определенное таким образом критическое состояние грунта в ходе реализации процесса экзарации. В качестве альтернативной схемы выполнения расчетов можно вместо приложения давления задавать в качестве кинематического нагружения последовательно увеличивающееся смещение киля по оси *x*.



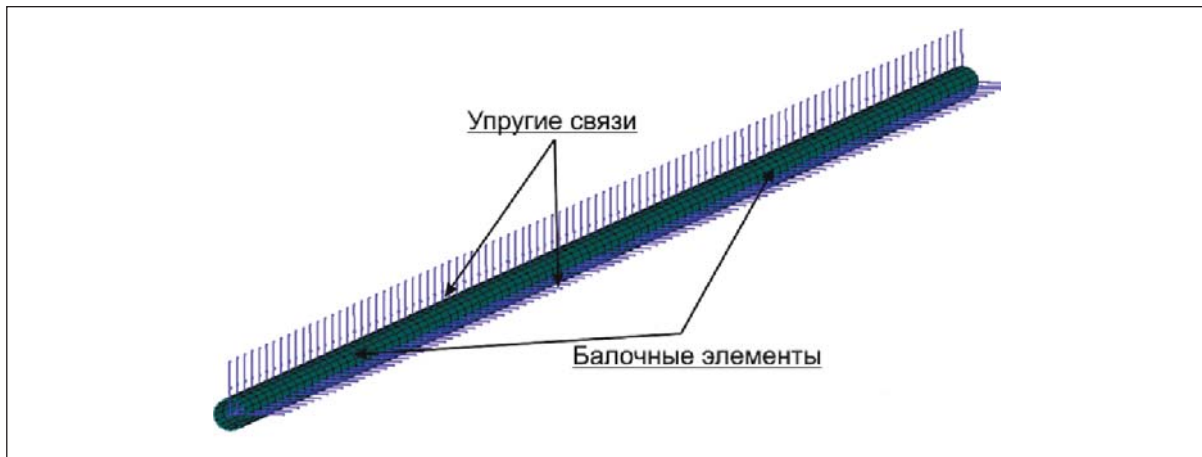


Рис. 9. Схема трубопровода в балочном приближении

Выбрав форму кия, глубину выпахивания и глубину заложения трубы, можно решать задачу при разных расположениях трубы по оси  $x$  относительно кия (см. рис. 8). Изменяя положения трубы по оси  $x$  относительно положения кия, можно определить максимальное смещение сечения трубы в процессе экзарации.

Для материала трубы и кия тороса используется упругая модель, характеризуемая стандартными параметрами: модулем упругости  $E$ , коэффициентом Пуассона  $\nu$ . Для материала грунта используется упруго-пластичная модель Друкера — Прагера [9] со следующими определяющими параметрами: модулем упругости  $E$ , числом Пуассона  $\nu$ , сцеплением  $c$  и углом внутреннего трения  $\varphi$ .

Приведем результаты расчетов, выполненных для двух случаев с принципиально разной формой фронтальной части кия: в виде полуокружности и в виде наклонной передней грани (угол наклона в расчетах варьируется). На рис. 8 представлены расчетные схемы для разных форм кия: с наклоном фронтальной грани  $15^\circ$  (а) и  $45^\circ$  (б), а также в виде полуокружности (в) (показаны правые половины килей).

Граничные условия для массива грунта задавались следующим образом: перемещения по оси  $x$  (на рис. 8 направлена слева направо) запрещены для левой и правой границ массива грунта, перемещения по оси  $y$  (на рис. 8 направлена снизу вверх) запрещены для нижней границы массива грунта и для верхней границы кия. Далее для определения НДС трубы рассчитанные значения перемещений подставляются в разработанную балочную модель трубопровода, которая описана ниже.

В одномерной модели трубопровод моделируется элементами балочного типа. Балочная модель позволяет учесть деформации растяжения-сжатия, изгиба и сдвига в двух поперечных направлениях. Также может быть учтено пластическое поведение материала. Кроме того, возможен учет внутреннего давления в трубе и температурного перепада.

Моделирование взаимодействия трубопровода с грунтом осуществляется путем использования нелинейных связей. Нелинейные связи (моделирующие взаимодействие трубы с грунтом) определены в каждом узле трубопровода и направлены в трех ортогональных направлениях (продольном, вертикальном и поперечном). На рис. 9 изображена схема трубопровода в балочном приближении с нелинейными связями.

Преимущества описанного приближенного подхода заключаются в значительном снижении вычислительных затрат, простоте реализации и возможности рассмотрения участков трубопровода большой длины без значительного увеличения расчетного времени. Недостатком данного подхода является невозможность учета локальных процессов в трубопроводе, таких как овализация, гофрирование и т. д., что может быть реализовано в рамках аналогичной модели, в которой используются элементы оболочечного типа.

В приближенной модели расчетного блока 2, как указывалось выше, используются результаты, полученные при расчете модели ледовой экзарации в плоской постановке. В первом варианте нагружения трубопровода (условно кинематическом) полученные в рамках расчетного блока 1 смещения  $\Delta S_{\max}$  задаются для отрезка балочной модели на участке, длина которого равна выбранному значению ширины активной части кия ледяного образования (рис. 10а). При этом оценивается НДС трубопровода при данных смещениях. Таким образом, можно оценить воздействие процесса экзарации на трубопровод для заданных глубины пропашки, параметров грунта и глубины заложения трубопровода. Для оценки ресурса прочности полученные значения деформаций и напряжений должны быть сопоставлены с критическими значениями для материала трубы.

Заметим, что смещение части трубопровода как твердого целого в результате кинематического нагружения вызывает большие изгибные напряжения



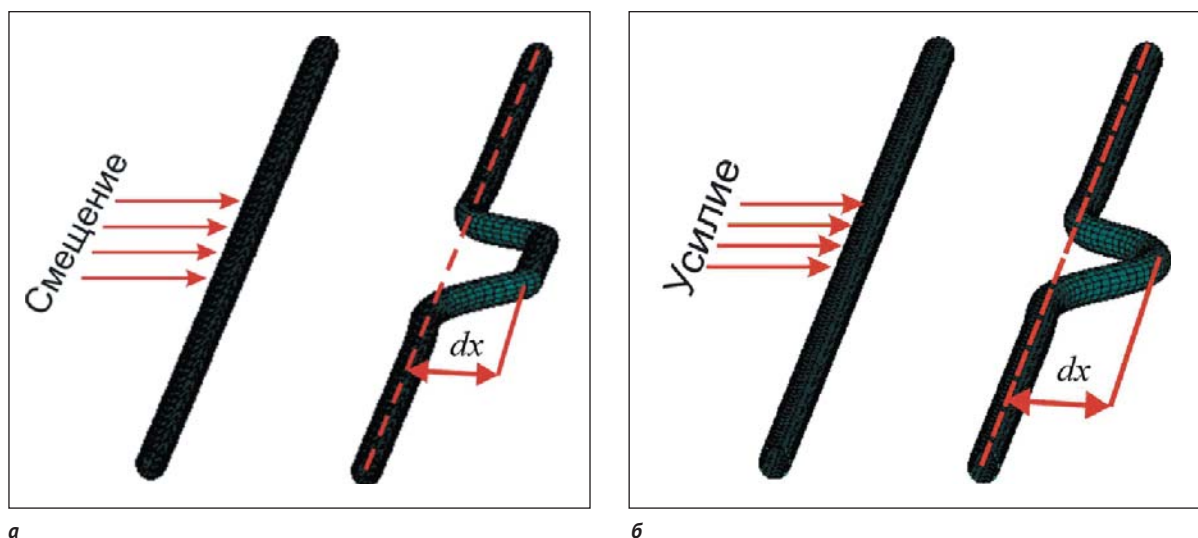


Рис. 10. Схемы нагружения трубопровода: заданное смещение (а) и заданная распределенная нагрузка (б)

на границах отрезка, к которому прикладывается перемещение. Эта схема не вполне соответствует реальной картине воздействия процесса экзарации на трубопровод, так как за счет жесткости труба даже под килем обладает некоторым радиусом кривизны.

Второй вариант нагружения трубопровода (условно силовой) заключается в приложении к участку трубы, длина которого равна ширине активной части кила тороса, фиктивной равномерно распределенной нагрузки (рис. 10б). Интенсивность нагрузки подбирается таким образом, чтобы максимальное смещение трубы соответствовало результатам, полученным при расчете модели экзарации в плоской

постановке. При такой схеме нагружения трубопровод имеет искривление по всей длине, и максимальный изгибающий момент наблюдается в середине участка нагружения, что соответствует ожидаемой картине деформирования трубопровода при ледовом выпахивании.

При расчете НДС трубопровода с нелинейными связями принимаются следующие граничные условия: концы моделируемого трубопровода полностью закрепляются. Чтобы граничные условия не влияли на НДС трубопровода в интересующей нас зоне, длина моделируемого участка выбирается таким образом, чтобы возмущение НДС в грунте от воздействия

Таблица 1. Характеристики материала кила и трубы

Характеристика	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
Материал кила (лед)	4,0·10 <sup>3</sup>	0,3
Материал трубы (сталь)	2,07·10 <sup>5</sup>	0,3

Таблица 2. Характеристики материала грунтов

Тип грунта	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения φ, град.	Удельное сцепление с, кПа
Суглинок текучепластичный (ТГ-1)	2,8	0,3	12,5	40
Суглинок тугопластичный (ТГ-2)	14,4	0,3	26,9	36

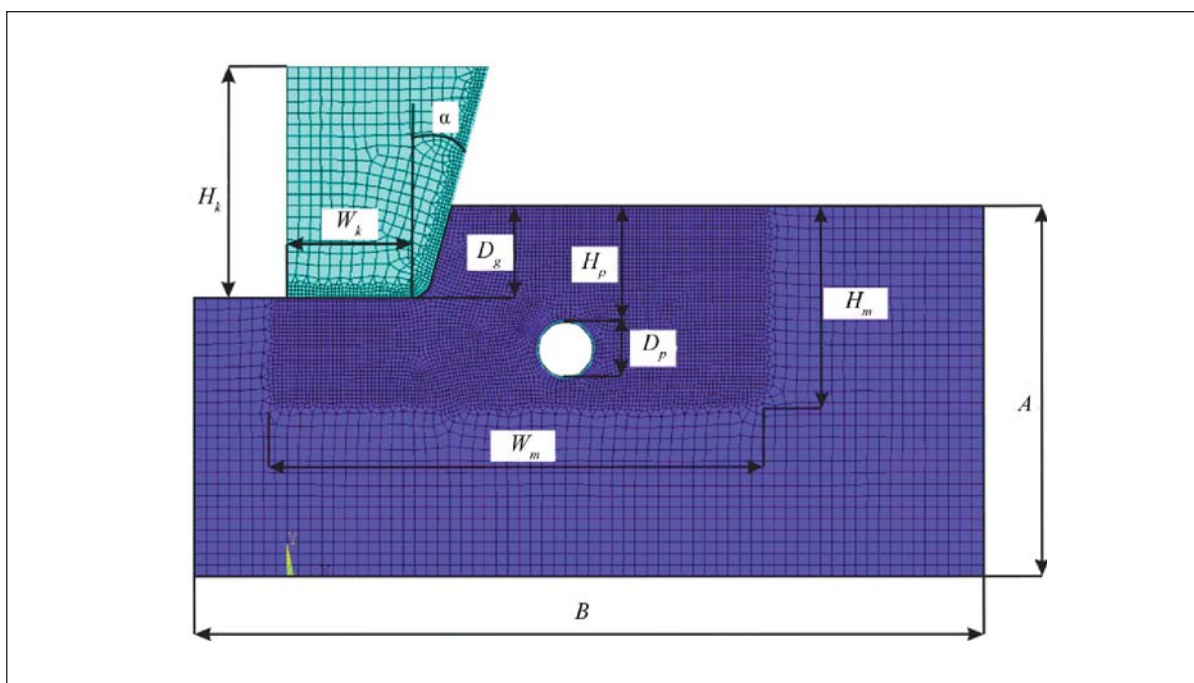


Рис. 11. Расчетная схема для расчетов в вычислительном комплексе ANSYS

на трубопровод практически полностью затухало к границам участка. В приведенных расчетах длина трубы с запасом принималась равной 200 м.

Эффективные жесткости связей, моделирующих сопротивление грунта смещениям трубы, должны быть рассчитаны в соответствии с физико-механическими свойствами реального грунта, окружающего проектируемый трубопровод.

### Реализация модели в рамках вычислительного комплекса ANSYS

Модель реализована в конечно-элементном вычислительном комплексе ANSYS 14.0. На рис. 11 показана расчетная схема модели ледовой экзарации в двумерной постановке для случая, когда киль ЛО имеет форму трапеции (показана правая половина кия) с наклонной передней частью и скруглением в зоне перехода от фронтальной грани к основанию. Если киль имеет форму полуокружности, берутся те

же геометрические параметры МКЭ-модели за исключением параметров кия. Геометрия кия в этом случае характеризуется радиусом окружности  $R$ . Более подробно МКЭ-модель описана в [5].

На рис. 11 параметры  $A$  и  $B$  обозначают размеры массива грунта,  $H_m$  и  $W_m$  — размеры области дополнительного измельчения элементов, моделирующих грунт,  $D_p$  — внешний диаметр трубопровода,  $H_p$  — расстояние от поверхности грунта до верхней образующей трубы,  $D_g$  — глубина внедрения кия в грунт (глубина выпахивания),  $W_k$  — характерный размер основания кия,  $H_k$  — высота кия,  $\alpha$  — угол наклона передней грани кия к вертикали,  $H_p$  и  $Y_p$  — координаты центра трубы. Для удобства введем также обозначение  $H_{кр}$ , равное расстоянию от верхней образующей трубы до нижней части кия, характеризующее величину дополнительного заглубления трубопровода по сравнению с расчетной глубиной экзарационных борозд.

Таблица 3. Геометрические параметры задачи

$B$ , м	$A$ , м	$H_k$ или $R$ , м	$D_g$ , м	$H_{кр}$ , м	$D_p$ , м	$\delta$ , м	$W_k$ , м	$\alpha$ , град.
12	8	5	0,5; 1,0; 1,5; 2,0	0,25; 0,5	1,219	0,027	3	15; 30

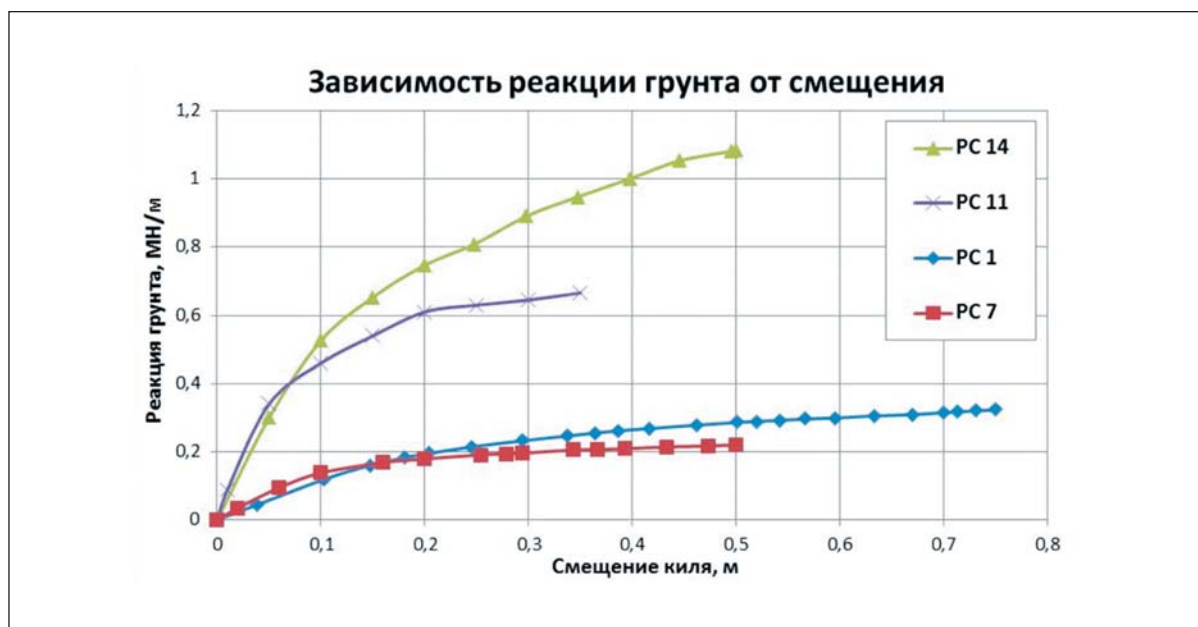


Рис. 12. Зависимость силы реакции грунта от смещения кия

Таблица 4. Сводная таблица результатов расчетов

Расчетный случай (PC)	Параметры кия	Тип грунта	Глубина выпаживания $D_g$ , м	Расстояние от кия до верхней образующей трубы, м	Максимальное смещение трубы $\Delta S_{max}$ , м
1	15°	ТГ-1	2,0	0,5	0,057
2	15°	ТГ-1	1,5	0,5	0,048
3	15°	ТГ-1	1,0	0,5	0,028
4	15°	ТГ-1	0,5	0,5	0,022
5	30°	ТГ-1	2,0	0,5	0,062
6	30°	ТГ-1	1,5	0,5	0,048
7	Полукруглость	ТГ-1	2,0	0,5	0,123
8	Полукруглость	ТГ-1	1,5	0,5	0,143
9	Полукруглость	ТГ-1	1,0	0,5	0,139
10	Полукруглость	ТГ-1	0,5	0,5	0,119
11	15°	ТГ-2	2,0	0,5	0,051
12	15°	ТГ-1	2,0	0,25	0,073
13	30°	ТГ-2	2,0	0,5	0,052
14	Полукруглость	ТГ-2	2,0	0,5	0,115



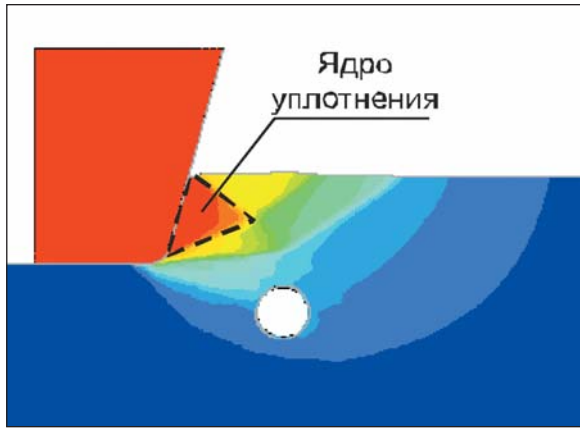


Рис. 13. Поле смещений (красный цвет соответствует максимальному значению)

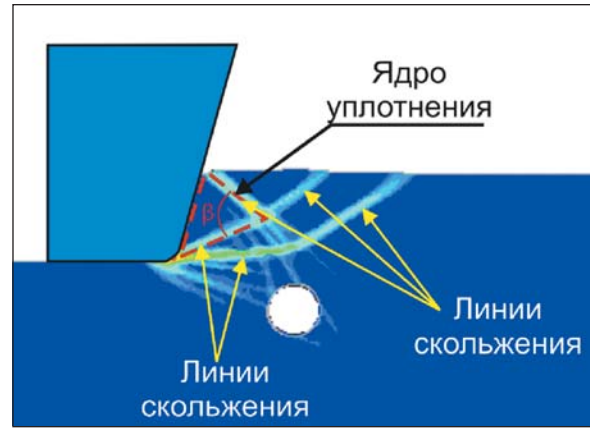


Рис. 14. Поле интенсивности деформаций (синий цвет соответствует нулевым деформациям)

Была проведена серия параметрических расчетов, в которых менялись тип грунта, форма кия, значения параметров  $D_g$  и  $H_{кр}$ . В табл. 1 приведены параметры материала кия и трубы, в табл. 2 — параметры материала грунтов, в табл. 3 — общие геометрические параметры модели.

### Результаты расчетов

В табл. 4 приведены результаты расчетов для различных параметров. На рис. 12 показаны графики зависимости силы реакции грунта от величины перемещения кия ледяного образования. Результаты даны для кия с углом наклона грани к вертикали  $15^\circ$ , грунтов ТГ-1 (обозначение РС 1 на рис. 12) и ТГ-2 (обозначение РС 11) и для кия, имеющего форму полуокружности для грунтов ТГ-1 (обозначение РС 7) и ТГ-2 (обозначение РС 14). После возрастания силы реакции грунта на некотором начальном участке графики постепенно начинают выходить на горизонтальную полку, что характеризует достижение грунтом состояния предельного равновесия и переход в состояние текучести.

Характерное распределение поля смещений для зоны контакта кия с грунтом, свидетельствующее о достижении предела прочности грунтового массива перед килем, показано на рис. 13 для РС 11 (грунт ТГ-2). Черной пунктирной линией показано ядро уплотнения, которое отчетливо визуально идентифицируется по равенству смещений грунта и кия.

На рис. 14 показано поле интенсивности деформаций для зоны контакта кия с грунтом (РС 11). Четко идентифицируются линии скольжения, соответствующие этапу развитой пластичности.

Сопоставительный анализ результатов при различных значениях параметров позволяет сделать вывод, что интенсивность воздействия на трубу возрастает при уменьшении зазора над трубой относительно основания кия, а при фиксированном значении зазора — при увеличении глубины выпахивания. Кроме того, можно заключить, что для

рассмотренных форм кия максимальное воздействие на трубу оказывает киль, форма которого в зоне контакта близка к дуге окружности.

Расчеты показали, что в случае грунта ТГ-2 (более прочного, чем грунт ТГ-1) при одинаковых значениях параметров модели возмущения вглубь грунта (ось  $y$ ) при ледовом выпахивании проникают слабее, чем для грунта ТГ-1. Из табл. 4 видно, что максимальные смещения трубы оказываются выше в расчетах с грунтом ТГ-1. Соответствующие напряжения в стенках трубы для разных грунтов приводятся ниже.

### Модель трубопровода в балочном приближении

В табл. 5 приведены геометрические параметры модели, принятые для расчета (параметры материала трубопровода представлены в табл. 1).

Параметры нелинейных связей, моделирующих отпор грунта, определялись по методике, описанной в [1, 2, 7]. Погонная жесткость продольных пружин  $k_l$  для грунта ТГ-1 равна  $0,766 \text{ МН/м}^2$ , для грунта ТГ-2 —  $1,148 \text{ МН/м}^2$ . Соответствующие значения поперечной погонной жесткости пружин  $k_n$  имеют следующие значения: для грунта ТГ-1 —  $0,408 \text{ МН/м}^2$ , для грунта ТГ-2 —  $2,097 \text{ МН/м}^2$ .

В табл. 6 приведены результаты расчетов балочной модели трубопровода для грунта ТГ-1. При этом смещение трубы  $\Delta S$ , рассчитанное в плоской задаче, равно  $14,3 \text{ см}$  (РС 8).

В табл. 7 приведены результаты расчетов балочной модели трубопровода для грунта ТГ-2. Смещение трубы принято равным  $\Delta S=11,5 \text{ см}$  (из расчета

Таблица 5. Геометрические параметры задачи

$L, \text{ м}$	$D_p, \text{ м}$	$\delta, \text{ м}$
200	1,219	0,027

Таблица 6. Результаты расчета для грунта ТГ-1 (приведены напряжения и деформации по Мизесу)

Ширина зоны приложения нагрузки, м	Силовое нагружение		Кинематическое нагружение	
	Напряжение, МПа	Деформация	Напряжение, МПа	Деформация
6	182	0,00114	216	0,00136
12	129	0,000813	216	0,00136
20	79,1	0,000497	216	0,00136

РС 14). Видно, что при использовании кинематической схемы нагружения трубы максимальные напряжения и деформации не зависят от ширины моделируемого кия (т. е. от длины отрезка, к которому прикладывается смещение). В случае силовой схемы нагружения трубы максимальные деформации и напряжения уменьшаются по мере увеличения ширины моделируемого кия (т. е. длины отрезка, к которому прикладывается сила). Максимальное напряжение наблюдается в случае грунта ТГ-2 при кинематическом нагружении и равняется 343 МПа.

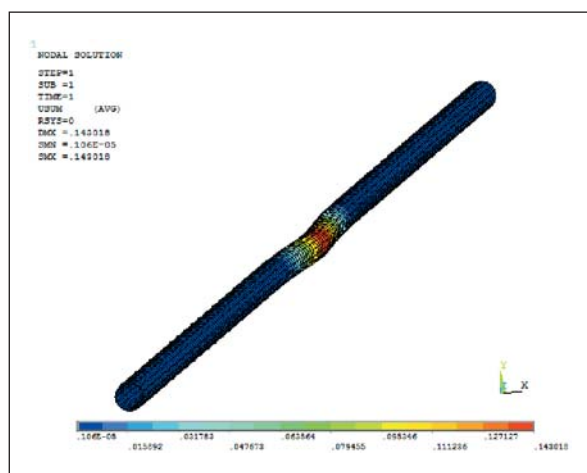
На рис. 15 показаны распределения смещений (а) и напряжений (б) по Мизесу в трубе для грунта ТГ-1 для случая силового нагружения.

В качестве примера приведем результаты модельных расчетов полного НДС трубы в условиях ледового выпаживания в случае внутреннего давления в трубе 11,8 МПа. Ширина активной части кия принята равной 6 м. Максимальное напряжение по Мизесу в этом случае наблюдается в варианте с грунтом ТГ-2 в схеме с кинематическим нагружением и составляет 395 МПа. Для того же грунта в схеме с силовым нагружением максимальное

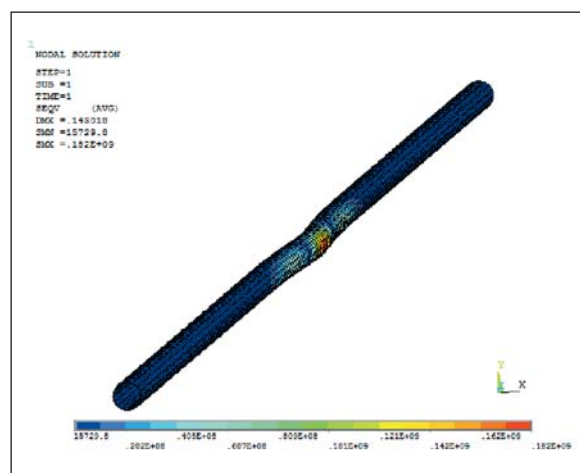
напряжение по Мизесу равняется 331 МПа. Для грунта ТГ-1 аналогичные расчеты дают значения 291 МПа и 267 МПа соответственно. Заметим, что характерное значение предела текучести стали, используемой для морских трубопроводов, составляет 450 МПа.

**Выводы**

1. Ключевыми факторами, определяющими интенсивность воздействия ледовой экзарации на заглубленный морской трубопровод в предположении о неразрушении ледяного кия, являются характеристики донного грунта и локальная форма кия в зоне контакта с дном.
2. Предложенный приближенный подход к моделированию задачи о воздействии ледовой экзарации на заглубленный трубопровод позволяет выполнять эффективные расчеты по определению безопасной глубины заложения трубопровода в условиях опасности ледовой экзарации.
3. Результаты расчетов с помощью приближенной модели показали, что для некоторых типов грунтов высокий уровень напряжений и деформаций



а



б

Рис. 15. Распределение смещений в трубопроводе при моделировании в балочном приближении (случай силового нагружения)

Таблица 7. Результаты расчета для грунта ТГ-2 (приведены напряжения и деформации по Мизесу)

Ширина зоны приложения нагрузки, м	Сила		Смещение	
	Напряжение, МПа	Деформация	Напряжение, МПа	Деформация
6	267	0,00168	343	0,00215
12	156	0,000982	343	0,00215
20	79,8	0,000501	343	0,00215

в трубопроводе может иметь место даже при расстоянии от верхней образующей трубы до основания килля, равном 0,5 м.

4. Параметры грунта сильно влияют на процесс разрушения грунта при экзарации, а также на НДС трубопровода. Как показали результаты расчета, несмотря на более низкие значения смещений трубы, в грунте ТГ-2 (более прочном) получены более высокие значения напряжений по Мизесу.

5. Влияние физико-механических характеристик донного грунта на параметры НДС трубопровода в условиях ледовой экзарации имеет труднопредсказуемый характер: например, смещение трубопровода от проектного положения может быть выше в случае грунта с более низкими прочностными характеристиками, в то время как результирующие напряжения могут оказаться выше в случае более прочного грунта.

### Литература

1. Айнбиндер А. Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: Справочное пособие. — М.: 1991. — 287 с.
2. Алешин В. В., Селезнев В. Е. и др. Численный анализ прочности подземных трубопроводов. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 320 с.
3. Вершинин С. А., Трусков П. А., Лиферов П. А. Воздействие ледовых образований на подводные объекты. — М., 2007. — 195 с.
4. Начата промышленная добыча газа на Ямале // <http://gazprom.ru/press/news/2012/october/article146696/> (дата обращения: 18.03.2013).
5. Наумов М. А., Онищенко Д. А. Численное моделирование процессов взаимодействия ледяных образований с морским дном и заглубленным трубопроводом в двумерной постановке // Труды IV международной конференции ROOGD-2012. — М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. — С. 355—369.
6. Природные условия Байдарацкой губы: Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал-Центр. — М.: Геос, 1997. — 432 с.

7. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Клишин Г. С. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем. — М.: КомКнига, 2005. — 328 с.

8. Стратегия «Газпрома»: Разведка и добыча газа и нефти // <http://gazprom.ru/about/strategy/exploration/> (дата обращения: 18.03.2013).

9. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of Applied Mathematics. — 1952. — Vol. 10. — № 2. — P. 157—165.

10. El-Gebaly S., Paulin M., Lanan G., Cooper P. Ice Gouge Interaction with Buried Pipelines Assessment Using Advanced Coupled Eulerian Lagrangian // Proceedings Arctic Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2012, paper OTC 23764.

11. ISO/FDIS 19906: 2010 Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures / Intern. Organization for Standardization. — [S. I.], 2010. — 474 p.

12. Li F., Kelley J., Uematsu E. Spring sea ice conditions from SAR images near the Alaska coast of the Chukchi Sea // Proc. of the 8th Int. Symp. «Okhotsk Sea & Sea Ice», 1—5 February 1993. Mombetsu, Hokkaido, Japan. — P. 261—268.

13. Paulin M., Kenny S., Palmer A. et al. Offshore Pipelines in Cold Regions — Environmental Loadings and Geotechnical Considerations // Proceedings of the International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice (ICETECH 2008), Banff, Canada, 2008. — P. 406—413.

14. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Ice Scour & Arctic Marine Pipelines Workshop. Mombetsu, Japan, 2000. — 278 p.

15. Timco G. W., Croasdale K., Wright B. An overview of first-year sea ice ridges. — [S. I.], 2000. — 159 p. — (PERD/CHC report; 5-112).

16. Номенклатура ВМО по морскому льду. Терминология. WMO/OMM/ВМО — № 259, Suppl. № 5. Издание 1970—2004: Ледовые термины, расположенные в алфавитном порядке // <http://www.aari.nw.ru/gdsidb/XML/volume1.php?lang1=2&lang2=0&arrange=1> (дата обращения: 18.03.2013).