

указанных вариантов в долях $6M_2 l^{3/2}/h^2$, где $l=e-r$ — длина разреза, $K=1,733; 1,53; 1,3; 1,22$.

Значения КИН в конечных точках разреза при отношениях $a/b=1,5; r/a=0,1; e/r=1,4; 1,5$ почти совпадают с результатами [1], вычисленными для бесконечной пластинки с отверстием и двумя разрезами. Без заметного ущерба конечную пластинку, для которой $a/r \geq 10, e/r \leq 2,0$, можно принять за бесконечную.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бережницкий Л. Т., Деляевский М. В., Панасюк В. В.* Изгиб тонких пластин с дефектами типа трещин. Киев: Наук. думка, 1979. 400 с.
2. *Вайнберг Д. В.* Концентрация напряжений в пластинах около отверстий и выкружек. Киев: Техника, 1969. 220 с.
3. *Каминский А. А.* Исследование поля напряжений возле малых радиальных трещин, выходящих на контур отверстия // Прикл. механика. 1971. Т. 7. № 12. С. 112–115.
4. *Космодамианский А. С., Иванов Г. М.* Изгиб тонких многосвязных плит. Донецк: Изд-во Донецк. ун-та, 1973. 264 с.
5. *Кулиев С. А.* Кручение квадратного бруса с центральной круглой полостью и двумя разрезами // Прикл. механика. 1986. Т. 22. № 4. С. 77–82.
6. *Мухомелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.
7. *Сидоров Ю. В., Федорюк М. В., Шабунин М. И.* Лекции по теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1982. 487 с.
8. *Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. 635 с.
9. *Угодчиков А. Г., Длувач М. И., Степанов А. Е.* Решение краевых задач плоской теории упругости на цифровых и аналоговых машинах. М.: Высш. шк., 1970. 528 с.
10. *Шерман Д. И.* Об одном методе решения некоторых задач теории упругости для двусвязных областей // Докл. АН СССР. 1947. Т. 55. № 8. С. 701–704.

Баку

Поступила в редакцию
19.IX.1988

УДК 539.3

© 1990 г.

В. И. ДАНИЛЕНКО, С. И. РОГАЧКО

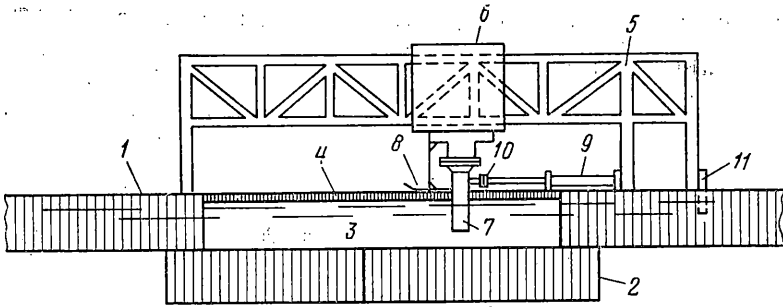
ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОВНЫХ ЛЕДЯНЫХ ПОЛЕЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОПОРОЙ

Представлены методика исследований и результаты экспериментов по прорезанию ровных ледяных полей цилиндрической опорой в полунатурных условиях. Экспериментальные данные анализируются с учетом результатов численного моделирования разрушения ледяного покрова, полученных методом конечных элементов. Предлагается простой критерий перехода от раздробления льда перед цилиндрической опорой к разрушению льда в результате возникновения и развития радиальных трещин нормального отрыва.

1. Введение. В настоящее время актуальным является вопрос о добыче углеводородов на шельфе замерзающих морей. В этой связи в проектных организациях ведутся разработки ледостойких нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений, способных противостоять воздействию различных факторов окружающей среды, и в первую очередь — воздействию ледяных образований, что должно обеспечить безаварийную работу морских промыслов.

Одним из основных расчетных случаев при проектировании таких сооружений является воздействие ровных ледяных полей с размерами в плане, значительно превышающими поперечные размеры опорных частей сооружения. Согласно рекомендациям действующих норм [1], наибольшие нагрузки на сооружение при этом будут иметь место при прорезании ледовых полей опорной частью сооружения. Простейшей формой опорной части при равновероятном направлении дрейфа ледовых полей является цилиндр.

Совершенствование рекомендуемых нормативными документами [1] способов расчета ледовых нагрузок на ледостойкие сооружения требует дополнительных исследований закономерностей разрушения ледяного покрова при взаимодействиях с цилиндрическими преградами. Целесообразным при этом представляется использование самых разнообразных методов — как экспериментальных, так и численно-аналитических.



Фиг. 1

В работе предпринята попытка анализа крупномасштабных экспериментальных исследований на основании результатов численного моделирования процесса методом конечных элементов.

2. Экспериментальные исследования. Крупномасштабные опыты по взаимодействию цилиндрической опоры с ровными ледяными полями производились по методике, разработанной в [2]. Данная методика состоит из следующих этапов.

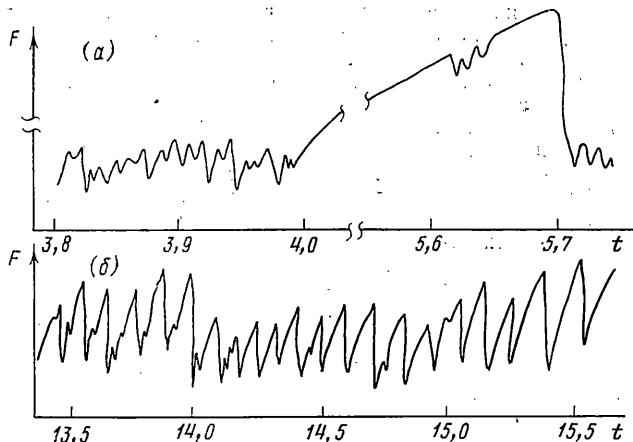
Подготовка экспериментов состояла из ряда последующих операций (фиг. 1). В естественном ледяном поле 1 пильным агрегатом, установленным на бульдозере, выпиливалась прямоугольная в плане льдина 2, которая с помощью специальной установки, оборудованной вертикальным гидроцилиндром, затапливалась под нижнюю кромку ледяного покрова и поворачивалась примерно на 45° . После этого вертикальное усилие на льдину, создаваемое гидроцилиндром, снималось, и под действием взвешивающей силы льдина оставалась прижатой к нижней кромке ледяного поля 1. Таким образом получали искусственный бассейн (майну) 3 необходимой площади. Размеры установки и мощность гидросистемы, как показал опыт, позволили осуществить такую операцию с льдиной размерами 8×8 м при толщине льда 1 м. После затапливания льдины с поверхности бассейна удалялись обломки льда и в условиях отрицательных температур намораживалось ровное ледяное поле 4. Перед замораживанием льда над майной в исходное положение выставлялась экспериментальная установка 5, представляющая собой пространственную ферму с подвижной тележкой 6. К подвижной тележке жестко крепились цилиндрическая опора 7. Далее в течение нескольких суток, в зависимости от погодных условий, естественным образом происходило наморзание ровного ледяного поля в майне. При нарастании льда до необходимой толщины перед опорой выпиливалась свободная кромка.

В общем случае разрушение ледяного покрова при взаимодействии с преградой включает как деформирование в плоскости покрова, так и деформирование при изгибе. В рамках данного исследования производилось изучение возможных механизмов разрушения ровного ледяного покрова при деформировании в плоскости. Для подавления деформирования покрова при изгибе перед цилиндрической преградой на подвижной тележке экспериментальной установки жестко крепилась на вертикальных стойках пара металлических лыж 8. До начала опыта в исходное положение также выставлялся гидроцилиндр 9, который подключался к гидроприводу. Между штоком гидроцилиндра и цилиндрической опорой устанавливался датчик 10 для регистрации ледовой нагрузки. На подвижной тележке экспериментальной установки крепился датчик перемещения для регистрации положения модели в ледовом поле. Процесс подготовки к опыту заканчивался установкой упоров 11, обеспечивающих неподвижность экспериментальной установки под нагрузкой.

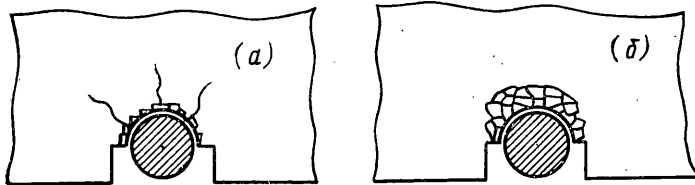
Показания датчиков нагрузки и перемещения во времени в процессе прорезания цилиндрической опорой ровного ледяного поля регистрировались на осциллограмме светолучевого осциллографа. После окончания опытов из ненарушенного льда майны отбирались образцы для определения физико-механических характеристик льда в майне: прочности льда на одноосное сжатие R_c и изгиб R_b , критического коэффициента интенсивности напряжений (трещиностойкости) льда K_{Ic} и т. д. Определение прочности на одноосное сжатие производилось в двух направлениях — перпендикулярно и параллельно плоскости наморзания льда, а определение изгибной прочности и критического коэффициента интенсивности напряжений осуществлялось испытанием балочек (соответственно сплошных и с начальным надрезом) на четырехточечный изгиб. Изучение прочностных свойств льда сопровождалось изменением температуры на поверхности ледяного поля и солёности льда.

В майне размером 7×6 м были проведены последовательно два опыта по прорезанию ледяного покрова цилиндрической опорой диаметром 416 мм со скоростью около 10 мм/с.

В первом опыте толщина льда в майне составила 110 мм. Фрагмент реализации суммарной нагрузки на цилиндрическую опору представлен на фиг. 2, а. При внедрении опоры в ледяное поле в течение первых 4 с образовалась зона смятия и уровень нагрузки составил примерно четвертую часть от максимального, зафиксированного в опыте. Затем в течение последующих 2 с при образовании системы радиальных трещин перед опорой, как это показано на фиг. 3, а, нагрузка достигла своего



Фиг. 2



Фиг. 3

максимального значения. Длины видимых трещин не превышали величины диаметра цилиндрической опоры. Далее, в процессе прорезания льда опорой трещины не развивались, а разрушение льда происходило за счет смятия и раздробления перед опорой. Причем уровень нагрузки в отдельных случаях не превышал одной трети от максимальной. Процесс прорезания ледяного покрова сопровождался потерей устойчивости по бокам опоры вне зоны влияния пары лыж.

Через сутки примерно в тех же температурных условиях, в той же майне, но при толщине льда 150 мм был проведен второй опыт. Через 13 с после начала внедрения опоры в лед реализация суммарной циклической нагрузки плавно достигла уровня, который держался в период всего опыта без резких колебаний. Фрагмент реализации суммарной нагрузки представлен на фиг. 2, б. Разрушение покрова в этом опыте происходило только путем смятия и раздробления льда (фиг. 3, б).

После окончания второго опыта были проведены испытания отобранных из майны образцов льда на одноосное сжатие и изгиб. По результатам испытаний среднее значение прочности льда на одноосное сжатие при направлении нагрузки перпендикулярно плоскости намерзания составило 0,85 МПа, а при направлении нагрузки параллельно плоскости намерзания — 0,47 МПа. Среднее значение изгибной прочности льда при направлении нагрузки перпендикулярно плоскости намерзания составило 0,475 МПа, а при направлении нагрузки параллельно плоскости намерзания — 0,19 МПа. Таким образом соотношение прочности льда на сжатие и изгиб в плоскости составило 2,47. Среднее значение коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} ровного ледяного поля равно 85 кПа·м^{1/2}.

3. Численное моделирование разрушения ледяного покрова цилиндрической опорой. 1. *Постановка модельной задачи и метод решения.* Решение задачи о взаимодействии цилиндрической опоры с произвольно нагруженным ровным ледяным полем в общей постановке представляется слишком сложным. Поэтому введем следующие упрощающие предположения.

Вследствие сравнительно высокой относительной скорости деформации ледяного покрова ($\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$), согласно фиг. 2, время отдельных циклов разрушения не превышает 1 с, что много меньше времени релаксации льда [3]. Поэтому в дальнейшем будем считать деформирование льда в рассматриваемом процессе линейно-упругим. Применение устройства, подавляющего вертикальные перемещения ледяного поля (изгибные деформации) позволяет ограничиться рассмотрением случая плоского деформирования. Кроме того, в силу небольшой толщины льда будем моделировать льдину однородной и изотропной в плоскости пластиной.

Таким образом, рассматривается следующая модельная задача [4]. В однородную и изотропную ледяную пластину внедряется жесткая цилиндрическая опора. По мере внедрения опоры горизонтальные усилия в пластине возрастают, что может привести к началу разрушения, конкретный вид которого попытаемся определить на основе анализа таких характеристик напряженно-деформированного состояния пластины, как перемещения, напряжения и силы (реакции) в точках с фиксированными перемещениями. При этом предполагается, что наличие зон превышения пре-

дела прочности льда на сжатие R_c свидетельствует о возможности начала разрушения ледяного поля при смятии и раздроблении. Зоны превышения предела прочности льда на растяжение R_p , в соответствии с общими представлениями о расклинивании [5] будем отождествлять с трещинами нормального отрыва.

Граничные условия сформулируем следующим образом. Ледяное поле полагаем прямоугольным в плане, а цилиндрическая опора внедряется по середине удлиненной стороны. Цилиндрическую опору, прочностные характеристики которой значительно превосходят прочностные характеристики льда, будем моделировать жестким клином. С учетом натуральных наблюдений контактное нагружение моделируем заданием постоянного сдвига точек контакта в направлении внедрения на расстояние l_0 . Равновесие пластины по отношению к жесткому перемещению, как целого, обеспечим, задавая условие опирания противоположного внедрению края льдины о естественный покров. Для этого ввиду различия масс и жесткостей ледяного поля и покрова, исключим смещение середины противоположной внедрению стороны льдины в направлении внедрения. Нагружение со стороны боковых краев майны будем моделировать равномерно распределенными сжимающими усилиями σ_0 на боковых гранях льдины.

Подобная задача для случая отношения ширины пластины B к ширине клина равного 20:1; $l_c=0,02B$ и $\sigma_0=0,1$ Па решается численно [6] с помощью комплекса программ метода конечных элементов, разработанного для решения плоских квазистатических задач механики хрупкого разрушения. Рассмотрим результаты расчетов, представляющих наибольший интерес с точки зрения объяснения наблюдаемой в экспериментах картины разрушения (точность вычисления параметров напряженно-деформированного состояния не менее 97%).

2. *Анализ результатов экспериментов с учетом данных численного моделирования.* Характерным результатом расчетов является существование в прилегающей ее линии контакта клина с пластиной зоны сжатия шириной менее $0,5 l_0$ (0,01 B). Далее расположена зона растяжения. Наибольшее растяжение наблюдается на оси симметрии пластины на расстоянии около l_0 от линии контакта, по величине оно почти в 2,6 раза меньше наибольшего абсолютного значения сжимающих напряжений в зоне сжатия. Наибольшие градиенты главных напряжений σ_1 и σ_2 наблюдаются в прилегающей к линии контакта области шириной около $2 l_0$. Таким образом, в соответствии с данными численного моделирования методом конечных элементов в материалах с отношением $R_c/R_p < 2,6$ (например, парафин) предел прочности на сжатие R_c в зоне сжатия должен достигаться быстрее, чем предел прочности на растяжение R_p в зоне растяжения. Вследствие этого разрушение при внедрении клина предположительно должно происходить в результате раздробления по линии контакта. Иначе вероятным становится формирование центральной трещины нормального отрыва в зоне растяжения.

Следует заметить, что прямое определение прочности льда на растяжение R_p в наших опытах не проводилось, но в соответствии с данными [3] можно приближенно полагать, что $R_p \approx R_u$. Таким образом во втором опыте отношение $R_c/R_u = 2,5$ и, по этой причине, ледовое поле при внедрении цилиндрической опоры разрушалось в зоне контакта смятием и раздроблением без образования видимых радиальных или кольцевых трещин.

Отношение R_c/R_u после проведения первого опыта непосредственно не определялось. Оценить его можно лишь с учетом того, что первый опыт проводился с более молодым льдом. В силу этого обстоятельство в первом опыте, согласно [3], прочность льда на изгиб была ниже, чем во втором опыте. Поэтому отношение R_c/R_u в первом опыте по всей вероятности превышало значение 2,5.

С учетом изложенного рассмотрим вопрос о возможном механизме разрушения ровного ледяного поля в первом опыте, полагая традиционным в ледотехнике способом [4], что разрушение начинается в местах наибольших по величине главных напряжений, причем траектории образовавшихся при этом трещин ориентированы поперек направления растяжения. В данном случае можно ожидать возникновения внутренней центральной трещины нормального отрыва, расположенной на расстоянии около l_0 от границы контакта и развивающейся при дальнейшем внедрении опоры в краевую трещину нормального отрыва.

Постановка задачи метода конечных элементов для случая возникновения перед клином центральной краевой трещины нормального отрыва в основных чертах согласуется с постановкой задачи без трещины, поскольку для согласованности результатов в обоих случаях использовалась одинаковая начальная сетка. Главные отличия связаны с учетом трещины — разрешались смещения расположенных на берегах трещины узлов по нормали к направлению внедрения клина; для моделирования сингулярности напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины соответствующие промежуточные узлы изопараметрических квадратических элементов автоматически сдвигались на четверть длины стороны к узлу, расположенному в вершине трещины. Также для повышения точности вычислений проводилось автоматическое измельчение сетки вблизи вершины трещины.

Решение соответствующей задачи свидетельствовало о значительном изменении напряженного состояния ледовой пластины при возникновении трещины L . В частности происходила локализация прилегающей к линии контакта зоны сжатия вдоль трещины с почти двухкратным увеличением сжатия в вершине трещины. Полученные положительные перемещения контактных узлов, расположенных в устье трещины, показывали, что в случае когда допустим выход материала (льда) из плоскости пластины, возможен перехлест берегов трещины. Вычисленные значения коэф-

эффициента K_f интенсивности напряжений в вершине трещины монотонно возрастают при изменении длины трещины от l_0 до $6 l_0$, оставаясь, однако, отрицательными. Поэтому неустойчивый рост трещины нормального отрыва в расчетном диапазоне длин представляется в рамках рассматриваемой схемы невозможным, что подтверждается экспериментом.

Появление трещины перед клином приводило к снижению (примерно на 30%) наибольших контактных усилий при одновременном увеличении общей нагрузки на клин, что также согласуется с представленными на фиг. 2, а экспериментальными данными.

Концентрация сжимающих напряжений вдоль краевой трещины сопровождается образованием зон растяжения у боковых поверхностей клина. Если растягивающие напряжения превысят предел прочности льда на растяжение, эти зоны могут стать причиной образования боковых трещин нормального отрыва. Хотя определение длины и направления этих трещин требует проведения дальнейших расчетов, качественное согласие с наблюдаемой в первом опыте схемой разрушения ледяного поля перед цилиндрической опорой является вполне удовлетворительным.

Таким образом, расчетные данные, несмотря на приближенность введенной схематизации взаимодействия, позволяют лучше понять и объяснить физическую картину разрушения ледяного покрова перед цилиндрической опорой. При этом одним из параметров, влияющих на вид разрушения ледяного покрова, является отношение прочностей льда¹.

Авторы благодарны сотрудникам Отраслевой научно-исследовательской лаборатории морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева, принимавших участие в проведении экспериментов, а также Р. В. Гольдштейну и Н. М. Осипенко за методическую помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительные нормы и правила: Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82, М.: Стройиздат, 1983. 38 с.
2. Копайгородский Е. М. и др. Воздействия ледяных полей на морские нефтегазопромысловые сооружения. // Обз. информ. ВНИИЭгазпрома. Сер. Разработка и эксплуатация морских нефтяных и газовых месторождений. М.: Изд-е ВНИИЭгазпрома, 1980. Вып. 2. 41 с.
3. Богородский В. В., Гаврило В. П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 384 с.
4. Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Механика разрушения и некоторые вопросы разрушения льда. // Механика и физика льда. М.: Наука, 1983. С. 65-94.
5. Баренблатт Г. И., Черепанов Г. П. О расклинивании хрупких тел. ПММ, 1960. Т. 24. Вып. 4. С. 667-682.

Москва

Поступила в редакцию.
24.XII.1988

¹ Гольдштейн Р. В., Даниленко В. И., Осипенко Н. М. Плоская статическая задача о расклинивании произвольно нагруженного упругого тела конечных размеров. Применение в механике ледяного покрова: Препринт № 262. М.: ИПМ АН СССР, 1985.