

doi: 10.5862/MCE.48.7

Вибрация сооружений, вызванная действием морского льда

Д.ф.-м.н., профессор К.Н. Шхинек,

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Аннотация. Возникновение вибрации сооружений при действии льда было отмечено во многих морях: заливе Кука, Ботническом заливе, заливе Бохай, Охотском море, Каспийском море. Это явление может быть очень опасным, вызывая усталостные разрушения (залив Бохай) или проблемы обитаемости платформ. Вибрация при действии льда возникает при определенных условиях даже у жестких сооружений, подобных платформе «Моликпак», с размерами по основанию порядка 100 м, когда определяющим становится колебание сооружения на грунте.

В связи с намечающимся переходом к большим глубинам, где процесс вибрации проявляется больше, значение изучения этого явления возрастает. Численное 2D-решение проблемы, основанное на общепринятых предположениях и математических моделях свойства среды, разработано в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете при поддержке компании British Petroleum. Решение рассматривает развитие процесса вибрации во времени, последовательное разрушение льда, реакцию сооружения и взаимное влияние сооружения и льда. Проанализированы свойства окружающей среды и характеристики сооружения, приводящие к возникновению вибрации.

Таким образом, предложен новый подход к решению проблемы вибрации сооружений при действии льда, и результаты его применения описываются в статье.

Ключевые слова: вибрация сооружений; скорость; собственная частота; реакция; воздействие льда

Введение

Процесс вибрации сооружений имеет случайный характер и зависит от многих причин, в частности, от податливости и массы сооружения, модуля упругости и прочности льда, скорости движения ледяного поля, характера разрушения льда (дробление, изгиб) и т. д. Основной вклад в анализ проблемы вибрации сооружений при действии льда внесли Т. Карна [1, 2, 3, 4] и Д. Соди [5], исследующие это явление уже более 20 лет. Результаты целого ряда исследований приведены в работах [7–11]. На основании лабораторных опытов и натурных наблюдений были классифицированы различные виды вибраций и предложены аналитические приближенные решения для их расчета. Однако трудно охватить все возможные ситуации и оценить влияние всех параметров, которые сопутствуют такому сложному процессу как вибрация, вызванная действием льда, даже в лабораторных опытах и в расчетных методах, основывающихся на них. Поэтому желательна разработка численных решений, позволяющих провести широкую вариацию условиями взаимодействия льда и сооружения.

Обычные программные комплексы, основанные на методе конечных элементов, также трудно использовать для решения проблемы, поскольку надо описывать многократно повторяющийся циклический процесс. Каждый цикл этого процесса состоит из сжатия льда, его разрушения, вылета раздробленных частиц льда, движения сооружения назад и его удара о лед и т. д. Более перспективным является применение метода дискретных элементов. Этот метод был использован в работах [12–19] и в данном исследовании.

1. Программа

1.1. Модель льда

В основу разработанной программы заложена модель, описанная в программном комплексе PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions), широко используемом в геомеханике. Этот метод представляет среду в виде набора дисков (2D) или сфер (3D), упакованных специальным образом. Используется особая процедура для избегания наложения частиц друг на друга и обеспечения отсутствия предварительного напряжения в системе. Среда должна описывать внутренние усилия, возникающие при растяжении, сжатии или сдвиге. Методика, позволяющая это сделать, описана в работе [20].

В результате положение всех частиц в начальный момент времени определено и между ними устанавливаются связи («пружины»). Изменение взаимного положения частиц приводит к деформации связей и возникновению усилий между элементами. Если растягивающее усилие превосходит определенный предел, то соответствующие связи рвутся. Связь, ответственная за Шхинек К.Н. Вибрация сооружений, вызванная действием морского льда

растяжение, не может быть восстановлена впоследствии. Связи, ответственные за сжатие, могут быть восстановлены. Как показано в работе [20], свойства полученной среды эквивалентны свойствам среды, описываемой законом Кулона – Мора, но не в напряжениях, а в усилиях.

1.2. Сооружение

Рассматривается вертикальное длинное сооружение (2D-задача решается в вертикальной плоскости), обладающее одной степенью свободы с заданной податливостью (с учетом влияния грунта) и массой (с учетом присоединенной массы). Обычно при длине сооружения, превосходящей на порядок толщину льда, концевые условия не влияют на общий результат. Поэтому получаемые результаты могут быть использованы для сооружений ограниченной, но не малой ширины. В расчетах сооружение рассматривается как масса, расположенная на льду и подпираемая с другой стороны пружинами.

2. Решаемая задача

Ровный лед толщиной h , модулем упругости E и заданными прочностными параметрами движется на сооружение со скоростью V_i . Задача состоит в определении нагрузок при взаимодействии льда и сооружения и движении последнего. Цель расчетов – определение условий, при которых возникает вибрация, и выяснение влияния на вибрацию основных параметров процесса.

2.1. Основные параметры, влияющие на процесс

Образование и характер вибрации зависят от следующих параметров:

- массы сооружения M , включая присоединенную массу;
- жесткости пружин, на которых находится сооружение, K_s ;
- ширины фронтальной части сооружения D ;
- демпфирования ζ .

Свойства льда определяются параметрами:

- модулем упругости E ;
- скоростью движения V_i ,
- одноосной прочностью R_c ,
- толщиной h .

Выходные параметры:

- усилия, образующиеся на контактной поверхности;
- усилия в пружинах (реакция сооружения) F ;
- амплитуда вибрации сооружения d ;
- скорость смещения сооружения V_c .

В большинстве проведенных опытов постоянными были ширина сооружения, его масса, толщина льда и его прочность.

3. Описание типичной картины взаимодействия

Применение рассматриваемой модели позволяет описать процесс разрушения льда и вылета раздробленных частиц, а также движение сооружения. Последовательные стадии взаимодействия в области контакта лед – сооружение в расчетах представлены на рисунке 1.



Рисунок 1. Последовательные стадии взаимодействия лед – сооружение:
 1 – начальное положение; 2 – начало разрушения вблизи границы контакта;
 3 – вылет раздробленных частиц; 4 – образование клина и взаимодействие с ним;
 5 – взаимодействие с раздробленным льдом

Процесс развивается следующим образом: неразрушенный лед подходит к сооружению и начинает давить на него (1); по мере возрастания нагрузки начинается разрушение льда и он «вспухает» (дилатансия) (2); из-за большого сжатия лед разрушается на куски и вылетает в стороны (3); поверхность неразрушенного льда приобретает форму клина, который давит на сооружение и разрушается (4); разрушенный материал взаимодействует с сооружением (5). Весь последующий процесс состоит из чередования этапов 2, 3, 4 и 5. Таким образом, высокая нагрузка, соответствующая начальному взаимодействию, больше не повторяется, и максимальная нагрузка в последующих процессах соответствует воздействию клина разрушенного льда. Это полностью подтверждается физическими опытами, в которых отмечается, что максимальная нагрузка после первого пика действует только по малой центральной части площади контакта лед – сооружение (например, [9]). Описанная физика процесса говорит о большой приближенности аналитического рассмотрения проблемы вибрации на основании уравнений теории упругости. Только начальная стадия (1) процесса может быть описана уравнениями упругопластических сред. Весь последующий процесс (дробление льда, вылет частиц, движение сооружения, последующие контакты) практически может быть рассмотрен только численно.

4. Результаты численных экспериментов

4.1. Качественные результаты

Наиболее распространенной характеристикой сооружения является значение его собственной частоты (собственного периода) – соотношение жесткости и массы, однако она оказывается недостаточной. Отношение веса сооружения (G) к «условной ледовой нагрузке» DhR_c играет существенную роль. Согласно экспериментальным исследованиям [7], отношение K/Eh также влияет на результаты. Наконец, отношение ширины сооружения и толщины льда также должно сказаться на результатах при малых D/h . Таким образом, описание вибрации базируется на многофакторном анализе, требующем специального рассмотрения сочетания перечисленных факторов. В настоящей статье может быть исследовано влияние только части из этих сочетаний.

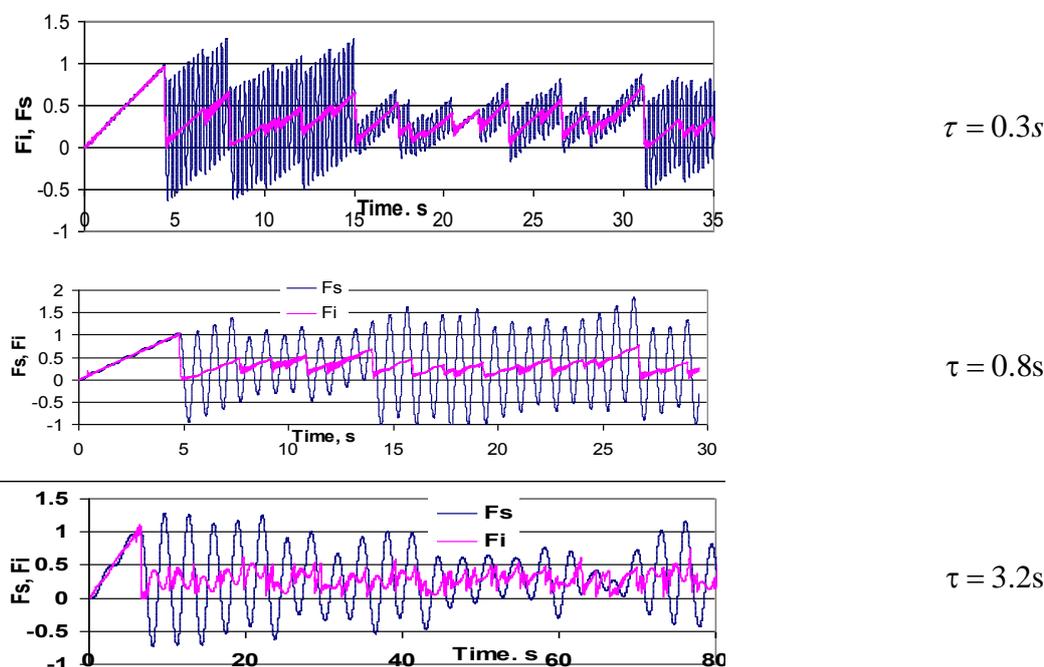


Рисунок 2. Ледовая нагрузка и реакция сооружения при $V_i = 0.03$ м/с и разных собственных периодах колебаний

Соотношение нагрузка – реакция сооружения в зависимости от собственного периода колебаний. Изменение во времени нагрузки на контакте лед – сооружение F_i и реакции сооружения F_s в виде $F/(DhR_c)$ при скорости движения льда 0.03 м/с и различных периодах собственных колебаний представлено на рисунке 2. Все исходные данные для расчета отличаются только периодом собственных колебаний (вариацией жесткости при постоянной массе). Результаты анализа показывают, что средние значения нагрузки и реакции совпадают Шхинек К.Н. Вибрация сооружений, вызванная действием морского льда

(в этой серии опытов они практически не зависят от периода собственных колебаний), однако максимумы реакции существенно превосходят максимумы нагрузки и зависят от периода собственных колебаний. Реакция сооружения во всех случаях изменяется с постоянным периодом, близким к периоду собственных колебаний, а у нагрузки имеется несколько периодов: локальные (связанные с обратным воздействием сооружения на лед) и глобальные.

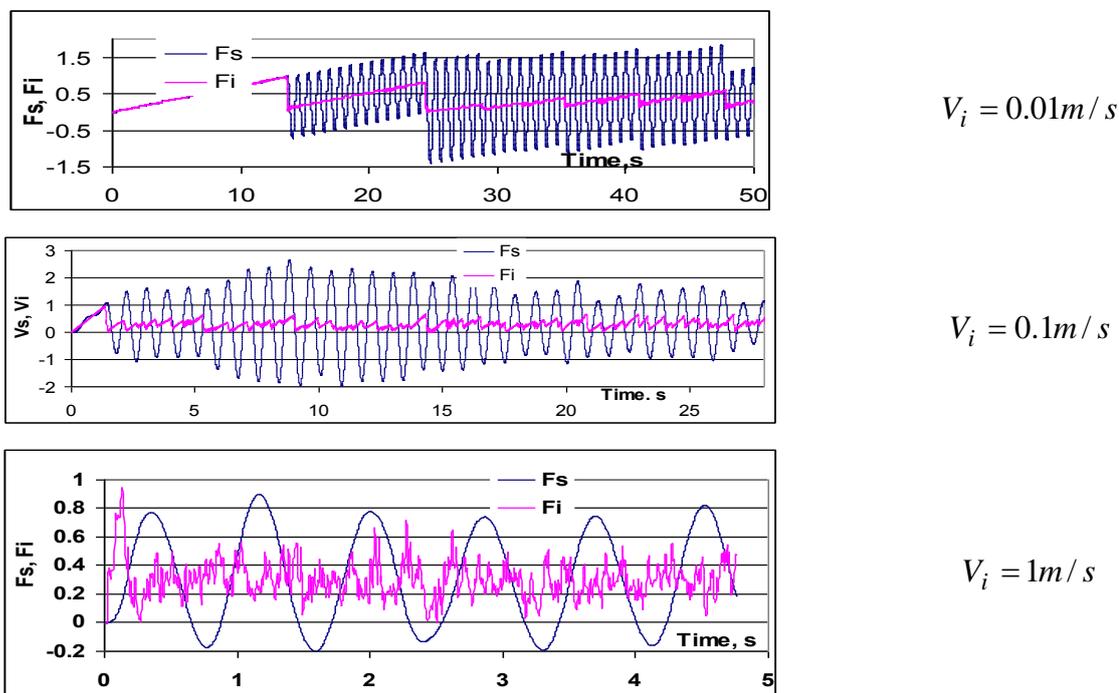


Рисунок 3. Ледовые нагрузки и реакция сооружения при различных скоростях льда и $\tau = 0.8 \text{ s}$

Соотношение нагрузка – реакция сооружения в зависимости от скорости движения льда. Аналогичная зависимость при постоянном периоде собственных колебаний ($\tau = 0.8 \text{ s}$) и разных скоростях движения льда представлена на рисунке 3. Можно видеть, что оба рассматриваемых фактора – собственная частота и скорость движения льда – существенно влияют на характер колебаний. Обе зависимости отражают похожие явления: отрывы ото льда, свободный «полет» и последующий новый контакт сооружения со льдом при очень малых скоростях движения льда, плавное движение сооружения при больших скоростях движения льда и периодах собственных колебаний.

Фурье-анализ. На рисунках 4 и 5 представлены результаты фурье-анализа для зависимостей, подобных тем, что показаны на рисунке 3 (результаты на рисунках 4 и 5 получены для колебаний при собственном периоде колебаний сооружения 0.45 c (частоте 2.2 Гц).

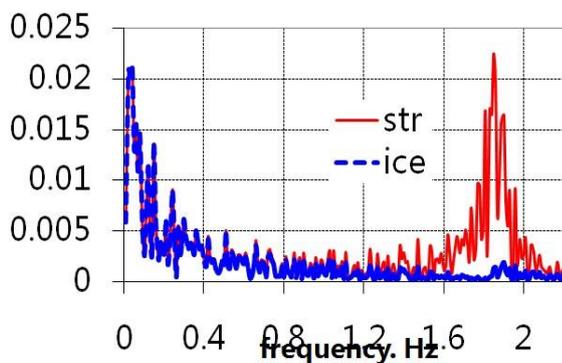


Рисунок 4. Фурье-анализ для зависимостей, похожих на представленные на рисунке 3 ($V = 0.01 \text{ м/с}$, период собственных колебаний 4.6 с , частота 2.1 Гц)

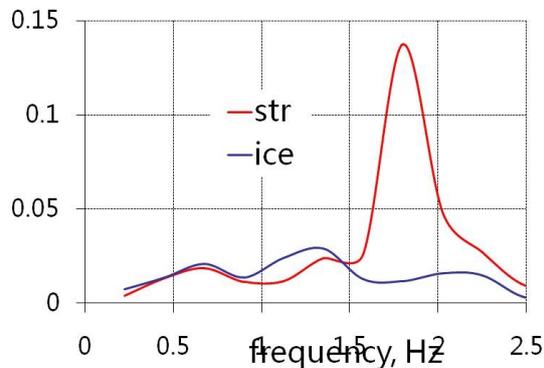


Рисунок 5. Фурье-анализ для зависимостей, похожих на представленные на рисунке 3 ($V = 1 \text{ м/с}$, период собственных колебаний 4.6 с , частота 2.1 Гц)

На рисунке 4 приведены результаты анализа для малых скоростей ($V_i = 0.01$ м/с). Зависимость имеет два максимума. Первый, на малых частотах, характеризует длиннопериодные колебания, возникающие при отрыве сооружения ото льда и свободном «полете». В этом случае значение коэффициентов одинаково для нагрузки и реакции. Второй максимум относится к реакции и наблюдается на частотах, близких к собственной частоте сооружения (но меньших ее).

На рисунке 5 виден лишь один максимум для реакции на частоте, близкой к частоте собственных колебаний (но отличной от нее). Максимум нагрузки соответствует частотам, отличным от частот, соответствующих максимуму реакции.

4.2. Количественные зависимости

Скорость колебаний. Подобно нагрузкам, скорость колебаний зависит от периода собственных колебаний сооружения, скорости движения льда и прочих описанных выше факторов. Например, изменение скорости колебания во времени представлено на рисунке 6. Прямая линия на этом рисунке соответствует скорости движения льда. Как следует из рисунка, амплитуда скорости колебаний сооружения может превзойти скорость движения льда. Этот факт неоднократно отмечался в экспериментальных исследованиях [3–7].

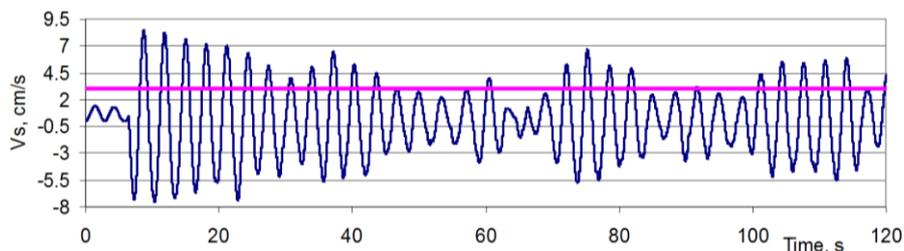


Рисунок 6. Скорость вибрации $\tau = 3.2$ с, $V_i = 0.03$ м/с

Общее соотношение между скоростью движения льда и максимальной амплитудой скорости вибрации приведено на рисунке 7. Зависимости получены при периодах собственных колебаний 3.2, 1.6 и 0.8 с. Пунктирная прямая характеризует скорость движения льда.

На некотором участке малых скоростей льда скорость сооружения превосходит скорость движения льда, а затем резко снижается. Этот факт наблюдался во многих экспериментах [3, 4, 5]. С уменьшением периода собственных колебаний длина участка, где скорость сооружения превосходит скорость льда, уменьшается [3].

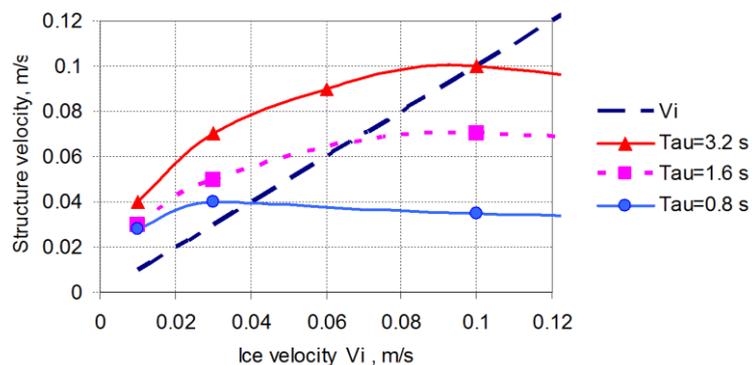


Рисунок 7. Сопоставление скорости движения льда и амплитуды скорости движения сооружения

Реакция сооружения. Совместное влияние периода собственных колебаний сооружения и скорости движения льда показано на рисунке 8. По результатам рассматриваемой серии численных опытов представлено отношение среднего максимума реакции F_{sm} к среднему максимуму ледовой нагрузки F_{im} в зависимости от скорости движения льда и периода собственных колебаний сооружения. Значение $F_{sm} / F_{im} = 1$ соответствует случайному квазистатическому процессу. Из рисунка следует, что при скорости движения льда более 0,1 м/с динамичность взаимодействия практически отсутствует. Максимум динамичности реакции наблюдался в рассмотренных опытах в диапазоне скоростей движения льда 0.03–0.1 м/с. Видно также, что, как и положено, мягкие системы меньше реагируют на динамику.

Шхинек К.Н. Вибрация сооружений, вызванная действием морского льда

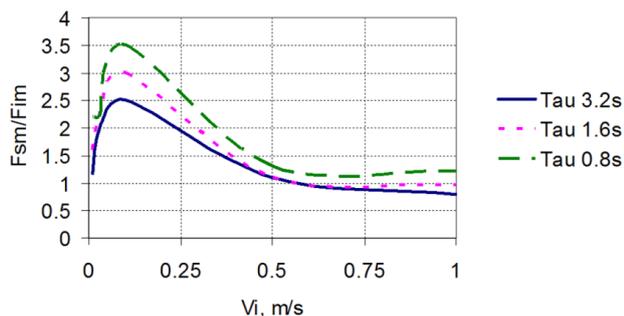


Рисунок 8. Совместное влияние скорости движения льда и периода собственных колебаний сооружения на реакцию сооружения

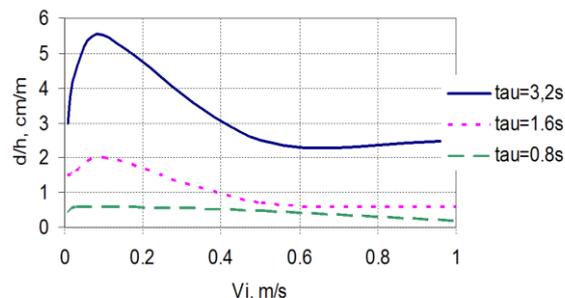


Рисунок 9. Совместное влияние скорости движения льда и периода собственных колебаний сооружения на амплитуду колебаний сооружения

Амплитуда колебаний. Зависимость максимальной амплитуды колебаний, отнесенной к толщине льда, от скорости движения льда представлена на рисунке 9. По этому параметру наиболее опасными являются малые скорости льда и гибкие сооружения, чья амплитуда колебания может почти в 10 раз превосходить амплитуды колебания жестких сооружений.

Влияние модуля упругости льда. Влияние этого параметра на вибрацию исследовано недостаточно. Насколько известно автору, результаты единственного исследования опубликованы в работе [7]. В приводимых ниже результатах численных экспериментов изменялся только модуль упругости льда E . Масса и жесткость сооружения оставались неизменными. Такой анализ трудно проводить по результатам физических экспериментов, поскольку упругость модельного льда изменяется в ограниченном диапазоне. Зависимость средней нагрузки F_{aver} , отношения усилия реакции сооружения к этой нагрузке F_s / F_{aver} , отношения амплитуды скорости V_s / V_i от жесткости сооружения K_s , толщины и модуля упругости льда E обозначены на рисунке 10.

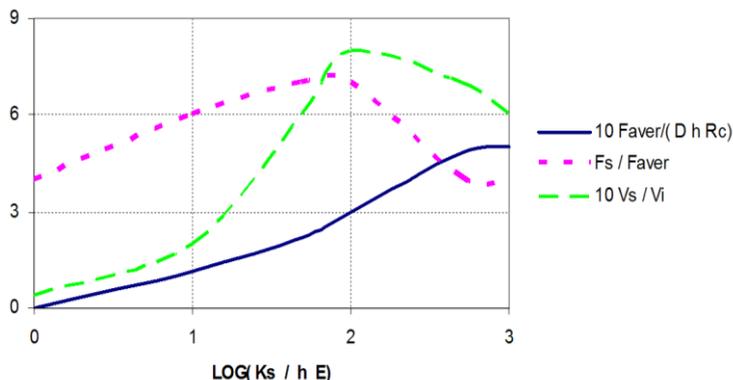


Рисунок 10. Зависимость нагрузок и амплитуды скорости вибрации от соотношения между жесткостью сооружения и модулем упругости льда

Из рисунка 10 следует, что когда жесткость сооружения (деленная на толщину льда) близка к модулю упругости льда (логарифм отношения близок к нулю), средняя нагрузка и скорость колебания сооружения очень малы. Снижение жесткости льда приводит к значительному росту нагрузок (особенно средних) и скорости колебаний. Это согласуется с результатами наблюдений [8].

Влияние относительной массы сооружения. Влияние относительной массы сооружения M / Dh (масса, приходящаяся на единицу площади контакта) или Mg / DhR_c (вес, отнесенный к максимальной силе сопротивления) практически не анализировалось ранее. Вместе с тем, проведенные эксперименты свидетельствуют, что оно имеет решающее значение для движения сооружения, уровня вибрации и реакции. Результаты, представленные на рисунке 11, показывают, что максимумы скорости, реакции и смещения существенно зависят от относительной массы.

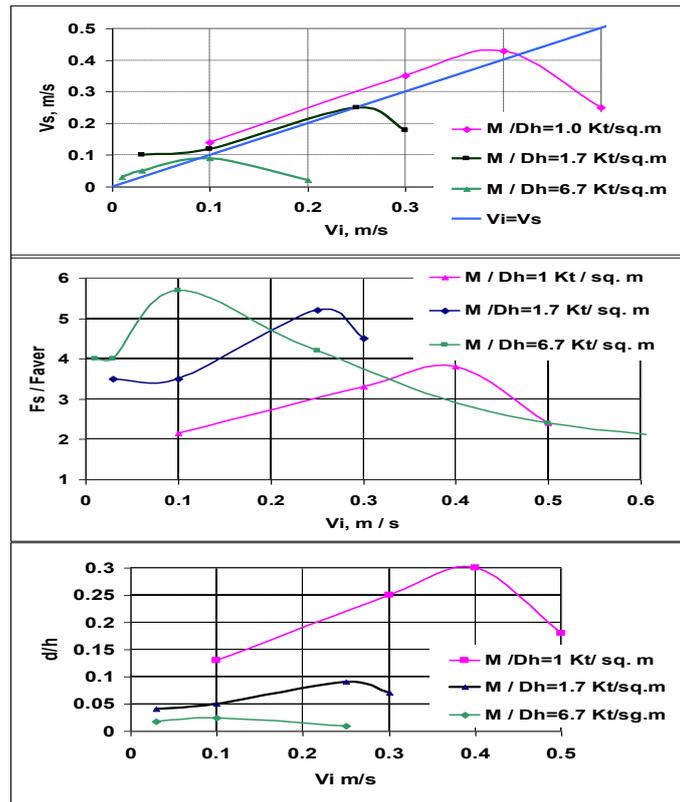


Рисунок 11. Влияние относительной массы сооружения на параметры вибрации

5. Сопоставление с модельными и натурными данными

5.1. Усилия

Рисунок 12, аналогичный рисунку 8 настоящей статьи, заимствован из работы [2]. В среднем максимальное возрастание нагрузки (коэффициент динамичности) в обеих работах имеет одинаковое значение (более трех), однако в работе [2] динамичность заканчивается в среднем при скорости движения льда 0.1–0.15 м/с, в то время как в данной работе – в районе скорости 0.5 м/с.

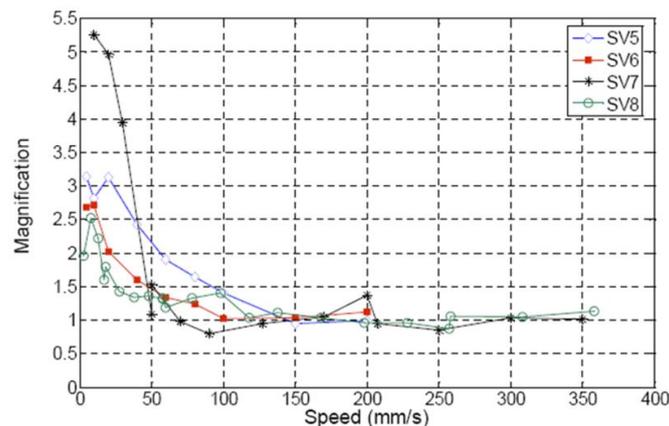


Рисунок 12. Зависимость коэффициента динамичности от скорости льда

Уровень коэффициента динамичности порядка 3–3,5 был достигнут также в опытах [7]. К сожалению, в этой работе не определена скорость, при которой пропадают динамические эффекты. Однако анализ работ [7] и [19] подсказывает, что, по-видимому, расхождение связано с различием относительной массы в опытах и расчетах.

5.2. Скорость вибрации

Зависимости, аналогичные приведенной на рисунке 7, неоднократно упоминались в работах [3, 4, 7]. В частности, на рисунке 13 приведена зависимость, полученная в работе [7].

Шхинек К.Н. Вибрация сооружений, вызванная действием морского льда

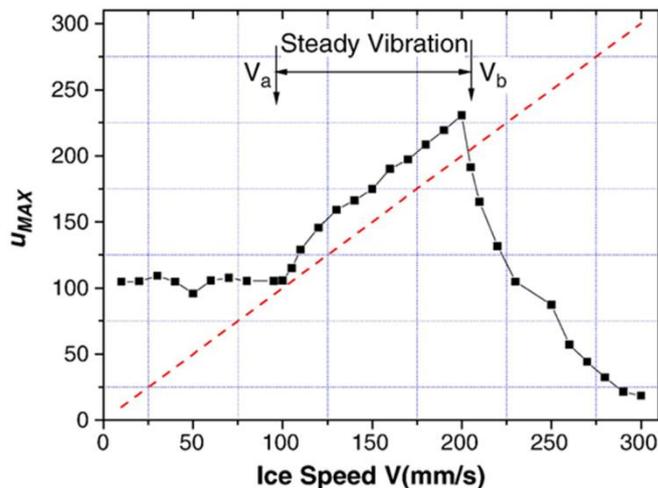


Рисунок 13. Зависимость максимальной скорости вибрации от скорости движения льда

Несмотря на качественное согласие, эти результаты отличаются от приведенных на рисунке 7. Если там скорость сооружения становится меньше скорости льда при $V_i = 0.1$ м/с и меньше, то в рассмотренных опытах это происходит при $V_i = 0.15\text{--}0.25$ м/с (в зависимости от жесткости сооружения). Одним из факторов, приведшим к этому разногласию, является то, что результаты получены при разном значении параметра Mg/DhR_c , на который редко обращают внимание при проведении опытов. При наших расчетах для того же значения этого параметра, которое было в опытах, различие становится минимальным.

Заключение

В работе использована математическая модель льда, позволяющая более детально описывать процесс взаимодействия льда с вертикальными сооружениями. Полученное 2D-решение описывает процесс многократного разрушения льда, вылет раздробленных частиц из области взаимодействия и влияние податливости сооружения на процесс взаимодействия.

Проведен широкий численный эксперимент. Целью эксперимента являлось установление качественных (а в некоторых случаях и количественных) связей между характеристиками сооружения, льда и параметрами вибрации. Результаты численных экспериментов сопоставлены с данными модельных экспериментов и наблюдений в натуральных условиях. Все результаты качественно, а в ряде случаев и количественно согласуются. По полученным данным можно сделать следующие выводы.

1. Существует большой разброс в результатах предсказаний ледовых нагрузок, действующих на морские сооружения. Вследствие несовершенства методов расчета вибрации сооружений этот разброс может значительно увеличиться.

2. Существенная вибрация возникает при различных скоростях движения льда в зависимости от значения относительной массы. Для параметров, использованных в данных опытах, это значение менее 0.25 м/с. В этом диапазоне скоростей реакция сооружения (усилия в конструкции) значительно (до 3–3.5 раз) превосходит ледовые нагрузки, а скорости колебания сооружения могут превосходить скорость движения льда. Вместе с тем, для других параметров (например, относительной массы) максимум реакции может соответствовать более высоким скоростям движения льда.

3. Чем меньше период собственных колебаний сооружения, тем больше коэффициент динамичности по усилиям и меньше амплитуда смещений и скоростей вибрации.

4. Полученные результаты качественно хорошо совпадают с опытными данными. Ряд отклонений результатов расчетов от экспериментальных данных, полученных в лаборатории, вероятно, связан с тем, что слишком много параметров должно быть учтено одновременно, что не всегда соблюдалось. Например, значения параметра Mg/DhR_c , на который часто не обращают внимания на моделях и в расчетах, существенно различались. Определенную роль могла играть двухмерность теоретического решения, в то время как опыты проводились в существенно трехмерной постановке ($D/h \leq 3$).

Шхинек К.Н. Вибрация сооружений, вызванная действием морского льда

Автор выражает признательность G. Thomas за постоянное внимание к работе и полезные советы и E. Салганику за проведение некоторых вычислений.

Литература

1. Karna T., Turunen R. Dynamic response of narrow structures to ice crushing // Cold Regions Science and Technology. 1989. Vol. 17. Issue 2. Pp. 173–187.
2. Kärnä T., Kolari, K., Johman, P., Evers, K-U., Bi, X., Määttänen M., Martonen P. Laboratory indentation tests // VTT Research Notes, 2003. Pp. 22–23.
3. Karna T., Turunen R, A straightforward technique for analyzing structural response to dynamic ice action // Proceedings of the 9th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1990. Vol. 4. Pp. 135–145.
4. Kärnä T. A procedure for dynamic soil-structure-ice interaction // Proceedings of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, 1992. Pp. 57–65.
5. Sodhi D.S. Ice induced vibrations of structures // Proceedings of the IAHR 9th International Symposium on Ice, Sapporo, Japan. 1988. Vol. 2. Pp. 625–657.
6. Blenkarn K.A. Measurement and Analysis of the Ice Forces on Cook Inlet Structures // Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Texas. 1970. Vol. 2. Pp. 365–378.
7. Huang Y., Qingzeng S., An Song. Model test study of the interaction between ice and a compliant vertical narrow structure // Cold Regions Science and Technology. 2007. Vol. 49. Issue 2. Pp. 151–160.
8. Engelbrektsen A. A refined ice/structure interact model based on observation in Gulf of Bothnia // Proceedings of Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference. Japan, 1997. Vol. 4. Pp. 373–376.
9. Timco G.W., Frederking R.M.W. Experimental investigations of the behavior of ice at the contact zone // Studies in Applied Mechanics. 1995. Vol. 42. Pp. 35–55.
10. Määttänen M. On conditions for the rise of self-excited ice-induced autonomous oscillations in slender marine pile structures // Finnish Board of Navigation. 1978). Report No. 25.
11. Yue Q., Bi X.J. Ice Induced Jacket Structure Vibration in Bohai Sea // Journal of Cold Regions Engineering. 2000. Vol. 14. Issue 2. 81–92.
12. Hopkins M. Numerical simulation of systems of multitudinous polygonal blocks. CRREL Report 92-221992. 69 p.
13. Kolari K., Kuutti J., Kurkela J. Fe-Simulation of Continuous Ice Failure Based on Model Update Technique // Proceedings of 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9 – 12, 2009. Luleå, Sweden. Pp. 845–854.
14. Konuk I., Gürtner A., Yu S. Study of Dynamic Ice and Cylindrical Structure Interaction by the Cohesive Element Method // Proceedings of 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9 – 12, 2009. Luleå, Sweden. Pp. 764–775.
15. Paavilainen J., Tuhkuri J., Polojärvi A. Discrete element simulation of ice pile-up against an inclined structure // IAHR 06 Proceedings of the 18th International Symposium on Ice. 2006. Vol. 2. Pp. 177–184.
16. Paavilainen J., Tuhkuri J., Polojärvi A. Simulation of Ice Pile-Up Process with 2d Combined Finite-Discrete Element Method // Proceedings of 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9 – 12, 2009. Luleå, Sweden. Pp. 874–882.
17. Polojärvi A., Tuhkuri J. 3D Discrete Numerical modelling of Ridge Keel Punch Through Tests // Cold Regions Science and Technology. Vol. 56. Issue 1. Pp. 18–29.
18. Gurtner A., Bjerkas M., Forsberg J., Hilding D. Numerical modelling of a full scale event // Proceedings of the IAHR Conference. 2010, Lathi, Finland.
19. Shkhinek K., Zhilenkov A., Thomas G. Vibration of Fixed Offshore Structures Under Ice Action // Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9–13, 2013. ESPOO, Finland.
20. Gundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // Geotechnique. 1979. Vol.29. Issue 1. Pp. 47–65.
21. Shkhinek K.N., Blanchet D, Matskevitch D. G., Croasdale K, Bhat S. Comparison of the Russian and foreign codes and methods for global load estimations // Proceedings of the 13th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; Houston, TX, USA; 27 .02 – 3.03 1994. 1994. Vol. 4. Pp. 75–82.

*Карл Натанович Шхинек, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)9499683; эл. почта: karl-1303@mail.ru*

© Шхинек К. Н., 2014

doi: 10.5862/MCE.48.7

Structures vibration induced by ice action

K.N. Shkhinek*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+79219499683; e-mail: karl-1303@mail.ru*

Key words

structures vibration; velocity; natural frequency; reaction; ice action

Abstract

Ice induced vibration of fixed offshore structures has been observed in different seas, for example, Beaufort Sea, Cook Inlet, Gulf of Bothnia, Bohai Gulf, Sea of Okhotsk, Caspian Sea. It can have a significant impact, as it may lead to failure due to structural fatigue (Bohai Gulf) or softening foundations, or cause problems with the serviceability of platforms.

The experimental works have been conducted for a long time and give results which can be used only for conditions corresponding to the experiment. Moreover, approximate analytical solutions have a limited area of application, because of complexity of the phenomenon.

A 2D solution for the numerical study of ice-induced vibration of vertical-sided fixed offshore structures based upon the discrete elements method has been developed by Saint Petersburg State Polytechnical University. The results of the comprehensive numerical analysis have been presented by authors to determine the main parameters of the environment and construction which influence the phenomenon.

References

1. Karna T., Turunen R. Dynamic response of narrow structures to ice crushing. *Cold Regions Science and Technology*. 1989. Vol. 17. Issue 2. Pp. 173–187.
2. Kärnä T., Kolari, K., Johman, P., Evers, K-U., Bi, X., Määtänen M., Martonen P. Laboratory indentation tests. *VTT Research Notes*, 2003. Pp. 22–23.
3. Karna T., Turunen R. A straightforward technique for analyzing structural response to dynamic ice action. *Proceedings of the 9th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 1990. Vol. 4. Pp. 135–145.
4. Kärnä T. A procedure for dynamic soil-structure-ice interaction. *Proceedings of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference*. San Francisco, 1992. Pp. 57–65.
5. Sodhi D.S. Ice induced vibrations of structures. *Proceedings of the IAHR 9th International Symposium on Ice*, Sapporo, Japan. 1988. Vol. 2. Pp. 625–657.
6. Blenkarn K.A. Measurement and Analysis of the Ice Forces on Cook Inlet Structures. *Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference*, Houston, Texas. 1970. Vol. 2. Pp. 365–378.
7. Huang Y., Qingzeng S., An Song. Model test study of the interaction between ice and a compliant vertical narrow structure. *Cold Regions Science and Technology*. 2007. Vol. 49. Issue 2. Pp. 151–160.
8. Engelbrektsen A. A refined ice/structure interact model based on observation in Gulf of Bothnia. *Proceedings of Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*. Japan, 1997. Vol. 4. Pp. 373–376.
9. Timco G.W., Frederking R.M.W. Experimental investigations of the behavior of ice at the contact zone. *Studies in Applied Mechanics*. 1995. Vol. 42. Pp. 35–55.
10. Määtänen M. On conditions for the rise of self-excited ice-induced autonomous oscillations in slender marine pile structures. *Finnish Board of Navigation*. 1978. Report No. 25.
11. Yue Q., Bi X.J. Ice Induced Jacket Structure Vibration in Bohai Sea. *Journal of Cold Regions Engineering*. 2000. Vol. 14. Issue 2. 81–92.
12. Hopkins M. *Numerical simulation of systems of multitudinous polygonal blocks*. CRREL Report 92-221992. 69 p.
13. Kolari K., Kuutti J., Kurkela J. Fe-Simulation of Continuous Ice Failure Based on Model Update Technique. *Proceedings of 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. June 9 – 12, 2009. Luleå, Sweden. Pp. 845–854.

14. Konuk I., Gürtner A., Yu S. Study of Dynamic Ice and Cylindrical Structure Interaction by the Cohesive Element Method. *Proceedings of 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. June 9 – 12, 2009. Luleå, Sweden. Pp. 764–775.
15. Paavilainen J., Tuhkuri J., Polojärvi A. Discrete element simulation of ice pile-up against an inclined structure. *IAHR 06 Proceedings of the 18th International Symposium on Ice*. 2006. Vol. 2. Pp. 177–184.
16. Paavilainen J., Tuhkuri J., Polojärvi A. Simulation of Ice Pile-Up Process with 2d Combined Finite-Discrete Element Method. *Proceedings of 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. June 9 – 12, 2009. Luleå, Sweden. Pp. 874–882.
17. Polojärvi A., Tuhkuri J. 3D Discrete Numerical modelling of Ridge Keel Punch Through Tests. *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 56. Issue 1. Pp. 18–29.
18. Gurtner A., Bjerkas M., Forsberg J., Hilding D. Numerical modelling of a full scale event. *Proceedings of the IAHR Conference*. 2010, Lathi, Finland.
19. Shkhinek K., Zhilenkov A., Thomas G. Vibration of Fixed Offshore Structures Under Ice Action. *Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. June 9–13, 2013. ESPOO, Finland.
20. Gundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*. 1979. Vol.29. Issue 1. Pp. 47–65.
21. Shkhinek K.N., Blanchet D., Matskevitch D. G., Croasdale K, Bhat S. Comparison of the Russian and foreign codes and methods for global load estimations. *Proceedings of the 13th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*; Houston, TX, USA; 27 .02 – 3.03 1994. 1994. Vol. 4. Pp. 75–82.

Full text of this article in Russian: pp. 63–71