УДК 656.621/.626

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЬДА С КОНСТРУКЦИЯМИ

© Василий Алексеевич Лобанов
Волжская государственная академия водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
lobbas@kis.ru

Аннотация. *В статье для целей конечноэлементного моделирования контактного взаимодействия льда с металлической конструкцией и отдельных ледяных образований между собой проанализирован ряд алгоритмов современных CAE систем. На основе сопоставления эмпирических данных и результатов расчёта обоснована модель поведения контактных границ типа УЗЛЫ – ПОВЕРХНОСТЬ. Обозначены особенности применения этого алгоритма в задачах прогнозирования поведения льда.*

Ключевые слова: *судно, ледовый, конечноэлементный, алгоритм, контакт, CAE системы*

MODELING OF CONTACT INTERACTION OF ICE WITH A CONSTRUCTION

© V.A.Lobanov
Volga State Academy of Water Transport, Russia, Nizhniy Novgorod

Abstract*. In article for the purposes finite element modeling of contact interaction of ice with a metal construction and separate ice bodies among themselves a number of algorithms modern CAE systems is analysed. On the basis of comparison of the empirical data and results of calculation the model of behaviour of contact borders of type NODES-TO-SURFACE is proved. Features of application of this algorithm in problems of forecasting of behaviour of ice are designated.*

Keywords: *vessel, ice, finiteelement, algorithm, contact, CAE systems*

1.Введение. Настоящая статья продолжает серию публикаций автора, посвящённых конечноэлементному моделированию льда как материала и его контактного взаимодействия с различными телами и конструкциями [4].

Научная деятельность автора связана с оценкой ледовых качеств судов внутреннего плавания. При этом для решения задач прочности, ходкости, маневренности судов в различных ледовых условиях используются современные CAE системы [1,7]. Результаты отличает удовлетворительная точность, детализация физических процессов, наглядность, что является неоспоримым преимуществом в сравнении с традиционными аналитическими методами. Но адекватность конечноэлементной модели определяет ряд факторов: степень дискретизации моделируемых тел, типы конечных элементов, выбор моделей материалов и их физических характеристик, назначение модели контактных взаимодействий объектов. Основными условиями достоверности проводимых расчётов являются правильная формулировка определяющих соотношений для материалов тел, критериев разрушения и задание физико-механических характеристик материалов [4]. Однако исследования автора показывают, что в отношении льда не менее важным является правильный выбор алгоритма контактного взаимодействия тел.

При движении судна в ледовых условиях результирующие нагрузки на судовой корпус будут определяться его непосредственным контактом с ледяным покровом, а также взаимодействием отдельных ледяных образований между собой. Лёд является

деформируемым и разрушаемым телом. В естественном состоянии он может проявлять крайне неоднородные свойства. Примеров численного моделирования льда как материала недостаточно [2,6,10], а описания алгоритмов его контактного поведения к настоящему времени автором вовсе не обнаружено. При этом мировая литература по численным методам расчёта контактных взаимодействий деформируемых тел насчитывает уже сотни наименований работ, опубликованных за несколько последних десятилетий [3]. Выбор для адаптации велик. Однако к этому обилию следует относиться критично – уже сам факт, что одновременно существует великое множество контактных алгоритмов, говорит о том, что они не идеальны.

Современные CAE системы, претендующие на универсальность, предлагают пользователям несколько десятков алгоритмов расчёта поведения контактных границ тел. Они апробированы многолетней практикой и дают надёжные результаты. Корректность применения алгоритма в первую очередь определяется знанием физики моделируемого процесса, поэтому в наиболее усовершенствованных пакетах предусмотрены возможности корректировки предлагаемых моделей или создания авторских. Всю совокупность методов можно разделить на две группы: несимметричные и симметричные. Несимметричные алгоритмы предусматривают деление контактных поверхностей на главную и подчинённую (master - slave), в симметричных такое подразделение отсутствует. Кроме этого в каждой группе предусмотрены модели с условием разрушения одной или нескольких поверхностей (eroding) или без такого условия.

В настоящей работе проведён сравнительный анализ результатов моделирования процесса соударения льдин между собой и с конструкцией. Для описания удара использовался ряд стандартных (встроенных) алгоритмов контакта из обеих групп, как с условиями разрушения, так и без них. В результате анализа предложена модель контакта, по мнению автора хорошо описывающая натурные данные.

2.Моделирование контакта льда с конструкцией. Для обоснования выбора модели контактного взаимодействия льда с конструкцией автором был поставлен ряд натурных экспериментов. Результаты проиллюстрированы на следующем примере.

Подопытная металлическая конструкция (рис. 1) имитировала рамную шпацию судового корпуса (1 – обшивка, 2 – рамный набор, 3 – холостой набор). Льдина (4) представляла собой заострённый блок (угол заострения – 90°) массой около 4,5 кг. Размеры элементов конструкции и льдины приведены в табл. 1. Ледяной блок соскальзывал по специальному жёлобу и ударял острым краем конструкцию. Замерялись продольная составляющая силы удара, стрелки прогибов элементов конструкции. Качественно оценивался характер повреждений конструкции, льдины и движения льдины в процессе контакта.

При моделировании удара использовались материалы, физико-механические характеристики которых показаны в табл. 2. Части конструкции описывались четырёхузловыми элементами оболочечного типа с размерами около 5 х 6 мм. Ледяной блок состоял из восьмиузловых элементов объёмного типа при средней длине ребра 5 мм. Общее количество элементов в модели составило около 55 000. Начальная скорость соударения льдины с конструкцией задавалась программно.

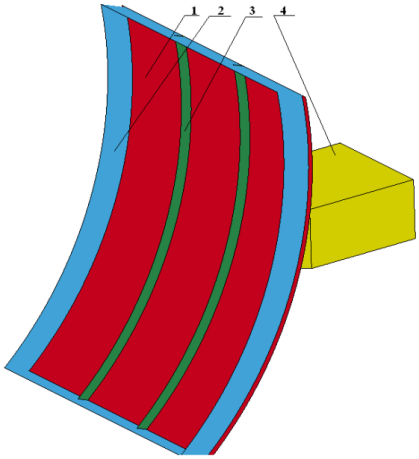


Рис. 1. Модель льда и конструкции

Таблица 1

Расчётные размеры конструкции и льдины

Элемент	Размеры, м		
	Длина	Ширина	Толщина (высота)
Обшивка	0,63	0,50	0,0005
Рамный набор	0,63	0,05	0,0015
Холостой набор	0,63	0,02	0,0010
Льдина	0,30	0,20	0,1000

Таблица 2

Расчётные характеристики материалов

Параметр	Материал	
	Лёд	Сталь
Модель	Упругопластический материал с изотропным упрочнением, критерием текучести Мизеса и критериями разрушения	Упругопластический материал с изотропно-кинематическим упрочнением и критерием разрушения
Плотность, кг/м^3	910,0	7800,0
Модуль Юнга, Па	$5{,}00 \cdot 10^9$	$2{,}00 \cdot 10^{11}$
Модуль сдвига, Па	$1{,}87 \cdot 10^9$	
Модуль объёмного сжатия, Па	$5{,}20 \cdot 10^9$	
Коэффициент Пуассона	0,34	0,30
Предел текучести, Па	$2{,}50 \cdot 10^6$	$2{,}50 \cdot 10^8$
Модуль упрочнения, Па	$0{,}65 \cdot 10^9$	$0{,}70 \cdot 10^9$
Предел прочности на растяжение, Па	$1{,}20 \cdot 10^6$	
Деформация разрушения	0,012	0,250

Моделирование производилось с использованием шести контактных алгоритмов, которые в наибольшей степени соответствовали физике описываемого процесса.

1. Несимметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ПОВЕРХНОСТЬ без разрушения
2. Несимметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ПОВЕРХНОСТЬ с разрушением
3. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ без разрушения
4. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ с разрушением

5. Симметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ВСЕ ПОВЕРХНОСТИ без разрушения
6. Симметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ВСЕ ПОВЕРХНОСТИ с разрушением

Для несимметричных алгоритмов использовалось следующие условия подчинённости: контактирующие элементы обшивки – главные (master), контактирующие элементы или узлы ледяного блока – подчинённые (slave).

Результаты количественного анализа показаны на рис. 2 и 3. При этом нумерация линий на графиках соответствует принятым выше обозначениям. Дисперсия экспериментальных данных максимальной продольной силы удара перекрывает все расчётные значения этого параметра (рис. 2). Таким образом, о приемлемости той или иной модели контакта можно судить только по среднему арифметическому эмпирических данных. По этой величине эмпирические значения более тяготеют к модели контакта №3. Более высокую корреляцию эта модель показывает и с замерами стрелки максимального прогиба обшивки (рис. 3).

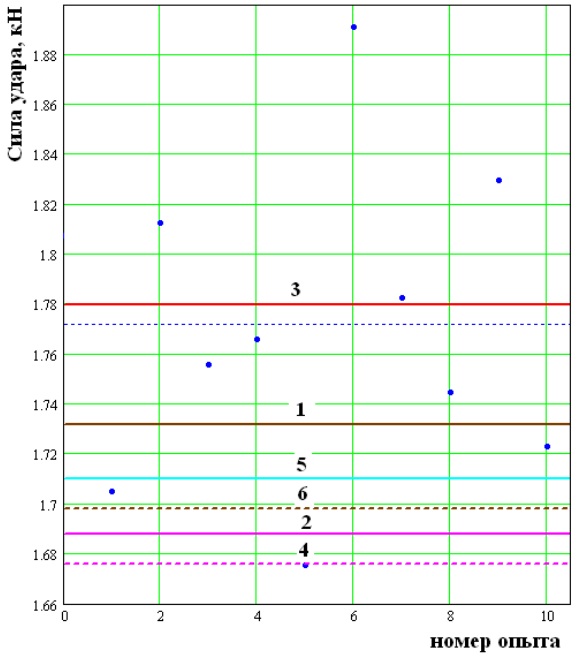


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных максимальной продольной силы удара с её расчётными значениями для различных моделей контакта

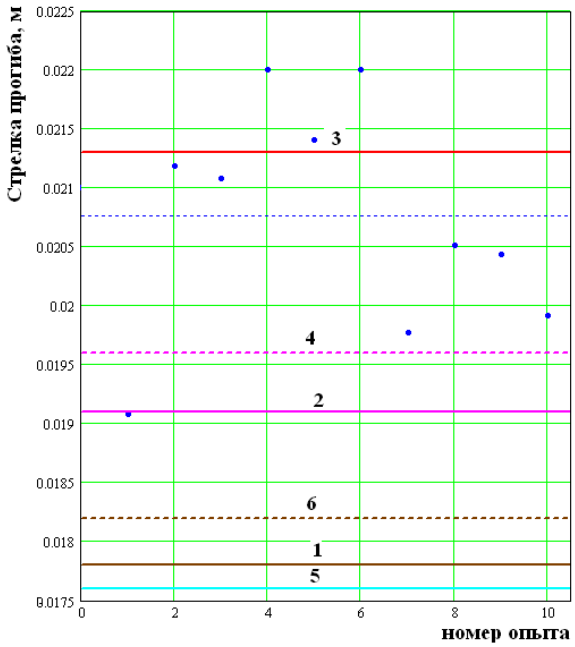


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных максимальной стрелки прогиба обшивки с её расчётными значениями для различных моделей контакта

Вывод на основе количественных результатов подтверждается качественным анализом процесса соударения (рис. 4 – 9). Из него следует, что алгоритмы №№ 1, 5 и 6 демонстрируют явления, не соответствующие физической картине контакта. Так модели №№ 1 и 5 помимо неадекватного характера разрушения льда, показывают проникновение его неконтактирующих элементов сквозь обшивку конструкции. Модель №6 в дополнение к этому предсказывает разрыв обшивки, что в опытах не наблюдалось.

Модели №№ 2 – 4 довольно реально описывают повреждения контактирующих тел. Тем не менее, среди них есть ряд различий, явные из которых поясняются на рис. 10 и 11. При оценке пластических деформаций модель №3 показывает более острую впадину удара (рис. 10). Модель №2 (а равно и №4) отличается сглаженными формами вмятины (рис. 11). Кроме этого наблюдается различие в характере движения льдины. В модели №3 (рис.10) её отскок несколько «запаздывает» по отношению к моделям №№ 2 и 4 (рис. 11). Особенности, обозначенные для модели №3, в большей степени соответствуют натурным наблюдениям, что в совокупности с количественными данными предопределило выбор автора в её пользу.

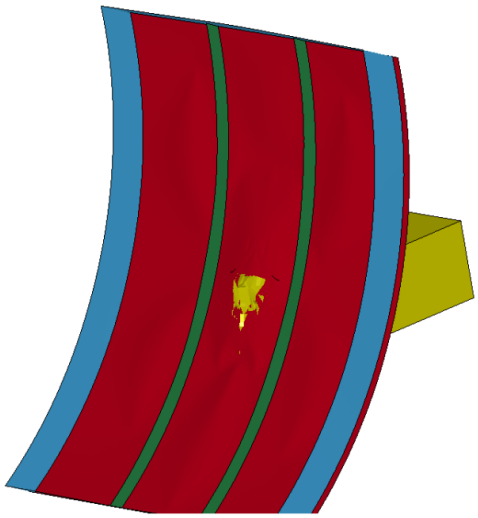


Рис. 4. Модель контакта №1

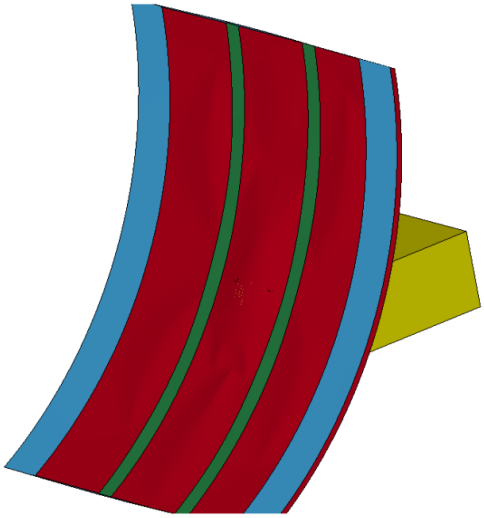


Рис. 5. Модель контакта №2

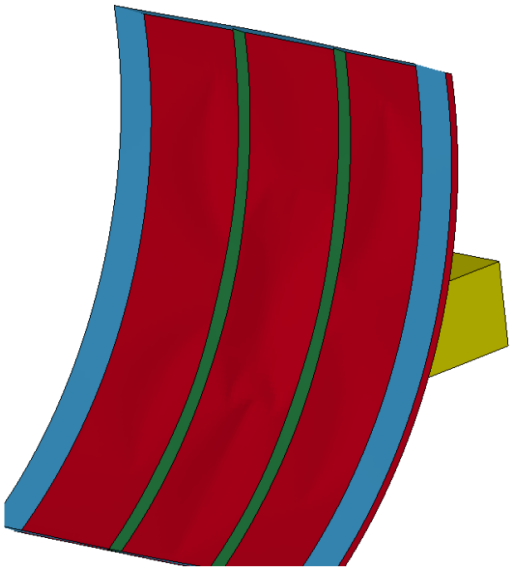


Рис. 6. Модель контакта №3

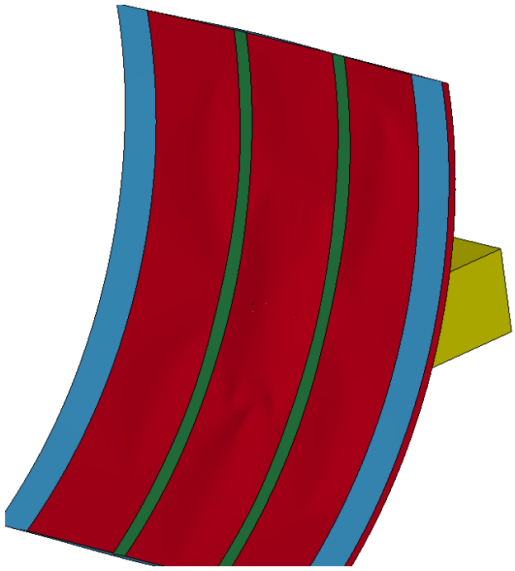


Рис. 7. Модель контакта №4

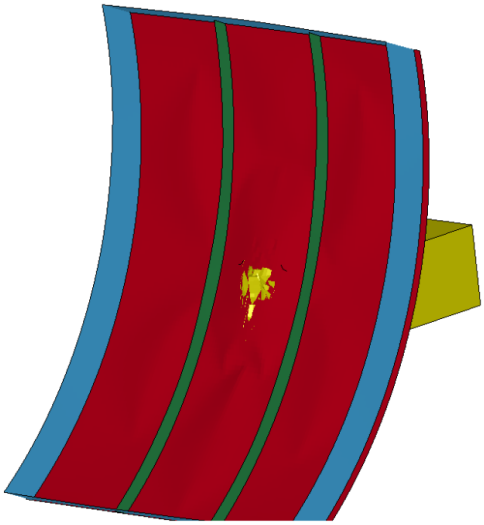


Рис. 8. Модель контакта №5

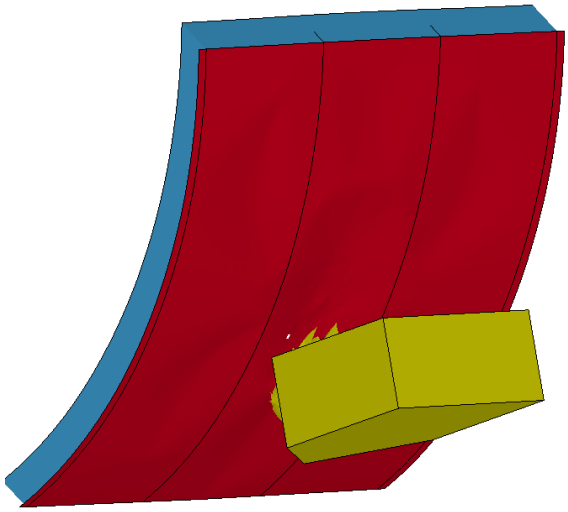


Рис. 9. Модель контакта №6

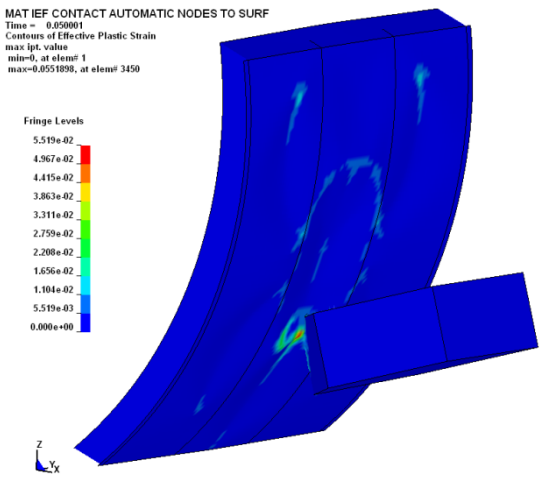


Рис. 10. Оценка пластических деформаций контактирующих тел для модели контакта №3

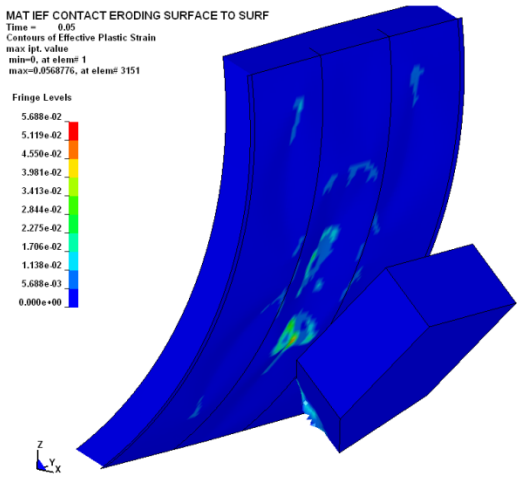


Рис. 11. Оценка пластических деформаций контактирующих тел для модели контакта №2

3.Моделирование контакта льдин. Выбору модели контактного взаимодействия отдельных льдин предшествовал эксперимент, аналогичный вышеописанному. Отличием являлось то, что вместо металлической конструкции использовался ледяной блок в форме прямоугольного параллелепипеда. Размеры его рёбер составили 0,2 х 0,2 х 0,1 м. В опыте измерялась продольная сила удара, и качественно оценивался характер разрушения льдин.

Геометрия обоих блоков была описана совокупностью восьмиузловых элементов объёмного типа. Общее количество элементов модели достигло 72 000. В данном примере взаимодействуют тела, у которых физические характеристики и типы используемых конечных элементов одинаковы. По этой причине моделирование контакта допустимо двумя способами. В первом случае каждый блок можно представлять отдельной структурной единицей модели – частью (Part). Во втором случае обе льдины являются отдельными элементами одной части.

Автором проанализированы оба варианта. При этом необходимо отметить, что первый вариант требует идентификации (указания номера и имени) каждого ледяного образования. Следовательно, возможности его ограничены. Так, например, описать с его использованием дрейф поля битого льда практически нереально.

Для моделирования использовались алгоритмы, описанные выше. С учётом того, что для несимметричных алгоритмов в данном случае правомерна смена подчинённости, были рассмотрены следующие модели контакта.

1. Несимметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ПОВЕРХНОСТЬ без разрушения (одна часть)
2. Несимметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ПОВЕРХНОСТЬ с разрушением (одна часть)
3. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ без разрушения (одна часть, прямая подчинённость)
4. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ без разрушения (одна часть, обратная подчинённость)
5. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ с разрушением (одна часть, прямая подчинённость)
6. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ с разрушением (одна часть, обратная подчинённость)
7. Симметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ВСЕ ПОВЕРХНОСТИ без разрушения (одна часть)

8. Симметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ВСЕ ПОВЕРХНОСТИ с разрушением (одна часть)
9. Несимметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ПОВЕРХНОСТЬ без разрушения (две части, прямая подчинённость)
10. Несимметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ПОВЕРХНОСТЬ без разрушения (две части, обратная подчинённость)
11. Несимметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ПОВЕРХНОСТЬ с разрушением (две части, прямая подчинённость)
12. Несимметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ПОВЕРХНОСТЬ с разрушением (две части, обратная подчинённость)
13. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ без разрушения (две части, прямая подчинённость)
14. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ без разрушения (две части, обратная подчинённость)
15. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ с разрушением (две части, прямая подчинённость)
16. Несимметричный типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ с разрушением (две части, обратная подчинённость)
17. Симметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ВСЕ ПОВЕРХНОСТИ без разрушения (две части)
18. Симметричный типа ПОВЕРХНОСТЬ-ВСЕ ПОВЕРХНОСТИ с разрушением (две части)

При этом прямая подчинённость устанавливала следующее состояние: контактирующие элементы или узлы неподвижного блока – главные (master), подвижного блока – подчинённые (slave).

Анализ результатов расчётов показывает, что в зоне разброса экспериментальных данных находится ряд моделей: №№ 3,9,10,11,12,13,15 (рис. 12). Наиболее близкий результат к величине среднего арифметического максимальной продольной силы удара демонстрирует алгоритм №13. Применимость его подтверждает и качественная характеристика соударения на основе анализа пластических деформаций тел (рис. 13). Из оставшихся шести контактных алгоритмов этого ряда качественно наиболее реально описывают удар модели №3 и №15 (рис. 14). Прочие модели дают неприемлемый результат, пример которого показан на рис. 15.

Среди не рассмотренных следует выделить симметричные алгоритмы №8 и №18. Расчётная оценка силы по ним даёт несколько заниженный результат, но качественная характеристика близка к правдоподобной. Однако нужно учесть, что принятые алгоритмы №13 и №15 ограничены в возможностях моделирования большого количества ледяных образований, а в моделях №8 и №18 этот недостаток отсутствует. Кроме того модели типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ (№№3, 13, 15) требуют задания в явном виде всего перечня потенциальных контактирующих узлов, что для реальных условий приводит к существенному «утяжелению» программного кода, увеличению требуемых объёмов памяти и как следствие – затрат машинного времени. По названным причинам для приближённого описания процесса поведения полей битого льда вполне допустимо использовать симметричные алгоритмы с разрушением.

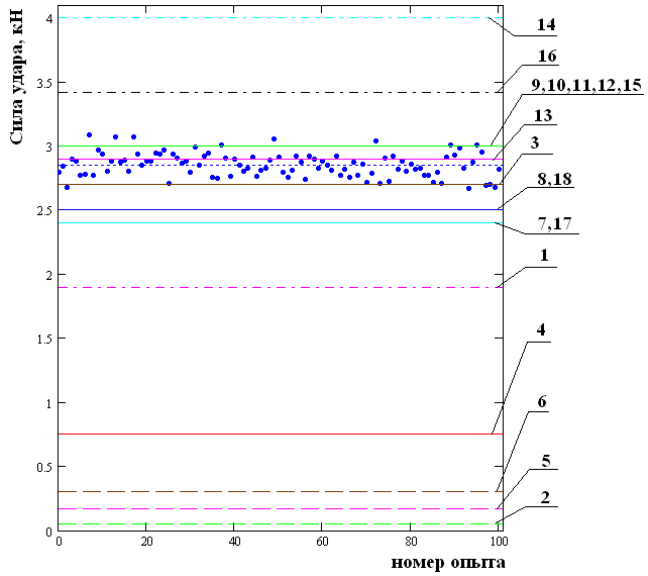


Рис. 12. Сопоставление экспериментальных данных максимальной продольной силы удара с её расчётными значениями для различных моделей контакта

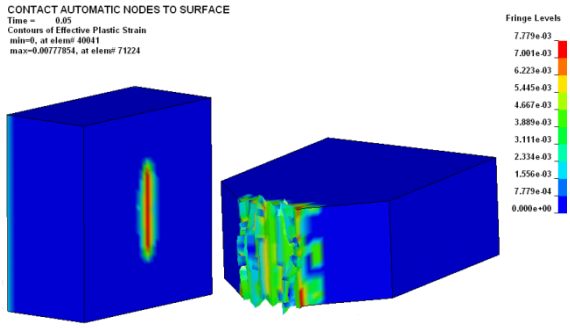


Рис. 13. Оценка пластических деформаций контактирующих льдин для модели контакта №13

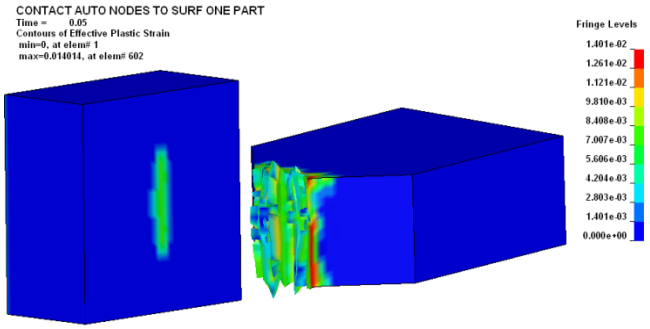


Рис. 14. Оценка пластических деформаций контактирующих льдин для модели контакта №3

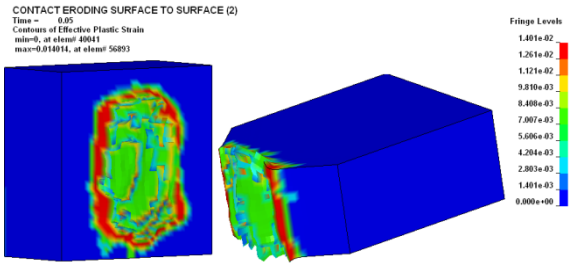


Рис. 15. Оценка пластических деформаций контактирующих льдин для модели контакта №12

4.Использование алгоритма УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ. Анализ результатов расчёта, приведённый выше, отдаёт предпочтение несимметричному контактному алгоритму типа УЗЛЫ-ПОВЕРХНОСТЬ (модели №№ 3, 13, 15). Эта модель контактного взаимодействия относится к наиболее ранним разработкам по компьютерной реализации численных методов расчёта в механике деформируемых твердых тел и даёт надёжные результаты [5,8,9]. Автор применяет этот алгоритм с рядом особенностей и допущений:

1. Решение многих задач связано с моделированием взаимодействия большого количества ледяных образований. При этом идентифицировать каждую единицу модели не представляется возможным. В этом случае совокупность льдин описывается одной частью. Всем поверхностям этой части присваивается статус подчинённости MASTER, всем узлам – SLAVE. То есть одно и то же тело является одновременно главным и подчинённым.
2. Алгоритм требует учёта трения. Следует отметить, что используемый в модели коэффициент трения, строго говоря, не является аналогом этого параметра, который приводится в справочных пособиях. Однако к настоящему времени автором не достаточно исследовано его влияние. Следуя рекомендациям [5], этот параметр варьируется в пределах значений статического и динамического коэффициентов трения льда по различным материалам.

3. Отмечены различия в форме ударного импульса и, как следствие, максимальной силы удара в обобщённой и детализированной базах выходных данных. По величине силы это расхождение колеблется в пределах 5%. Для анализа принимались максимальные значения.

5.Выводы. Для моделирования контактного взаимодействия льда с металлической конструкцией, а также отдельных ледяных образований между собой предпочтительнее использовать несимметричный алгоритм типа УЗЛЫ – ПОВЕРХНОСТЬ.

1. Результаты расчётов по данному алгоритму чувствительны к условиям подчинённости.
2. Для описания контакта льдин этот алгоритм можно использовать в двух формах идентификации.
3. Для приближённой оценки поведения большого скопления взаимодействующих ледяных образований допустимо использовать симметричные алгоритмы типа ПОВЕРХНОСТЬ – ВСЕ ПОВЕРХНОСТИ с разрушением.

Литература

1. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: Компьютерпресс, 2002. – 224 с.: ил.
2. Брепсон Р. Численное моделирование течений в ледовом вискозиметре Пенелопы. В сб. Физика и механика льда: Пер. с англ./ Под ред. П. Трюде. – М.: Мир, 1983. с. 36-42.
3. Бураго Н.Г., Кукуджанов В.Н. Обзор контактных алгоритмов. Журнал Известия РАН, МТТ, 2002.
4. Лобанов В.А. Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой. Дифференциальные уравнения и процессы управления, №4, 2008. Электронный журнал, рег. №П2375 от 07.03.97 ISSN 1817-2172, http://www.neva.ru/journal/j/RU/numbers/2008.4/issue.html
5. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Хабибуллин М.В., Старенченко С.В. Алгоритм расчета контактных границ в методе конечных элементов для решения задач высокоскоростного соударения деформируемых твердых тел// Вычислит. технологии. 1998. Т.3. №3. С.94-102.
6. D.V. Zyryanov. Columnar-grained S2 ice contact model with failure. http://www.itasca-udm.com/pages/contact.html
7. Hallquist J.O. LS-DYNA 950. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation. LSTC Report 1018. Rev. 2. USA, 2001. – p 498.
8. Johnson G.R. Liquid-solid impact calculations with triangular elements. Trans. ASME, 99, No. 3, 1977, 589–600.
9. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D. J. Three dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads. Int. J. Numerical Methods Eng., 14, 1979, 1865–1871.
10. Kolari Kari, Kouhia Reijo, Kärnä Tuomo. Ice Failure Analysis using Strain-softening Viscoplastic Material Model. European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2004). Jyväskylä, 24-28 July 2004.

Поступила: 01.09.11.