

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КРИБОТОВ
В ЛЕДЯНЫХ СТРУКТУРАХ ЕВРОПЫ

© 2010 г. Е. Н. Чумаченко, Р. Р. Назиров, О. С. Ерохина

Институт космических исследований РАН, г. Москва

mmkaf@miem.edu.ru

Поступила в редакцию 03.09.2009 г.

Создание специализированного оборудования для проникновения через толщу льда океана Европы (спутник Юпитера), процесс очень дорогостоящий и, несомненно, требующий предварительной теоретической проработки. Движение крибота должно осуществляться протаиванием ледяной массы в окрестности его месторасположения за счет поддержания на поверхности крибота соответствующей температуры. Оборудование должно быть максимально компактно и эффективно. Понятно, что ограничения на габариты и вес связаны с трудностями транспортировки оборудования на поверхность изучаемого объекта. Форма крибота обуславливает энергозатраты на обеспечение его перемещения в ледяных структурах. В этой работе, на основе выполненных расчетов, мы рассматриваем эффективность различных форм корпуса крибота и его атакующей (носовой) части.

Имитационное моделирование. В работе [1] были рассмотрены вероятные трудности, возникающие при создании криботов. Была подробно описана математическая постановка краевой задачи расчета температурных деформаций, были получены первые оценки эффективности применения оборудования типа криботов для изучения ледяной поверхности Европы.

Суть задачи имитационного моделирования сводится к следующему.

Физическое состояние ледяных структур может быть описано соотношениями, связывающими девиатор тензора напряжений с девиатором тензора деформации в соответствии с теорией упруго-пластического течения. Процесс протаивания достаточно медленный, квазистатический, поэтому на каждом из этапов построения решения должны выполняться уравнения равновесия. Для расчета напряженно-деформированного состояния ледяных структур нам необходимо найти распределение температур в окрестности изучаемого объекта. По-прежнему, при построении оценок будем полагать, что свойства окружающей объект среды однородны, изотропны и зависят только от температуры. Для ре-

шения воспользуемся общим уравнением теплопроводности. Обратим внимание, что разбиение границы, определяющее типы граничных условий и для расчета напряженно-деформированного состояния, и для расчета эволюции температурных полей, постоянно изменяется и определяется текущим положением и физическим состоянием выделенного для изучения сегмента окружающей крибот среды.

Рассмотрим ситуацию, когда малоразмерный объект, на поверхности которого поддерживается постоянная температура, превышающая температуру таяния льда, находится внутри ледяного массива. Для анализа возникающих вокруг такого объекта температурных полей и оценки напряженно-деформированного состояния ледяных структур, достаточно рассмотреть некоторую последовательность окрестностей продвигающегося объекта. Приближенное решение поставленной задачи будем искать с помощью метода конечных элементов, в цилиндрических координатах. В качестве конечных элементов используем кольцевые элементы треугольного сечения. Для более точного анализа процессов, проходящих в ледяных структурах, необходимо учитывать, что они различным образом сопротивляются сжатию и растяжению. Причем прочность на сжатие выше прочности на растяжение. Это влияние можно учесть, например, если принять, что величина критического касательного напряжения зависит от величины критического нормального напряжения, действующего в той же плоскости. На этом основывается теория разрушения Шлейхера-Надаи которая позволяет в терминах интенсивности касательных и средних напряжений охарактеризовать напряженное состояние при разрушении.

При последующем имитационном моделировании значения модуля Юнга (E), коэффициента Пуассона (ν), удельной теплоемкости (C), теплопроводности (λ), предельных значений напряжений при сжатии (σ_s^c) и растяжении (σ_s^p), коэффициента линейного расширения (α), были приняты по данным работ [2–4]. Сводная таблица этих обобщенных характеристик ледяных структур Европы, для широ-

Скорости перемещения крибота, в зависимости от его формы и температуры с учетом температуры окружающей среды (льда)

	$V \times 10^{-4}$, (мм/с) при $T_{\text{л}} = -100^{\circ}\text{C}$	$V \times 10^{-4}$, (мм/с) при $T_{\text{л}} = -50^{\circ}\text{C}$	V , (мм/с) при $T_{\text{л}} = -6^{\circ}\text{C}$
Шар ($T = 30^{\circ}\text{C}$)	22.6	63.88	12
Шар ($T = 60^{\circ}\text{C}$)	83.32	142.84	14.8
Игла ($T = 30^{\circ}\text{C}$)	36.36	92.28	4
Игла ($T = 60^{\circ}\text{C}$)	140.52	162.48	4
Капсула ($T = 30^{\circ}\text{C}$)	63.32	209.52	16.4
Капсула ($T = 60^{\circ}\text{C}$)	80	226.68	3.6

кого диапазона температур, от -5°C до -170°C , приведена в работе [1].

В рассматриваемых примерах изучалось перемещение объектов различной формы, условно названных “шар”, “игла” и “капсула”, в слоях льда температурой -100° , -50° и -6° (рис. 1). Сами объекты, имитирующие крибот, считались нагретыми в первом случае до 30°C , а во втором, до 60°C . При этом

задняя стенка считалась в два раза менее горячей, чем фронтальная и боковая.

Расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния выполнялись с помощью вычислительной системы SPLEN (www.komtek.ru).

На рис. 1, в качестве примера, приведены полученные температурные поля для трех форм изучае-

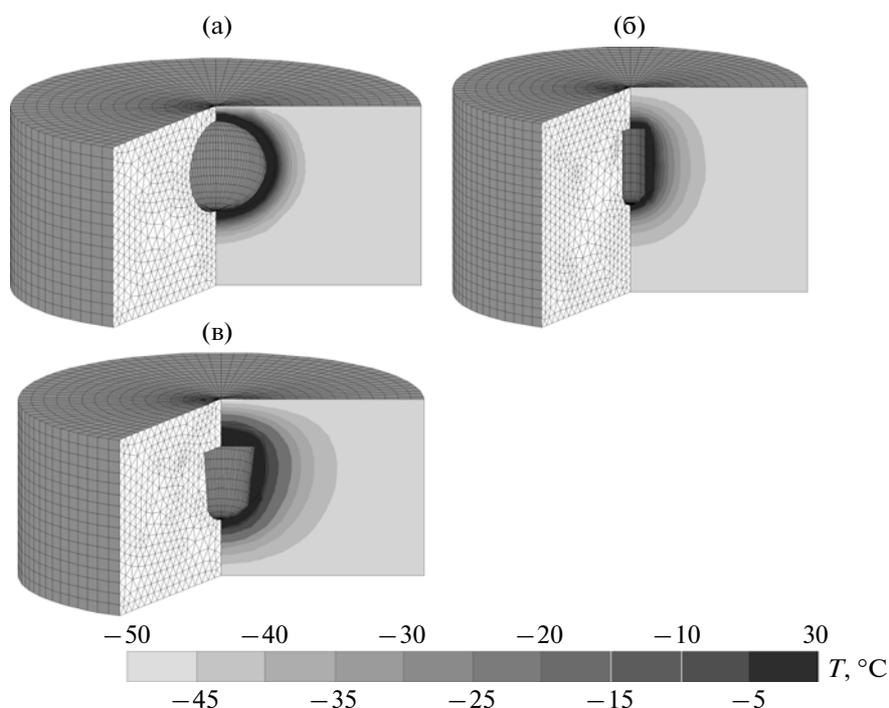


Рис. 1. Температурные поля для криботов различных форм при температуре льда: -60°C ; корпуса $+30^{\circ}\text{C}$.

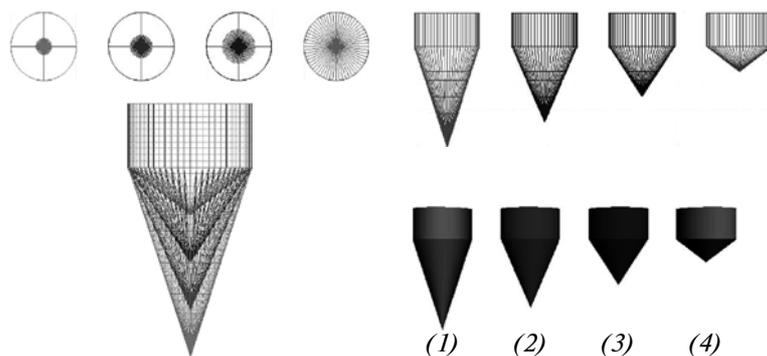


Рис. 2. Формы конусообразных наконечников крибота.

мого объекта при проникновении сквозь лед температурой -50°C . Контурной линией отмечены зоны, в которых окружающая капсулу среда находилась в жидком состоянии на предшествующем шаге “протаивания”. Темным цветом показана жидкая фаза льда на текущем шаге. Естественно, что с увеличением температуры на поверхности крибота, водяная прослойка вокруг него будет увеличиваться.

В результате проведенных вычислений были определены скорости перемещения нагретых объектов в ледяных структурах (см. таблицу).

Получилось, что при низких температурах льда наиболее предпочтительная форма крибота в виде “иголки”, а при температурах ближе к температуре плавления — “капсула”. Однако, при анализе полей разрушения вокруг движущегося объекта, получается, что минимальные “избыточные” разрушения во льду образуются при движении “иголки”, что несомненно является преимуществом этой формы крибота.

Обсуждение результатов. Таким образом, анализ напряженно деформированного состояния процесса “протаивания” ледяных структур позволяет сделать некоторые предварительные выводы относительно формы крибота. Это может быть цилиндрическое (сигарообразное) тело с пропорцией диаметра к высоте примерно 1 : 6, т.е. “иголка” с атакующей частью в виде “капсулы”.

Расчеты показывают [1], что в жидкости вокруг капсулы может развиваться достаточно высокое гидростатическое давление. Т.е. наравне с проблемой поддержания температуры в капсуле, достаточно актуальной является и проблема ее защиты от высокого давления. Вторая “особенность” процесса, его очень низкая скорость. Таким образом, очевидно, что необходимы дополнительные исследования по оптимизации формы и размеров капсулы, созданию систем регулирования температуры ее поверхности с целью повышения скорости прохождения ледяных структур. Подробные исследования потребуются при проектировании системы управляющих

воздействий, обеспечивающих направленное перемещение капсулы, существенно отличающееся от вертикального, обеспечиваемого гравитационными силами.

Например, для оценки влияния формы носовой части крибота на скорость его движения были рассмотрены четыре варианта конусообразного наконечника (рис. 2).

Расчеты при численном эксперименте показали, что если при температуре ледяных структур -100°C , относительную скорость движения с наконечником (1) принять за 1.0, то относительная скорость крибота с наконечником (2) будет равна 0.41, а для (3) и (4) — 0.47 и 0.62 соответственно.

Аналогичные данные, полученные для ледяных структур при температуре -50°C , для тех же вариантов наконечников: 1.0; 0.5; 0.53; 0.61. И, наконец, при температуре -6°C , относительные скорости перемещения крибота оказались равными: 1.0; 0.88; 0.82; 0.79.

Следует обратить внимание, что во всех случаях форма наконечника наиболее близкая к игле обеспечивает наибольшую скорость перемещения аппарата. Причем, при низких температурах, уменьшение заостренности конуса сначала приводит к резкому падению скорости и последующему плавному ее возрастанию, а при температурах близких к температуре плавления ледяных структур наблюдается плавное убывание скорости движения (рис. 3а).

Т.к. площади поверхности нагреваемой части крибота в каждом случае различны, целесообразно ввести некий параметр $\Omega = V/(\Sigma \cdot T)$, характеризующий не только относительную скорость движения (прямо пропорционально), но и относительную площадь поверхности крибота (обратно пропорционально), и относительную температуру нагрева этой поверхности (обратно пропорционально).

Относительные площади поверхности нагрева наконечников для приведенных на рисунках форм крибота, соответственно равны: 1.0; 0.86; 0.73; 0.59.

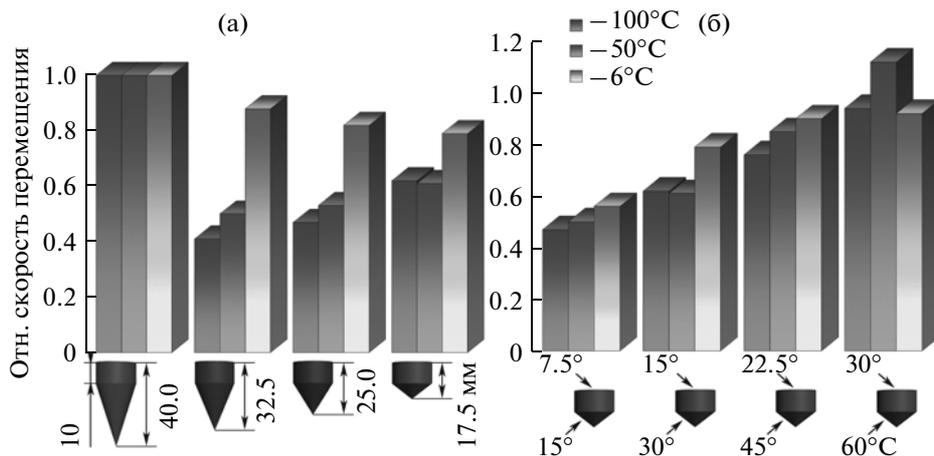
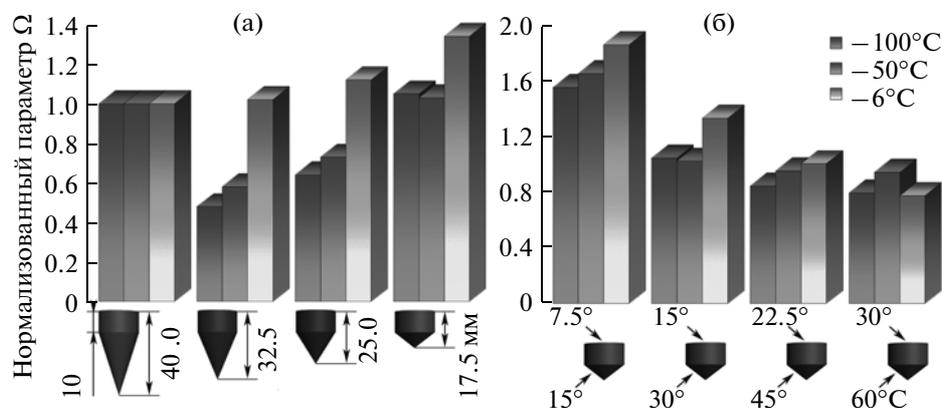


Рис. 3. Относительная скорость перемещения.

Рис. 4. Нормализованный параметр Ω .

При поддержании постоянной температуры на активных стенках крибота в 30°C и на торце в 15°C, показатель Ω примет значения, показанные на рис. 4а.

Очевидно, что по этому показателю наиболее перспективной является форма (4) носовой части крибота. При всех температурах для этой формы уменьшение скорости движения меньше, чем уменьшение обогреваемой поверхности крибота, а значит, и затрат энергии на поддержание процесса.

Интересно посмотреть, как влияет температура разогрева поверхности крибота на вышеприведенные показатели. Для наконечника четвертого типа рассмотрим четыре случая. В (I) будем считать, что корпус крибота нагрет до 15°C, а его торцевая часть до 7.5°C. Во (II) варианте оставим уже рассмотренные температуры (30°C и 15°C). В (III) и (IV) случаях возьмем температуры 45°, 22.5° и 60°, 30°C соответственно.

Выполнив расчеты в этом численном эксперименте, для относительной скорости перемещения

крибота получили (правило нормирования сохранено) диаграмму, показанную на рис. 3б.

Таким образом, увеличение температуры в 4 раза приводит примерно к удвоению скорости перемещения крибота.

Относительно комплексного показателя Ω . В численном эксперименте расчеты этого показателя привели к следующим результатам (рис. 4б).

Отсюда можно сделать вывод, что, несмотря на то, что повышение температуры увеличивает скорость движения крибота, с энергетической точки зрения это не выгодно. В рассмотренных случаях наиболее “рациональными” следует признать температуры в диапазоне 15–30°C.

Конечно, полученные решения являются только приближенными оценками. Не учитываются в должной мере свойства ледяных структур в зависимости от температуры. Пока не ясно влияние различных вкраплений на механические свойства льда. Существенным фактором является образо-

вание ледовой крошки в окрестности капсулы. Непрерывное изменение плотности давления и вязкости в окрестности капсулы делают задачу нелинейной сразу по нескольким параметрам. Образование крошки может, как замедлить процесс проникновения в толщу льда, так и ускорить этот процесс при организации соответствующих способов (технологий) прохождения.

Мы считаем, что продолжение исследований в этом направлении может привести к созданию уникального оборудования для проведения экспериментальных работ на замерзшей поверхности океана Европы, спутника Юпитера.

Исследования выполняются при поддержке гранта РФФИ № 09-08-00204-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чумаченко Е.Н., Назиров Р.Р.* О некоторых проблемах, связанных с созданием криоботов // *Космич. исслед.* 2009. Т. 47. № 3. С. 247–255. (*Cosmic Research*. P. 226).
2. *Новиков О.С.* Механические свойства жидких металлов. Экстремальные свойства минимальных монокристаллов металлов. М.: Едиториал. УРСС, 2004.
3. *Докучаев Л.В.* О спектре собственных колебаний ледяного океана спутника Юпитера Европы // *Космич. исслед.* 2003. Т. 41. № 3. С. 277–284. (*Cosmic Research*. P. 257).
4. *Докучаев Л.В.* Гравитационные упругие волны в океане Европы спутника Юпитера // *Космич. исслед.* 2005. Т. 43. № 3. С. 209–214. (*Cosmic Research*. P. 199).