

УДК 519.8:536.2+539.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ КРИБОТА ПОД ЛЕДЯНОЙ ПОКРОВ ЕВРОПЫ

© 2011 г. *Е.Н. Чумаченко^{1,2}, Д. Данхэм¹, Р.Р. Назиров^{1,2}, В.П. Кулагин¹,
И.В. Логашина¹, О.С. Ерохина²*

¹ Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)

² Институт космических исследований РАН, Москва

mmkaf@miem.edu.ru

Поступила в редакцию 26.09.2011

Рассматриваются вероятные трудности, возникающие при создании криоботов. Обсуждаются проблемы прохождения больших толщин ледяного слоя и эффективности применения оборудования типа криоботов для изучения ледяной поверхности Европы. Сделан обзор исследований по созданию криобота как для земного применения, так и для исследования планетарных льдов. Приводится обзор альтернативных технологий исследования подледного пространства.

Ключевые слова: криобот, моделирование процесса протаивания ледяного пласта, МКЭ.

Введение

Идея создания криобота – это идея создания оборудования для проникновения через толщу льда океана Европы (спутник Юпитера). Посадочный аппарат на Европу запланирован в рамках миссии к Юпитеру LAPLACE. Подробно с возможностями его применения можно ознакомиться в статье [1].

Движение криобота должно осуществляться протаиванием ледяной массы в окрестности его месторасположения за счет поддержания на поверхности криобота соответствующей температуры.

Основная задача – создание максимально компактного и эффективного оборудования. Понятно, что ограничения на габариты и вес связаны с трудностями транспортировки оборудования на поверхность изучаемого объекта.

Также предполагается, что, несмотря на небольшой размер, устройство может быть оборудовано мощным источником энергии (например, РТГ – радиоизотопным термоэлектрическим генератором), способным поддерживать заданную температуру на поверхности теплового зонда.

Предыдущие исследования

Для земного применения такие исследовательские приборы были разработаны и успешно апробированы в Гренландии и Антарктике в 1960-х годах. Немецкий ученый К. Филберт предложил так называемый зонд Филберта. Такой зонд двигался за счет силы тяжести и соединялся с поверхностью кабелем. В 1968 году в ходе экспериментов на станции Jarl Joset два зонда достигли глубины в 218 и 1005 м [2].

В 90-х гг. Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера сконструировал зонд для исследования антарктических шельфовых льдов. Зонд SUSI II (SUSI – зонд под шельфовыми льдами) был успешно протестирован на леднике Реттенбах (Зельден, Австрия) в 1990 г. и достиг глубины 60 метров. Плавающие зонды для земного применения имели следующие характеристики:

- длина от 2.2 до 3.6 м;
- диаметр от 10 до 14 см;
- общая масса в сотни килограммов;
- используемая мощность от 3 до 15 кВт;
- скорость протаивания порядка 2 м/ч [3].

Исследование космических объектов, покрытых льдом, – достаточно сложная задача, так как посадочный аппарат должен удовлетворять многим критериям: минимальные размеры и вес, наличие мощного источника энергии, возможность осуществить экологически чистое прохождение ледяного пласта с целью исключения загрязнения.

Экстраполируя исследования в земных условиях на космические объекты, было предложено использование плавящего зонда. В настоящее время существует несколько основных концепций прохождения ледяного пласта: плавящий зонд, растапливающий лед впереди себя,двигающийся под действием силы тяжести; термобур, действие которого основано на одновременном бурении и плавлении; зонд, движение которого осуществляется за счет водяных струй, способствующих образованию скважины. Каждая из предложенных методик имеет как свои плюсы, так и минусы.

Одной из самых перспективных концепций является идея использования только плавления. Преимуществами ее являются меньшая уязвимость прибора к повреждениям, относительно небольшие энергозатраты, также она удовлетворяет условиям небольшого размера и веса. К недостаткам можно отнести относительно невысокую скорость проникновения и необходимость наличия жидкой фазы льда. Последнее условие является наиболее важным, так как в условиях низкого давления (Европа) с большей вероятностью будет происходить сублимация, что может привести к блокировке зонда.

Теория основывается на соотношениях для мощности, полученных Аамотом [4]:

$$P = P_m + P_s, \quad (1)$$

где P_m – мощность, необходимая для нагрева объема льда от начальной температуры до температуры плавления и для совершения фазового перехода из твердого состояния в жидкое, P_s – мощность, необходимая для поддержания льда в жидком состоянии. P_m определяется из следующего соотношения:

$$P_m = A\nu\rho(H_f + c_p T), \quad (2)$$

где A – поперечное сечение, ν – скорость проникновения, ρ – плотность льда, c_p – удельная теплоемкость льда, H_f – энтальпия фазового перехода, зависящая от атмосферных условий. Выражение для P_s имеет вид:

$$P_s = \frac{4\lambda T}{a\pi^2} (2\pi q) \int_0^{L_{probe}} \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{ku^2 s}{v}}}{u(J_0^2(au) + Y_0^2(au))} du ds, \quad (3)$$

где a – радиус зонда, λ – теплопроводность льда, k – температуропроводность льда, s – пространственная координата, направленная вдоль зонда, v – скорость зонда, u – аргумент интегрирования.

В Институте космических исследований Австрийской академии наук в г. Грац был проведен ряд экспериментов в цилиндрическом вакуумном приемнике. Плавающий зонд представлял собой сферу, составленную из двух латунных полусфер. Между ними помещался круговой нагревательный элемент, способный выдержать температуру до 200°C, и изоляционный материал. Два датчика температуры были установлены в зонд: один в непосредственной близости от нагревателя и один внутри латунной сферы, ближе к поверхности. Прилагаемый кабель состоял из тонкого кевларового троса, окруженного двумя электрическими проводами для подачи тепла и пятью проводами для измерения температуры.

В общей сложности было проведено четыре эксперимента: для сжатого льда и снега в слу-

чае атмосферных условий и вакуума. В результате экспериментов были получены следующие значения скоростей: в условиях вакуума для льда – 3.4 см/ч, для снега – 4.8 см/ч, при атмосферных условиях – 23 см/ч и 45 см/ч для льда и снега соответственно [5].

Также был проведен ряд экспериментов с плавающими головками двух различных конфигураций. Для эксперимента были изготовлены две головки из меди. В обоих случаях размер головки превышал тело зонда для того, чтобы канал протаивания был достаточно широк. Нагревательный элемент был встроен в середину каждой головки. Эксперименты проводились при атмосферном давлении и для простой архитектуры зонда.

Измерения показали, что в описанных условиях скорость проникновения достигала $6.3 \cdot 10^{-5}$ м/с в обоих случаях. Полученное значение должно рассматриваться лишь как ориентировочное, так как условия, в которых проводился эксперимент, далеки от условий в вакууме при низких температурах. Важным результатом является то, что полученные оценки одинаковы для обоих случаев. Таким образом, форма головки либо оказывает незначительно влияние на процесс, либо не оказывает его совсем [6].

Эксперимент, описанный в статье [7], показал, что процесс протаивания сильно зависит от структуры окружающего льда. Предполагается, что Европу покрывает пористый лед. Таким образом, плавающий зонд может оказаться неэффективным в силу снижения скорости протаивания из-за возникновения сублимации, а не плавления. В таком случае образующаяся талая вода будет проникать в пористую структуру льда, и, следовательно, давление водяного пара будет недостаточным для осуществления плавления. Однако после того как зонд погрузится на глубину около метра, лед станет менее пористым и скорость плавления значительно увеличится. Дальнейшее же проникновение, с большой вероятностью, будет происходить аналогично тому, как это происходит на Земле: скважина закроется, давление повысится, лед будет плавиться, а не сублимироваться. Однако из проведенного эксперимента сложно сказать, на какой глубине это произойдет.

Эксперимент, описанный в статье [5], показал, что хвостовая часть зонда может оказывать влияние на скорость проникновения под лед. Так, например, зонд с более короткой хвостовой частью перемещается быстрее, чем с более длинной. Сам же процесс протаивания может оказаться весьма динамичным, характеризующимся чередованием плавления и сублимации. Но также существует вероятность формирования кратера вокруг прибора, что может привести к его блокировке.

Другой концепцией исследования подледного пространства является применение термобура – прибора, использующего как плавление, так и бурение. К его преимуществам можно отнести более эффективное прохождение ледяного покрова: термобур может двигаться как во льду, так и во льду с включениями. Его недостатки – более сложный и уязвимый механизм, а также значительное увеличение требуемых энергозатрат.

Такой зонд, разработанный совместно Гонконгским политехническим институтом и Австрийской академией наук, состоит из двух разделенных нагревательных контуров: «горячий нос» перед зондом и четыре нагревательных элемента на конце прибора. Задача «горячего носа» – стабилизация зонда в процессе и нагрев бурового лезвия. Прибор оборудован двумя винтами, двигающимися в противоположных направлениях.

Для того чтобы оценить производительность термобура, были проведены опыты в ледяном блоке для трех возможных случаев: бурение/плавление в чистом льду и во льду с включениями.

В эксперименте с бурением значение скорости на поверхности составило 7.2 м/ч, на глубине же скорость значительно уменьшалась. Таким образом, термобур позволяет достигнуть наибольших скоростей на поверхности, но приводит к значительному увеличению потребления энергии и проблемам с удалением продуктов бурения [6].

Американские ученые Циммерман и Карделл предложили термозонд, использующий горячие струи воды для создания скважины. Предполагается, что система будет обеспечиваться энергией за счет радиоизотопных термоэлектрических генераторов. Прибор был протестирован на наземных ледниках в октябре 2003 года и достиг скорости проникновения до 0.3 м/ч. Тем не менее бурение струей воды зависит от наличия жидкой фазы в скважине [6].

Анализ проблемы

Физическое состояние ледяных структур может быть описано соотношениями, связывающими девиатор тензора напряжений с девиатором тензора деформации в соответствии с теорией упругопластического течения [8]

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \tilde{\epsilon}_{ij}, \quad \tilde{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}, \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}, \quad (4)$$

$$\tilde{\epsilon}_{ij} = \epsilon_{ij} - \epsilon \delta_{ij}, \quad \epsilon = \frac{1}{3} \epsilon_{ij} \delta_{ij},$$

где $\tilde{\sigma}_{ij}$ – компоненты девиатора напряжений, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, σ_u – интенсивность напряжений, σ – среднее на-

пряжение, $\tilde{\epsilon}_{ij}$ – компоненты девиатора перемещений, ϵ_{ij} – компоненты тензора перемещений, ϵ_u – интенсивность деформаций, $\dot{\epsilon}_u$ – скорость деформации, ϵ – средняя деформация, δ_{ij} – символ Кронекера.

Интенсивность напряжений нелинейно зависит от интенсивности деформаций и температуры

$$\sigma_u = \sigma_u(\epsilon_u, T), \quad \sigma_u = \sqrt{\frac{3}{2} \tilde{\sigma}_{ij} \tilde{\sigma}_{ij}}, \quad \epsilon_u = \sqrt{\frac{2}{3} \tilde{\epsilon}_{ij} \tilde{\epsilon}_{ij}}. \quad (5)$$

Компоненты тензора напряжений зависят от компонент тензора деформаций в заданном, изменяемом поле температур следующим образом:

$$\sigma_{ij} = (2\sigma_u / 3\epsilon_u) \epsilon_{ij} + 3(K - 2\sigma_u / \epsilon_u) \epsilon \delta_{ij} - \alpha(2\sigma_u / 3\epsilon_u) \Delta T \delta_{ij}, \quad (6)$$

где ΔT – разница температур на текущем шаге решения (К), α – коэффициент линейного расширения (1/К).

Для упругого состояния льда (в этом случае $2\sigma_u / 3\epsilon_u = 2G$), переходя от коэффициентов G и K , характеризующих модуль сдвига и коэффициент объемного сжатия, к коэффициентам E и ν (модуль Юнга и коэффициент Пуассона, соответственно), получим:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\epsilon_{ij} + \frac{3\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \epsilon - \frac{1+\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \alpha \Delta T \right). \quad (7)$$

Процесс протаивания достаточно медленный, квазистатический, поэтому на каждом из этапов построения решения должны выполняться уравнения равновесия:

$$\sigma_{ij,j} = 0. \quad (8)$$

Пусть изучаемый нами сегмент ледяной структуры занимает объем V с границей S в декартовой системе координат XYZ . Граница тела разбита на три части, так что $S = S_\sigma \cup S_u \cup S_{\sigma u}$ (рис. 1).

На части границы S_σ действуют поверхностные силы ($\vec{P}_n = P_n \vec{k}_i$):

$$\sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3) n_j \Big|_{S_\sigma} = P_n(x_1, x_2, x_3). \quad (9)$$

На части границы S_u заданы перемещения $\vec{u}^* = u_i^* \vec{k}_i$:

$$u_i(x_1, x_2, x_3) \Big|_{S_u} = u_i^*(x_1, x_2, x_3). \quad (10)$$

На части границы $S_{\sigma u}$ заданы по одной из компонент векторов $\vec{P}_n$ и $\vec{u}^*$:

$$\sigma_{1j}(x_1, x_2, x_3) n_j \Big|_{S_{\sigma u}} = P_n(x_1, x_2, x_3),$$

$$u_2(x_1, x_2, x_3) \Big|_{S_{\sigma u}} = u_2^*(x_1, x_2, x_3), \quad (11)$$

где искомые функции – $u_1(x_1, x_2, x_3)$, $u_2(x_1, x_2, x_3)$, $u_3(x_1, x_2, x_3)$.

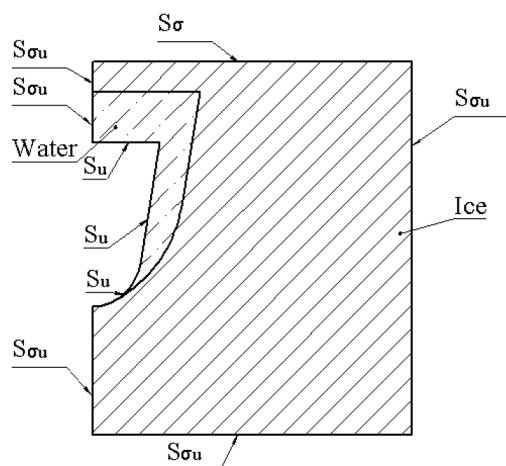


Рис. 1. Граничные условия (перемещение)

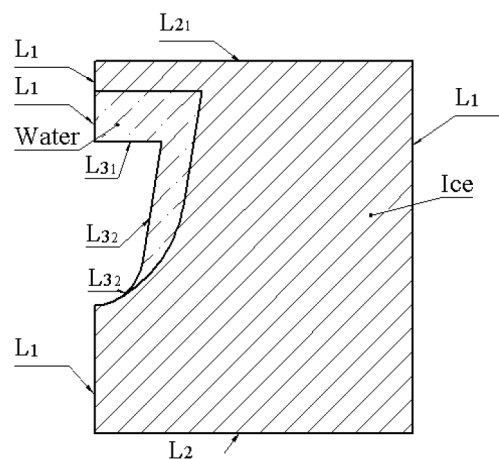


Рис. 2. Граничные условия (температура)

Таблица

Среда	Модуль Юнга E , 10^6 Н/м ²	Предельное значение напряжения при сжатии σ_s^c , 10^6 Н/м ²	Предельное значение напряжения при растяжении σ_s^t , 10^6 Н/м ²	Коэффициент Пуассона ν	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	Теплопроводность λ , Вт/(кг·К)	Коэффициент линейного расширения α , 10^6 /К
Лед (-8°C)	9237.86	29.42	26.48	0.3	2050	0.023	100
Лед (-170°C)	14219.64	51.88	49.03	0.3	850	0.050	10
Вода (-5°C)	2451.66	27.85	25.50	0.45	4200	0.022	120

Соотношения Коши, связывающие компоненты тензора деформаций и перемещения частиц, имеют вид [8]:

$$2\varepsilon_{ij} = u_{i,j} + u_{j,i}. \quad (12)$$

Для расчета напряженно-деформированного состояния ледяных структур нам необходимо найти распределение температур в окрестности изучаемого объекта. При построении оценок будем полагать, что свойства окружающей среды однородны, изотропны и зависят только от температуры. Общее уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \sum_i \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \right] + Q, \quad (13)$$

где $T = T(x_i, t)$ – температура тела в точке (x_i) в момент времени t ; $c = c(T)$ – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)); $\rho = \rho(T)$ – плотность (кг/м³); $\lambda = \lambda(T)$ – теплопроводность (Вт/(м·К)); $Q = Q(x_i, T)$ – интенсивность источников тепла внутри тела (Вт/м³), которая считается положительной, если тепло подводится к телу. В начальный момент в области V задано начальное распределение температуры $T(x_i, 0) = T_0(x_i)$.

На границе области могут быть заданы следующие условия теплообмена с окружающей средой (рис. 2):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{L_1} = q, \quad (14)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{L_2} = \psi(T - T_{cp}), \quad (15)$$

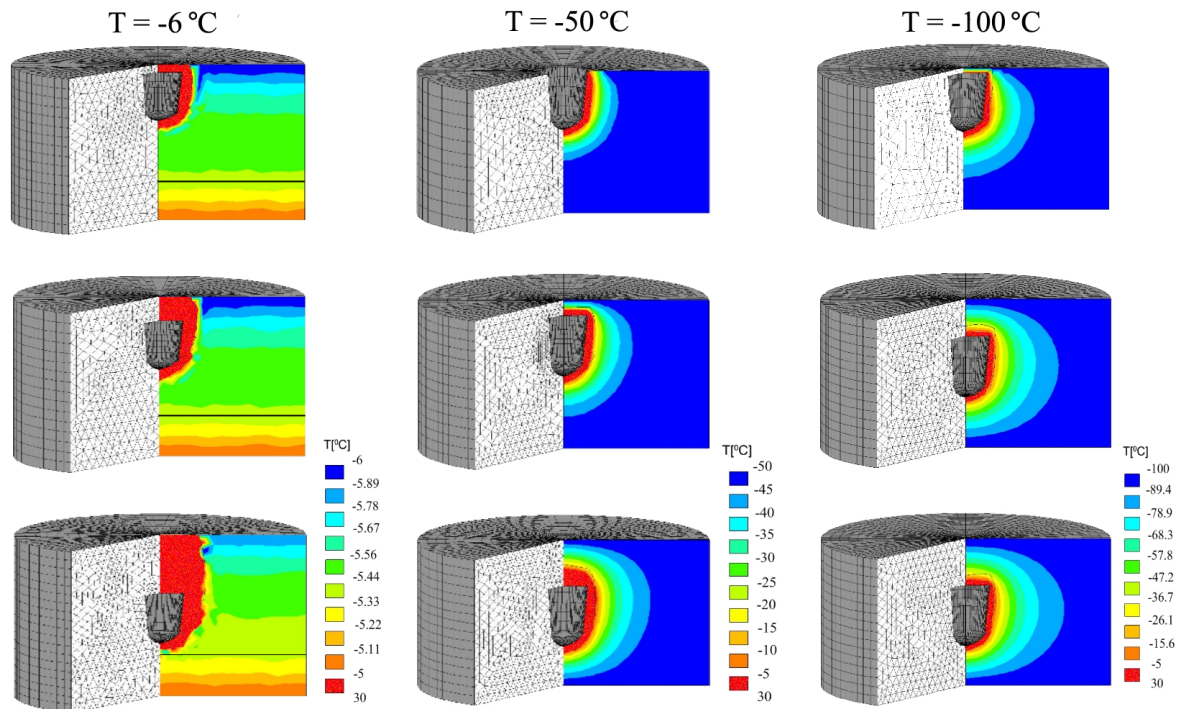
$$T \Big|_{L_3} = T_b, \quad (16)$$

то есть на части L_3 границы может быть задана постоянная температура T_b , а на оставшейся части – конвективный теплообмен $\psi(T - T_{cp})$ или тепловой поток интенсивности q (Вт/м²). Конвективный теплообмен характеризуется коэффициентом теплообмена ψ (Вт/(м²·К)) и температурой окружающей среды T_b .

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 криобот среды.

Рассмотрим ситуацию, когда некоторый 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 осесимметричных окрестностей продвигающегося объекта.

Рис. 3. Температурные поля в массиве льда при температурах: -6°C , -50°C , -100°C

После соответствующих подстановок наша задача сведется к отысканию решения уравнений (8) и (13) с граничными условиями (9)–(11), (16) [8–10].

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 [11, 12] которая позволяет в терминах интенсивности касательных и средних напряжений охарактеризовать напряженное состояние при разрушении.

Имитационное моделирование

Численные значения, используемые для моделирования, представлены в таблице [17].

На основании большого числа работ, опубликованных после полетов космических аппаратов «Вояджер» и «Галилео» (например, [13–15], <http://voyager.jpl.nasa.gov/>, <http://solarsystem.nasa.gov/galileo/>), было принято, что на поверхности ледяного покрова Европы температура может

достигать -170°C , толщина ледяного покрова порядка 10 км, а переход ледяных структур в жидкое состояние предположительно происходит при температуре -5°C [16].

На передней и боковой поверхности объекта, условно названного нами «горячая капсула», температура принималась равной 30°C , а на тыльной, горизонтальной площадке – 15°C .

Расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния выполнялись с помощью вычислительной системы SPLEN (<http://www.kommek.ru>). Вычислительная система SPLEN основана на методе конечных элементов и предназначена для расчетов термонапряженного состояния элементов конструкций сложных физико-механических систем.

На рис. 3 приведены полученные температурные поля для трех значений температур ледяного массива. Графическим контуром отмечены зоны, в которых окружающая капсулу среда находилась в жидком состоянии на предшествующем шаге «протаивания». Темным (красным) цветом показана жидкая фаза льда на текущем шаге «протаивания». Для температуры массива -100°C характерно быстрое закрытие (застывание) протаиваемого следа. Жидкий след принимает вид вогнутой линзы. Это прямое следствие перепада температур на поверхности капсулы.

При температуре ледяного массива -50°C жидкий след принимает форму сильно выпуклой линзы, т.е. влияние перепада температур на поверхности капсулы заметно снижается.

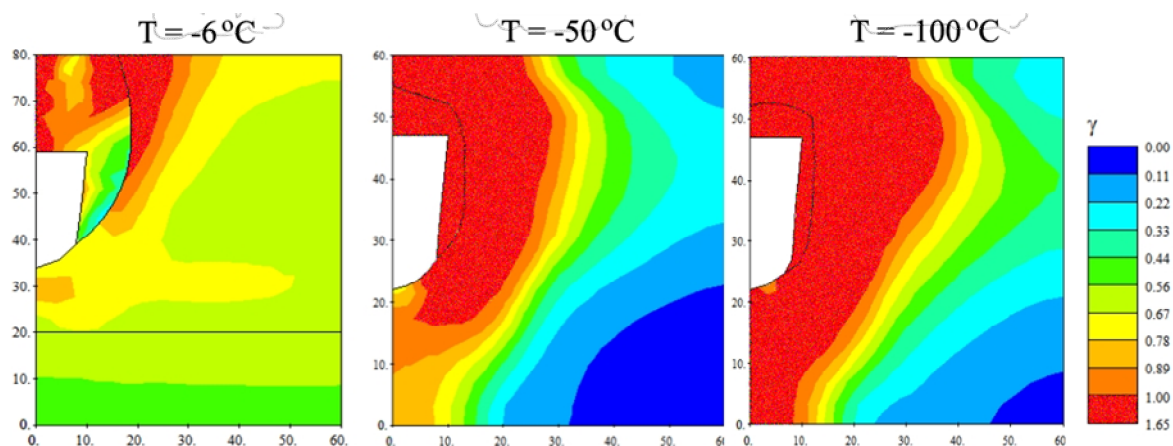


Рис. 4. Вероятностные зоны разрушений в массиве льда при -6°C , -50°C , -100°C

Рассмотрим случай, когда температура ледяного массива равна -6°C . Горизонтальная черта на приведенных температурных полях показывает условный раздел жидкого и твердого состояния среды в изучаемом секторе. В этом случае за капсулой образуется незамерзающий, жидкий шлейф, имеющий каплевидную форму.

При оценке напряженно-деформированного состояния в окрестности капсулы воспользуемся интегрированным показателем Шлейхера–Надаи для вероятностной оценки разрушений ледяных структур вокруг капсулы [8].

На рис. 4 зоны, в которых наиболее вероятно нарушение сплошности ледяного массива, отмечены красным цветом. Параметр γ – параметр критерия Шлейхера–Надаи для вероятностной оценки разрушений в заданной области. При температурах ниже -50°C зоны разрушения располагаются вокруг капсулы, причем зона опережающего разрушения тем существеннее, чем ниже температура льда. При температурах, близких к температуре плавления, опережающие зоны разрушения отсутствуют, нарушение сплошности наиболее вероятно в зоне шлейфа капсулы.

Обсуждение результатов

Анализ напряженно-деформированного состояния процесса «протаивания» ледяных структур позволяет сделать некоторые численные оценки, которые, в свою очередь, дают представление о проблемах, которые необходимо решать разработчикам (конструкторам) и пользователям (заказчикам) криобота.

Расчеты показывают, что в жидкости вокруг капсулы может развиваться достаточно высокое гидростатическое давление. Таким образом, увеличение давления должно быть учтено в дальнейших расчетах. То есть 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.

Для оценки влияния формы криобота на скорость его движения были рассмотрены четыре варианта носовой части (рис. 5).

Расчеты при численном эксперименте показали, что если при температуре ледяных структур -100°C относительную скорость движения криобота формы (1) принять за 1.0, то относительная скорость криобота формы (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 (рис. 6), для тех же форм криоботов: 1.0; 0.5; 0.53; 0.61. И, наконец, при температуре -6°C относительные скорости перемещения криобота оказались равными: 1.0; 0.88; 0.82; 0.79.

Следует обратить внимание, что во всех случаях форма атакующей (носовой) части, 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.

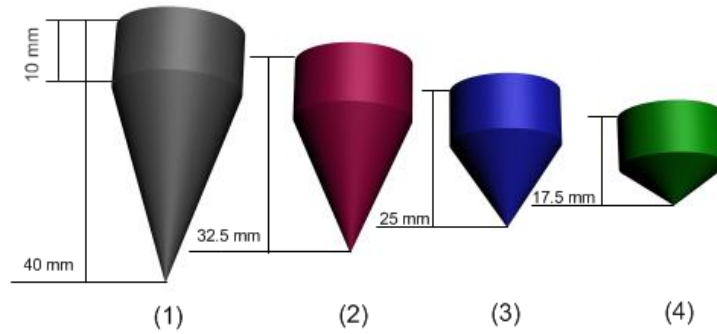


Рис. 5. Формы конусообразных наконечников крибота

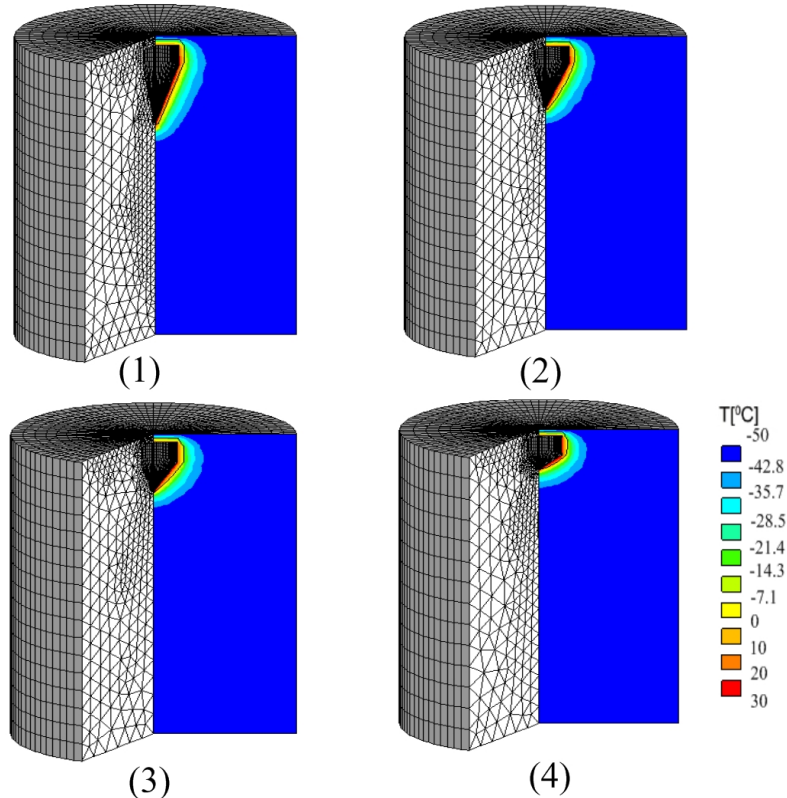


Рис. 6. Формы конусообразных наконечников крибота

Так как площади поверхности нагреваемой части крибота в каждом случае различны, целесообразно ввести некий параметр, характеризующий не только относительную скорость движения (прямо пропорционально), но и относительную площадь поверхности крибота (обратно пропорционально) и относительную температуру нагрева поверхности (обратно пропорционально):

$$\Omega = \frac{V}{ST}, \quad (17)$$

где V – относительная скорость перемещения, S – площадь поверхности крибота, T – относительная температура нагрева поверхности крибота (в градусах Цельсия).

Относительные площади поверхности нагрева для приведенных на рисунках форм крибота соответственно равны: 1.0; 0.86; 0.73; 0.59. При поддержании постоянной температуры на активных стенках крибота в 30°C и на торце в

15°C показатель Ω принимает значения, представленные на рис. 8.

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, потребуется меньшее количество энергии на поддержание процесса протавивания.

Интересно посмотреть, как влияет температура нагрева поверхности крибота на вышеприведенные показатели. Для носовой части 4-го типа рассмотрим четыре случая. В случае I будем считать, что корпус крибота нагрет до 15°C, а его торцевая часть – до 7.5°C. В варианте II оставим уже рассмотренные температуры (30°C и 15°C). В случаях III и IV возьмем температуры 45°C, 22.5°C и 60°C, 30°C соответственно.

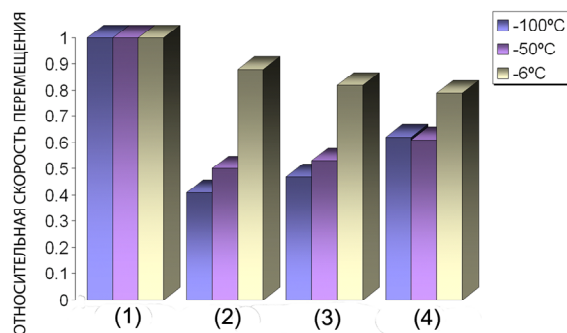


Рис. 7. Относительная скорость перемещения в зависимости от размеров крибота

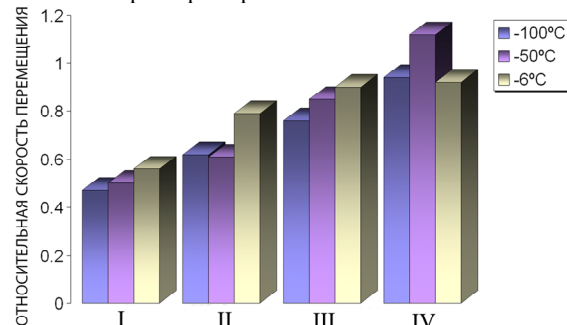


Рис. 9. Относительная скорость перемещения в зависимости от температуры нагрева крибота

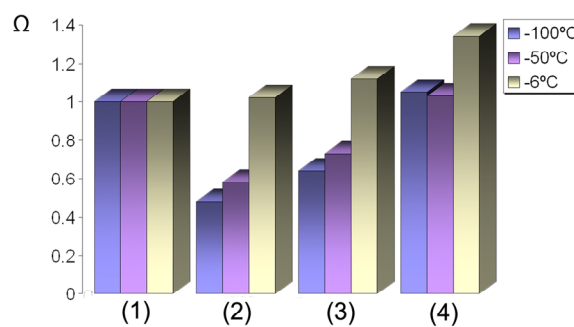


Рис. 8. Нормализованный параметр Ω в зависимости от размера крибота

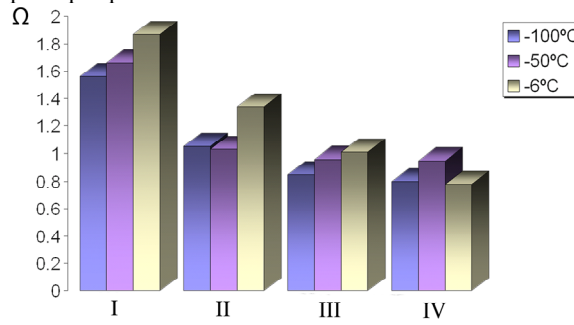


Рис. 10. Нормализованный параметр Ω в зависимости от температуры нагрева крибота

Выполнив расчеты в этом численном эксперименте, для относительной скорости перемещения крибота получили (правило нормирования сохранено) данные, представленные на рис. 9.

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

В численном эксперименте расчеты комплексного показателя Ω привели к результатам, представленным на рис. 10.

Заключение

Отсюда можно сделать вывод: несмотря на то, что повышение температуры увеличивает скорость движения крибота, с энергетической точки зрения это невыгодно. 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 образование ледовой крошки в окрестности капсулы. Непрерывное изменение плотности, давления и вязкости в окрестности капсулы делает 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.

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

В дальнейшем планируется усовершенствование модели:

- Предполагается развитие модели с учетом уплотнений и камней.
- Планируется учесть гравитацию при движении зонда.

В данной работе использовалось моделирование только головной части зонда. Следующие работы будут рассматривать и хвостовую часть прибора, так как она может оказывать влияние на скорость проникновения под лед.

Кроме того, предполагается сравнение решений с решением, полученным на основе баланса энергий.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования по направлению «Космические исследования и технологии» 2011–2013 гг.

Список литературы

1. Blanc M., Alibert Y., Andre N. et al. LAPLACE: a mission to Europa and the Jupiter system for ESA's cosmic vision programme // *Experimental Astronomy*. 2009. 23. P. 849–892.

2. Талалай П.Г. Проникновение в подледниковые озера: планы и реальность // Природа. 2006. №9. С. 45–53.
3. Ulamec S., Biele J., Funke O., Engelhardt M. Access to glacial and subglacial environments in the solar system by melting probe technology // Rev. Environ. Sci. Biotechnology. 2007. 6. P. 71–94.
4. Aamot H.W.C. Heat transfer and performance of a thermal probe for glaciers. Technical Report 210, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire. 1967.
5. Treffer M., Koemle N., Kargl G. et al. Preliminary studies concerning subsurface probes for the exploration of icy planetary bodies // Planetary and Space Science. 2006. 54. P. 621–634.
6. Weiss P., Yung K.L., Ng T.C. et al. Study of a melting drill head for the exploration of subsurface planetary ice layers // Planetary and Space Science. 2008. 56. P. 1280–1292.
7. Kaufmann E., Kargl G., Koemle N.I. et al. Melting and sublimation of planetary ices under low pressure condition: Laboratory experiments with a melting probe prototype // Earth Moon Planets. 2009. P. 11–29.
8. Чумаченко Е.Н., Печенкин Д.В. Моделирование и расчет термоупругопластических деформаций при анализе локально изотропных конструкций. М.: МИЭМ, 2000.
9. Chumachenko E.N., Nazirov R.R., Logashina I.V. Mathematical simulation of cryobot movement // International workshop «Europa Lander: science goals and experiments», IKI RAS, Moscow, 9–13 February 2009. P. 17–18.
10. Chumachenko E.N., Nazirov R.R. Some problems associated with design of cryobots // Cosmic Research. Moscow, 2009. V. 47, №3. P. 247–255.
11. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1974.
12. Курленя М.В., Миренков В.Е., Шутов В.А. Основы математического моделирования разрушения. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 1998.
13. Carr M.H., Belton M.J.S., Chapman C.R. et al. Evidence for a subsurface ocean on Europa // Nature. 1998. 391. P. 363–365.
14. Pappalardo R.T., Head J.W. & Greeley R. The hidden ocean of Europa // Scientific American. October 1999. P. 34–43.
15. Greenberg R. Unmasking Europa. Search for life on Jupiter's ocean moon. New York: Praxis Publishing Ltd., 2008.
16. Thomson R.E., Delaney J.R. Evidence for a weakly stratified European ocean sustained by seafloor heat flux // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № E6. P. 355–365.
17. Николаев О.С. Механические свойства жидких металлов. Экстремальные свойства минимальных монокристаллов металлов. М.: Едиториал УРСС, 2004.

COMPUTER SIMULATION OF THERMAL PROBE PENETRATION THROUGH THE EUROPA'S ICY SHELL

E.N. Chumachenko, D. Dunham, R.R. Nazirov, V.P. Kulagin, I.V. Logashina, O.S. Erokhina

This paper examines some possible problems connected with the thermal probe design. The article also touches upon the problems of thick ice strata formation, and efficiency of thermal-probe-like devices application in Europa's icy shell research.

The paper considers previous studies concerning creation of a melting probe both for terrestrial use and for planetary ice research. Also alternative technologies for subglacial space research are reviewed.

Keywords: thermal probe; melting probe; computer simulation of ice penetration; FEM.