

К.Е.Сазонов

БУКСИРОВКА АЙСБЕРГОВ

К.Е.Sazonov

TOWING OF ICEBERGS

Представлено решение задачи о буксировке айсберга на чистой воде. Исследованы параметры колебаний, возникающих в системе «буксировщик-канат-айсберг» при различных типах энергетической установки буксирующего судна.

Ключевые слова: айсберг, буксировка, синтетический канат, натяжение, колебания, стационарный режим

The paper deals with the solution of the iceberg towing problem. Parameters of oscillations in the "towing ship – cable – iceberg" system are investigated for various ship powerplant types.

Key words: iceberg, towing, synthetic cable, tension, oscillations, steady-state condition.

Введение

При мореплавании и освоении морских месторождений полезных ископаемых в приполярных регионах существует вероятность воздействия на инженерные сооружения со стороны айсбергов, которые могут привести и уже приводили к крупным авариям и катастрофам. В соответствии с номенклатурой морских льдов айсбергом называется массивный, отколовшийся от ледника кусок льда различной формы, выступающий над уровнем моря более чем на 5 м, который может быть на плаву или находиться на мели.

Айсберговая опасность была осознана человечеством после трагедии с лайнером «Титаник», произошедшей в 1912 г. в северной Атлантике. Для обеспечения безопасности мореплавания в этом регионе был создан специальный «Ледовый патруль», в обязанности которого входило обеспечение контроля за движением айсбергов и предупреждение судов о грозящей им опасности.

Подавляющее большинство айсбергов (примерно 99 %) образуется при разрушении Антарктического и Гренландского ледяных щитов. В северном полушарии крупные айсберги редко превышают в поперечнике 200 м и возвышаются над уровнем моря более чем на 25 м. В Южном океане встречаются гигантские айсберги, достигающие в поперечнике нескольких километров и имеющие осадку до 500 м. Несмотря на то, что айсберги распространены на площади, составляющей примерно 20 % площади Мирового океана, вероятность встречи с ними резко падает по мере удаления от берегов Гренландии и Антарктиды.

Наибольшую опасность айсберги представляют для стационарных морских сооружений, так как они не имеют возможности уклониться от встречи с ними. В последние годы в мире разработаны методы активной борьбы с айсбергами. Основной

целью этих методов является изменение траектории движения айсберга таким образом, чтобы исключить возможность его столкновения с платформой.

В настоящее время существует 4 общепризнанных, опробованных метода управления движением айсбергов [6]:

- буксировка одним судном;
- буксировка двумя судами;
- воздействия струями винтов;
- воздействие гидропушкой.

Наиболее распространенным является первый способ буксировки, который с успехом применяется с 70-х гг. прошлого века. Схема буксировки достаточно проста. Она включает использование плавающего синтетического каната диаметром 15-20 см и длиной 1000 – 1200 м, который позволяет прикладывать буксировочное усилие 60 т (суммарное усилие в двух ветвях каната). Канат опускают с кормы пока судно приближается к айсбергу, затем судно обходит айсберг, продолжая вытравливать канат. Судно подходит к началу каната, который помечен бумом. После соединения двух концов каната к ним присоединяется стальной буксирный трос диаметром 100 мм и длиной не менее 100 м. Этот трос служит для притапливания синтетического троса. Стальной трос выполняет несколько функций.

- погружает линию буксировки до глубины расположения центра гидродинамического сопротивления, уменьшая тем самым опрокидывающий момент;
- обеспечивает безопасность буксировки при обрыве или соскальзывании синтетического троса с айсберга;
- является демпфирующим элементом при осуществлении буксировки айсберга на волнении.

Спуск синтетического каната с судна буксировщика достаточно быстрый процесс, он занимает от 0,5 до 2 ч. Основную трудность при таком способе буксировки представляют опрокидывания айсберга и соскальзывание с него буксирного троса, так как после этого операцию заводки троса приходится начинать сначала. Много времени занимает сбор вытравленного синтетического троса после выполнения операции по буксировке айсберга.

Об эффективности применения этого метода можно судить по следующей статистике. При выполнении операций по буксировке айсберга с целью отклонить его траекторию от защищаемого объекта 14% операций были неудачными, и защищаемый объект приходилось снимать с точки и отводить в сторону, 65% операций прошли успешно без каких-либо проблем, а в 21% случаев операция закончилась успехом после нескольких попыток ее выполнения.

Теоретическому исследованию процесса буксировки айсбергов посвящена интересная работа А.В.Марченко [4], в которой исследованы вопросы устойчивости процесса буксировки, а также проведено численное исследование колебаний, возникающих в системе «буксировщик - трос - айсберг». Некоторые результаты и рекомендации, содержащиеся в этой работе, представляются не совсем обоснованными. Так, например, для снижения максимального натяжения троса при буксировке автор рекомендует увеличивать тягу движителя буксировщика с нуля до максимума плавно в течение достаточно длительного времени (примерно 30 мин). Это условие, с уче-

том небольших скоростей буксировки, трудно выполнимо, так как буксировщик при этом плохо управляет.

Целью данной работы является некоторое уточнение математической модели буксировки, предложенной в работе [4], для более точного изучения процесса буксировки и выработки на этой основе рекомендаций по ее осуществлению.

Математическая модель

Математическая модель буксировки айсберга, как и буксировки судна, задается системой двух дифференциальных уравнений движения [2]:

$$M_s v_s = T_E - 2T_s - R_s, \quad (1)$$

$$M_I v_I = 2T_s - R_I, \quad (2)$$

где M_s, M_I - массы судна и айсберга; v_s, v_I - скорости судна и айсберга; T_E - тяга движительного комплекса судна; R_s, R_I - сопротивление воды движению судна и айсберга; T_s - горизонтальная проекция силы натяжения каната, действующая на судно; T_I - натяжение каната, действующее на айсберг.

Множитель 2 в выражениях (1) и (2) учитывает наличие двух ветвей буксировочного каната, с помощью которых осуществляется буксировка. В горизонтальной плоскости между направлением буксировки и буксировочным канатом существует некоторый угол. Для характерных длин каждой из ветвей каната (300 – 400 м) и для характерных поперечных размеров айсберга в направлении буксировки (не более 100 м) этот угол не превышает 10^0 , поэтому соответствующий направляющий косинус примерно равен 1, что и учтено при записи выражений (1) и (2).

Сила сопротивления воды движению судна и айсберга описываются следующими зависимостями:

$$R_s = 0,5C_s \rho_w S_s |v_s| v_s; \quad R_I = 0,5C_I \rho_w S_I |v_I| v_I, \quad (3)$$

где S_s - площадь смоченной поверхности судна; S_I - характерная площадь поперечного сечения айсберга в направлении буксировки; ρ_w - плотность воды; Коэффициенты сопротивления судна $C_s \in (0,004 \div 0,005)$ [7] и айсберга $C_I \in (0,5 \div 2)$ [1,5].

Тяга движительного комплекса судна при небольших скоростях движения (меньших 3 м/с) может быть представлена линейной функцией скорости судна v_s :

$$\frac{T_E}{T_E^{\max}(N)} = 1 - 0,06v_s, \quad (4)$$

где $T_E^{\max}(N)$ - тяга двигателей судна на швартовном режиме, зависящая от подаваемой на них мощности N .

Эта зависимость описывается следующим выражением, которое получено на основании данных работы [8] и учитывает отсутствие возможности возникновения второй стадии кавитации на гребных винтах, мощность задается в кВт:

$$T_E^{\max} = 0,195N^{0,933}, \quad \text{кН.} \quad (5)$$

Формула (5) получена применительно к двухвинтовым судам, которые обычно используются при выполнении буксировочных операций. При начале движения судна из положения покоя набор мощности выполняется судоводителями ступенчато, например, с шагом по 25% N . Временная протяженность каждой ступеньки относительно небольшая, примерно 1 – 2 мин. Поэтому полный набор мощности осуществляется примерно за 4 – 6 мин. Для определения тяги движителей на швартовном режиме при парциальных значениях мощности можно использовать выражение (5), внося в него небольшую корректировку:

$$T_E^{\max} = 0,195k^{0,666} N^{0,933}, \quad (6)$$

где $k \in (0,1)$ - коэффициент, показывающий какая часть от полной мощности используется в данный момент времени.

Во введении указывалось, что для буксировки айсбергов используется плавающий синтетический канат. Термин «плавающий» используется здесь в двух смыслах. Во-первых, он указывает на положительную плавучесть каната, которая обеспечивает возможность довольно просто выполнять операцию по его заводке. Во-вторых, термин «плавающий» указывает на способ передачи усилия от буксировщика к айсбергу. В этом смысле «плавающим» является канат, у которого перед айсбергом имеется лежащий на воде некоторый участок его длины. Нагрузка на айсберг передается только в горизонтальной плоскости. В такой трактовке «плавающий» канат аналогичен «длинной» якорной цепи, используемой для удержания плавучих объектов [3]. Математическая модель такого плавающего каната предложена в работе [4]. В соответствии с этой моделью, пренебрегая инерционными эффектами, сила натяжения каната у айсберга будет равна:

$$T_I = T_{st} = \frac{WA^2}{2H_s}, \quad (7)$$

где T_{st} - значение силы натяжения в лежащем на воде участке троса; W - погонный вес троса; A - ордината точки касания канатом поверхности воды (начало декартовой системы координат с кормой судна, ось OX совпадает с поверхностью воды, ось OY направлена вертикально вверх); H_s - высота точки крепления каната над уровнем воды.

Горизонтальная проекция силы натяжения каната в точке его крепления к судну будет равна:

$$T_s = (T_{st} + WH_s) \cos \varphi, \quad (8)$$

где $\varphi = \arctg(2H_s/A)$ - угол между горизонталью и канатом.

При выводе соотношений (7) и (8) предполагалось, что буксирный канат не имеет вставок из стального троса. Зависимость длины каната от его натяжения может быть записана следующим образом [4]:

$$T_{st} = k_1\delta + k_2\delta^3; \quad \delta = \frac{l_r - l_0}{l_0}, \quad (9)$$

где δ – относительное удлинение отдельной ветви каната; $k_1 = 5 \cdot 10^5$ Н и $k_2 = 10,5 \cdot 10^6$ Н – эмпирические коэффициенты, соответствующие жесткостной характеристике синтетического каната; l_r, l_0 – текущая и начальная длины отдельной ветви каната соответственно.

Для замыкания математической модели (1) и (2) используется следующее соотношение:

$$l_0\delta = v_s - v_I. \quad (10)$$

Начальные условия

Для решения сформулированной задачи Коши для системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений (1), (2) и (10) необходимо установить начальные условия. Тривиальные начальные условия $\delta = v_s = v_I = 0$ при $t = 0$ приводят, вследствие выражений (7) – (9), к требованию $A = 0$, что может быть реализовано только при условии изгиба каната на угол $\pi/2$ под кормой судна. Очевидно, что буксирный канат обладает изгибной жесткостью, которая не допускает такую конфигурацию. Поэтому необходимо сформулировать начальные условия иначе.

В качестве начальной примем следующую ситуацию. Двигатели судна-буксировщика развивают некоторое небольшое тянущее усилие T_{E0} , которое целиком компенсируется горизонтальной проекцией силы натяжения каната в точке его крепления к судну:

$$T_{E0} = 2(T_{st} + WH_s)\cos\varphi. \quad (11)$$

Используя соотношения (7) и (8), из этого выражения можно исключить T_{st} , в результате получается алгебраическое уравнение, решение которого позволяет определить величину A :

$$T_{E0} = 2\left(\frac{WA^2}{2H_s} + WH_s\right)\cos\left[\arctg\left(\frac{2H_s}{A}\right)\right]. \quad (12)$$

После этого по формуле (8) определяется T_{st} , а по формуле (9) соответствующее этому натяжению значение относительного удлинения каната δ^* .

Теперь начальные условия можно сформулировать следующим образом:

$$v_s = v_I = 0; \quad \delta = \delta^* \quad \text{при} \quad t = 0. \quad (13)$$

При формулировке этих условий предполагалось, что величиной скорости айсберга, которая должна была возникнуть под действием силы натяжения T_{st} можно пренебречь из-за большой его инерционности.

Стационарное решение

В работе [4] показано, что сформулированная задача (1), (2) и (10) имеет стационарное решение, которое описывает буксировку с постоянной скоростью:

$$v_s = v_I, \quad 2T_I = R_I, \quad T_E = 2T_S + R_s. \quad (14)$$

На основании соотношений (14) параметры стационарного режима могут быть определены как решение следующей системы уравнений:

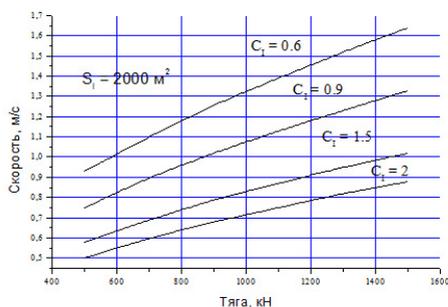
$$T_E^{\max} (1 - 0,06v_s) = \left(\frac{WA^2}{H_s} + 2WH_s \right) \cos \left[\arctg \left(\frac{2H_s}{A} \right) \right] + 0,5C_s \rho_w S_s v_s^2, \quad (15)$$

$$\frac{WA^2}{H_s} = 0,5C_I \rho_w S_I v_s^2.$$

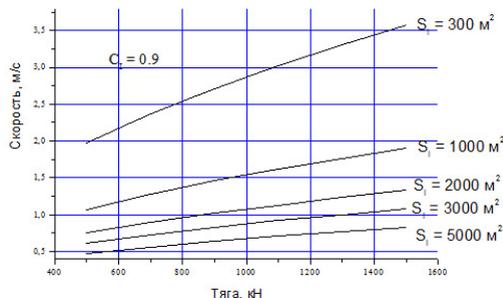
Принимая во внимание, что при стационарной буксировке $\frac{WA^2}{H_s} \approx 2WH_s$ и $\cos[\arctg(2H_s/A)] \approx 1$, для определения величины стационарной скорости получим следующее выражение:

$$v_s = \frac{0,067 \frac{T_E^{\max}}{\rho_w}}{(C_I S_I + C_s S_s)} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{555,5 \rho_w (C_I S_I + C_s S_s)}{T_E^{\max}}} \right). \quad (16)$$

Результаты расчетов по формуле (16) представлены на рис.1. При проведении расчетов в качестве прототипа буксировщика было принято ледокольное судно обеспечения с $S_s \approx 2500 \text{ м}^2$, $H_s = 5 \text{ м}$.



а)



б)

Рис.1 Зависимости скорости стационарной буксировки айсберга от тяги движителей и от параметров айсберга. а – влияние коэффициента сопротивления айсберга; б – влияние площади поперечного сечения айсберга, определенной в направлении буксировки.

Результаты численных расчетов

В реальных условиях скорость выхода судна на режим движения, характеризующийся максимальным тяговым усилием, зависит от типа энергетической установки. Увеличение частоты вращения движителей происходит ступенчато примерно за 6 этапов. Для дизельной энергетической установки характерное время, затрачиваемое на каждый этап, составляет примерно 15 мин. Для электрической энергетической установки это время составляет в среднем 2,5 мин.

На рис. 2 и 3. приведены результаты расчетов параметров буксировки айсберга массой 40000 т ледокольным судном обеспечения массой 10000 т с дизельной и электрической энергетическими установками. При расчетах коэффициент сопротивления воды движению айсберга был принят $C_f = 0,9$. Начальная длина каната равна 450 м.

Анализ данных, представленных на рис. 2 и 3, позволяет сделать некоторые выводы. Эти выводы развивают и дополняют ранее полученные в работе [2] результаты.

Колебания в системе «буксировщик - канат - айсберг» возникают вне зависимости от типа энергетической установки судна. Причем наибольшее усилие в канате возникает при первом колебании, когда айсберг строгивается с места и начинает набирать скорость. Видно, что при наличии режима постоянной тяги движителя колебания в системе довольно быстро затухают. Как следует из рис. 2 затухание происходит через 10-15 мин после начала движения. Возобновляются колебания при ступенчатом изменении тяги движительного комплекса. Поэтому для судна с электрической установкой колебания в системе затухают только после полного набора тяги.

Полученный результат противоречит рекомендации, содержащейся в работе [4], в которой предложено набирать максимальную тягу движительного комплекса в течение достаточно большого времени. Хотя по результатам той же работы [4] во время набора тяги система «буксировщик - канат - айсберг» все время находилась в колебательном движении, амплитуда которого в течение примерно часа возрастала. Как показывают результаты, выполненных в этой работе расчетов, возрастание амплитуды колебаний обусловлено постоянным ростом тягового усилия. Поэтому для эффективного гашения колебательного движения в системе при выполнении буксировок на спокойной воде необходимо поддерживать тягу движительного комплекса постоянной.

Расчеты показывают, что наибольшую трудность при выполнении буксировки на тихой воде представляет начальный ее этап. Именно на первом колебании в тресе возникают наибольшие усилия, которые могут привести к его обрыву. Опасные значения натяжений возникают уже при минимально возможных для устойчивого движения буксировщика значениях потребляемой мощности.

Одним из возможных решений проблемы является увеличение прочности буксирного каната, чтобы он мог выдерживать возникающие усилия. Это направление является перспективным, т.к. увеличение прочности канала расширит возможности буксировки айсбергов на волнении.

Другой подход состоит в том что, необходимо разработать специальный режим движения буксировщика в начале буксировки, который, может быть, должен включать остановки и движение задним ходом. Можно ожидать, что такие операции позволят снизить уровень натяжения буксирного каната.

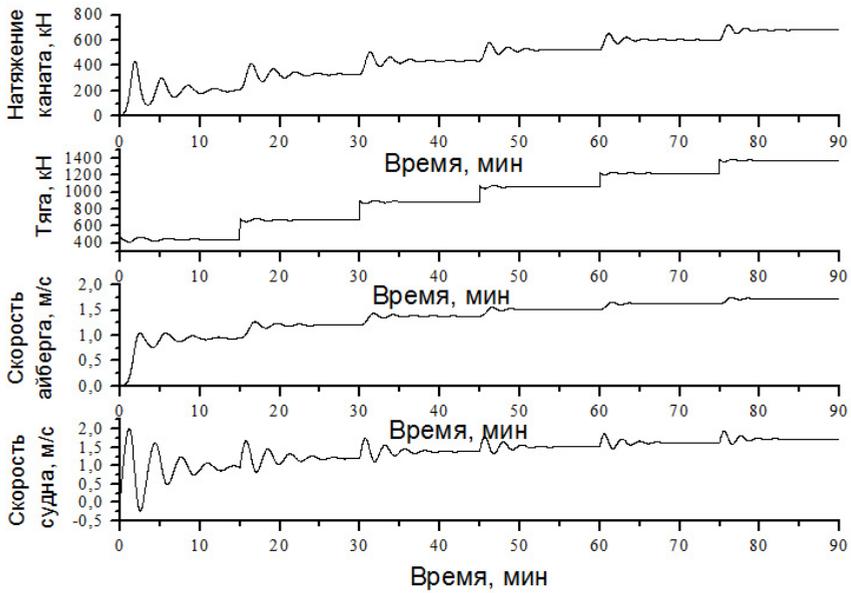


Рис.2. Параметры буксировки айберга судном с дизельной энергетической установкой

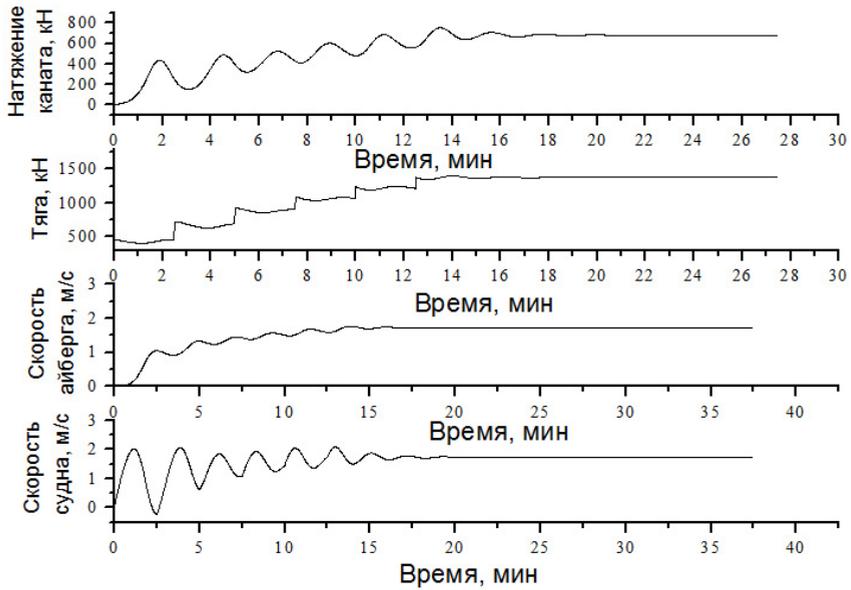


Рис.3. Параметры буксировки айберга судном с электрической энергетической установкой

Литература

1. *Демпстер Р.* Характеристики механики айсбергов./В кн. «Физика и механика льда», М.: Мир, 1983, с. 43-56.
2. *Куликов Н.В., Сазонов К.Е.* Буксировка судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 2003, 156 с.
3. *Кульмач П.П.* Якорные системы удержания плавучих объектов. Л.: Судостроение, 1980, 336 с.
4. *Марченко А.В.* Устойчивость буксировки айсберга./Труды ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, вып.51(335), 2010, с. 69-82.
5. *Роуб Р.К.* Дрейф и разрушение айсбергов./В кн. «Динамика масс снега и льда», Л.: Гидрометеоздат, 1985, 456 с.
6. *Сазонов К.Е.* Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 2010, 274 с.
7. Справочник по теории корабля. В трех томах., т.1. Гидродинамика. Сопротивление движению судов. Судовые движители/Под ред. Я.И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985, 768 с.
8. *Цой Л.Г.* Морские ледоколы. Особенности проектирования. Учеб. пособие, СПбГМТУ; СПб., 2003, 110 с.