

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ЛЬДА ИЗ ДОКОВОГО КОМПЛЕКСА

Чернышев Игорь Александрович

Инженер проектного отдела, e-mail: kirpichok@ya.ru

Сухоруков Андрей Львович

Д.т.н., зам. начальника проектного отдела,

АО «Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин»
191119 Россия, Санкт-Петербург, ул. Марата, 90 e-mail: su_andr@yahoo.com

Аннотация. В работе на основе методов численного решения уравнений динамики вязкой жидкости определены гидродинамические характеристики системы удаления льда из докового комплекса (ДК). Показана практическая возможность реализации данной системы удаления льда за счет использования насосов, предназначенных для заполнения и осушения балластных отсеков ДК. Рассчитаны поля потока и касательные напряжения на нижней поверхности ледового поля для различных вариантов расположения потокообразователей. Определена допустимая скорость ветра, при которой обеспечивается удаление льда из ДК при различной осадке и различном расположении отверстий для создания направленного потока.

Ключевые слова: доковый комплекс, система удаления льда, вычислительная гидродинамика, Ansys Fluent.

Цитирование: Чернышев И.А., Сухоруков А.Л. Численное моделирование системы гидродинамического удаления льда из докового комплекса // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №2 (10). С. 136–145. DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-14

Введение. В настоящей статье рассмотрена работа системы гидродинамического удаления битого льда из междубашенного пространства докового комплекса (ДК). При его погружении возможна ситуация, когда куски битого льда могут затечь вместе с водой внутрь ДК. Механические и пневматические заграждения не всегда способны надежно защитить ДК от битого льда в период ввода судна, они не обеспечивают отгон льда от рабочего торца и



Рис. 1. Общий вид ДК

быстрое удаление льда, проникшего в междубашенное пространство. Гидродинамический способ более эффективен, так как позволяет использовать насосы для создания направленного поверхностного потока, струи которого выводят шугу и битый лед за пределы ДК.

Для создания поверхностного течения, выталкивающего битый лед, используются потокообразователи, установленные в стенах башен ДК. Их

количество соответствует количеству насосов, необходимых для заполнения или осушения балластных цистерн. Установлено, что наибольшей влекущей силой и дальностью обладает струя со скоростью истечения около 2,5-3,0 м/с [4].

Цель настоящей работы заключается в оценке характеристик гидродинамической системы удаления льда из междубашенного пространства ДК в процессе погружения, при воздействии внешних факторов.

Определение сил, перемещающих битый лед в междубашенное пространство, при погружении плавучего ДК. Под воздействием течения, возникающего при погружении плавучего ДК, битый лед стремится попасть в ДК и заполнить междубашенное пространство. Этому способствует и ветер, а в проточных водоемах, также, естественное течение.

Задержание или удаление попавшего в ДК битого льда может быть осуществлено, если соблюдается условие:

$$F_{\text{ПО}} \geq k \cdot F_B \quad (1)$$

где $F_{\text{ПО}}$ – сила гидродинамического воздействия струй, созданных потокообразователями, кгс;

k – коэффициент запаса, принимаемый равным 1,2;

F_B – сумма сил, под воздействием которых битый лед, плавающий на акватории, вталкивается в междубашенное пространство ДК при его погружении, кгс.

В период погружения ДК на окружающее поле битого льда действуют следующие силы [3]:

- сила, обусловленная трением потока о нижнюю поверхность льдин, F_1 ;
- сила, вызываемая трением воздуха о верхнюю поверхность ледяного поля, F_2 ;
- сила, обусловленная уклоном свободной поверхности, F_3 ;
- сила гидродинамического давления на подводную часть торца ледяного поля F_4 .

При движении льда внутри ДК возникает еще одна сила - сила трения льда о внутренние стенки башен ДК и выступающие части. Поскольку сила трения противодействует как силам, вталкивающим лед в ДК, так и гидродинамическому воздействию на лед от создаваемого потока, а по абсолютному значению остается неизменной, этой силой можно пренебречь.

Для учета наихудших условий принимается случай, когда ветер направлен в торец выбранной половины ДК. Тогда суммарная величина силы, вталкивающей лед в ДК, составит:

$$F_B = F_1 + F_2 + F_3 + F_4. \quad (2)$$

Значения составляющих F_1 , F_2 и F_4 могут быть выражены через скоростные напоры:

$$F_1 = k_1 v^2 BL; \quad F_2 = k_2 W^2 BL; \quad F_4 = k_4 v^2 Bfh, \quad (3)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий трение воды о нижнюю поверхность льда и плотность воды при температуре 0°С, принимается равным 0,5 кгс·с²/м⁴;

v – поверхностная скорость потока, втекающего в ДК, м/с;

L – длина, перемещающегося внутри ДК ледового поля, принимается равной $3B$, так как увеличение длины свыше (2,5 – 3,0) B не вызывает дальнейшего роста влекущей силы потока, м;

B – ширина ледового поля, м;

W – скорость ветра, м/с;

k_2 – коэффициент, учитывающий трение воздуха о верхнюю поверхность льда и плотность воздуха в диапазоне температур от -20° до $+10^\circ\text{C}$, принимается равным $0,002 \text{ кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$;

k_4 – коэффициент, учитывающий форму поперечного сечения и условия обтекания льдин, а также плотность воды при температуре 0°C , принимается равным $50 \text{ кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$;

f – коэффициент, учитывающий долю погруженной в воду площади торцов льдин, на которую воздействует гидродинамическое давление потока, принимается равным $0,46$.

h – средняя толщина льда, принимается равной $0,5 \text{ м}$.

Одним из основных факторов, оказывающих силовое воздействие на передвижение льда, является поверхностная скорость потока, заполняющего междубашенное пространство при погружении ДК:

$$v_D = \frac{H_{СП}}{T}; v_0 = \frac{L}{2} \cdot \frac{v_D}{H_B}; v = v_0 \cdot \alpha, \quad (4)$$

где

v_D – средняя скорость погружения ДК, с;

v_0 – скорость невозмущенного потока, возникающая на акватории перед торцом ДК при его погружении, м/с;

α – безразмерный коэффициент, на соответствующей стадии погружения, зависящий от величины $X = \frac{H_{СП}}{H_B}$, снимаемый с графика (рис. 2);

H_B – глубина водоема или проходного канала перед ДК, принимается равной 30 м ;

$H_{СП}$ – глубина слоя воды над стапель-палубой, м;

T – время погружения ДК на максимальную величину от момента погружения стапель-палубы, с.

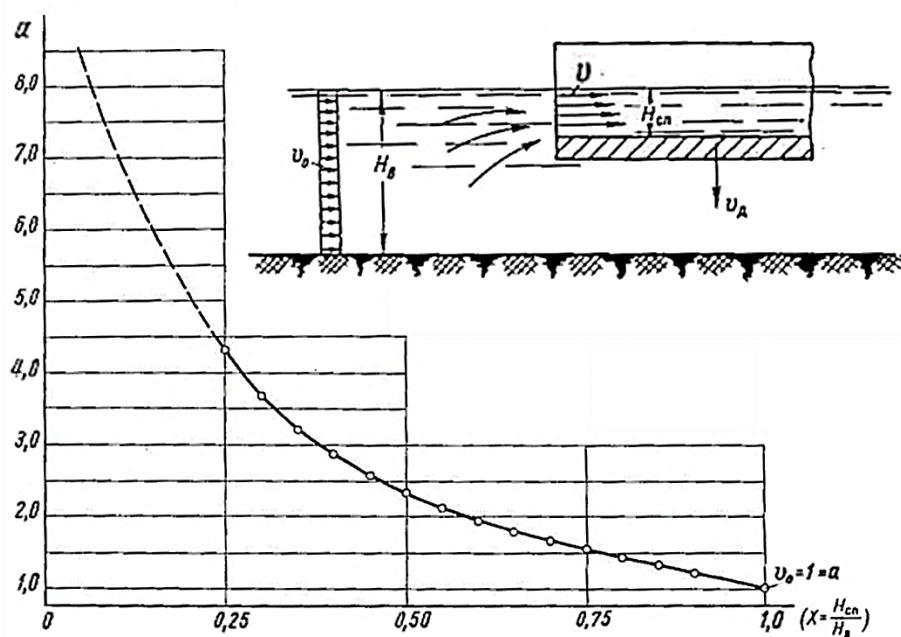


Рис. 2. График изменения величины коэффициента поверхностной скорости потока α на различных стадиях погружения ДК [2]

Сила, обусловленная уклоном свободной поверхности потока F_3 , определяется как алгебраическая сумма проекций сил: G (веса льда) и N (силы плавучести) на горизонтальную ось. Эти силы могут быть определены по формулам:

$$G = \gamma_{\text{л}}BLh; \quad N = G \cdot \cos\delta = \gamma_{\text{л}}BLh \cdot \cos\delta . \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{л}}$ – удельный вес льда, принимаемый равным 920 кгс/м^3 .

Проекция этих сил на горизонтальную ось и будет искомой силой:

$$F_3 = N \cdot \sin\delta = \gamma_{\text{л}}BLh \cdot \cos\delta \cdot \sin\delta = 0,5\gamma_{\text{л}}BLh \cdot \sin 2\delta . \quad (6)$$

Угол уклона свободной поверхности δ создается при погружении ДК вследствие некоторого отставания в выравнивании уровня поверхности воды на полудлине ДК и определяется по формуле:

$$\text{tg}\delta = \frac{\Delta H}{0,5L_{\text{д}}},$$

где ΔH – секундное приращение глубины слоя воды над стапель-палубой, м (по своему значению равно средней скорости погружения ДК $v_{\text{д}}$).

При малых углах $\sin 2\delta \approx \text{tg} 2\delta$. После подстановки в выражение (6) принятых значений, получим:

$$F_3 = 2\gamma_{\text{л}}BLh \frac{\Delta H}{L_{\text{д}}} = 2\gamma_{\text{л}}BLh \frac{v_{\text{д}}}{L_{\text{д}}}. \quad (7)$$

Подставляя в зависимость (2) значения F_1, F_2, F_3, F_4 получаем формулу, определяющую максимальную величину силы, под воздействием которой лед проникает в ДК:

$$F_{\text{в}} = k_1v^2BL + k_2W^2BL + 2\gamma_{\text{л}}BLh \frac{v_{\text{д}}}{L_{\text{д}}} + k_4v^2Bfh . \quad (8)$$

Транспортирующая способность потока, созданного потокообразователями, представляет собой сумму тех же по физической сущности сил, которые воздействуют на лед при вталкивании его в погружающийся ДК. В отличие от них в суммарной силе созданного потока отсутствует составляющая F_2 , учитывающая воздействие ветра. Поскольку сила F_3 возникает и может способствовать удалению льдин только в период всплытия ДК, она относится в запас и не рассматривается. Сила гидродинамического давления F_4 на кромку льдин в данном случае приложена ко всей площади погруженной части торцов льдин и коэффициент площади торцов f в данном случае равен 0,9.

Используя ранее принятые обозначения и численные величины коэффициентов, формула для определения действующей на лед силы создаваемого потока может быть записана в виде

$$F_{\text{по}} = F_1 + F_4 = k_1v_{\text{по}}^2BL + k_4v_{\text{по}}^2Bfh = 1,5v_{\text{по}}^2B(B + 30h) . \quad (9)$$

По условию (1) удаление битого плавающего льда из междубашенного пространства ДК может быть осуществлено при условии $F_{\text{по}} = 1,2F_{\text{в}}$.

Следовательно:

$$v_{\text{по}} = \sqrt{1,2 \frac{k_1v^2BL + k_2W^2BL + 2\gamma_{\text{л}}BLh \frac{v_{\text{д}}}{L_{\text{д}}} + k_4v^2Bfh}{1,5B(B + 30h)}} \quad (10)$$

Построим график зависимости потребной величины поверхностной скорости течения от скорости ветра W .

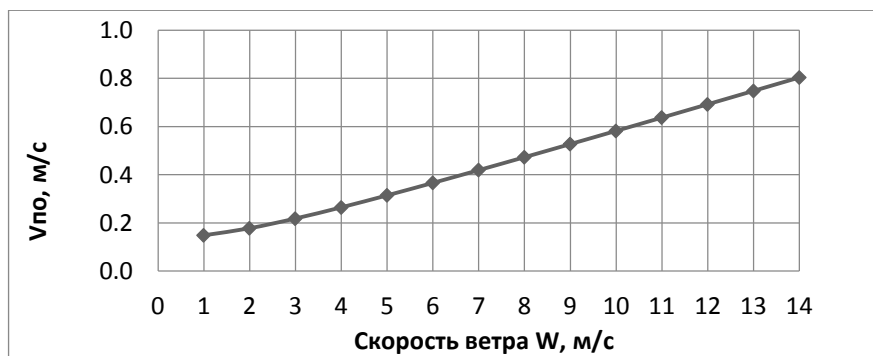


Рис. 3. Зависимость потребной величины поверхностной скорости от скорости ветра W

Параметры расчетной модели. Для оценки влияния расположения отверстий потокообразователей на величину поверхностной скорости в процессе погружения ДК проведен численный расчет с использованием программного комплекса «Ansys Fluent», который позволяет вычислять параметры течений методом численного интегрирования осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса [8]. Для замыкания системы уравнений использовалась к-ε модель турбулентности. В качестве математического аппарата решения уравнений Навье-Стокса использовался метод контрольных объемов.

Характерные размеры расчетной области, соответствующей внутреннему пространству ДК (рис. 4):

- длина L = 230 м;
- высота H = 3,75; 7,5; 15 м (соответствует различным уровням воды);
- ширина B = 30 м.

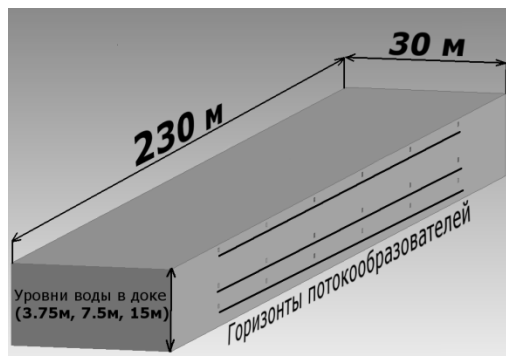


Рис. 4. Геометрия расчетной области

На боковых границах расчетной области (лежащих в плоскости XZ) находится по 6 отверстий, на которых задается скорость потока жидкости V = 3 м/с для двух вариантов расчета:

- с поворотом потока относительно ДП на 30° на борт (вариант №1);
- с поворотом потока относительно ДП на 30° на борт и относительно ОП на 30° вверх (вариант №2).

Ось X – направлена в нос, ось Y – направлена на левый борт, ось Z – направлена вверх.

Площадь каждого отверстия 0,554 м². Площади отверстий выбраны исходя из заданной производительности насосов Q = 3000 м³/ч. Рассматривались три горизонта расположения отверстий.

Приведенная ниже геометрия соответствует уровню воды в ДК 15 м.

Расчет эквивалентной средней скорости поверхностного потока. При расчете эквивалентной средней скорости от действия потокообразователей проводилось сопоставление с аналитической оценкой силы сопротивления пластины на основе формулы Прандтля-Шлихтинга [7], при этом использовались следующие зависимости:

$$F_{X TP.}^{Fluent} = C_x \cdot \frac{\rho \cdot v_{cp}^2}{2} \cdot S; \quad C_x = \frac{2 \cdot F_{X TP.}^{Fluent}}{v_{cp}^2 \cdot \rho \cdot S}; \quad C_{X TP.}^{П-Ш} = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}}; \quad Re = \frac{v_{cp} \cdot L}{\nu}, \quad (11)$$

где v_{cp} – средняя скорость потока от действия потокообразователей, м/с.

$S = B \cdot L$ – площадь поверхности льда, м²;

$F_{X\text{ТР}}^{\text{Fluent}}$ – сила трения, полученная с использованием численного моделирования, Н;

C_x – коэффициент трения, полученный с использованием численного моделирования;

$C_{X\text{ТР}}^{\text{П-Ш}}$ – коэффициент трения пластины, рассчитанный по формуле Прандтля-Шлихтинга;

Приравняв коэффициенты, получим следующее уравнение для определения эквивалентной средней скорости от действия потокообразователей:

$$\frac{2 \cdot F_{X\text{ТР}}^{\text{Fluent}}}{v_{\text{ср}}^2 \cdot \rho \cdot S} = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}} \quad (12)$$

Для расчета касательных напряжений, возникающих на нижней поверхности ледового поля, использовалась зависимость $\tau_{\text{ср}} = \frac{F_{X\text{ТР}}^{\text{Fluent}}}{S}$.

Результаты расчета. Ниже приведены сопоставительные картины, которые наиболее явно показывают зависимость распределения абсолютной величины скорости в различных сечениях от режимов работы потокообразователей и от геометрии расчетных областей.

Верхние части рисунков – вариант №1 (работа потокообразователей с поворотом потока относительно ДП на 30° на борт).

Нижние части рисунков – вариант №2 (работа потокообразователей с поворотом потока относительно ДП на 30° на борт и относительно ОП на 30° вверх).

Уровень воды соответствует значениям 3,75 м (рисунки слева) и 15 м (рисунки справа).

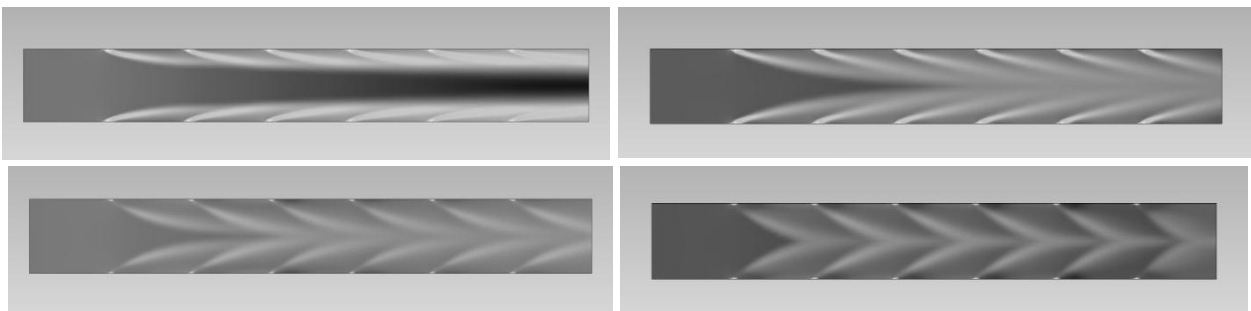


Рис. 5. Распределение абсолютной величины скорости в плоскости расположения осей отверстий, параллельной ОП (1 м ото льда)

Ниже приведены графики гидродинамических касательных напряжений на нижней поверхности ледового поля на различном расстоянии от диаметральной плоскости. Значения получены для линий проведенных вдоль борта ДК.

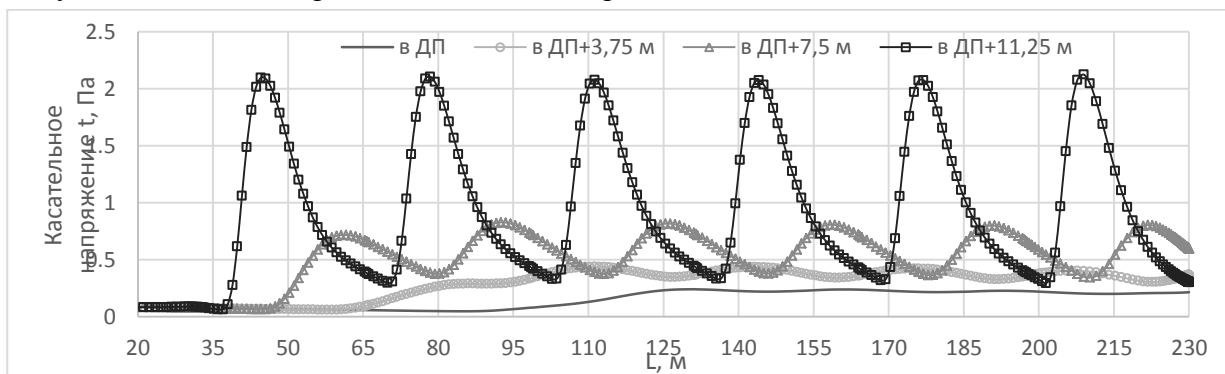


Рис. 6. Уровень воды 15 м, ото льда до центра отверстий – 1 м (вариант №1)

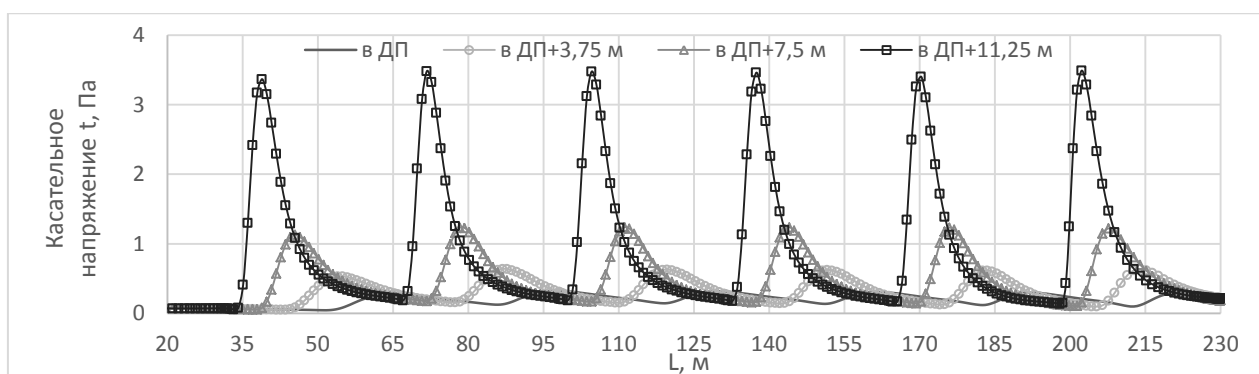


Рис. 7. Уровень воды 15 м, ото льда до центра отверстий – 1 м (вариант №2)

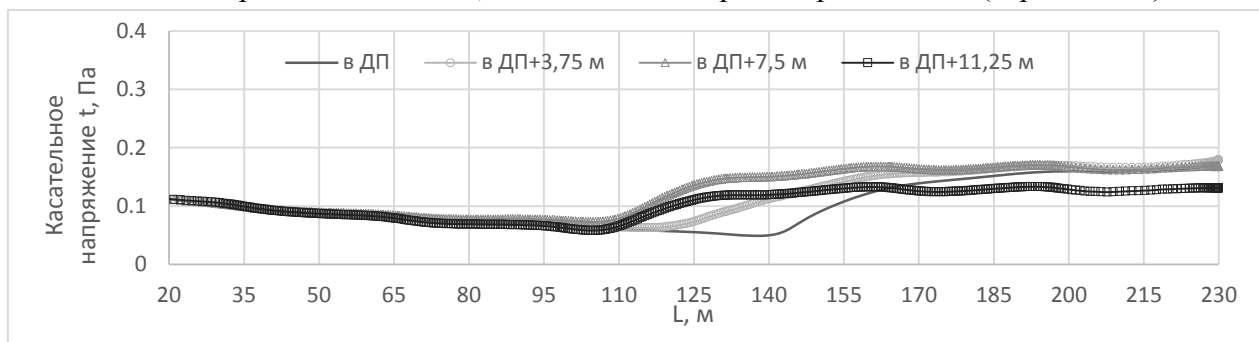


Рис. 8. Уровень воды 15 м, ото льда до центра отверстий – 7,5 м (вариант №1)

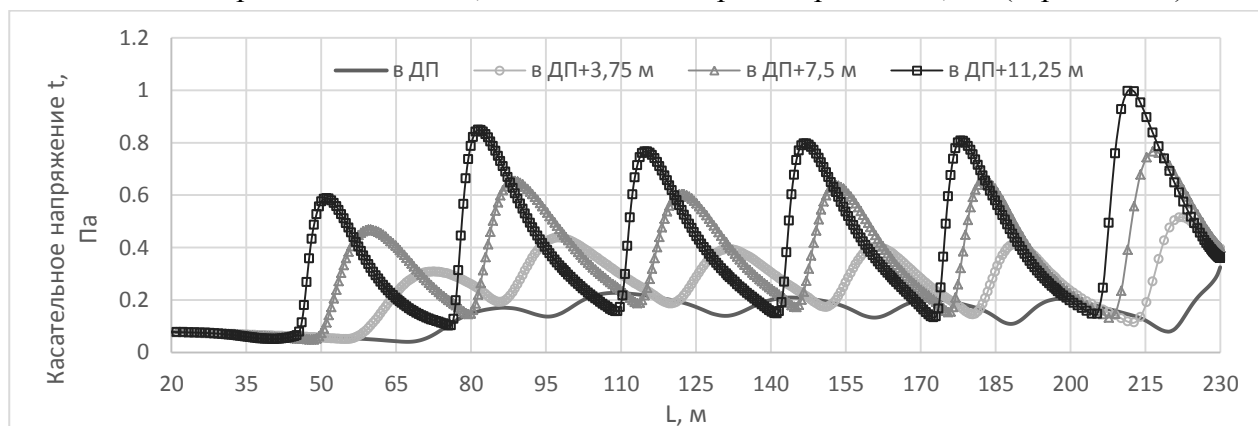


Рис. 9. Уровень воды 15 м, ото льда до центра отверстий – 7,5 м (вариант №2)

Отметим, что абсолютные значения скорости потока в плоскости расположения отверстий оказываются большими, когда оси струй потокообразователей находятся в этой плоскости (вариант №1), однако большее силовое воздействие на ледовое поле оказывают струи наклоненные под углом к плоскости расположения отверстий (вариант №2).

Основную нагрузку на лед для наших расчетных условий оказывают:

- сила, вызываемая трением воздуха о верхнюю поверхность ледяного поля, F_2 (при высоких значениях скорости ветра);

- сила гидродинамического давления на подводную часть торца ледяного поля F_4 .

Анализ результатов и выводы. В таблицах 1 и 2 приведены значения средней скорости потока, силы трения и касательных напряжений, действующих на нижнюю поверхность ледового поля при работе потокообразователей, а также допустимая скорость ветра, при которой обеспечивается удаление льда из ДК.

Таблица 1. Сравнительная таблица для уровней воды 3,75 м и 7,5 м

| Уровень воды в ДК, м | 3,75 | | 7,5 | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Расстояние отверстий ото льда, м | 1 | | 1 | | 3,75 | |
| Вариант работы потокообразователей | №1 | №2 | №1 | №2 | №1 | №2 |
| Сила трения $F_{тр.}$, Н | 3432 | 4500 | 3736 | 4187 | 1347 | 2942 |
| Среднее касательное напряжение $\tau_{ср.}$, Па | 0,50 | 0,65 | 0,54 | 0,61 | 0,20 | 0,43 |
| Средняя скорость потока $V_{ср.}$, м/с | 0,68 | 0,79 | 0,72 | 0,76 | 0,42 | 0,63 |
| Допустимая скорость ветра W , м/с | 11 | 13 | 12 | 13 | 7 | 10 |

Таблица 2. Сравнительная таблица для уровня воды 15 м

| Уровень воды в ДК, м | 15 | | | | | |
|--|------|------|------|------|-------|------|
| Расстояние отверстий ото льда, м | 1 | | 7,5 | | 11,25 | |
| Вариант работы потокообразователей | №1 | №2 | №1 | №2 | №1 | №2 |
| Сила трения F , Н | 3778 | 3840 | 740 | 1802 | 477 | 1025 |
| Среднее касательное напряжение $\tau_{ср.}$, Па | 0,55 | 0,56 | 0,11 | 0,26 | 0,07 | 0,15 |
| Средняя скорость потока $V_{ср.}$, м/с | 0,72 | 0,73 | 0,30 | 0,49 | 0,24 | 0,36 |
| Допустимая скорость ветра W , м/с | 12 | 12 | 4 | 8 | 3 | 5 |

На основе результатов расчета можно сделать следующие выводы:

- для всех вариантов расчета вертикальная составляющая скорости, создаваемая потокообразователями, увеличивает касательные напряжения на нижней поверхности ледового поля;
- уменьшение расстояния отверстий ото льда увеличивает величину поверхностной скорости потока;
- расположение отверстий потокообразователей на расстоянии 1 м ото льда для всех вариантов уровней воды позволяет обеспечить удаление льда при скорости ветра более 10 м/с.

Заключение. В работе на основе методов численного решения уравнений динамики вязкой жидкости определены гидродинамические характеристики системы удаления льда из докового комплекса. Показана практическая возможность реализации данной системы удаления льда за счет использования насосов, предназначенных для заполнения и осушения балластных отсеков ДК.

Рассчитаны поля потока и касательные напряжения на нижней поверхности ледового поля для различных вариантов расположения потокообразователей. Определена допустимая скорость ветра, при которой обеспечивается удаление льда из ДК при различной осадке и различном расположении отверстий для создания направленного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева М.А., Луферчик Я.С., Ручкинова О.И. Анализ мероприятий по борьбе с шугой // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура №2015. С. 218-236 DOI: 10.15593/2224-9826/2015.2.15
 2. Баланин В.В. Построение поля скоростей в плоской свободной турбулентной струе при неравномерном начальном распределении скоростей по сечению // Труды ЛИИВТа. 1952. вып. XIX. С. 32–48.
 3. Иванов Л.В. Зимняя эксплуатация объектов водного транспорта. М. Изд. «Транспорт». 1978. 212 с.
 4. Иванов Л.В. Методика расчета потокообразующего комплекса для защиты плавучих доков от попадания битого льда при доковании судов // Судоремонт флота рыбной промышленности. 1969. № 12. С. 33–40.
 5. Колосов М.А., Ушакевич А. Н., Федотова О. А. Насосная система для создания майны у причала в период зимней навигации // Гидротехника. СПб. Изд. «ПортНьюс». 2009. № 3. С. 30–33.
 6. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. Л.: Гидрометеиздат. 1967. 461 с.
 7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Издательство иностранной литературы. 1956. 528 с.
 8. Ansys Fluent 14.5. User Guide. Режим доступа: <http://ansys.com>
-

UDK 629.12

NUMERICAL SIMULATION OF THE HYDRODYNAMIC REMOVAL OF BROKEN ICE SYSTEM FROM DOCK COMPLEX

Igor A. Chernyshev

Engineer of design department, e-mail: kirpichok@ya.ru

Andrey L. Sukhorukov

Dr. Sci. Tech., Deputy head of the design department, e-mail: su_andr@yahoo.com

The Central Design Bureau for Marine Engineering “Rubin”

90, Marat Str., 191119, St. Petersburg, Russia

Abstract. In this work, the hydrodynamic characteristics of broken ice removal system from dock complex (DC) were calculated on the base of computational solving equations methods of viscous fluid dynamics. The feasibility of this system using pump units that intended for filling and Dewatering of the dock ballast compartments.

Fields of stream and tangent stress on the under shelf of the ice floe for variations of flow developers positions were calculated. Allowable wind speed was designed for providing the removal of broken ice from the DC with different trims and different positions of hole for developing of directions flow.

Keywords: dock complex, removal of broken ice system, computational fluid dynamics, Ansys Fluent.

References

1. Avdeeva M.A., Luferschik Ia.S., Ruchkinova O.I. Analiz meropriiati po borbe s shugoi [The analysis of methods of fight against sludge ice] // Vestnik PNIPU Stroitelstvo i arhitektura = Reporter of Perm National Research Polytechnic University. Building and architecture №2015. Pp. 218-236 (in Russian) DOI: 10.15593/2224-9826/2015.2.15
2. Balanin V.V. Postroenie polia skorostei v ploskoi svobodnoi turbulentnoi strue pri neravnomernom nachalnom raspredelenii skorostei po secheniiu [Construction of a field of velocities in flat free turbulent flow at unequal-dimensional initial distribution of velocities on cut] // Leningradskiy institut inzhenerov vodnogo transporta: trudy = Leningrad Institute of Water Transport Engineers: proceedings. 1952. vol. 19. Pp. 32–48. (in Russian)
3. Ivanov L.V. Zimniaia ekspluatatsiia obektov vodnogo transporta [Winter operation of water transport facilities]. Moscow. Transport. 1978. 212 p. (in Russian)
4. Ivanov L.V. Metodika rascheta potokoobrazuiushchego kompleksa dlia zashchity plavuchikh dokov ot popadaniia bitogo lda pri dokovanii sudov [Method for calculating the flow-forming complex for protecting floating docks from falling broken ice during docking of ships] // Sudoremont flota rybnoy promyshlennosti = Ship repair fleet fishing industry. 1969. no. 12. Pp. 33–40. (in Russian)
5. Kolosov M.A., Ushakevich A. N., Fedotova O. A. Nasosnaia sistema dlia sozdaniia mainy u prichala v period zimnei navigatsii [Pump system for pool generation on the berth in winter-navigation season] // Gidrotekhnika = Hydrotechnics St. Petersburg. Portnews. 2009. no. 3. Pp. 30–33. (in Russian)
6. Peschanskii I.S. Ledovedenie i ledotekhnika [Iceology and ice technology]. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1967. 461 p. (in Russian)
7. Schlichting G. Teoriya pogramichnogo sloya [The boundary layer theory]. Moscow. Izdatel'stvo inostrannoy literatury = Foreign Literature Publishing House. 1956. 528 p. (in Russian)
8. Ansys Fluent 14.5. User Guide. Available at: <http://ansys.com>