

УДК 623.618.

Ю.В. Данилов, В.И. Левчин, А.В. Уланов, А.С. Федоров

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЯ КОРАБЛЯ

Данилов Юрий Васильевич, закончил факультет автоматизированных систем управления ВМУРЭ им. А.С. Попова. Старший научный сотрудник НИЦ ОСО ФГУ «24 ЦНИИ МО РФ». Имеет статьи и публикации в области математического моделирования вооруженной борьбы на море, а также в области анализа управления рисками. [Тел.: (812) 450-50-79, доб. 118].

Левчин Вячеслав Игоревич, закончил факультет математического обеспечения автоматизированных систем управления ВМУРЭ им. А.С. Попова. Заместитель начальника отдела НИЦ ОСО ФГУ «24 ЦНИИ МО РФ». Имеет статьи и публикации в области математического моделирования вооруженной борьбы на море, а также в области анализа управления рисками. [Тел.: (812) 450-50-79, доб. 118].

Уланов Алексей Васильевич, закончил факультет автоматизированных систем управления ВМУРЭ им. А.С. Попова. Начальник отдела НИЦ ОСО ФГУ «24 ЦНИИ МО РФ». Имеет статьи и публикации в области математического моделирования вооруженной борьбы на море, а также в области анализа управления рисками. [Тел.: (812) 450-50-79, доб. 118].

Федоров Алексей Сергеевич, закончил факультет математического обеспечения автоматизированных систем управления ВМУРЭ им. А.С. Попова. Адъюнкт ФГУ «24 ЦНИИ МО РФ». Имеет статьи и публикации в области математического моделирования вооруженной борьбы на море, а также в области анализа управления рисками. [E-mail: fedorov_a@list.ru].

Аннотация

В настоящей статье рассмотрена топология гидродинамического поля корабля и предложены подходы к расчету его параметров как для спокойной воды, так и с учетом волнения. Полученная модель позволяет вычислять избыточные давления, создаваемые кораблем в процессе движения, применительно к произвольной точке пространства. Ценность предлагаемого подхода заключается в том, что он опирается на достаточно простые математические зависимости и использует доступные исходные данные. Достижимая при этом точность достаточна для проведения оперативно-тактических расчетов.

Ключевые слова: гидромеханика, гидродинамическое поле корабля, топология гидродинамического поля, расчет параметров гидродинамического поля.

Abstract

The present article deals with topology of hydrodynamic field of ship and proposes approaches to calculations of its parameters for both still water and waves. The resultant model allows calculating overpressure generated by ship during ship's motion for an arbitrary space point. The value of the proposed approach consists in the fact that it is based on sufficiently simple mathematical dependencies and uses available source data. The achieved accuracy is sufficient for operational and tactical calculations.

Key words:

hydromechanics, ship hydrodynamic field, topology of hydrodynamic field, calculation of hydrodynamic field parameters.

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Движущийся корабль возмущает окружающую водную среду, сообщая составляющим ее частицам воды некоторые скорости, которые уменьшаются по мере удаления от его корпуса. Изменение скоростей частиц жидкости приво-

дит к локальным изменениям давления вокруг корпуса корабля, создавая таким образом его гидродинамическое поле.

Исследования показывают, что гидродинамическое поле корабля состоит из трех ярко выраженных областей (см. рис. 1, данный рисунок заимствован из [2]). Две из них — носовая и кор-

мовая, представляют собой зоны повышенного давления, а центральная область характеризуется пониженным давлением. Возникновение зон повышенного давления в носовой и кормовой частях корабля обусловлено торможением частиц жидкости и, как следствие, падением скоростного напора. Возникновение зоны пониженного гидродинамического давления вызвано резким ускорением частиц жидкости и увеличением скоростного напора в потоке. Протяженность зоны пониженного давления в среднем составляет около 70% от длины корабля.

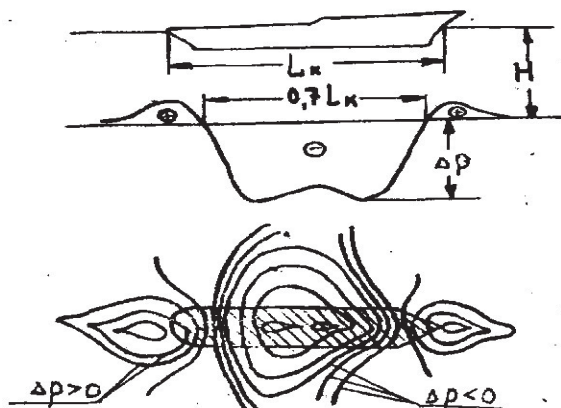


Рис. 1. Распределение давлений в гидродинамическом поле корабля [2]

При движении корабля возмущения передаются всем новым частицам жидкости, а величина и направление этих возмущений относительно корабля остаются неизменными, поэтому гидродинамическое поле можно рассматривать как движущееся вместе с кораблем. Как показано на рисунке 1, гидродинамическое поле корабля не является локализованным в поперечной плоскости и распространяется по траверзу на десятки и сотни метров.

Возмущения частиц воды, вызванные движением корабля, по интенсивности часто бывают ниже возмущений, обусловленных такими природными явлениями, как течения, приливы и отливы, ветровые и внутренние волны. Из перечисленных природных явлений основную долю возмущений вносят морские ветровые волны. Поэтому принято различать собственное гидродинамическое поле корабля (определяется для спокойного моря) и поле волнения. При вычислении параметров суммарного гидродинамического поля корабля с учетом волнения производится сложение соответствующих избыточных давлений.

2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

2.1 Параметры гидродинамического поля корабля для спокойной воды

Аналитический расчет параметров гидродинамического поля корабля является весьма слож-

ной задачей, относящейся к области физики, называемой гидромеханикой и изучающей закономерности равновесия и движения жидкостей. Задачи теоретической гидромеханики, связанные с аналитическим расчетом гидродинамического поля корабля как тела сложной формы для произвольных условий его движения, строгого аналитического решения не имеют. Однако с учетом введения ряда граничных условий (частных случаев) данная задача может быть сведена к решению дифференциального уравнения Лапласа, предполагающего «упорядоченное» обтекание корпуса корабля, движущегося равномерно и прямолинейно в безграничном потоке жидкости без учета волнообразования. Это позволяет получить достаточно простые зависимости, описывающие избыточное давление, создаваемое кораблем, для различных скоростей его движения. Основные математические зависимости, которые предлагается использовать для расчета параметров гидродинамического поля корабля в спокойной воде, приведены в п. 3.1.

Следует отметить, что упомянутые зависимости не являются строгими с точки зрения всего многообразия условий внешней среды и не применяются в расчетах, связанных с проектированием кораблей, однако, могут быть использованы для оперативно-тактических расчетов с приемлемой степенью точности, которая определяется принятой степенью детализации моделирования и имеющимися исходными данными.

2.2 Параметры гидродинамического поля волн

Основным видом возмущений, вызывающих изменения давления водной среды, являются морские волны, обусловленные ветрами, изменениями атмосферного давления, гравитационного поля Земли, влиянием Луны, подводными вулканическими и сейсмическими явлениями и т.п. [2]. В настоящей работе рассматриваются главным образом ветровые волны, которые имеют высоту до нескольких метров, периоды до 15-20 сек, длину до нескольких сотен метров и оказывают существенное влияние на суммарное гидродинамическое поле корабля.

Математические зависимости для учета гидродинамического поля ветровых волн приведены в п. 3.2.

3 ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ

3.1 Математические зависимости для спокойной воды

Величина гидродинамического давления измеряется в паскалях (Па). Иногда в литературе можно встретить и другие единицы измерения, например, килограмм на квадратный метр или миллиметр водяного столба.

$$1 \text{ кг/кв.м} = 1 \text{ мм.вод.ст.} = 9,81 \text{ Па}$$

С учетом ряда граничных условий избыточное давление, создаваемое кораблем, может

быть описано следующей формулой [1]:

$$\Delta P = -\rho \cdot U_0^2 \cdot k_g \cdot f(\bar{R}), \quad (1)$$

где ρ - плотность воды;

U_0 - скорость хода корабля;

k_g - коэффициент гидродинамического поля;

$f(\bar{R})$ - функция расстояния от центра тяжести корабля.

Коэффициент гидродинамического поля k_g , являющийся функцией размерений корабля и глубин моря, может быть вычислен следующим образом [1]:

$$k_g = \frac{\sigma_k}{2\pi} \cdot \frac{L}{B} \cdot \bar{B}^2 \cdot \bar{T}, \quad (2)$$

где L - длина корабля;

\bar{B} - относительная ширина корабля;

\bar{T} - относительная осадка корабля;

B - ширина корабля;

σ_k - коэффициент объемной полноты корпуса корабля.

С учетом соотношений:

$$\bar{B} = \frac{B}{h_m}, \quad \bar{T} = \frac{T}{h_m},$$

получаем следующее выражение:

$$k_g = \frac{\sigma_k}{2\pi} \cdot \frac{L}{B} \cdot \frac{B^2}{h_m^2} \cdot \frac{T}{h_m}.$$

И окончательно:

$$k_g = \frac{\sigma_k}{2\pi} \cdot \frac{L \cdot B \cdot T}{h_m^3}. \quad (3)$$

Функция расстояния характеризует взаимное положение корабля и точки, для которой производится вычисление избыточного давления с учетом глубины моря. Значение данной функции может быть вычислено следующим образом [1]:

$$f(\bar{R}) = \sqrt{\bar{x}_h^2 + \bar{y}_h^2 + \bar{z}_h^2} = \sqrt{\left(\frac{x}{h_m}\right)^2 + \left(\frac{y}{h_m}\right)^2 + \left(\frac{z}{h_m}\right)^2}. \quad (4)$$

Пример расчета параметров гидродинамического поля корабля приведен в таблице 1. В качестве исходных данных для расчета приняты следующие параметры:

1 Измерения корпуса корабля: длина (L) - 100 м, ширина (B) - 15 м, осадка (T) - 8 м, коэффициент объемной полноты - 0,55.

2 Скорость корабля - 10 узлов.

3 Плотность воды - 1040 кг/куб.м.

4 Глубина моря - 40 м.

5 Глубина точек расчета - 40 м (на дне).

6 Место точек расчета - под килем корабля (в диаметральной плоскости).

7 Расчетное значение коэффициента гидродинамического поля - 0,016421178 (получено при помощи (3) на основе имеющихся исходных данных).

Таблица 1

Распределение избыточного гидродинамического давления под килем корабля

№ п/п	X, м	f(R)	Δp (Па)
1	50	-0,20216	345,2526
2	40	-0,17678	301,8997
3	30	-0,04096	69,95159
4	20	0,286217	-488,802
5	10	0,751944	-1284,17
6	0	1	-1707,8
7	-10	0,751944	-1284,17
8	-20	0,286217	-488,802
9	-30	-0,04096	69,95159
10	-40	-0,17678	301,8997
11	-50	-0,20216	345,2526

Данные, приведенные в таблице 1, могут быть проиллюстрированы следующим образом (см. рис. 2).

Приведенные математические зависимости позволяют представить объемную конфигурацию гидродинамического поля корабля путем расчета нескольких продольных характеристик

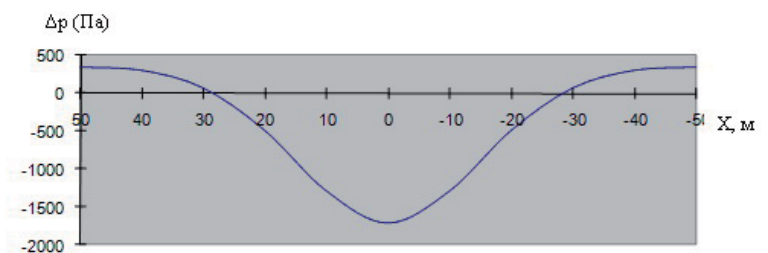


Рис. 2. График изменения избыточного давления под килем корабля

поля для фиксированных значений Y (расстояние от диаметральной плоскости корабля). Пример объемной конфигурации гидродинамического поля корабля для тех же исходных данных, что и в предыдущем примере для траверзных расстояний, изменяющихся в пределах от -120 м (левый борт) до 120 м (правый борт), приведен на рисунке 3. Отметим, что в соответствии с изложенной организацией расчета собственное гидродинамическое поле корабля симметрично относительно как диаметральной плоскости, так и плоскости мидель-шпангоута, что свидетель-

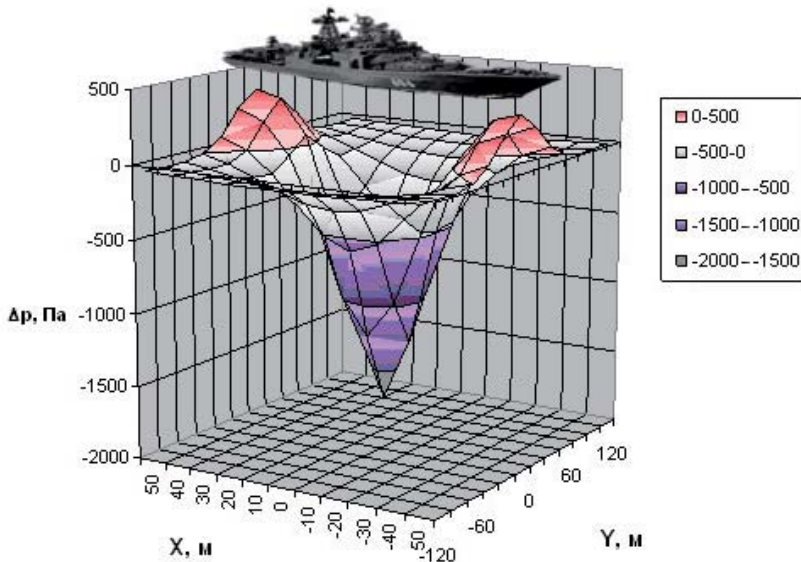


Рис. 3. Пример объемной конфигурации гидродинамического поля корабля (избыточные давления, Па) для глубины 40 м

ствует об определенной погрешности вычислений, связанной с отличиями формы реального корабля от его идеальной модели (для сравнения см. рис.1).

3.2 Математические зависимости для ветровых волн

Изменение давления на грунте от ветровых волн может быть определено на основе следующего соотношения [2]:

$$\Delta p = \frac{9,81 \cdot 10^3 h_B}{2 ch \left(2\pi \frac{H}{\lambda_B} \right)} \sin \frac{2\pi t}{T_B}, \text{ Па}, \quad (5)$$

где t - текущее время моделирования, с;

T_B - период волны, с;

h_B - высота волны, м;

H - глубина моря, м;

λ_B - длина волны, м.

Период волны T_B определяется из соотношения

$$T_B = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_B}{g} cth \frac{2\pi H}{\lambda_B}}, \quad (6)$$

где g - ускорение силы тяжести;

H - глубина моря, м;

λ_B - длина волны, м.

Символы ch и cth , использованные в выражениях (5) и (6), обозначают гиперболический косинус и гиперболический котангенс соответственно. Вычисление данных величин производится по следующим формулам:

$$ch x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}, \quad (7)$$

$$cth x = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}. \quad (8)$$

Следует отметить, для ветрового волнения существует ярко выраженная связь между высотой волны и ее длиной [3]. Для открытого моря в литературе приводится следующее эмпирическое соотношение:

$$h_B / \lambda_B = 0,008 V^{0,75}, \quad (9)$$

где h_B - высота волны, м;

λ_B - длина волны, м;

V - скорость ветра, м/с.

Высота волны, как и скорость ветра, является параметром прямого измерения, входящим в состав характеристик районов ТВД. Таким образом, длина волны вычисляется следующим образом:

$$\lambda_B = h_B / 0,008 V^{0,75}. \quad (10)$$

Исходя из вышеизложенного, основными исходными данными для расчета избыточного давления, создаваемого поверхностными волнами, являются:

- скорость ветра;
- высота волны;
- глубина моря;
- момент времени (текущее время моделирования).

В качестве примера расчета можно привести данные, указанные в таблице 2. Расчеты, приведенные в таблице 2, произведены для следующих исходных данных:

1. Скорость ветра - 10 м/с.
2. Высота волны - 2 м.
3. Глубина моря - 40 м.
4. Длина волны, полученная с помощью (10), - 44,46 м.
5. Период волны, полученный с помощью (6), - 5,33 с.

Таблица 2

Избыточные давления, создаваемые ветровой волной

№ п/п	t , сек	t / T_B	Δp (Па)
1	0,533483	0,1	40,53049
2	1,066966	0,2	65,59489
3	1,600449	0,3	65,62882
4	2,133933	0,4	40,61935
5	2,667416	0,5	0,109869
6	3,200899	0,6	-40,4415
7	3,734382	0,7	-65,5608
8	4,267865	0,8	-65,6626
9	4,801348	0,9	-40,7081
10	5,334831	1,0	-0,21974

Данные, приведенные в таблице 2, могут быть проиллюстрированы следующим образом (см. рис. 4).

4 Ограничения и допущения модели

Ограничения и допущения применительно к расчетам параметров гидродинамического поля определяются в основном принятыми граничными условиями:

1 Водная среда, в которой движется корабль, является безграничной невязкой несжимаемой однородной жидкостью.

2 Корабль движется равномерно и прямолинейно. Вопросы вычисления избыточных гидродинамических давлений при ускоренном движении, а также на циркуляциях не рассматриваются.

3 Корпус корабля имеет вытянутую форму, т.е. длина корпуса значительно (в разы) больше его ширины.

4 Скорость движения корабля не превышает критическую, что определяет ламинарный (безвихревой) характер потока обтекающей жидкости.

5 При расчете избыточных давлений от волнения моря из всего многообразия факторов рассматриваются только ветровые волны.

6 Влияние самого корабля на ветровое волнение не рассматривается.

Выводы

Изложенные в настоящей статье данные позволяют сделать следующие выводы:

1 Предлагаемая модель обеспечивает аналитический расчет избыточных давлений, создаваемых кораблем в процессе движения, применительно к произвольной точке пространства, что позволяет получать параметры конфигурации гидродинамического поля корабля.

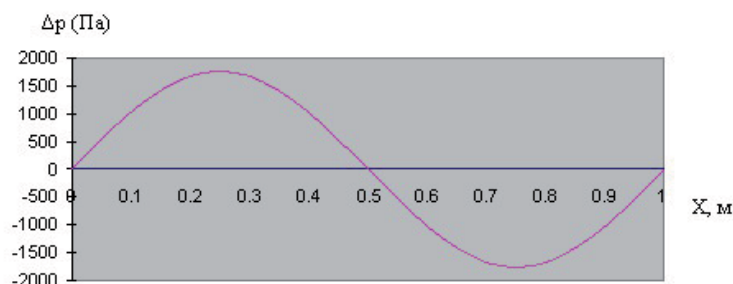


Рис. 4. График изменения придонного давления от ветровых волн

2 Модель достаточно проста и в то же время чувствительна к таким факторам, как размеры и очертания корпуса корабля, скорость его движения, плотность воды, глубина моря и координаты точки пространства, для которой производится расчет. Обеспечивается также учет волнения моря.

3 Вычисления носят приближенный характер и могут быть использованы для оперативно-тактических расчетов с приемлемой степенью точности, которая определяется принятыми ограничениями и допущениями.

4 Описанный способ расчетов может быть использован при моделировании функционирования минного оружия (гидродинамические каналы неконтактных взрывателей), а также для оценки эффективности минного оружия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Прикладная гидромеханика/ под ред. А.Н. Патрашева – М.: Воениздат, 1970.
- 2 Теория эксплуатации неконтактных систем мин/ под ред. А.Г. Толстых - Л.: ВМорА, 1984.
- 3 Шулейкин В.В. Физика моря. - М.: АН СССР, 1953.