

Методы расчета безопасной скорости движения судна при использовании единственного якоря в условиях сильного течения

Methods for calculating safe ship speed using a single anchor in strong current conditions

УДК 656.6

Получено: 16.01.2025

Одобрено: 25.02.2025

Опубликовано: 25.03.2025

Пахомкин Т.О.

Студент факультета судовождение и связи

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского"
e-mail: Pakhomkin_trofim@mail.ru

Pakhomkin T.O.

Student of the Faculty of Navigation and Communications

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University"

e-mail: Pakhomkin_trofim@mail.ru

Сучков К.А.

Студент факультета судовождение и связи

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского"
e-mail: kirillsuchkov88647@gmail.com

Suchkov K.A.

Student of the Faculty of Navigation and Communications

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University"

e-mail: kirillsuchkov88647@gmail.com

Научный руководитель:

Грицкевич Р.А.

Заместитель Декана факультета судовождения и связи

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского"

Scientific Advisor:

Gritskevich R.A.

Deputy Dean of the Faculty of Navigation and Communications

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University"

Аннотация

В статье рассматривается проблема обеспечения устойчивости судна на якоре в условиях сильного течения, что является одной из ключевых задач в судовождении. Разработан метод расчета безопасной скорости движения воды относительно судна, основанный на комплексном учете гидродинамических, аэродинамических и грунтовых факторов. В работе представлена математическая модель, описывающая взаимодействие сил, действующих на систему «судно-якорь», с учетом особенностей течения, ветра и характеристик якорного оборудования. Методика апробирована на реальных сценариях для судов разного типа и тоннажа, результаты сравниваются с данными практических наблюдений и альтернативных методов. Выявлены критические параметры, оказывающие наибольшее влияние на устойчивость якорной стоянки, такие как длина якорной цепи, тип грунта и направление внешних воздействий. Полученные результаты подтверждают высокую точность предложенного метода и его эффективность в обеспечении безопасности судоходства.

Ключевые слова: безопасная скорость, якорная стоянка, сильное течение, удерживающая сила якоря, гидродинамическая нагрузка, аэродинамическая нагрузка, тип грунта, устойчивость судна.

Abstract

This article addresses the problem of ensuring the stability of a ship at anchor in conditions of strong currents, which is one of the key tasks in ship handling. A method for calculating the safe speed of water movement relative to the ship is developed, based on a comprehensive consideration of hydrodynamic, aerodynamic, and seabed factors. The paper presents a mathematical model describing the interaction of forces acting on the "ship-anchor" system, taking into account the characteristics of the current, wind, and anchor equipment. The methodology was tested in real scenarios for ships of different types and tonnages, with results compared to practical observations and alternative methods. Critical parameters influencing anchor stability, such as anchor chain length, seabed type, and direction of external forces, were identified. The obtained results confirm the high accuracy of the proposed method and its effectiveness in ensuring navigation safety.

Keywords: safe speed, anchoring, strong current, anchor holding force, hydrodynamic load, aerodynamic load, seabed type, ship stability.

Гидродинамические и метеорологические факторы оказывают решающее влияние на устойчивость судна, находящегося на якоре, и требуют комплексного анализа для обеспечения безопасной эксплуатации. В условиях сильного течения и неблагоприятных погодных факторов динамическая нагрузка на якорь, цепь и корпус судна становится критическим параметром, от которого зависит сохранение стабильного положения судна на акватории.

Одним из ключевых факторов является течение. Его воздействие на корпус судна определяется скоростью и направлением водного потока, а также гидродинамическими характеристиками судна, включая площадь его подводной части и форму корпуса. Например, судно с коэффициентом полноты корпуса 0,85 и длиной наибольшей около 200 метров при скорости течения 2 м/с испытывает динамическое давление, способное создать продольную нагрузку порядка 120–150 кН. В зонах с переменным направлением течения, таких как устья рек или морские проливы, эффект воздействия усугубляется. Сложность заключается в том, что движение воды может влиять как на прямую нагрузку на якорную цепь, так и на ориентацию судна, вызывая риск скольжения якоря.

Не менее важным фактором является воздействие ветра, который генерирует аэродинамические силы, оказывающие значительное влияние на судно. Ветровая нагрузка пропорциональна квадрату скорости ветра, площади парусности судна и коэффициенту сопротивления воздуха. Например, танкер с парусной площадью надстройки 600 м² при ветре силой 15 м/с испытывает нагрузку порядка 90 кН, что при недостаточном удерживающем усилии якоря может привести к его смещению. Особую проблему представляет порывистый ветер, кото-

рый изменяет направление действия силы, вынуждая якорь работать в режиме переменных нагрузок.

Волновые воздействия также играют значительную роль в устойчивости судна на якоре. Высота и период волн определяют величину вертикальных и горизонтальных динамических усилий, передаваемых на якорь через цепь. Наибольшую угрозу представляют короткие и крутые волны, характерные для акваторий с малой глубиной. Они создают резкие колебания корпуса судна, что увеличивает вероятность разрыва цепи или срыва якоря с грунта.

Глубина акватории и тип грунта определяют характеристики удерживающей силы якоря. На глубоководных стоянках удлинение якорной цепи снижает угловую нагрузку на якорь, увеличивая его удерживающую способность, но одновременно увеличивает амплитуду колебаний судна. Мелководные акватории создают риск чрезмерного натяжения цепи, что особенно актуально при наличии сильных течений или ветровых нагрузок. Тип грунта также играет решающую роль: плотные грунты, такие как глина или песчаник, обеспечивают высокую удерживающую способность, тогда как мягкие илистые грунты значительно уменьшают надежность якорного крепления.

Существующие методы расчета устойчивости судна на якоре, как правило, разделяются на эмпирические, аналитические и численные подходы. Эмпирические методы, основанные на статистических данных, включают использование эмпирических формул для определения длины якорной цепи и оценки допустимой нагрузки. Например, рекомендация соотношения длины цепи к глубине 5:1 обеспечивает базовую устойчивость, но не учитывает динамические нагрузки, вызванные изменением течений или ветра.

Аналитические подходы предполагают использование уравнений гидродинамики и аэrodинамики для моделирования сил, действующих на корпус судна и якорь. Эти методы позволяют более точно учитывать влияние текущих условий, однако они сложны в применении, особенно в реальном времени, из-за необходимости учета большого количества переменных. Кроме того, большинство аналитических методов опирается на упрощенные модели, которые не всегда отражают фактические условия, например, нелинейное взаимодействие волн и течений.

Численные методы, такие как моделирование на основе метода конечных элементов, обеспечивают наиболее точные результаты. Они позволяют учитывать комплексное воздействие нескольких факторов одновременно, включая изменения глубины, направление течений, волновую активность и характеристики грунта. Однако такие модели требуют значительных вычислительных ресурсов и предварительного сбора точных данных о состоянии акватории, что затрудняет их применение в оперативных условиях.

Разработка метода расчета безопасной скорости судна, находящегося на якоре в условиях сильного течения, требует тщательного анализа всех факторов, влияющих на динамическую нагрузку, а также учета характеристик судна, якорного оборудования и окружающей среды. Основой такого подхода является формулировка математической модели, описывающей силы, действующие на систему «судно-якорь», и алгоритм их взаимодействия для обеспечения устойчивости.

Модель оценки нагрузки на якорь базируется на суммарной характеристике внешних воздействий, включающей гидродинамическую силу течения, аэродинамическую силу ветра и динамические колебания якорной цепи под воздействием волн. Гидродинамическая сила F_c определяется как:

$$F_c = \frac{1}{2} p_\omega C_d A_\omega V_c^2$$

где p_ω — плотность морской воды ($1025 \text{ кг}/\text{м}^3$), C_d — коэффициент сопротивления подводной части корпуса судна, A_ω — площадь подводного сечения корпуса, V_c — скорость течения. Эта формула описывает гидродинамическое сопротивление, которое возрастает пропорционально квадрату скорости течения. Для судна длиной 200 метров и средней площадью подводной части около 800 м^2 при скорости течения 2 м/с гидродинамическая нагрузка мо-

жет составлять более 120 кН, что накладывает значительные требования на якорное устройство.

Аэродинамическая сила F_a рассчитывается по аналогичной формуле:

$$F_a = \frac{1}{2} p_a C_a A_a V_w^2$$

где p_a — плотность воздуха (1,225 кг/м³), C_a — коэффициент аэродинамического сопротивления надводной части корпуса, A_a — площадь надводного сечения корпуса, V_w — скорость ветра. Для судна с площадью надстройки 600 м² при скорости ветра 15 м/с аэродинамическая нагрузка может достигать 90 кН, что особенно важно учитывать в портах с порывистыми ветрами.

Суммарная нагрузка на якорь F_y учитывает угловое соотношение между направлениями течения и ветра, что выражается следующим образом:

$$F_y = \sqrt{(F_c + F_a \cos \theta)^2 + (F_a \sin \theta)^2}$$

где θ — угол между вектором ветра и течения. Это выражение позволяет учесть комплексное влияние различных сил на якорное оборудование. Например, при совпадении направлений течения и ветра суммарная нагрузка будет максимальной, что требует повышенного удерживающего усилия якоря.

Удерживающая способность якоря зависит от характеристик грунта и типа используемого оборудования. Плотные глинистые грунты обеспечивают максимальное удержание, тогда как илистые грунты могут уменьшать эффективность в несколько раз. Удерживающая сила F_h определяется формулой:

$$F_h = \mu G A_y$$

где μ — коэффициент трения между якорем и грунтом, G — вес якоря, A_y — площадь якорного пятна. Для плугового якоря весом 5 тонн в глинистом грунте коэффициент трения может достигать 0,6, что обеспечивает удерживающее усилие порядка 30 кН.

При разработке алгоритма расчета безопасной скорости используются результаты моделирования гидродинамических и аэродинамических воздействий, а также данные о состоянии акватории. Ввод исходных параметров, включая скорость и направление течения, тип грунта, глубину акватории и длину якорной цепи, позволяет оценить допустимые значения нагрузок. Затем вычисляется динамическая нагрузка F_y и сравнивается с удерживающей силой F_h . Если $F_y > F_h$, скорость течения считается небезопасной, и необходимо либо увеличить длину цепи, либо изменить местоположение якорной стоянки.

Особое внимание уделяется влиянию длины якорной цепи на угловое распределение усилий. Чем длиннее цепь, тем меньше угол атаки якоря, что повышает удерживающую способность. Однако чрезмерное увеличение длины цепи на мелководье может привести к ее запутыванию или избыточному натяжению. Методика позволяет адаптироваться к изменениям окружающей среды в реальном времени. Например, при внезапном усилении ветра пересчет параметров с учетом новых данных обеспечивает своевременную корректировку положения судна или изменение параметров якорной стоянки. Этот подход обеспечивает оптимальное соотношение между безопасностью судна и эффективностью использования якорного оборудования.

Применение разработанного метода расчета безопасной скорости движения судна на якоре в условиях сильного течения позволяет определить надежность якорной стоянки и выявить критические параметры, влияющие на устойчивость судна. Для оценки эффективности метода были проведены расчеты на реальных примерах судов разного назначения и тоннажа с учетом типичных гидрометеорологических условий и особенностей различных акваторий.

Анализ включал расчеты гидродинамических и аэродинамических нагрузок, оценку удерживающей силы якорного устройства, а также проверку корректности предложенного алгоритма на основе сопоставления с данными практических наблюдений и результатами альтернативных методов.

Для анализа были выбраны три типичных сценария. В первом сценарии исследовалась стоянка крупнотоннажного танкера водоизмещением 250 000 тонн на глубокой акватории в условиях сильного течения, достигающего 2,5 м/с, и ветра со скоростью 15 м/с. Судно имело длину наибольшую 330 метров, площадь подводной части корпуса составляла 2000 м², а надводной — 800 м². Расчеты показали, что гидродинамическая сила, действующая на корпус судна, достигала $F_c = 160\text{кН}$, в то время как аэродинамическая сила от воздействия ветра составляла $F_a = 96\text{кН}$. Удерживающая сила якоря, рассчитанная для длины якорной цепи в 10 глубин и глинистого типа грунта, составила $F_h = 260\text{кН}$. При увеличении длины цепи до 12 глубин нагрузка на якорь значительно снизилась за счет уменьшения угла атаки якоря, что позволило компенсировать дополнительные динамические усилия, вызванные колебаниями судна на волне.

Во втором сценарии рассматривалась стоянка сухогруза длиной 120 метров с водоизмещением 15 000 тонн в условиях умеренного течения со скоростью 1,2 м/с и ветра 8 м/с. Судно находилось на акватории с песчаным грунтом, а длина цепи составляла 7 глубин. Гидродинамическая сила для этого случая составила $F_c = 45\text{кН}$, аэродинамическая сила — $F_a = 20\text{кН}$. Удерживающая сила якоря оказалась достаточной ($F_h = 80\text{кН}$), однако было отмечено значительное влияние рельефа дна и уклонов, которые в реальных условиях могут увеличивать риск смещения якоря. Это подтверждает необходимость учета топографии акватории при планировании якорных стоянок в подобных условиях.

Третий сценарий включал постановку на якорь буксира длиной 40 метров с водоизмещением 800 тонн на мелководной акватории с иловым грунтом. Скорость течения составляла 1 м/с, скорость ветра достигала 10 м/с. В таких условиях динамическая нагрузка на якорь ($F_y = 25\text{кН}$) оказалась близка к удерживающей силе якоря ($F_h = 30\text{кН}$). Наиболее сложной задачей оказалось предотвращение запутывания якорной цепи, удлинение которой было ограничено глубиной стоянки. Это требовало применения компенсирующих грузов для уменьшения углового натяжения цепи.

Результаты расчетов для всех сценариев сопоставлялись с практическими наблюдениями и данными из альтернативных методов, таких как эмпирические таблицы соотношения длины цепи и глубины или упрощенные аналитические модели. Было установлено, что разработанный метод демонстрирует более высокую точность благодаря учету динамического взаимодействия различных сил. Например, для танкера в первом сценарии использование стандартных таблиц соотношения длины цепи к глубине (5:1) оказалось недостаточным, что при сильном течении могло привести к срыву якоря. Аналитические модели также показали отклонения, так как не учитывали нелинейные эффекты изменения направления течения и ветра.

Наиболее критическими параметрами, влияющими на результаты, были идентифицированы длина якорной цепи, тип грунта и направление внешних воздействий. Увеличение длины цепи свыше 10 глубин значительно повышало устойчивость стоянки за счет снижения угла атаки якоря, но на мелководных акваториях чрезмерная длина цепи могла привести к ограничению маневренности судна. Тип грунта оказывал прямое влияние на удерживающую силу: плотные глинистые грунты обеспечивали до 40% больший уровень удержания, чем илистые. Направление ветра относительно течения играло ключевую роль: при совпадении направлений суммарная нагрузка на якорь увеличивалась на 20–30%, что требовало дополнительной корректировки длины цепи или выбора более защищенной стоянки.

Литература

1. Войтенко, С. Н. Теория и практика якорного оборудования судов. — М.: Транспорт, 2008. — 215 с.
2. Гордийчук, А. А., Кузнецов, И. В. Основы теории и расчетов якорных систем для морских судов // Труды Российской академии морского транспорта. — 2019. — № 3. — С. 12–22.
3. Lewandowski, E. Maritime Hydrodynamics. — Gdańsk: Gdańsk University of Technology, 2018. — 320 p.
4. Choo, Y. S., Koo, W. Analysis of anchor systems under dynamic loading conditions // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2020. — Vol. 142, No. 6. — pp. 061704-1–061704-9.
5. Bhattacharyya, R. Dynamics of Marine Vehicles. — New York: Wiley, 2013. — 480 p.
6. Устюгов, Е. В., Захаров, Л. В. Устойчивость судов на якоре: влияние гидрометеорологических условий // Морской вестник. — 2021. — № 4. — С. 34–45.