

Обоснование методов предотвращения риска дрейфа судна в условиях динамических изменений осадки на мелководье

Justification of methods to prevent vessel drift risk under conditions of dynamic draft changes in shallow waters

УДК 629.7.05

Получено: 19.10.2024

Одобрено: 26.11.2024

Опубликовано: 25.12.2024

Лукьянов Г.Е.

Студент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского; факультет судовождение и связи
e-mail: glukanov247@gmail.com

Lukyanov G.E.

Student of the State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Faculty of Navigation and Communication
e-mail: glukanov247@gmail.com

Максимов А.А.

Студент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского; факультет судовождение и связи
e-mail: Maksduxa3@gmail.com

Maksimov A.A.

Student of the State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Faculty of Navigation and Communication
e-mail: Maksduxa3@gmail.com

Научный руководитель:

Огай А.С.

Заведующий кафедрой теории и устройства судна Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского

Scientific Advisor:

Ogay A.S.

Head of the Department of Theory and Design of Ships, State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy

Аннотация

В работе рассмотрены теоретические и прикладные аспекты обоснования методов предотвращения риска дрейфа судна при плавании на мелководных акваториях, подверженных динамическим изменениям осадки. Поставлена задача уточнения расчетных методик, и разработаны рекомендации по выбору скорости, курса и применению дополнительных маневренных средств. Исследования основаны на анализе гидродинамических моделей, данных лабораторных испытаний и натурных наблюдений. Предложены подходы к интеграции результатов численных расчетов и эмпирических данных в практику судовождения. Рассмотрены факторы, влияющие на поведение судна при ограниченной глубине, даны обоснования корректирующих мер, направ-

ленных на минимизацию неконтролируемого бокового смещения, а также определены направления оптимизации маршрутного планирования с учетом колебаний осадки. Предложенные решения повышают безопасность и предсказуемость управления судном в сложных навигационных условиях.

Ключевые слова: дрейф судна, мелководье, динамическая осадка, гидродинамические расчеты, маневренность, безопасность судоходства, регулирование курса и скорости, буксировочные средства.

Abstract

This study examines the theoretical and practical aspects of justifying methods to prevent the risk of vessel drift during navigation in shallow waters subjected to dynamic draft changes. The objective was to refine calculation methodologies and develop recommendations for selecting speed, course, and the application of additional maneuvering aids. The research is based on the analysis of hydrodynamic models, laboratory test data, and field observations. Approaches for integrating numerical calculation results with empirical data into navigational practices are proposed. Factors influencing vessel behavior in limited depths are considered, and justifications for corrective measures aimed at minimizing uncontrolled lateral displacement are provided. Additionally, directions for optimizing route planning considering draft fluctuations are identified. The proposed solutions enhance the safety and predictability of vessel handling in complex navigational conditions.

Keywords: vessel drift, shallow waters, dynamic draft, hydrodynamic calculations, maneuverability, navigational safety, course and speed regulation, towing aids.

Теоретическое обоснование методов предотвращения риска дрейфа судна в условиях динамически изменяющейся осадки на мелководье требует системного рассмотрения комплекса факторов, определяющих поведение морского объекта при ограниченном запасе глубины. Согласно данным, представленным в фундаментальных трудах по морской гидродинамике (Barrass, Derrett, “Ship Stability for Masters and Mates”, 2012; Molland, “The Maritime Engineering Reference Book”, 2011), при уменьшении расстояния между килем и дном возрастает влияние мелководного эффекта, выражающегося в увеличении гидродинамического сопротивления и изменении картины обтекания корпуса. В процессе движения судно в таких условиях испытывает сниженную эффективность руля и винтов, а реакция на управляющие воздействия приобретает запаздывающий характер. Одним из ключевых гидродинамических явлений, влияющих на способность судна поддерживать заданный курс, выступает динамическая осадка (squat). Данный феномен исследовался в экспериментальных бассейнах Морского научно-исследовательского института Нидерландов (MARIN) и Гамбургского гидродинамического института (HSVA), где было показано, что при возрастании скорости на мелководье судно частично «подсасывается» вниз, вызывая дополнительное погружение носовой или кормовой части корпуса в зависимости от его архитектуры. Этот процесс напрямую влияет на остойчивость и управляемость: чем сильнее выражен squat, тем менее предсказуемо поведение судна при корректировке курса, что повышает риск дрейфа, особенно при наличии ветровых воздействий и течений, характерных для ограниченных акваторий.

Исследования, проведенные в рамках международных программ ITTC (International Towing Tank Conference), указывают на то, что актуальные расчётные методики дрейфа учитывают базовые параметры корпуса и винторулевого комплекса, однако нередко игнорируют сложный характер распределения скоростей потока в приграничном слое, неравномерность профиля глубины дна и переменность грунтовых характеристик. В условиях мелководья качественная оценка дрейфа требует комплексной математической модели, основанной на решениях уравнений Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, дополненной эмпирическими коэффициентами, учитывающи-

ми влияние динамической осадки и мелководного сопротивления. Применение современных программных комплексов, таких как DELFTship, MAXSURF, а также CFD-кодов, адаптированных для расчёта при ограниченной глубине (например, OpenFOAM с пользовательскими солверами), позволяет получить численные результаты, согласующиеся с данными модельных испытаний. Тем не менее их надёжность зависит от корректности исходных данных, настройки сеток расчётных областей и калибровки по результатам опытов на моделях.

Достоверные сведения о факторах, влияющих на дрейф, необходимо дополнять данными о метеорологических и океанографических условиях. Исследования в Балтийском море (Gusta, 2009) подтверждают значимость ветровой нагрузки при мелководных переходах: уже при слабом боковом ветре судно приобретает дополнительную поперечную составляющую движения, которая, в сочетании с ограниченной глубиной, усложняет удержание заданного курса. Аналогично приливно-отливные и локальные береговые течения в районах, где глубина переменна, способны формировать сложную карту скоростей, действующих на днище, подверженное перепаду давлений. Так, данные натурных наблюдений, представленные в докладах SSPA Sweden AB и Chalmers University of Technology, свидетельствуют, что при навигации в прибрежных зонах значительные колебания осадки из-за squat накладываются на мелководные эффекты, уменьшая запасы остойчивости и снижая манёвренные качества судна. В результате даже сравнительно незначительные изменения глубины вызывают необходимость постоянной корректировки курса, а ошибка в оценке гидродинамической обстановки приводит к неконтролируемому дрейфу.

Анализ существующих методик регулирования дрейфа опирается на рекомендации международных организаций, таких как Международная морская организация (ИМО), и лоцманских служб, разрабатывающих практические инструкции для капитанов. Традиционные подходы основаны на эмпирических поправках к курсу и скорости, выведенных из опыта навигации в аналогичных условиях и данных опытовых бассейнов. Современные тенденции направлены на интеграцию методов численного моделирования с системами поддержки принятия решений на борту, которые, в совокупности с информацией о прогнозах погоды и течений, позволяют оценить риск дрейфа в режиме реального времени. Однако проблема заключается в том, что большая часть существующих методик носит статический характер, не учитывая динамическую природу процессов, связанных с изменением осадки и мгновенными вариациями гидродинамической среды. Попытки уточнить и дополнить такие методики за счёт развития более точных CFD-моделей, адаптированных под мелководье, а также за счёт активного применения математических методов оптимизации траектории и параметров движения (курса, скорости хода, положения на транзитной линии), представлены в исследованиях ряда университетских центров морской инженерии в Северной Европе и Восточной Азии.

Методы оценки и моделирования дрейфа судна при навигации на мелководье опираются на применение численных гидродинамических моделей, экспериментальных данных модельных бассейнов и результатов натурных наблюдений в реальных эксплуатационных условиях. Теоретической основой служит система уравнений Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, дополненная турбулентными моделями типа $k-\epsilon$ или $k-\omega$. На практике для расчётов широко применяют вычислительные пакеты уровня OpenFOAM, STAR-CCM+, ANSYS Fluent, а также специализированные программы, адаптированные для решения задач судовой гидродинамики на мелководье. При этом крайне важно учесть пространственную неоднородность гидрологической обстановки, профиль рельефа дна и распределение скоростей течений, поскольку мелководный эффект существенно искажает поле скоростей и давлений вокруг корпуса, снижают эффективность рулевых органов и изменяют характер дифферента судна под действием динамической осадки.

При формировании вычислительных моделей исходят из данных гидрографических промеров, определяющих фактическую глубину, уклон дна и местные особенности донных отложений, способных повлиять на структуру пограничного слоя и расположение стационарных вихревых образований. В качестве граничных условий назначают «слипание» в придонной области, свободную поверхность с возможностью учёта волновых колебаний, а при необходимости – полупрозрачные или полностью отражающие боковые границы, имитирующие наличие береговых линий или сооружений. Важной предпосылкой адекватного численного эксперимента является правильный выбор турбулентной модели: в условиях мелководья зачастую применяют SST (Shear Stress Transport) или гибридные модели, позволяющие корректно воспроизвести зону интенсивного смещения потока, возникающую при близком расположении корпуса к грунту. Для более точной оценки параметров дрейфа могут использоваться методы адаптивного уточнения расчётной сетки (Adaptive Mesh Refinement), обеспечивающие детальную проработку узких областей вокруг носовой и кормовой оконечности.

Разработка математических моделей дополняется экспериментальными исследованиями. В буксировочных танках и опытовых бассейнах центры, подобные MARIN (Maritime Research Institute Netherlands), HSVA (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt), SSPA Sweden AB, проводят модельные испытания при заданных масштабах и фиксированных скоростях. Вода в бассейнах может подаваться так, чтобы имитировать течение, а элементы донного рельефа либо создаются искусственно, либо формируются при помощи регулируемых панелей дна. Измерения позиции и курса модели, сил и моментов на корпусе, скоростного поля потока производятся при помощи оптических трекинговых систем и лазерных доплеровских анамометров, что даёт возможность калибровать и верифицировать численные модели. При этом важно учитывать законы подобия: числа Фруда и Рейнольдса, определяющие динамическое сходство масштабной модели и прототипа. Экспериментальные данные позволяют откорректировать значения эмпирических коэффициентов, используемых в расчётах для учёта влияния squat, мелководного сопротивления и затруднённой циркуляции потока.

Применение полученных результатов к реальным условиям предполагает учёт метеорологических факторов: скорость и направление ветра, определяемые по данным локальных метеостанций, прогнозируемое состояние атмосферы, а также динамика течений, описываемая по данным прибрежных гидрологических станций, систем AIS и спутникового зондирования. Совмещая эти параметры с данными о проектной осадке, форме корпуса, типе энергетической установки, характером винторулевого комплекса, а также со штатными методиками расчёта динамической осадки и дрейфа (например, с использованием формул Барасса или поправок по методикам, приводимым в руководящих документах IMO MSC.1/Circ.1331), специалисты формируют базу для прогноза дрейфа и оптимизации параметров судовождения. Сравнительный анализ эффективности различных корректирующих мер, направленных на снижение дрейфа, осуществляется путём многократных численных экспериментов и вариаций управляющих параметров. Среди таких мер могут быть снижение скорости на мелководных участках, преднамеренная перекладка руля на упреждающий угол, применение подруливающих устройств и буксиров в стеснённых акваториях, а также оптимизация маршрута прохождения мелководного фарватера с учётом рельефа дна и сезонных колебаний уровня воды.

Верификация результатов моделирования достигается путём сопоставления полученных расчётных данных с фактической информацией, зафиксированной при реальных проходах судов по сложным мелководным акваториям. Использование аппаратуры гидроакустического профилирования, навигационных журналов, данных бортовых систем измерения осадки, GPS-треков, AIS-информации позволяет контролировать точность прогнозов и выявлять погрешности моделирования. В ходе таких исследова-

ний установлено, что адекватная оценка дрейфа на мелководье достигается при соблюдении комплексного подхода: сочетании детального численного расчёта, подтверждённого экспериментальными результатами, с корректировкой параметров судовождения по результатам натурных наблюдений. Данные о дрейфе вносятся в базы знаний лоцманских станций, становятся частью систем поддержки принятия решений для капитанов, используются в курсах подготовки и тренажёрных занятиях, направленных на повышение квалификации судоводителей.

В условиях, когда динамическая осадка способна существенно исказить управляемость и курсодержимость, первым шагом становится выбор оптимальной кинематической схемы прохождения фарватера с учётом фактической глубины, профиля дна и потенциальных колебаний уровня воды. Исследования MARIN (Maritime Research Institute Netherlands) и HSVA (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt) подтверждают, что при сниженном запасе глубины под килем критическим фактором выступает снижение скорости, при котором уменьшается интенсивность гидродинамического «подсасывания» корпуса, сокращается разница давлений под днищем, а значит, минимизируется эффект squat и связанное с ним увеличение бокового дрейфа. Оптимальный подбор скорости, основывающийся на численных расчётах, калиброванных по результатам модельных испытаний, даёт возможность снизить отклонения от заданной траектории, повысить точность маневрирования и сократить риск бокового смещения. В зонах, где профиль дна неравномерен или глубина меняется под воздействием приливо-отливных явлений, заблаговременная корректировка курса и скорости с упреждающим учётом геоморфологических и гидрологических данных становится ключевой. Использование дополнительных рулевых и буксировочных средств, особенно в акваториях с частой необходимостью точного позиционирования судна при переменных параметрах осадки, рассматривается как эффективная тактическая мера, дополняющая стандартные маневренные средства. Подруливающие устройства, расположенные в носовой или кормовой части, способны оперативно компенсировать возникающее поперечное смещение, тогда как при выполнении сложных манёвров в узкостях, реках или подходных каналах возможна постановка буксира, действующего с подветренной или противотечной стороны и корректирующего траекторию судна.

Практический опыт лоцманских станций Северного и Балтийского морей, а также рекомендаций, выработанных организациями вроде SSPA Sweden AB, свидетельствует о том, что применение буксиров особенно целесообразно для крупнотоннажных судов и при неблагоприятных метеорологических условиях, когда боковая составляющая ветра или нестабильное течение усиливают дрейф. Разрабатываемые обучающие программы и тренажёрные комплексы, адаптированные под специфическую гидродинамику мелководья, дают судоводителям возможность отработать навыки упреждающей корректировки курса и скорости, научиться учитывать влияние донного рельефа, ветровых нагрузок и течений, а также вовремя использовать дополнительные средства управления. При этом обогащение маршрутных карт данными о рельефе дна, промеров осадки, прогнозах гидрологических и метеорологических параметров повышает точность навигационного планирования. Расчёт корректирующих мер производится с учётом критериев остойчивости, резерва рулевых сил, характеристик винторулевой группы, а также оценки времени реакции судна на изменение режима хода. В случае выявления критических участков маршрута, где совокупность факторов может вызвать значительный дрейф, капитан или лоцман заранее формирует стратегию прохождения, включая назначение необходимых буксиров, определение целевых скоростей на участках с повышенной мелководностью и уточнение курса с учётом рельефа дна, отмеченного в лоциях и лоцманских атласах. Подобная методика, признанная международными классификационными обществами и рекомендованная в руководствах для судоводителей, повышает предсказуемость поведения судна при ограничен-

ной глубине, минимизирует риск неконтролируемого отклонения от заданной траектории и снижает вероятность навигационных происшествий.

Литература

1. *Barrass, C.B., Derrett, D.R.* Ship Stability for Masters and Mates. 7th ed. Amsterdam : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2012. 523 p.
2. *Molland, A.F.* The Maritime Engineering Reference Book: A Guide to Ship Design, Construction and Operation. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. 920 p.
3. *Gucma L.* The Method of Navigational Safety Assessment in Port Approach Regions // Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. 2009. No. 17 (89). Pp. 14–21.
4. International Towing Tank Conference (ITTC). Recommended Procedures and Guidelines: Proceedings of the 26th ITTC. Rio de Janeiro, 2011.
5. International Maritime Organization (IMO). MSC.1/Circ.1331. Guidance for the Operational Use of Integrated Bridge Systems (IBS). London: IMO, 2009. 22 p.
6. *Барбанов Г.П., Клявин О.Н.* Гидродинамика судна на мелководье. Л.: Судостроение, 1988. 184 с.