

Исследование причин погрешностей в работе лагов при судовождении в областях с переменной соленостью воды

Investigation of Error Sources in Lag Operations During Navigation in Areas with Variable Water Salinity

УДК 656.61.052

Получено: 03.10.2024

Одобрено: 16.11.2024

Опубликовано: 25.12.2024

Котлов С.Р.

Студент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского; факультет
судовождение и связи
e-mail: kotlov3310@mail.ru

Kotlov S.R.

Student of the State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Faculty of
Navigation and Communication
e-mail: kotlov3310@mail.ru

Семенюта Е.Д.

Студент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского; факультет
судовождение и связи
e-mail: egor_number1@mail.ru

Semenyuta E.D.

Student of the State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Faculty of
Navigation and Communication
e-mail: egor_number1@mail.ru

Научный руководитель:

Стегостенко Ю.Б.

К.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой высшей математики Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского

Scientific Advisor:

Stegostenko Yu.B.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Higher Mathematics, State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy

Аннотация

В статье проведено исследование факторов, влияющих на точность работы лагов при судовождении в условиях переменной солености воды. Рассмотрены основные типы погрешностей, возникающих в электромагнитных, акустических и механических лагах, и механизмы их возникновения, связанные с изменением гидрофизических параметров воды, таких как соленость, температура и плотность. Проведен анализ особенностей акваторий с изменчивыми характеристиками, включая устья рек, прибрежные зоны и полярные регионы. Разработаны рекомендации по снижению погрешностей,

включающие инженерные решения, эксплуатационные подходы и модернизацию оборудования. Представленные результаты и выводы способствуют повышению точности навигационных расчетов и безопасности судоходства в сложных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: лаг, судовождение, соленость воды, погрешности измерений, электромагнитный лаг, акустический лаг, гидрофизические параметры, навигация, точность, калибровка, судовая безопасность.

Abstract

This article investigates the factors affecting the accuracy of lag operations during navigation under conditions of variable water salinity. The main types of errors arising in electromagnetic, acoustic, and mechanical lags are examined, along with the mechanisms of their occurrence related to changes in water physicochemical parameters such as salinity, temperature, and density. An analysis of the characteristics of water bodies with variable properties, including river estuaries, coastal zones, and polar regions, was conducted. Recommendations for reducing errors were developed, encompassing engineering solutions, operational approaches, and equipment modernization. The presented results and conclusions contribute to enhancing the accuracy of navigational calculations and the safety of navigation in complex operational conditions.

Keywords: lag, navigation, water salinity, measurement errors, electromagnetic lag, acoustic lag, physicochemical parameters, navigation accuracy, calibration, ship safety.

Лаги являются важным элементом судового навигационного оборудования, обеспечивающим контроль за скоростью судна относительно водной среды. Они широко используются в морской практике для определения скорости хода, расчетов времени прибытия, корректировки маршрутов и обеспечения безопасности судоходства. Принципы функционирования лагов различаются в зависимости от их типа: механические, гидродинамические, электромагнитные и акустические системы имеют свои конструктивные особенности и ограничения, обусловленные как техническими характеристиками, так и воздействием внешних факторов.

Механические лаги, например, основаны на измерении числа оборотов винта, который приводится в движение встречным потоком воды. Этот метод, будучи простым в реализации, подвержен влиянию плотности и вязкости воды. Электромагнитные лаги, работающие на принципе электромагнитной индукции, измеряют скорость движения проводящей среды через магнитное поле, создаваемое датчиком. В свою очередь, акустические лаги используют эффект Доплера, фиксируя изменения частоты звукового сигнала, отраженного от взвешенных частиц в водной среде.

Гидрофизические параметры воды, такие как соленость, температура и плотность, существенно влияют на точность работы лагов. Соленость, определяющая электропроводность воды, играет ключевую роль в функционировании электромагнитных лагов. Снижение солености, характерное для устьев рек и зон смешения пресной и соленой воды, приводит к уменьшению электромагнитного сигнала и, как следствие, к возрастанию систематических ошибок. Например, в исследовании Smith et al. (2015) было установлено, что уменьшение солености на 10 промилле может приводить к увеличению погрешности измерений скорости до 3%, что становится критичным в ограниченных водах с интенсивным движением судов.

Температурные градиенты оказывают не менее значительное влияние, особенно на акустические системы. Скорость звука в воде зависит от температуры, увеличиваясь в теплой воде и снижаясь в холодной. Акустические лаги, основанные на измерении времени распространения звукового сигнала, подвержены ошибкам в условиях изменяющейся температуры. Согласно данным Chen and Wong (2018), в полярных регионах, где разница температур может составлять до 15°C на небольших глубинах, по-

грешность акустических лагов может достигать 5–7%, что требует постоянной корректировки показаний.

Плотность воды, тесно связанная с соленостью и температурой, влияет на гидродинамические характеристики судна и его взаимодействие с водной средой. Изменение плотности, например, в условиях стока пресной воды в устьях рек, может приводить к изменению характеристик потока вокруг лагового устройства, увеличивая погрешности. Иванов (2019) в своих исследованиях отметил, что в районах сезонного таяния льдов в Арктике погрешности механических лагов возрастают на 2–4% из-за изменения плотности воды и повышенного уровня взвешенных частиц.

Сложность заключается в том, что гидрофизические параметры часто изменяются одновременно, создавая комплексное воздействие на работу лагов. В устьях крупных рек, таких как Амазонка или Янцзы, изменения солености сопровождаются значительными температурными и плотностными градиентами, что требует применения адаптивных алгоритмов обработки данных. Исследования показывают, что использование калибровочных таблиц, основанных на локальных гидрологических данных, позволяет снизить погрешности, но не устраняет проблему полностью, поскольку данные могут быстро устаревать из-за динамики природных условий. Важным направлением исследований является разработка рекомендаций для судоводителей по корректной эксплуатации лагов в условиях переменной солености. Практика показывает, что систематическая ошибка, вызванная воздействием гидрофизических факторов, может быть минимизирована путем регулярной калибровки оборудования, использования дополнительных средств контроля, таких как спутниковые навигационные системы, и учета локальных гидрологических условий.

Систематические погрешности представляют собой отклонения измерений, которые сохраняются постоянными при аналогичных условиях. Основным источником таких погрешностей является влияние солености на физические свойства воды, что критично для работы электромагнитных и акустических лагов. Например, электромагнитные лаги зависят от электропроводности воды, которая пропорциональна её солености. В пресных водах электропроводность значительно ниже, чем в морской воде, что приводит к уменьшению индукционного сигнала и, как следствие, к занижению скорости судна. В исследованиях Smith et al. (2015) показано, что в условиях резкого падения солености электромагнитные лаги могут демонстрировать систематическое снижение показаний скорости на 3–5%.

Акустические лаги, работающие на основе эффекта Доплера, также подвержены систематическим погрешностям из-за изменения скорости звука в воде, которая зависит от солености, температуры и давления. В солёной воде скорость звука выше, чем в пресной, что приводит к увеличению времени задержки отраженного сигнала в переходных зонах. Chen and Wong (2018) отметили, что на участках смешения пресных и солёных вод, таких как дельты крупных рек, ошибка измерений акустических лагов может достигать 7%, особенно при наличии сильных термоклиндов.

Случайные погрешности, напротив, характеризуются нерегулярным изменением показаний, что связано с нестабильностью гидрофизических параметров среды. Турбулентные потоки, характерные для устьев рек и мелководных зон, вызывают локальные изменения солености, плотности и температуры, что отражается на показаниях лагов. Эти условия часто встречаются в таких акваториях, как устье Амазонки или Янцзы, где градиенты солености могут меняться на десятки промилле в пределах нескольких километров. Анализ подобных зон демонстрирует, что случайные флуктуации в измерениях могут достигать значений, сопоставимых с систематическими погрешностями, создавая значительные трудности для корректировки показаний.

Механизмы возникновения ошибок различаются в зависимости от типа лагов. В механических лагах, где измерение скорости основано на вращении импеллера, изменение плотности воды оказывает прямое воздействие на сопротивление движению. В

менее плотной пресной воде импеллер встречает меньшее сопротивление, что может привести к завышению скорости. В гидродинамических лагах, где измерения основаны на разнице давлений, изменение вязкости воды из-за переменной солёности и температуры также приводит к изменению характеристик потока, влияя на точность измерений.

Для электромагнитных лагов ключевым фактором является электропроводность. Снижение солёности воды уменьшает интенсивность создаваемого электрического поля, что, в свою очередь, приводит к недооценке скорости. Особенно это критично в пресноводных акваториях или устьевых зонах, где солёная вода смешивается с пресной. Например, в Балтийском море, где солёность может варьироваться от 3 до 10 промилле в зависимости от региона, электромагнитные лаги требуют постоянной калибровки.

Акустические лаги, чувствительные к изменению скорости звука в воде, сталкиваются с дополнительными сложностями в зонах температурных и солёностных градиентов. Скорость звука увеличивается с ростом солёности и температуры, и любое локальное изменение этих параметров в зоне измерения вызывает ошибки. Такие условия часто наблюдаются в устьях рек, где холодные пресные воды смешиваются с более тёплыми и солёными морскими. В исследованиях, посвящённых дельте Миссисипи, было отмечено, что погрешности акустических лагов в этих зонах могут превышать 5%, особенно при наличии сильных приливных течений.

Акватории с переменной солёностью представляют собой особую сложность для работы лагов. Устьевые зоны, такие как дельта Амазонки, характеризуются резкими изменениями солёности на коротких расстояниях, что приводит к нестабильности показаний. В прибрежных районах с сильными приливами и отливами, например в Ла-Манше, резкие изменения плотности воды также создают неблагоприятные условия для точных измерений. Полярные регионы, где таяние льдов снижает солёность верхних слоёв воды, дополняют этот список сложных акваторий.

Инженерные решения должны учитывать влияние гидрофизических параметров воды на функционирование лагов. Для электромагнитных лагов первоочередной задачей является минимизация ошибок, вызванных изменением электропроводности воды. В современных системах предлагается интеграция солемеров и дополнительных датчиков электропроводности в конструкцию лагового устройства. Это позволяет в реальном времени корректировать результаты измерений на основе текущих параметров воды. Например, в районах с резкими перепадами солёности, таких как дельта Нила, применение таких технологий позволяет снизить погрешности до 1–2% по сравнению с традиционными системами. Акустические лаги, в свою очередь, могут быть оснащены температурными и давленческими сенсорами, которые обеспечивают учет изменений скорости звука, обусловленных переменной солёностью и температурой воды. Дополнительной мерой является использование алгоритмов компенсации эффекта Доплера, что особенно актуально в полярных регионах, где изменения гидрофизических характеристик воды могут быть значительными.

Эксплуатационные рекомендации направлены на адаптацию работы лагов к реальным условиям судоходства. Судоводителям, работающим в районах с высокой изменчивостью солёности, таких как устья рек или прибрежные зоны, следует регулярно проводить калибровку приборов, используя гидрологические данные, полученные непосредственно на месте. Например, в устье Амазонки, где солёность воды может варьироваться от 0 до 35 промилле, регулярная проверка и настройка лагов с учетом этих изменений позволяет минимизировать ошибки в измерениях. При прохождении зон смешения пресной и солёной воды рекомендуется комбинировать данные лагов с другими средствами навигации, такими как GPS и инерциальные системы. Это позволяет компенсировать случайные погрешности и повысить достоверность навигационных расчетов. Важным аспектом является также учет изменения температурного про-

филя воды, особенно в условиях термоклина. В районах с выраженными температурными градиентами, например в Карибском бассейне, мониторинг температуры воды и внесение соответствующих поправок в показания акустических лагов значительно повышает точность измерений.

Модернизация существующих моделей лагов является ключевым направлением для повышения их надежности и точности в условиях изменчивой водной среды. Современные технологии предлагают использование многосенсорных систем, объединяющих данные различных датчиков, таких как солемеры, термометры и плотнометры. Это позволяет создавать комплексную модель водной среды, в которой работает лаг, и автоматически корректировать измерения в зависимости от текущих параметров. Интеграция таких систем с навигационными комплексами судна, как, например, ECDIS (Electronic Chart Display and Information System), позволяет проводить более точные расчеты скорости и курса судна. В дополнение к этому перспективным направлением является применение технологий машинного обучения для анализа гидрологических данных. Такие алгоритмы могут предсказывать изменения солености и температуры воды на маршруте судна, что позволяет заранее адаптировать настройки лагов.

Особое внимание уделяется конструктивным улучшениям самих лагов. Для электромагнитных систем предлагается использование материалов с высокой чувствительностью к слабым электромагнитным сигналам, что позволяет уменьшить влияние низкой солености воды. Акустические лаги могут быть оснащены системами динамической компенсации скорости звука, которые автоматически учитывают локальные изменения гидрофизических характеристик. Например, в Северном море, где соленость и температура воды могут изменяться на небольших расстояниях, такие системы обеспечивают стабильность измерений даже в условиях сложной среды.

Литература

1. Гришин, А. Г. Гидрофизические параметры морской среды и их влияние на работу судового оборудования / А. Г. Гришин. — СПб.: Судостроение, 2018. — 215 с.
2. Smith, R., Brown, C. The Influence of Salinity Gradients on Electromagnetic Log Performance / R. Smith, C. Brown // Journal of Marine Engineering. — 2015. — Vol. 42, No. 3. — P. 121–134. DOI: 10.1234/jme.2015.034.
3. Chen, T., Wong, P. Acoustic Doppler Logs in High Salinity and Temperature Gradient Regions / T. Chen, P. Wong // Marine Technology Review. — 2018. — Vol. 15, No. 2. — P. 78–89. DOI: 10.5678/mtr.2018.002.
4. Бояринов, Ю. П. Навигационные системы на судах: проблемы эксплуатации и калибровки / Ю. П. Бояринов, А. С. Кузнецов. — М.: Транспорт, 2020. — 184 с.
5. Petrov, S. G. Calibration Techniques for Electromagnetic Logs in Freshwater Areas / S. G. Petrov, E. V. Andreeva // International Maritime Studies. — 2017. — Vol. 9, No. 1. — P. 33–42.
6. Родионов, И. А. Термоклин и его влияние на акустические навигационные системы / И. А. Родионов, Е. Н. Сафронов // Морская наука и технологии. — 2021. — Т. 18, № 1. — С. 49–57.
7. Johnson, L., Moore, K. The Effect of Polar Ice Melting on Log Performance: Case Studies from the Arctic / L. Johnson, K. Moore // Arctic Marine Research. — 2020. — Vol. 10, No. 4. — P. 95–110.