



Буровые суда: перемещение, смещение и удержание



Василий АМЕЛИН

Амелин Василий Степанович – Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ) – филиал Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Москва, Россия.*

Крамарь В. А., Душко В. Р., Душко В. В. Обобщённая математическая модель пространственного перемещения бурового судна. – М.: Вузовский сборник, Инфра-М, 2018. – 118 с.

В монографии рассмотрены особенности динамики буровых судов, предназначенных для работы в морских условиях. Комплекс включённых в монографию теоретических исследований направлен на решение задач, связанных с обоснованием особенностей системы динамического позиционирования бурового судна, необходимой для его

эксплуатации в условиях открытого моря.

Условия функционирования системы автоматического удержания судна определяются балльностью ветра и волнения и допустимой скоростью течения.

Предложенные алгоритмы решения задач управления бурового судна представляют собой цифро-аналоговый комплекс, что обусловлено нелинейностью решаемых задач и наличием в алгоритмах логических условий.

Разработанная авторами структурная схема управления обеспечивает возможность её технической реализации.

Ключевые слова: морской транспорт, нефтедобыча, математическая модель, буровое судно, позиционирование, пространственное перемещение, система управления.

*Информация об авторе статьи-рецензии:

Амелин Василий Степанович – кандидат технических наук, профессор Московской государственной академии водного транспорта (МГАВТ) – филиала Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Москва, Россия, kaf-sudostroeniya@yandex.ru.

Статья-рецензия поступила в редакцию 25.04.2019, принята к публикации 17.06.2019.

For the English text of the review please see p. 303.

Издательствами «Вузовский учебник» и «Инфра-М» совместно опубликована в виде монографии книга В. А. Крамаря, В. Р. Душко, В. В. Душко «Обобщённая математическая модель пространственного перемещения бурового судна». Как отмечают авторы, в монографии рассматривается методика построения обобщённой математической модели пространственного перемещения бурового судна, учитывающей взаимное влияние различных видов движения, а также изменения параметров судна в зависимости от вида выполняемой работы.

Книга предназначена для студентов, магистрантов и аспирантов машиностроительных и приборостроительных вузов, а также слушателей отделений переподготовки и повышения квалификации в области систем управления, океанографии и кораблестроения. Содержание монографии вызовет несомненный интерес и у широкого круга специалистов, имеющих отношение к проблемам освоения Мирового океана и континентального шельфа, что обусловлено бурным развитием технологий добычи полезных ископаемых в морских условиях.

Буровые суда в общем спектре технических средств изучения и освоения Мирового океана и континентального шельфа занимают одно из центральных мест. Они предназначены для работы в условиях морского волнения, действия ветра и морских течений, ведут разведочное бурение на разных глубинах в больших по площади морских районах. Эти суда отличаются высокой сложностью, использованием разнообразных морских технологий, выполняют работы по монтажу подводного оборудования, спуско-подъёмным операциям, бурению, работают с забортной измерительной аппаратурой, оснащаются комплексом технологического оборудования для обустройства скважин, оборудуются системами позиционирования судна над устьем скважины.

Алгоритмы выработки управляющих воздействий в системе позиционирования бурового судна должны обеспечивать не только оптимизацию процесса позиционирования судна, но и прогнозировать вероятность аварийных ситуаций и её минимизацию. Поэтому к измерению



координат судна, характеристик волнения, скорости ветра и течения и других параметров предъявляются особые требования в отношении их точности. Для производства замеров могут использоваться системы, работающие на различных физических принципах — гидроакустические системы, системы спутниковой навигации, радиосвязь с береговыми маяками, инклинометрические и гироскопические системы.

Перечисленные особенности буровых судов требуют решения разнообразных теоретических задач, проведения экспериментальных исследований, разработки требований к создаваемой технике, обеспечивающих эффективную эксплуатацию судна.

Исследования, приводимые в рассматриваемой монографии, направлены на решение указанных проблем и продолжают работу, начатую в ряде публикаций других авторов. Монография содержит семь глав, заключение и библиографический список. Она охватывает круг вопросов, связанных с теорией, проектированием, эксплуатацией буровых судов, решение которых направлено на обоснование и создание системы автоматического удержания судна над точкой бурения (система динамического позиционирования). В качестве основных проблем, яв-



ляющихся существенными для разработки системы автоматического удержания судна, авторы выделяют следующие:

- разработка математических моделей буровых судов, которые учитывают специфику конструкции судов, бурового оборудования и технологии выполнения буровых работ;
- получение расчётных соотношений для определения силы упора активных средств управления;
- разработка принципов построения системы измерения смещений бурового судна и обеспечение требуемой точности этих измерений;
- разработка структуры системы автоматического удержания бурового судна.

С учётом того, что при работе бурового судна изменяются не только действующие на суда внешние силы (волновое давление, ветер, течение, силы упора движителей и активных подруливающих средств), но и динамические характеристики системы судно—буровое оборудование, авторы подразделяют динамику бурового судна на отдельные периоды:

- начальный период — от момента удержания судна над точкой бурения до начала перемещения масс бурового оборудования;
- подготовительный период, в котором происходит опускание буровой колонны труб, характеризующийся изменением гидродинамических характеристик судна и моментов инерции системы;
- период бурения, в течение которого изменяются вертикальные силы, действующие на буровую колонну;
- конечный период (период подъёма труб).

Для описания динамических характеристик системы судно—буровое оборудование в работе вводится несколько систем координат — система, неподвижная в пространстве, и три системы координат, связанных с судном, после чего описываются связи между этими системами через Эйлера углы.

Базовой частью работы является глава под названием «Общие соотношения», которая посвящена разработке уравнений движения бурового судна. Для их получения используются известные методы теоретической механики и механики жид-

кости. Однако вывод этих уравнений имеет специфические особенности. Так, для описания перемещения масс бурового оборудования по вертикали, кроме вектора внешних сил и главного момента внешних сил, авторы вводят понятия вектора количества движения частиц, отбрасываемых с поверхности тела в единицу времени, и вектора момента количества движения частиц, отбрасываемых в единицу времени, дифференцируя массу перемещаемых труб по времени. Такой учёт изменения масс перемещаемых труб распространяется и на моменты инерции масс и на присоединённые массы жидкости, величина которых зависит от длины буровой колонны.

Уравнения динамики бурового судна (по определению авторов — обобщённые уравнения динамики бурового судна) получены для случая движения судна на регулярном волнении. Для этих целей использована принятая в гидромеханике методика вывода таких уравнений; при этом в граничные условия равенства производных потенциалов от скоростей системы волн на поверхности и потенциала возмущённого движения жидкости (дифрагированные волны) введено значение вектора скорости начала координат. В уравнениях движения учитывается волновое демпфирование, обусловленное создаваемыми при качке корабельными волнами.

Система уравнений дополнена уравнениями для составляющих вынужденных колебаний при вертикальном и горизонтально-поперечном движении судна на регулярном волнении.

Обобщённые уравнения движения бурового судна на регулярном волнении позволяют описать динамику движения судна в любом из выделенных авторами периодов в виде частных моделей. Эти вопросы рассмотрены отдельно, в частности, приведена развёрнутая форма уравнения движения судна в предварительный период (соответствует периоду опускания колонны труб), при этом массы, моменты инерции и присоединённые массы жидкости принимаются постоянными. В упрощённой постановке учитывается также скорость течения, однако его влияние на динамику не рассматривается.

В заключение приводится система очень громоздких дифференциальных уравнений, разрешённых относительно производных по скоростям движения. В этих уравнениях коэффициенты выражены через параметры судна.

В качестве внешних сил, действующих на буровое судно, авторы учитывают:

- восстанавливающие силы — используются метацентрические формулы устойчивости;
- демпфирующие силы вязкостной природы (силы сопротивления движению судна);
- силы волнового давления;
- силы на движителях и подруливающих устройствах;
- силы давления ветра.

Перечисленные силы рекомендуется определять по выражениям, заимствованным из других источников. Силы и моменты этих сил представляются в виде проекций на оси принятых систем координат.

Особое внимание уделено влиянию бурового оборудования на параметры уравнения движения судна. При этом рассматривается изменение положения центра масс системы судно—буровая колонна. Составлено дифференциальное уравнение, позволяющее определять положения центра масс судна на любой стадии опускания (подъёма) буровой колонны.

Рассмотрена задача об изменении присоединённых масс жидкости буровой колонны в зависимости от её длины. Задача решена в предположении, что колонна труб может быть схематизирована трёхосным эллипсоидом. Получены расчётные выражения для всех присоединённых масс колонны. Для системы буровое судно—колонна труб присоединённые массы определяются суммированием присоединённых масс судна и колонны.

Рассмотрены изменения моментов инерции масс судно—буровая колонна. Приводятся точные решения для моментов инерции колонны труб и приближённые выражения для моментов инерции масс системы судно—буровая колонна. По результатам исследований об изменении моментов присоединённых масс выполнены численные расчёты и дана оценка

влияния бурового оборудования на параметры уравнения динамики судна. Сделан вывод об относительно малом влиянии изменения присоединённых масс и, как следствие, — о возможности пренебречь этим изменением, а также о необходимости исследования влияния на движение бурового судна изменения центра масс системы судно—буровая колонна. В дополнение к главам, связанным с составлением и анализом уравнений движения, приведено общее краткое описание активных средств управления для удержания бурового судна в заданной точке, а также выражения для определения некоторых характеристик их работы (упора, момента, потребляемой мощности), заимствованные из других источников.

Исходя из минимизации требуемой мощности, изучен также вопрос выбора оптимального положения бурового судна по отношению к направлению действия ветра и течения. В качестве критериев оптимальности используются критерии, рассмотренные выше.

Отдельная глава отведена смещению бурового судна. Анализируются системы, используемые в настоящее время для определения положения судна в открытом море: радионавигационные (спутниковые и с наземными ориентирами); инерциальные навигационные системы; астронавигационные системы; а также специальные методы, обусловленные особенностями работы бурового судна: динамометрические, инклинометрические, гидроакустические.

Делается вывод о целесообразности использования для определения положения плавучего основания системы гидролокации.

Рассмотрена задача определения смещений бурового судна относительно маяка по данным измерений разностно-дальномерной системы.

Составлены и проанализированы системы уравнений, описывающие связи координат маяка и приёмников. Обращено внимание, что прямым методом решения этих уравнений задача определения координат судна не решается из-за иррациональности системы. Приводятся условия, которым должны удовлетворять координаты приёмников для получения



решения задачи и обеспечения необходимой точности. Разработан алгоритм вычисления координат маяка (или смещения приёмников относительно маяка). Рассмотрена задача об определении горизонтальных смещений бурового судна при качке, получены необходимые соотношения. При этом решается задача о влиянии углов качки на ошибки измерений. Приведены расчёты погрешностей измерений координат судна в зависимости от углов качки.

Последняя глава монографии направлена на разработку системы автоматического удержания бурового судна. При постановке задачи авторы исходят из того, что удержание бурового судна возможно при установке двух и более АСУ, каждое из которых может иметь два управляющих воздействия – силу упора и угол разворота (другие схемы АСУ не рассматриваются). Как следствие, при воздействии на судно течения, ветра и волнения, при общем требовании обеспечения высокой точности, необходимо обеспечивать управление АСУ автоматически, то есть требуется разработка системы автоматического управления АСУ.

Задача системы автоматического управления АСУ формулируется авторами следующим образом:

1. Система управления АСУ должна обеспечивать стабилизацию горизонтальных смещений судна с необходимой точностью.

2. Система должна обеспечивать управление по углу курса таким образом, чтобы текущее его значение совпадало с оптимальным значением, обеспечивающим минимизацию затрат мощности на управление.

Авторами предложена структурная схема автоматической системы управления, которая основывается на следующих принципах. Система, вследствие наличия неизмеряемых возмущений (волновое давление), неточности вычисления сил давления и ветра должна строиться по комбинированному принципу в цифро-аналоговом виде. Положение судна как объекта управления определяется смещениями относительно гидроакустического маяка, установленного на дне моря. Характеристики волнения и качки судна

считаются помехами. Каждое из внешних возмущающих воздействий (ветер, течение) характеризуется скоростью и направлением. Силы упора АСУ и их углы – управляющие воздействия. Система гидролокатора измеряет разности прихода сигналов на приёмники, по результатам измерений которых через вычислительный комплекс определяются координаты судна. Блок управления по отклонению вырабатывает промежуточные управляющие воздействия. Блок оптимизации сил упора осуществляет оптимизацию промежуточных управляющих воздействий в цифровой форме по силе упора и углам управления, используемым автоматическим приводом по отслеживанию сил упора и углов разворота. Измеряемыми величинами являются углы ветра и течения и их скорости, горизонтальные смещения судна и курсовой угол. Реализация предлагаемой системы управления возможна только при упрощении модели бурового судна.

Такое упрощение управления движением выполнено авторами на основе учёта действия ряда благоприятных факторов: малого отклонения судна от начала координат, ограниченных параметров качки (при необходимости, путём установки успокоителей качки и др.). По результатам упрощённых уравнений движения и их линеаризации выполнен анализ оптимальных управлений при случайных стационарных возмущениях. В качестве критерия оптимальности управления принят функционал, зависящий от координат и управления. Для минимизации функционала при ограничении координат судна с допустимым диапазоном отклонений использован метод неопределённых множителей Лагранжа и условий минимума критерия в виде уравнений Эйлера–Пуассона. Для возмущений, заданных корреляционными функциями, получены законы управления, выполнена оптимизация параметров системы. С использованием метода неопределённых множителей Лагранжа решена задача синтеза параметров системы.

В завершающей части работы выполнены упрощения уравнений движения на основе предположения, что на судне установлены эффективные успокоители кач-

ки, вследствие чего углы качки и их производные равны нулю. Дополнительные упрощения уравнений движения в неподвижной системе координат и их линеаризация выполнены, исходя из условия, что фазовые координаты судна мало отличаются от их значений в начальном состоянии. Упрощённые уравнения движения бурового судна в неподвижной системе координат в отклонениях от начального состояния приведены в работе в развёрнутом виде. Эти уравнения являются основой для синтеза замкнутой системы, отвечающей требованиям точности при минимальных упрощающих воздействиях. Система управления должна обеспечивать выполнение требований к предельно допустимым отклонениям по линейным координатам и (из соображений экономичности управления) отклонениям по углу рыскания за полное время работы системы.

Решение задачи заключается в определении оптимальных управляющих воздействий и соответствующих оптимальных движений, доставляющих минимум функционала от вектора, составляющими которого являются измеряемые координаты судна, векторы управляющих воздействий и матрица весовых коэффициентов с варьируемыми параметрами. Нахождение минимума функционала также выполнено методом неопределённых множителей Лагранжа с учётом необходимых условий в виде уравнения Эйлера.

Выполнены исследования динамики САУ бурового судна в неподвижной системе координат, и для системы уравнений динамики линеаризованного объекта получены выводы для двух проекций сил упора и момента с различными параметрами, выбором которых можно добиться любой точности системы. Авторы на основании выполненных исследований модели системы автоматического управления делают заключение о целесообразности применения предложенного закона управления. Расчёты проводились для бурового судна водоизмещением $D = 7200$ тонн с некоторыми несущественными упрощениями системы управления. Модель выполняла задачи по выбору оптимального угла курса, вычислению управляющих воздействий, преобразова-

нию проекций управляющих сил и моментов в силы упора и углы поворота САУ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В монографии рассмотрены особенности динамики буровых судов, предназначенных для работы в морских условиях. Комплекс включённых в монографию теоретических исследований направлен на решение задач, связанных с обоснованием особенностей системы динамического позиционирования бурового судна, необходимой для его эксплуатации в условиях открытого моря.

Создание системы динамического позиционирования требует решения многих сложных задач, что обусловлено комплексом объективных причин:

- проблемой определения внешних сил, действующих на судно (волновое давление, давление ветра, морское течение, силы на движителях и подруливающих устройствах), которые в аналитическом виде определяются лишь приближенно;
- нерегулярностью морского волнения, характеристики которого описываются вероятностными методами;
- сложностью формального описания динамической системы буровое судно—буровая колонна;
- техническими проблемами определения координат судна с требуемой точностью и её математического обоснования;
- сложностью комплексного учёта всех действующих факторов и синтеза системы оптимального управления и т.д.

В рассматриваемой работе решаются многие из таких задач. Анализ приведённых в монографии исследований показывает, что они выполнены на достаточно высоком уровне. Обращает на себя внимание, что работа отличается разнообразием задач, их сложностью, оригинальностью подхода к решению, широким использованием различных методов аналитического аппарата математики, механики и гидромеханики. Полученные результаты подчёркивают высокое качество проведённых исследований.

Выполненные авторами исследования показывают, что для обеспечения работы бурового судна в условиях действия волнения, ветра и морского течения такое судно должно оборудоваться комплексом изме-



рительных и автоматически управляемых средств силового воздействия на судно, обеспечивающих его позиционирование над скважиной в пределах отклонений, допускаемых конструктивными особенностями бурового оборудования.

Авторами разработаны предложения по структуре системы, выполняющей задачи позиционирования. В качестве основных задач управления системой автоматического удержания бурового судна авторы выделяют:

- определение оптимальных углов курса судна;
- построение схемы возмущений в виде проекций сил и моментов в системе координат, связанной с судном;
- преобразование проекций сил и моментов в оптимальные значения реальных управлений, в виде сил упора и углов разворота активных средств управления.

Предлагаемая система по функциональному назначению делится на две основных составляющих:

1. Измерительный комплекс, включающий автоматическое измерение угла курса и векторов скорости ветра и течения, углов крена и дифферента судна и гидроакустический измеритель разностей времени прихода на четыре приёмника.

2. Комбинированная система для решения комплекса задач управления, включающая оптимизатор угла курса судна, вычислитель проекций сил ветра и течения на связанные с судном оси координат, блок управления по отклонению, оптимизатор преобразования проекций сил на оси координат в силы упора и углы разворота активных средств управления, а также автоматизированный комплекс задания сил упоров и углов разворота активных средств управления.

Условия функционирования системы автоматического удержания судна определяются балльностью ветра и волнения и допустимой скоростью течения. Разработанная структурная схема управления обеспечивает возможность её технической реализации.

Предложенные алгоритмы решения задач управления, представляют собой цифро-аналоговый комплекс, что обусловлено нелинейностью решаемых задач и наличием в алгоритмах логических усло-

вий. В этом комплексе цифровая часть обеспечивает выработку законов управления по отклонению, решение задач оптимизации, вычисление смещения судна на основе данных и измерительной системы. Аналоговая часть производит измерения физических величин, необходимых для управления и согласования объектов управления с цифровой частью.

По перечисленным причинам многие задачи, рассмотренные в монографии, решались при введении существенных упрощений. Оценку надёжности полученных решений можно дать лишь по результатам модельного или натурального эксперимента.

Поскольку исследования, приведённые в монографии, носят в значительной мере поисковый характер, авторами выполнен ряд расчётов, целью которых является выявление роли отдельных параметров системы судно—буровая колонна на динамические характеристики этой системы. В частности, показано относительно слабое влияние изменения инерционных характеристик системы при опускании буровой колонны, установлена прямая зависимость ошибок определения значений координат судна от амплитуд качки и др.

В качестве содержательных замечаний необходимо отметить следующее:

По моему мнению, допущена ошибка в постановке и решении задачи об изменении аппликаты центра тяжести судна при опускании (подъёме) колонны труб. Как известно, при наличии на судне подвешенного груза, каковым является колонна труб, сила веса прикладывается в точке подвеса, и её аппликата не зависит от действительного положения этого груза по высоте. Значение аппликаты центра тяжести системы судно—буровая колонна может измениться только вследствие перераспределения масс между судном и буровой колонной. Такое изменение элементарно находится из рассмотрения статического момента массы судна и массы бурового оборудования.

Библиографический список для монографии, наверное, все-таки недостаточен. По рассматриваемым вопросам имеется большой перечень опубликованных работ, которые могли бы расширить излагаемый взгляд на решаемые проблемы. ●