

УДК 62

## МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ОБСТАНОВОЧНЫХ СУДОВ

Чистякова Дарья Дмитриевна<sup>1</sup>, магистрант

e-mail: [dashachistyakovamr@yandex.ru](mailto:dashachistyakovamr@yandex.ru)

Кузнецова Вера Владимировна<sup>1</sup>, к.т.н.

e-mail: [anis88vera@mail.ru](mailto:anis88vera@mail.ru)

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** В работе рассматриваются модели расчета навигационного времени обстановочного судна, выполняющего задачи по обеспечению безопасности судоходства. Представлена структура навигационного времени как совокупности операций по постановке, снятию и обслуживанию средств навигационной обстановки, а также выполнению промеров глубин и траления. Разработаны модели расчета времени постановки и снятия буев при различных условиях эксплуатации. Учитывается вероятностный характер дополнительных и аварийных работ.

**Ключевые слова:** обстановочное судно, навигационное время, средства навигационной обстановки, постановка буев, снятие буев, обслуживание СНО, промеры глубин, вероятностные процессы.

## MODELS FOR CALCULATING TECHNICAL PERFORMANCE INDICATORS OF ENVIRONMENTAL VESSELS

Darya D. Chistyakova<sup>1</sup>, Master's Degree Student

e-mail: [dashachistyakovamr@yandex.ru](mailto:dashachistyakovamr@yandex.ru)

Vera V. Kuznetsova<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences

e-mail: [anis88vera@mail.ru](mailto:anis88vera@mail.ru)

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The paper considers models for calculating the navigation time of a survey vessel performing tasks to ensure the safety of navigation. The structure of navigation time is presented as a set of operations for setting, removing, and maintaining navigation aids, as well as performing depth measurements and trawling. Models for calculating the time of setting and removing buoys under various operating conditions have been developed. The probabilistic nature of additional and emergency operations is taken into account.

**Keywords:** survey vessel, navigation time, navigation aids, buoy placement, buoy removal, maintenance of navigation aids, depth measurements, probabilistic processes.

Развитие транспортной системы внутренних водных путей является важным направлением обеспечения устойчивого функционирования экономики и логистической инфраструктуры государства. Рост объемов грузовых и пассажирских перевозок предъявляет повышенные требования к безопасности судоходства, надежности навигационного оборудования и эффективности работы специализированного флота, обеспечивающего эксплуатационное содержание судовых ходов. Существенную роль в данной системе играют обстановочные суда, предназначенные для поддержания навигационной обстановки на внутренних водных путях и выполнения комплекса технических мероприятий, обеспечивающих безопасное движение судов.

Обстановочный флот представляет собой специализированную категорию служебно-вспомогательных судов, деятельность которых направлена на организацию и поддержание гарантированных условий судоходства. В задачи таких судов входит постановка, перестановка и снятие плавучих средств навигационной обстановки, контроль состояния судового хода, обслуживание береговых и плавучих навигационных знаков, проверка исправности сигнальных огней и оперативное устранение выявленных неисправностей. Кроме того, обстановочные суда регулярно выполняют промеры глубин, траление участков водного пути, обследование акваторий, а также участвуют в аварийно-восстановительных и вспомогательных работах.

Современные условия эксплуатации внутренних водных путей характеризуются значительным количеством факторов, влияющих на эффективность работы обстановочного флота. К ним относятся гидрометеорологические условия, изменение уровней воды, сезонность навигации, протяженность обслуживаемых участков, интенсивность движения судов, а также необходимость выполнения внеплановых работ. В отличие от транспортных судов, эксплуатация которых носит более предсказуемый характер, деятельность обстановочных судов связана с высокой степенью неопределенности и необходимостью оперативного реагирования на изменение навигационной обстановки.

Особое значение приобретает техническая оснащенность обстановочных судов. На современных судах данного типа используются средства спутниковой навигации, гидрографические комплексы, эхолоты, системы радиосвязи и автоматизированного контроля положения навигационных знаков. Применение подобного оборудования позволяет повысить точность выполняемых работ и сократить время обслуживания участков водного пути. Однако увеличение функциональности судна одновременно усложняет процесс оценки его технико-эксплуатационных характеристик и требует разработки более совершенных методов расчета.

Важной особенностью работы обстановочного флота является сочетание плановых и вероятностных процессов. Часть операций выполняется по утвержденным графикам и заранее известным маршрутам, включая сезонную постановку и снятие буев, периодическое обслуживание навигационных знаков и проведение контрольных промеров. Вместе с тем значительный объем времени затрачивается на внеплановые мероприятия: устранение аварийных повреждений средств навигационной обстановки, срочные промеры участков с изменяющимися глубинами, выполнение договорных работ и обеспечение безопасности судоходства в нестандартных условиях. Подобная специфика существенно усложняет определение фактической загрузки судна и требует применения вероятностных методов анализа.

При проектировании и эксплуатации обстановочных судов важное значение имеет определение навигационного времени, производительности и эффективности использования судна. Ошибки в расчетах могут приводить к снижению надежности навигационного обеспечения, увеличению эксплуатационных затрат и нерациональному использованию технических ресурсов. В связи с этим возникает необходимость разработки



математических моделей, позволяющих учитывать не только основные виды эксплуатационных операций, но и влияние случайных факторов на работу судна.

Математическое моделирование является одним из наиболее эффективных инструментов исследования эксплуатационных процессов на водном транспорте. Использование расчетных моделей позволяет прогнозировать продолжительность выполнения работ, оценивать потребность в технических ресурсах, определять оптимальные параметры судна и анализировать эффективность различных режимов эксплуатации. Применительно к обстановочному флоту подобные модели имеют особую практическую значимость, поскольку позволяют учитывать специфику навигационного обслуживания и разнообразие выполняемых функций.

Следует отметить, что обстановочные суда в настоящее время рассматриваются не только как технические средства обслуживания навигационной обстановки, но и как универсальные многофункциональные суда, способные выполнять широкий спектр гидрографических, контрольных и вспомогательных операций. В зависимости от района эксплуатации и назначения они могут использоваться для обследования состояния судового хода, транспортировки персонала, доставки оборудования, участия в аварийных работах и мониторинга состояния водных объектов. Подобная универсальность требует комплексного подхода к оценке их эксплуатационной деятельности.

Таким образом, разработка модели расчета технических показателей работы обстановочных судов является актуальной научно-практической задачей, направленной на повышение эффективности навигационного обеспечения внутренних водных путей. Создание адекватных расчетных зависимостей позволяет учитывать особенности эксплуатационных процессов, анализировать влияние различных факторов на производительность судна и формировать обоснованные решения на этапах проектирования и эксплуатации обстановочного флота.

Судоходные условия обеспечиваются и поддерживаются с помощью обстановочных судов. Обстановочники сначала занимаются постановкой знаков плавучей обстановки, затем снимают их, когда вода начинает покрываться льдом. Все это происходит по утвержденной программе. Деятельность бригады разделена на дневную и ночную смены, что обусловлено спецификой навигационного оборудования и требованиями безопасности. В светлое время суток основной упор делается на инженерно-измерительные работы: производится промер глубин для актуализации карт, перестановка навигационных знаков, замена элементов питания в светосигнальных приборах, а также траление судового хода. Кроме того, в обязанности бригады входит оперативная передача собранных данных о габаритных размерах и текущем состоянии пути. С наступлением темноты фокус смещается на контроль функционирования световой навигации. Бригада осуществляет обход участка с целью проверки исправности сигнальных огней. При обнаружении неисправностей (недостаточная видимость, неверная ориентировка створных фонарей относительно судового хода) проводятся необходимые ремонтные работы. График работы и периодичность объезда закрепленного участка напрямую зависят от его протяженности: для коротких дистанций цикл составляет одни сутки, для протяженных — двое.

Навигационное время обстановочного теплохода ( $t_n$ ) можно представить как сумму времени, отводимого на постановку ( $t_n$ ), снятие ( $t_{сн}$ ), обслуживание СНО по плану ( $t_{обсл}$ ), аварийное обслуживание СНО ( $t_{обсл}^a$ ), выполнение плановых промеров ( $t_{пр}$ ) и траления судового хода ( $t_{тр}$ ), а также времени на выполнение дополнительных работ на договорной основе ( $t_{доп}$ ): использование судна в качестве разъездного ( $t'_p$ ), выполнение промеров ( $t'_{пр}$ ), траления по договору с клиентурой ( $t'_{тр}$ ).



$$t_n = t_n + t_{cn} + t_{обсл} + t_{обсл}^a + t_{np} + t_{mp} + t_{дон},$$

$$t_{дон} = t'_{np} + t'_{mp} + t'_p. \quad (1)$$

Время на постановку СНО складывается из ходового времени, времени на маневр и стоянку. Время на маневр и стояночное время связано с операциями, проводимыми с каждым знаком.

Если число буюв  $n_{бс}$ , перевозимых на судне либо на барже в сцепе с ним, превышает число буюв  $n_{б}$ , то постановка СНО на участке происходит в один рейс и время на постановку определяется по выражению:

$$t_n = \frac{2 \times (l_{доуч} + l_{уч})}{v} + n_{б} \times (t_{nm} + t_{ncm}), \quad (2)$$

где  $l_{доуч}$  — расстояние, которое необходимо пройти судну до участка обслуживания;

$l_{уч}$  — длина участка обслуживания;

$t_{nm}$  — время, отводимое на маневренные операции при постановке одного буюв;

$t_{ncm}$  — стояночное время при постановке одного буюв.

Если же число буюв, размещаемое на судне либо на барже, не превышает число расставляемых на участке буюв, то время постановки вычисляется в виде:

$$t_n = \frac{l}{v} + n_{б} \times (t_{nm} + t_{ncm}),$$

$$l = 2 \times (n_{бс} \times l_1 + 2n_{бс} \times l_1 + 3n_{бс} \times l_1 + \dots + in_{бс} \times l_1) + 2 \times i \times l_{доуч} \quad (3)$$

где  $l$  — расстояние, пройденное судном при расстановке буюв;

$l_1$  — расстояние между буювами на участке обслуживания.

$$l_1 = \frac{l_{уч}}{n_{б} + 1} \quad (4)$$

Формула суммы  $i$ -тых членов арифметической прогрессии [1]:

$$S_i = \frac{a_1 + a_i}{2} \times i, \quad (5)$$

где  $a_1$  — первый член арифметической прогрессии;

$a_i$  —  $i$ -тый член арифметической прогрессии;

$i$  — количество членов арифметической прогрессии.

В нашем случае количество членов — это количество рейсов, совершаемое судном, определяется выражением:

$$i = \frac{n_{б}}{n_{бс}} \quad (6)$$

Подставляя формулы (4-6) в выражение (3) получим:

$$l = \frac{n_{б}}{n_{бс}} \times \left( l_{уч} \times \frac{(n_{бс} + n_{б})}{(n_{бс} + 1)} + 2l_{доуч} \right). \quad (7)$$

Выражения для определения времени снятия буюв в конце навигации:  
при одном рейсе

$$t_{сн} = 2 \times \left( \frac{l_{доуц} + l_{уч}}{v} \right) + n_{б} \times (t_{снм} + t_{снст}) \quad (8)$$

при нескольких рейсах

$$t_{сн} = \frac{l}{v} + n_{б} \times (t_{снм} + t_{снст}), \quad (9)$$

где  $t_{снм}$  — время, отводимое на маневренные операции при снятии одного бую;

$t_{снст}$  — стояночное время при снятии буюв.

Время, затрачиваемое на манёвры судна при постановке и снятии плавучих знаков, является базовой величиной для расчётов. Его значение определяется на основе статистических данных, накопленных за предыдущие периоды, либо устанавливается согласно нормативам и фактическим показателям конкретной обстановочной службы.

Время на обслуживание обстановки по установленному графику за навигацию определяется по выражению:

$$t_{обсл} = n_{обсл} \times \left( \frac{2 \times (l_{доуц} + l_{уч})}{v} + n_{б} \times t_{обсл.ст} \right), \quad (10)$$

где  $n_{обсл}$  — число обслуживаний СНО за навигацию, сут;

$t_{обсл.ст}$  — время, затрачиваемое на обслуживание одного знака навигационной обстановки.

Число обслуживаний за навигацию  $n_{обсл}$  принимается в зависимости от принятого графика объездов обстановочного участка,  $m$  раз в  $n$  суток.

$$n_{обсл} = \left( \frac{t_{э}}{n} \right) \times m + \left[ t_{э} - \left( \frac{t_{э}}{n} \right) \times n \right], \quad (11)$$

где  $t_{э}$  — продолжительность навигации обстановочного судна, сут.

Время, затрачиваемое на промер глубин за навигацию по плану, определяется по выражению:

$$t_{np} = n_{np} \times \left( \frac{2 \times l_{доп} + l_{np}}{v} + \frac{l_{np}}{v_{np}} \right), \quad (12)$$

где  $n_{np}$  — число промеров за навигацию по плану;

$l_{доп}$  — расстояние от базы до участка, на котором будет произведен промер;

$l_{np}$  — длина участка, на котором необходимо произвести промер глубин;

$v_{np}$  — скорость судна при промере глубин, может быть вычислена приближённо по выражению:

$$v_{np} \leq 0,06 \times a_{np}, \text{ км/ч}, \quad (13)$$

где  $a_{np}$  — расстояние между промерными точками, определяемое по плану промера глубин, м.

При этом скорость  $v_{np}$  не должна выходить за пределы диапазона 2÷15 км/ч [2].  
Время на траление по плану за навигацию:

$$t_{mp} = n_{mp} \times \left( 2 \times \frac{l_{доп}}{v} + \frac{s_{mp}}{b_{mp} \times v} + \frac{s_{mp}}{b_{mp} \times v_{mp}} \right), \quad (14)$$

где  $n_{mp}$  —число тралений за навигацию по утвержденному плану;

$l_{доп}$  —расстояние от базы до участка, на котором производится траление;

$s_{mp}$  —площадь траления;

$b_{mp}$  —ширина полосы траления, зависит от типа трала;

$v_{mp}$  —скорость хода судна при тралении.

Зависимость скорости буксировки трала от мощности буксира условно можно считать линейной:

$$v_{\bar{o}} = aN + b, \quad (15)$$

где  $a, b$  —коэффициенты линейной зависимости.

Тогда приращение скорости буксировки можно представить как дифференциал по мощности:

$$\Delta v_{\bar{o}}(N) = \frac{\partial v_{\bar{o}}}{\partial N} dN = a \cdot dN = a \cdot \Delta N, \quad (16)$$

Известно, что при тралении, производимым обстановочным судном с мощностью, равной 150 л.с. теплоход развивает скорость 7 км/ч. Таким образом, скорость буксировки трала можно выразить формулой:

$$\begin{aligned} v_{mp} &= v^{150} + a \times \Delta N, \\ \Delta N &= N - 150. \end{aligned} \quad (17)$$

Статистические значения параметра  $a$ , которые получены на основе анализа паспортных диаграмм буксирных судов при буксировке ими однотипных объектов, приведены в табл.1,

По данным табл.1 получена зависимость параметра  $a$  от мощности энергетической установки буксира (18).

Таблица 1. Значение параметра  $a$  в зависимости от мощности буксира

| Приращение мощности буксира при приращении скорости на 1 км/ч, $\Delta N$ , л.с | 30      | 80      | 100     | 125     | 250      |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| $a = \frac{\Delta v_{\bar{o}}(N)}{\Delta N}$                                    | 0,0333  | 0,0125  | 0,01    | 0,008   | 0,004    |
| Мощность энергетической установки буксира, $N$ , л.с./кВт                       | 150/110 | 300/220 | 450/330 | 600/441 | 1200/882 |

$$a = 4,0736 \times N^{-0,982} \quad (18)$$

Окончательно получаем выражение для расчета  $v_{mp}$ .

$$v_{mp} = 7 + ((4,0736 \times ((N/0,735)^{0,018})) - 611,04 \times (N/0,735)^{-0,982}), \text{ км/ч.} \quad (19)$$

При проектировании судов, предназначенных для траления водных путей, возникает необходимость в ориентировочной оценке скорости буксировки трала. Для этих целей предлагается приближённая формула, которая служит инструментом для предварительных расчётов на данном этапе.

В то же время эксплуатационная деятельность обстановочного судна не ограничивается плановыми заданиями. Объём внеплановых, или договорных, работ, выполняемых в течение навигации, носит стохастический (вероятностный) характер. Это обусловлено тем, что такие работы инициируются заказчиками, и их точное количество и объём становятся известны лишь по факту поступления заявок.

Для прогнозирования временных затрат на выполнение этого случайного объёма работ используется математический аппарат теории вероятностей. В качестве модели принимается, что и количество заявок, и протяжённость обслуживаемых участков являются непрерывными случайными величинами. Учитывая сложность сбора репрезентативной статистики для построения точной функции распределения, вводится обоснованное допущение: случайная величина подчиняется нормальному закону распределения. [1,4]

Важно отметить, что для решения основной задачи — определения времени, затрачиваемого на эти работы — нет необходимости в полном описании вероятностного распределения. Достаточно оперировать его ключевой числовой характеристикой — математическим ожиданием, которое представляет собой среднее ожидаемое значение.

На практике, когда диапазон возможных значений величины определён на основе накопленного опыта, её математическое ожидание может быть рассчитано с применением «правила трёх сигм», что позволяет получить статистически обоснованную оценку временных затрат.

Исходя из вышесказанного, время на выполнение промеров глубин по договору за навигацию определяется по выражению:

$$t'_{np} = n'_{np} \times \left( 2 \times \frac{l'_{донп}}{v} + \frac{l'_{np}}{v} + \frac{l'_{np}}{v_{np}} \right), \quad (20)$$

где  $n'_{np}$  — математическое ожидание числа промеров глубин по договору за навигацию;

$l'_{донп}$  — расстояния до участка, на котором необходимо произвести промер глубин по договору;

$l'_{np}$  — математическое ожидание величины участка, на котором производится промер по договору.

Время на выполнения траления за навигацию по договору:

$$t'_{mp} = n'_{mp} \times \left( 2 \times \frac{l'_{донп}}{v} + \frac{s'_{мп}}{b_{мп} \times v} + \frac{s'_{мп}}{b_{мп} \times v_{мп}} \right), \quad (21)$$

где  $n'_{мп}$  — математическое ожидание числа тралений по договору за навигацию;

$l'_{донп}$  — математическое ожидание величины расстояния до участка, на котором необходимо произвести траление по договору;

$s'_{мп}$  — математическое ожидание величины площади участка, на котором производится траление по договору.

Время на выполнение судном разъездных операций в течение всей навигации определяется по выражению:

$$t_p' = 2n_p' \times \left( \frac{l_{доп}' + l_p'}{v} \right), \quad (22)$$

где  $n_p'$  — математическое ожидание числа выполнения разъездных операций по договору за навигацию;

$l_{доп}'$  — математическое ожидание величины расстояния до участка обслуживания;

$l_p'$  — математическое ожидание величины участка обслуживания.

Время на аварийное обслуживание СНО за навигацию складывается из времени, затрачиваемого на обслуживание одного знака обстановки:

$$t_{обсл}^a = n_a \times (1,5 \times t_{см}^a), \quad (23)$$

где  $n_a$  — математическое ожидание числа аварийных обслуживаний СНО;

$t_{см}^a$  — стояночное время при аварийном обслуживании одного знака навигационной обстановки, устанавливается согласно практике работы по аварийному обслуживанию.

В ходе проведенного исследования были рассмотрены особенности эксплуатационной деятельности обстановочных судов и разработаны модели расчета основных технических показателей их работы. Выполненный анализ показал, что эффективность функционирования обстановочного флота напрямую связана с точностью определения навигационного времени, необходимого для выполнения комплекса работ по обеспечению безопасности судоходства.

В работе была представлена структура навигационного времени, включающая операции по постановке и снятию средств навигационной обстановки, плановому и аварийному обслуживанию навигационных знаков, выполнению промеров глубин, тралению судового хода, а также дополнительным работам, выполняемым по договору. Разработанные расчетные зависимости позволяют учитывать особенности выполнения указанных операций в различных условиях эксплуатации и обеспечивают возможность более точной оценки производительности судна.

Особое внимание в исследовании уделено вероятностному характеру дополнительных и аварийных работ. В отличие от плановых операций, объем и периодичность внеплановых мероприятий заранее определить затруднительно, что требует применения методов теории вероятностей и математической статистики. Использование математического ожидания при расчете времени выполнения дополнительных работ позволяет получить более объективную оценку эксплуатационной загрузки судна и учитывать влияние случайных факторов на организацию работы флота.

Разработанные модели могут использоваться как на этапе проектирования обстановочных судов, так и в процессе их практической эксплуатации. Применение предложенных зависимостей дает возможность определять оптимальные параметры судна, оценивать необходимую мощность энергетической установки, рассчитывать производительность и анализировать экономическую эффективность различных вариантов эксплуатации. Это особенно важно при модернизации существующего флота и создании новых судов, отвечающих современным требованиям навигационного обеспечения.

Практическая значимость исследования заключается также в возможности применения полученных результатов при планировании работы навигационных служб. Использование математических моделей способствует более рациональному распределению ресурсов, сокращению эксплуатационных затрат и повышению надежности обслуживания



внутренних водных путей. Кроме того, результаты работы могут быть полезны при разработке нормативных и методических документов, регламентирующих деятельность обстановочного флота.

Перспективным направлением дальнейших исследований является создание комплексных цифровых моделей работы обстановочного флота с использованием реальных статистических данных эксплуатации. Подобный подход позволит учитывать сезонные изменения условий судоходства, влияние гидрометеорологических факторов, интенсивность движения флота и особенности отдельных участков внутренних водных путей. Кроме того, использование методов компьютерного моделирования и анализа больших массивов эксплуатационных данных может существенно повысить точность прогнозирования работы судов.

Таким образом, выполненное исследование подтверждает необходимость применения современных методов математического моделирования при оценке технических показателей работы обстановочных судов. Разработанные расчетные зависимости позволяют учитывать специфику эксплуатационной деятельности специализированного флота, обеспечивают возможность повышения эффективности его использования и создают основу для дальнейшего совершенствования системы навигационного обеспечения внутренних водных путей.

#### **Список литературы:**

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и математическая статистика. — М.: КНОРУС, 2016. — 504 с.
2. РД 31.74.04-2002 Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним. Утв. ТК 318 Морфлот, 17.06.2004.-161 с.
3. Гусев В.А., Климов В.А. Судоходство и навигационное обеспечение внутренних водных путей. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2018. — 312 с.
4. Лурье А.И. Основы математического анализа. — М.: Физматлит, 2015. — 640 с.

