

УДК [656.61.0525 : 551.467] : 627.2

К вопросу о мореходных качествах судна при ледовом плавании

А.Н. Анисимов

Морская академия МГТУ, кафедра управления судном и промышленного рыболовства

Аннотация. В статье представлен анализ ледового плавания на акватории порта, которое рассматривается как плавание в двухфазной среде с вертикальным распределением. Описан метод определения вязкостной составляющей сопротивления при плавании в льдо-водной среде. Двухфазную среду предложено рассматривать как неньютоновскую жидкость.

Abstract. The paper presents the analysis of ice navigation in port waters, which is regarded as swimming in two-phase medium with vertical distribution. The method for determining the viscosity component of resistance in ice-aquatic medium has been described. Two-phase medium has been proposed to be considered as non-Newtonian liquid.

Ключевые слова: лед, акватория порта, канал, двухфазная среда, неньютоновская жидкость, безопасность
Key words: ice, sea port, channel, two-phase medium, non-Newtonian liquid, safety

1. Введение

Плавание во льдах относится к категории наиболее сложных. Ледовые условия оказывают существенное влияние на мореходные качества судна, в особенности на его управляемость, ходкость и остойчивость. Кроме того, значительно повышается вероятность навигационных происшествий, связанных с повреждением корпуса судна при столкновении с обломками крупного льда; существует опасность навалов при ледокольной проводке в конвое; увеличивается риск посадки судна на мель. Плавание в припае на подходах к порту и в его акватории имеет особенности, которые требуют отдельного детального рассмотрения.

Для обеспечения безопасности плавания и лоцманской проводки на подходах к порту и в его акватории в зимних условиях формируется ледовый канал. Делается это с максимальным соответствием морским картам.

Созданный в припае ледовый канал постоянно поддерживается портовыми буксирами и ледоколами. В процессе эксплуатации ледового канала может происходить повреждение его кромок вследствие значительных поперечных и расходящихся волн – в носу и в корме судна на первоначальной стадии формирования льда (нилас, молодой лед).

По мере дальнейшей эксплуатации канала бровки его утолщаются за счет вытесненного корпусами судов подсонов, образуя "буртик", который может достигать значительной высоты. Со временем толщина битого льда в канале становится больше, чем толщина льда за бровкой в сплошном поле. Снежный покров способствует формированию и образованию еще большего количества мелкобитого льда на акватории и еще большему формированию бровок. В процессе эксплуатации акватории порта в течение всего сезона лед никуда не "убирается", и распределение битого льда по толщине канала становится важным условием успешной проводки судов. При повреждении бровки возникает опасность выплывания крупно-битого льда на канал, что, в свою очередь, создает реальную угрозу для безопасного плавания судов.

Сила сопротивления мелкобитого льда движению судна на канале непостоянна и зависит от многих факторов. Удерживать судно на центре канала по створным знакам довольно трудно, т.к. оно стремится уйти с оси канала в сторону меньшего сопротивления. Мелкобитый тертый лед в силу разных причин распределяется в канале неравномерно и имеет разную сплоченность и толщину, как по длине, ширине, так и по высоте канала. При плавании по каналу стремление удерживать судно перекладкой руля на центре канала по створам будет способствовать движению судна под углом к оси канала, и в результате может привести к повреждению бровки, а в последующем – к смещению всего канала по ширине к навигационным опасностям. Поэтому подготовка канала буксирами для проводки судна по нему обязательно включает окалывание буксирами кромок канала и прохождение их по оси канала по створным линиям.

В настоящей работе проведен анализ ледового плавания по акватории порта как плавания в двухфазной среде с вертикальным распределением. На основе данного анализа найден способ определения вязкостной составляющей сопротивления при плавании в льдо-водной среде.

2. Исследование составляющих сопротивления корпусу судна на чистой воде и при ледовом плавании

Сопротивления корпуса судна на чистой воде

Ходкость, как мореходное качество, включает сопротивление корпусу судна и раздел движителей. В общем случае систему дифференциальных уравнений, описывающих движение судна при маневрировании с изменением режима работы главного двигателя, на чистой воде на малых скоростях, с применением допущений на основании второго закона динамики, можно представить в виде:

$$m(1 + \lambda_{11})(dv / dt) = -R(v) - P(n), \quad (1)$$

где $m(1 + \lambda_{11})$ – масса судна с учетом присоединенной массы вдоль Ox ; dv / dt – ускорение судна; $R(v)$ – сопротивление корпуса судна окружающей среде; $P(n)$ – сила упора гребного винта (ГВ).

Уравнение (1) справедливо и для плавания во льдах. Для нас представляет интерес правая часть уравнения. При плавании в условиях чистой воды $R(v)$ принимают пропорциональным квадрату скорости, преобразуя и интегрируя уравнение, получают закон изменения скорости и при дальнейшем преобразовании вычисляют длину пути, пройденного судном, и время. Впоследствии данные используются для построения инерционных, стартовых и инерционно-тормозных характеристик.

В развернутой форме полное сопротивление судна представляют в виде:

$$R = R_F + R_{VP} + R_W + R_A + R_{AP} + R_{AA}, \quad (2)$$

где R_F – сопротивление трения; R_{VP} – сопротивление формы; R_W – волновое сопротивление; R_A – сопротивление шероховатости судна; R_{AP} – сопротивление выступающих частей корпуса; R_{AA} – сопротивление воздуха (определяется продувкой модели надводной части корпуса в аэродинамической трубе).

При исследовании влияния формы обводов на величину сопротивления и изучении проблем моделирования сопротивление подразделяют в соответствии с природой действующих сил, на вязкостную составляющую (зависит от чисел Рейнольдса) и гравитационную составляющую (зависит от чисел Фруда), т.о. сопротивление судна, двигающегося по свободной поверхности воды, представляют в виде:

$$R(Fr, Re) = R_v(Re) + R_W(Fr) = R_F + R_{VP} + R_W. \quad (3)$$

Из гидромеханики известна общая формула сопротивления

$$R = C(\rho v^2 / 2) \Omega, \quad (4)$$

где C – коэффициент полного сопротивления судна; Ω – площадь его смоченной поверхности; v – скорость судна.

По аналогии (3) коэффициент полного сопротивления представляют как

$$C = C_v + C_W = C_F + C_{VP} + C_W, \quad (5)$$

где C_v , C_F , C_{VP} , C_W – коэффициенты сопротивления (вязкостного, трения, формы и волнового соответственно).

При плавании на стесненной акватории порта можно предположить, что в сопротивлении водной среды судну полных обводов на малых ходах превалирует вязкостная составляющая сопротивления.

Это обосновывается тем, что у тихоходных судов полных обводов волновое сопротивление практически отсутствует и составляет до $Fr = 0,10$; у среднескоростных – до $Fr = 0,15$. На мелководье картина волнообразования определяется значением относительной скорости $Fr_H = v/\sqrt{gH}$, где H – глубина на акватории. При невысоких относительных скоростях $v \leq (0,35 - 0,40)\sqrt{gH}$ характер волнообразования на мелководье не отличается от наблюдаемого на неограниченной глубине. Однако стеснение потока между днищем судна и дном акватории приводит к росту местных скоростей и перепадам давления вдоль корпуса судна и, соответственно, – к увеличению вязкостной составляющей сопротивления. При $H/T = 1,5-20R_v$ может увеличиться на 10-15 %, по другим источникам – на 20-40 %, в зависимости от величины H/T . Отсюда, вязкостное сопротивление в общем случае оказывает большее влияние на ходовые качества судна, чем волновое сопротивление. Например, для танкеров длиной корпуса $L = 180-240$ м для скорости $V = 5$ узлов числа Фруда $Fr = 0,05-0,06$. Сопротивления шероховатости – 10-15 % в общем балансе сопротивления; сопротивление выступающих частей не превышает 2-10 % полного; сопротивления формы – 15-35 %. Все они увеличивают вязкостную часть сопротивления. Сопротивление воздуха – не более 0,5-1,5 % полного сопротивления и имеет один порядок с погрешностью расчетного или экспериментального определения последнего.

Силы вязкостной природы определяются числом Рейнольдса, которое является критерием динамического подобия и характеризует соотношение вязкостных и инерционных сил:

$$Re = vL/\nu, \quad (6)$$

где L – длина судна; v – скорость судна; ν – кинематическая вязкость потока жидкости.

Точное определение составляющих вязкостного сопротивления является задачей, не разрешенной окончательно. В практических целях принимают, что сопротивление трения равно сопротивлению у эквивалентной пластины при равенстве чисел Рейнольдса. Коэффициент сопротивления трения эквивалентной пластины в отечественной практике определяется по формуле Прандтля – Шлихтинга:

$$C_{Fo} = 0,455 / (\lg R_e)^{2,58}. \quad (7)$$

Учитывая сопротивление формы, коэффициент C_v представляется как

$$C_v = C_{Fo} (1 + k), \quad (8)$$

где $k = C_{VP} / C_{Fo}$ – коэффициент формы.

Коэффициент формы в основном определяется обводами судна ($\delta, L/B, B/T$) и рассчитывается по эмпирическим зависимостям Ватанабе, для судов с полными обводами:

$$K = 0,017 + 20\delta[(L/B)^2 \sqrt{(B/T)}], \quad (9)$$

где δ – коэффициент полноты корпуса.

У судов полных обводов ($\delta \geq 0,8$) дополнительно могут наблюдаться сопротивление от разрушения носовой подпорной волны R_{WB} и индуктивное сопротивление от двух интенсивных вихрей в носовой оконечности R_I . Рассматривая вопросы маневрирования среднетоннажных танкеров $Dw = 40-75$ тыс. т на акватории порта на малых ходах, где такого волнообразования не встречается, расчетами сопротивлений R_{WB} и R_I пренебрегают (Жинкин, 2000).

Сопротивление корпуса судна при плавании в сплошных льдах

При ледовом плавании в уравнение (2) включается дополнительно ледовое сопротивление. Считается, что движение ледокола и судов ледового класса в сплошных льдах сопровождается процессами, в силу которых и возникает ледовое сопротивление. Отличительная особенность их – это цилиндрическая вставка, создающая дополнительное ледовое сопротивление транспортных судов. При исследовании взаимодействия корпуса со льдом принимается гипотеза независимости составляющих полного ледового сопротивления (Ионов, Грамузов, 2001).

Полное ледовое сопротивление имеет вид:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_B, \quad (10)$$

где R_1 – сопротивление разрушению льда; R_2 – сопротивление притапливанию и переворачиванию разрушенных льдин; R_3 – сопротивление раздвигания разрушенного льда; R_B – гидродинамическое сопротивление; $R_{np} = R_1 + R_2$ – прямое сопротивление; $R_{ск} = R_3 + R_B$ – скоростное сопротивление.

По аналогии с (2) формула (10) в целом представляет собой буксировочное сопротивление, т.е. при буксировке судна в ледовых условиях плавания к тросу необходимо приложить равные усилия.

Считается, что гидродинамическая составляющая сопротивления мала по сравнению с ледовым сопротивлением и принимается такой же, как на чистой воде. При работе в предельных по толщине льдах гидродинамической составляющей сопротивления пренебрегают и учитывают только чистое ледовое сопротивление $R_{л.ч.}$:

$$R_{л.ч.} = R_1 + R_2 + R_3. \quad (11)$$

Чистое ледовое сопротивление при плавании в сплошном льду складывается из сопротивления разрушению целого льда R_p , которое, в свою очередь, складывается из сопротивления разрушению льда форштевнем $R_{p.ф.}$ и сопротивления разрушению льда бортами, с учетом симметрии корпуса $R_{p.б.}$ и сопротивления обломков льда R_o , т.е.

$$R_{л.ч.} = R_p + R_o = R_{p.ф.} + R_{p.б.} + R_o. \quad (12)$$

Для судов активного ледового плавания, по другим источникам, чистое ледовое сопротивление в сплошных льдах определяется приближенно по формуле

$$R_{л.ч.} = (Bh / \eta_1) (0,2\sigma_p h_n + 16,8v), \quad (13)$$

где B – ширина судна; h – толщина льда; σ_p – предел прочности льда на изгиб; v – скорость судна; η_1 – коэффициент ледокольности.

При плавании в битом льду сопротивление корпуса судна также подразделяется на ледовую и гидродинамическую части, где последняя принимается как на чистой воде при данной скорости. Ледовое сопротивление определяют потерей кинетической энергии при соударении корпуса со льдинами, раздвиганием обломков льда, их деформациями и трением друг о друга. Приближенно его можно определить по формуле

$$R_{л.ч.} = z_n \sqrt{(rh_n)} (B/2)^2 k_1 (1 + 2f\alpha_n (L/B)) + k_2 z_n r h_n B (f + \alpha_n \operatorname{tg} \alpha_o) Fr + k_3 z_n r h_n L \operatorname{tg}^2 \alpha_o r^2, \quad (14)$$

где r – средний размер льдин в плане; h_n – толщина льда; L, B – длина и ширина судна; α_n – коэффициент полноты носовой ветви конструктивной ВЛ; α_o – угол входа носовой ВЛ; k_1, k_2, k_3 – безразмерные коэффициенты; f – коэффициент трения обшивки о лед; z_n – удельный вес льда (Жинкин, 2000).

При плавании в канале за ледоколом сплоченность битого льда принимается равной 8 баллам, для сплоченности принимаются конкретные значения безразмерных коэффициентов. При отсутствии данных ориентируются на статистические данные о форме ледоколов и судов ледового плавания при выборе α_n и α_o , средний размер льдин в канале определяют в функции от толщины льда. Формулы (13) и (14) включают

ряд параметров, точность определения которых не высока, что позволяет их использовать лишь для приближенной оценки ледового сопротивления судна.

Силы, возникающие на корпусе судна при плавании в ледовом канале

Действительно, если ледокол имеет ширину корпуса $B_s = 28-29$ м, а танкер $Dw = 40-100$ тыс. т ширину $B_T = 32-34$ м, то сплоченность льда 8 баллов в канале за ледоколом для оценки ледового сопротивления судна не вполне отражает действительность. В зависимости от толщины сплошного льда (или 10-балльного) при плавании в канале за ледоколом судно на поворотах застревает, и требуется его окальвание. То же происходит даже при плавании в однолетнем льду: на поворотах в ледовом канале судно застревает и испытывает значительные нагрузки на корпусе в поперечном сечении по его длине.

При ледовом плавании могут возникать ситуации, когда, имея достаточную инерцию, судно вписывается и проходит крутой поворот канала за ледоколом, но вероятность повреждения винто-рулевой группы высокая. Такие факты в практике ледового плавания имеются. Если смоделировать ситуацию плавания судна в Арктических паковых льдах за ледоколом при выше отмеченных обстоятельствах, то можно предположить: имея огромную инерцию, танкер в грузу $Dw = 75-100$ тыс. т и более может "расклиниться" на повороте так, что корпус будет поврежден. С внешней стороны поворота корпус будет испытывать растягивающие усилия, а с внутренней – сжимающие корпус в "гармошку".

Теория корабля в расчетах прочности судна рассматривает корпус как тонкостенную пустотелую балку, которая испытывает воздействие сложной системы сил. В практических расчетах деформацию корпуса подразделяют на деформацию общего изгиба в продольной и поперечной плоскостях и местные деформации корпуса, т.е. рассматривается общая продольная прочность, поперечная прочность и местная прочность корпуса судна. Проверка прочности под действием местных нагрузок является задачей расчета местной прочности, а обеспечение общей продольной прочности в обычных условиях плавания предполагает также и обеспечение общей поперечной прочности. Общая поперечная прочность корпуса судна на изгибающие моменты и перерезывающие силы не рассчитывается и проверяется только в особых случаях (например, при постановке судна в док). Считается, что такой подход вполне приемлем при характерных для морских судов соотношениях между высотой борта и шириной судна (H/B). Однако в теории корабля мы находим, что для общей характеристики формы корпуса судна важно соотношение главных размерений: отношение ширины корпуса к осадке (B/d) влияет на остойчивость, качку и ходовые качества; отношение длины к высоте борта судна (L/H) – на прочность судна. Отношение высоты борта к ширине судна (H/B) в общей характеристике формы корпуса судна вообще не рассматривается.

Опыт плавания на транспортных рефрижераторных судах в Антарктиде и прилегающих к ней районам, проливом Дрейка и др. в условиях шторма подтверждает, что отношение L/H значительно влияет на прочность корпуса судна. Два транспортных рефрижераторных судна (типа "Поляр-2" и "50 лет СССР") имели мало отличающиеся отношения H/B и отличающиеся на 20 % отношения L/H . В примерно одинаковых штормовых условиях судно с большим отношением L/H получило повреждения усиленного уголка ширстречного пояса и палубного стрингера (ватервейс) в форме разрывов в районе ориентировочно ± 20 м от мидельшпангоута.

Необходимо отметить, что расчета продольной прочности данных судов в Информации об остойчивости для капитана вообще нет, т.е. для любой загрузки в эксплуатационных условиях плавания продольная прочность корпуса судов обеспечивается конструктивными особенностями. Из приведенного примера можно предположить, что отношение H/B оказывает влияние на продольную прочность судна при плавании в штормовых условиях. Поэтому необходимо дальнейшее проведение научных исследований и инженерных расчетов в области корпусных конструкции на стадии проектирования и постройки. На уровне практическом важно соблюдать правила хорошей морской практики, учитывать основные размерения корпусов проводимых судов, их маневренные элементы при прокладке ледоколом канала того или иного радиуса и др.

С увеличением интенсивности ледокольной проводки Северным морским путём судов, в частности танкеров, актуальность данной проблемы существенно возрастает, и в первую очередь в плане предотвращения загрязнения окружающей среды.

3. Некоторые обобщенные результаты исследования ледового плавания судна на акватории порта

При постановке и проведении модельных испытаний судна в ледовых условиях увеличивается количество определяющих критериев динамического подобия. При соблюдении равенства чисел Фруда натуре и модели $Fr_H = Fr_M$ необходимо удовлетворить равенство чисел Коши $Ch_H = Ch_M$, которые моделируют соотношение сил инерции и упругости льда $Ch = \rho v^2/E$, где E – модуль упругости разрушаемого льда.

Кроме того, должно соблюдаться геометрическое подобие толщины льда и размеров обломков, обязательно также соблюдение равенства коэффициентов трения, соотношения плотности льда и воды. Одновременное выполнение всех этих требований невозможно, что усложняет методику проведения модельного эксперимента и перерасчета полученных результатов на натуре.

Уравнения (10-14) описывают теоретическую модель, которая используется для получения способа расчета ледового сопротивления. Сам способ расчета имеет полуэмпирический характер, исходные зависимости корректируются с учетом натуральных данных. Приведенные уравнения (13) и (14), как способ расчета чистого ледового сопротивления судна, применяются в рамках этой теоретической модели.

Расчитанное по выше отмеченным формулам ледовое сопротивление понимают (в соответствии с терминологией, примененной Ю.А. Шиманским) как некоторый "условный измеритель", который отличается от реального сопротивления, но позволяет сравнивать ледокольную способность судов (Жинкин, 2000).

Практика ледового плавания буксиров на акватории порта показывает, что при 10-балльной сплоченности измельченного битого льда толщина его по вертикали от поверхности неодинакова и неоднородна. Неравномерное распределение по толщине происходит в зависимости от разных гидрометеорологических и др. причин.

Неоднородность "распределения льда по вертикали" неоднозначно влияет на маневренные качества буксиров. В данном случае наблюдается меняющееся дополнительное ледовое сопротивление корпусу судна. Забивание насадок гребных винтов льдом становится не эпизодической, а постоянной проблемой.

При полной балластировке и загрузке буксира для плавания во льдах он не выходит на грузовую марку, как на чистой воде. Опыт показывает, что при полной нагрузке буксир теряет до 20 % и более дедефта в зависимости от конструктивного водоизмещения, суровости зимы, интенсивности захода судов в порт и др. факторов, непосредственно влияющих на ледовое состояние акватории. Уменьшение водоизмещения буксира и, как следствие, снижение осадки во льдах значительно влияют на маневренные качества (и не только), что требует постоянной работы полными ходами.

При плавании в таких условиях на акватории порта полными ходами за кормой не наблюдается даже чистой воды, сплоченность льда остается 10 баллов по принимаемой шкале. Однако наличие следа, оставляемого за буксиром во льду, свидетельствует о том, что "сплоченность льда по вертикали" в данном месте и направлении меньше. Проводка танкеров каналом показывает, что нос уваливает на этот след, и поэтому важно при поддержании канала буксирами, чтобы последний галс был сделан ими именно по центру канала по створам, это обезопасит судно от ухода к бровке и за бровку канала.

Общеизвестно, что вода при замерзании расширяется, и объем пресноводного льда превышает объем воды, из которой он образовался, примерно на 9 %. Плотность морского льда не является постоянной величиной и варьируется в зависимости от его солёности и от содержания в нем пузырьков воздуха.

При большой сплоченности льда на акватории по вертикали плавание судна осуществляется во льдо-водной среде с плотностью ρ' , которая включает плотность воды ρ и плотность льда ρ_L :

$$\rho' = \rho + \rho_L. \quad (15)$$

В первом приближении потерю объемного водоизмещения буксира можно оценить по формуле:

$$\Delta V = -\Delta T \alpha B L, \quad (16)$$

где $\alpha = f(T)$ – коэффициент полноты площади ватерлинии; B, L – ширина и длина буксира; ΔT – изменение осадки при плавании во льдах; T – осадка буксира.

Таким образом, движение судна в условиях мелкобитого измельченного льда можно рассматривать как плавание в двухфазной льдо-водной среде. Водная среда "рабочей" части акватории порта настолько насыщена своим производным твердым состоянием – измельченным льдом, что создает значительные трудности и тяжелые условия для плавания судов. В течение всего ледового периода двухфазная среда постоянно изменяет свое состояние под влиянием гидрометеорофакторов и интенсивности судозаходов.

Уравнение (6) для числа Рейнольдса, характеризующего соотношение вязкостных и инерционных сил двухфазной среды, будет иметь следующий вид:

$$Re' = v' L / \nu', \quad (17)$$

где ν' и v' – кинематическая вязкость двухфазной среды и скорость судна в льдо-водной среде.

Подставляя (17) в (7), получим коэффициент сопротивления трения эквивалентной пластины по формуле Прандтля – Шлихтинга для двухфазной среды:

$$C'_{Fo} = 0,455 / (\lg Re')^{2,58}. \quad (18)$$

По формулам (7) и (18) рассчитываем коэффициенты сопротивления трения эквивалентной пластины при плавании на чистой воде и для двухфазной среды, затем определяем вязкостную составляющую сопротивления по (8) на чистой воде и с учетом (18) в условиях плавания в двухфазной среде:

$$C_v = C'_{Fo}(1 + k). \quad (19)$$

Основную трудность в расчетах вызывает вычисление чисел Рейнольдса для двухфазной среды.

Представим (6) и (17) как систему уравнений, где в обоих уравнениях присутствует одна и та же величина L – длина судна:

$$\left\{ \begin{array}{l} Re = vL/v \\ Re' = v'L/v' \end{array} \right\}. \quad (20)$$

Преобразуем (20) относительно длины судна при $L = \text{const}$ и запишем равенство в виде:

$$L = Re \cdot n/v; L = Re' \cdot n'/v',$$

тогда, приравнявая правые части, получим:

$$Re \cdot n/v = Re' \cdot n'/v', \quad (21)$$

решая (21) относительно Re' , окончательно получим:

$$Re' = Re \cdot n/v \cdot v'/n', \quad (22)$$

где Re , n и v – число Рейнольдса, кинематическая вязкость и скорость судна на чистой воде соответственно; n' и v' – кинематическая вязкость двухфазной среды и скорость судна в льдо-водной среде соответственно.

Уравнение (22) представляет собой расчетно-экспериментальный метод по определению чисел Рейнольдса двухфазной среды для вычисления сопротивления судна при ледовом плавании на акватории порта и в каналах.

Особенностью этого метода является необходимость иметь результаты натуральных наблюдений при плавании судна в ледовых условиях (n' и v'), а также расчетные данные (Re , n и v) при плавании судна на чистой воде в условиях одинаковой загрузки ($D = \text{const}$). Например, в благоприятных гидрометеорологических условиях в балласте при заходе в порт на режиме работы главного двигателя (ГД) – самый малый передний ход (СМХП), который задан по машинному телеграфу (МТ). Определяем скорость судна (или берем из данных судна) и рассчитываем число Рейнольдса на чистой воде. Далее, при плавании в ледовых условиях, при заходе в порт в балласте (с водоизмещением как на чистой воде) на режиме ГД СМХП, определяем скорость судна и вычисляем кинематическую вязкость двухфазной льдо-водной среды. Полученные при ледовом плавании и имеющиеся ранее на чистой воде данные подставляем в формулу (17) и определяем Re' . Используя уравнения (18) и (19), определяем коэффициент вязкостного сопротивления, и дальнейший расчет полного сопротивления судна при ледовом плавании производится по выше отмеченным формулам.

Из (22) можно предположить, что двухфазное состояние водной среды можно рассматривать как *неньютоновскую жидкость*. Из гидравлики известно, что для таких жидкостей продольные касательные напряжения трения ϕ выражаются зависимостью вида $\phi = \mu(du/dn)^k$, где k – число, величина которого отлична от единицы; μ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом динамической вязкости; du/dn – градиент скорости.

4. Заключение

Из вышеприведенного анализа ледового плавания судов на акватории порта можно сделать некоторые выводы.

Наряду с плаванием судна по чистой воде и в сплошных, битых льдах, имеющим теоретическое описание, существует плавание на акватории и в канале. Этот вид ледового плавания отличается от других тем, что оно происходит в мелкобитом крошеном льду. Такой вид плавания можно рассматривать как плавание в льдо-водной среде, которая представляется как двухфазная среда.

Опыт такого ледового плавания мелкоосидающих судов показывает, что увеличивающаяся масса мелкобитого льда на акватории порта приобретает вертикальное распределение с неоднородной сплоченностью. Неравномерная по вертикали сплоченность льда негативно сказывается на мореходных качествах судна.

В результате проведенного анализа плавания судна по чистой воде и во льдах автором предложен расчетно-экспериментальный метод определения чисел Рейнольдса для расчета силы сопротивления плавающего судна в двухфазной среде. Для данной среды плавание следует рассматривать как плавание в неньютоновской жидкости.

Данное предложение может быть использовано для построения теоретической модели и получения способа расчета ледового сопротивления для режима плавания судов в мелкобитом крошеном тертом льду.

Литература

- Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб., Судостроение, 512 с., 2001.
Жинкин В.Б. Теория и устройство корабля. СПб., Судостроение, 336 с., 2000.