

УДК 629.5.015.1 : 629.542.4

К вопросу о непотопляемости рефрижераторных судов

А.Н. Анисимов

*Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра управления судном
и промышленного рыболовства*

Аннотация. В аварийной ситуации при затоплении грузового отсека происходит изменение коэффициента проницаемости рефрижераторного груза. Это приводит к изменению аварийной остойчивости и посадки судна, которая отличается от типовых случаев в "Информации капитану об аварийной остойчивости". Предложен вариант расчета мореходных качеств судна при наличии пробоины в рефрижераторном трюме транспортного судна и направленном фазовом переходе "груз – пульпа".

Abstract. In an emergency situation when cargo compartment is sinking the coefficient of permeability of refrigerated cargo is changed. This leads to changing stability and ship landing which differs from the model cases (spoken about in Information on the captain). A new variant of calculation of vessel seaworthiness for the case when there are holes in the refrigerator hold and phase transition "cargo – pulp" has been proposed.

Ключевые слова: коэффициент проницаемости, мореходные качества судна, пробоина, рефрижераторный груз с фазовыми переходами

Keywords: coefficient of permeability, seaworthy vessel, hole, refrigerator cargo from state transitions

"При подразделении трюма и надводных частей надо руководствоваться расчетами влияния затопления отделений на крен, дифферент и остойчивость. Принцип же подразделения должен быть тот, чтобы плавучесть утрачивалась ранее остойчивости – короче, чтобы корабль тонул, не опрокидываясь"

А.Н. Крылов (цит. по: Мальцев и др., 1973)

1. Введение

В отличие от плавучести и остойчивости непотопляемость не является самостоятельным мореходным качеством судна. Способность судна сохранять свои мореходные качества при затоплении части водонепроницаемого объема корпуса определяется как непотопляемость. Обладающее хорошей непотопляемостью судно должно оставаться на плаву при затоплении одного или нескольких помещений, и обладать остойчивостью, не допускающей его опрокидывания. Кроме того, судно не должно утрачивать ходкость и управляемость. Непотопляемость судна обеспечивается запасом плавучести, правильное использование которого обеспечивается рациональным делением водонепроницаемого корпуса судна на отсеки. Не менее важным, чем плавучесть, фактором непотопляемости судна получившего пробоину, является остойчивость судна. При проектировании и постройке судна обеспечению аварийной остойчивости придается огромное значение.

Затопляемые отсеки судна подразделяют на два основных типа: отсеки, не сообщающиеся с забортной водой, и отсеки, сообщающиеся с забортной водой. Отсеки первого типа получают ввиду искусственного затопления, или при затоплении через пробоину, которая впоследствии заделана, и вода не откачена. Отсеки второго типа получают при затоплении через незаделанную пробоину. В свою очередь, в силу различных аварийных ситуаций и обстоятельств, в процессе борьбы за непотопляемость судна эти отсеки могут подразделяться на группы (категории), которые также могут переходить друг в друга (Семенов-Тянь-Шанский, 1973).

Для вычисления объемов затопленных помещений используют теоретический чертеж. Эти теоретические объемы соответствуют абсолютно пустым отсекам без учета набора корпуса, оборудования, груза и пр., поэтому объем влившейся воды всегда будет меньше теоретического объема затопленного отсека. Это различие в объемах учитывается введением коэффициента, который называется коэффициентом проницаемости и имеет различные значения для различных отсеков в зависимости от того, что в них располагается. При расчетах непотопляемости коэффициент проницаемости вводится в виде множителя к теоретическому объему затопленного отсека.

Правилами Регистра морского судоходства России предусмотрено наличие на борту судна, в зависимости от его типа и размеров, такого документа, как "Информация об аварийной посадке и остойчивости судна", содержащего информацию о последствиях, возникающих от затопления отсеков, включая и схемы борьбы за живучесть судна при тех или иных вариантах такого затопления. Этот

документ должен быть одобрен Регистром морского судоходства, и давать возможность капитану судна оценивать посадку и остойчивость своего судна в аварийной ситуации по типовым расчетным схемам. При расчетах аварийной остойчивости судна в правилах Регистра морского судоходства для различных вариантов затопления отсеков необходимо использовать принятые значения коэффициентов проницаемости помещений μ . Однако опыт аварий с рыболовными и транспортными рефрижераторными судами показывает, что коэффициент проницаемости для рефрижераторного груза (рыбодукция) не соответствует установленному правилами Регистра в силу перехода такого груза из твердого состояния в состояние "пульпы" при затоплении данного рефрижераторного помещения.

2. Анализ критериев Регистра в области обеспечения аварийной непотопляемости и остойчивости судна

Методы исследования, представленные в настоящей работе, базируются на сопоставлении критериев (коэффициент проницаемости), требуемых Регистром в области непотопляемости судна с результатами, полученными из конкретных аварийных ситуаций. Основным предназначением коэффициента проницаемости является ориентировочный расчет количества воды, поступившей в судовое помещение. Расчет выполняется по рекомендуемой правилами Регистра формуле

$$p = v \gamma_{ж} \mu_j, \quad (1)$$

где p – вес влившейся в аварийное помещение забортной воды; v – объем грузового помещения; $\gamma_{ж}$ – удельный вес забортной воды, поступившей в аварийный отсек; μ_j – коэффициент проницаемости грузового помещения без груза или для конкретного типа груза.

В части V "Деление на отсеки" правил Регистра в разделе "Коэффициенты проницаемости" требуется, чтобы в расчетах аварийной посадки и остойчивости судна коэффициент проницаемости принимался для помещений, предназначенных для перевозки сухих грузов, равным значению $\mu = 0,6$. Это же значение коэффициента проницаемости следует использовать и для рефрижераторных трюмов.

В аварийной ситуации при получении судном бортовой пробоины в трюме от столкновения или навала для оценки состояния посадки судна Правилами Регистра рекомендуется использовать величину стандартного вероятностного индекса деления на отсеки R и величину допустимого вероятностного индекса деления на отсеки A . Такая рекомендация не учитывает фазового перехода груза в аварийном рефрижераторном трюме.

Как известно из текста правил Регистра, величина допустимого вероятностного индекса деления на отсеки A превышает или равна величине стандартного вероятностного индекса деления на отсеки R :

$$A \geq R. \quad (2)$$

Величина допустимого вероятностного индекса A определяется из выражения

$$A = \sum W_s,$$

где W – вероятность затопления отсека или смежных отсеков при получении бортовой пробоины; s – вероятность сохранения судна при затоплении отсека или смежных помещений.

Вероятность W затопления отсека, ограниченного поперечными переборками, равна:

$$W = ap,$$

где коэффициент a учитывает положение абсциссы середины пробоины по длине судна, а величина p зависит от протяженности грузового отсека и длины пробоины.

При подсчете вероятности затопления отсека суммирование ведется по номерам грузовых трюмов и групп смежных отсеков, которые включены в процесс оценки аварийной посадки и остойчивости.

В расчетах аварийной посадки и остойчивости по значению вероятностного индекса $s_j(s_1, s_2, s_3)$, где параметры s_1, s_2, s_3 определяются по осадкам судна d_1, d_2, d_3 , коэффициент проницаемости грузового помещения μ_j должен лежать в интервале от 0,60 до 0,95 и рассчитываться по формуле:

$$\mu_j = 1 - 1,2(d_j - d_0)/d_s - 0,05(d_s - d_j)/(d_s - d_0), \quad (3)$$

где d_0 – наименьшая эксплуатационная осадка, соответствующая наименьшей возможной в эксплуатации загрузке судна с учетом жидких грузов, включая балласт; d_s – осадка деления на отсеки, соответствующая грузовой ватерлинии деления на отсеки.

Величина стандартного вероятностного индекса деления на отсеки R определяется по формуле

$$R = 1 - 250 / (L_s + N/4 + 375),$$

где $N = N_1 + N_2$, причем N_1 – число людей, обеспеченных местами в спасательных шлюпках из общего числа людей на борту судна; N_2 – число людей (включая экипаж), которых разрешено перевозить на судне в превышение числа N_1 ; L_S – длина судна при его делении на отсеки. Для грузового судна L_S – наибольшая теоретическая длина проекции судна на уровне или ниже палубы, ограничивающей максимальную вертикальную протяженность затопления H_{\max} .

Основным конструктивным принципом деления на отсеки считается принцип "слабого звена", суть его заключается в том, чтобы плавучесть судна утрачивалась раньше, чем остойчивость. Данный принцип объясняется тем, что процесс потери плавучести судном – продолжительный, длящийся часы и десятки часов, в то время как опрокидывание судна из-за потери остойчивости происходит внезапно и порой с потерями человеческих жизней. Поэтому, деление на отсеки производится таким образом, чтобы судно уходило под воду, не опрокидываясь (Кацман и др., 1991).

Правилами Регистра требуется, чтобы непотопляемость промысловых судов была обеспечена при затоплении двух любых смежных отсеков. Обеспечение непотопляемости сводится к тому, чтобы при затоплении смежных отсеков судно погружалось не глубже предельной линии погружения, отстоящей на 76 мм ниже бортовой линии палубы переборок. Для этого специальными методами рассчитывают и строят кривые предельных длин отсеков, ординаты которых представляют собой наибольшие длины отсеков, которые может иметь судно. Однако с уменьшением коэффициента проницаемости, ординаты кривых предельных длин отсеков увеличиваются, а соответственно и длины отсеков могут быть увеличены. Таким образом, с учетом коэффициента проницаемости $\mu = 0,6$ длина отсека l_i может быть увеличена до величины l_i' ($l_i' > l_i$). Применительно к обсуждаемой проблеме, возникающей с "двухфазным" грузом при затоплении отсека, коэффициент проницаемости увеличивается и может достигать максимального значения, существующая конструктивная длина отсеков может оказаться завышенной. О последствиях возможного влияния завышенной длины отсека на расчеты аварийной посадки и остойчивости судна говорит статистика аварийности рыболовных судов.

В части IV "Остойчивость" из правил Регистра для определения начальной метацентрической высоты поврежденного судна необходимо в расчетах посадки и остойчивости судна учитывать поправки, определяемые влиянием свободной поверхности жидкого груза, судовыми запасами и балластом, причем эти поправки должны учитываться так же, как и в случае неповрежденного судна.

Неизбежность фазового перехода груза в затопленном рефрижераторном трюме позволяет последовательно в процессе проведения аварийных мероприятий на судне оценивать изменение метацентрической высоты, амплитуду и период качки судна, а также установить их динамику. Поскольку груз рыбной продукции в аварийном рефрижераторном трюме будет подвержен дефростации, то образующаяся "пульпа" со свойством "свободной поверхности", будет изменять метацентрическую высоту на величину равную:

$$\delta h_{cn} = - (i_x \cdot \gamma_n) / \Delta, \quad (4)$$

где i_x – момент инерции помещения относительно оси абсцисс; Δ – весовое водоизмещение судна.

Не менее важными при проведении аварийных мероприятий являются такие параметры, которые анализируют на соответствие требованиям Регистра состояния судна, изменение его амплитуды и периода. При расчетах амплитуды качки и оценки динамики этой амплитуды за время проведения аварийных мероприятий, учитывая фазовый переход "груз – пульпа" в рефрижераторном трюме, формирующий "свободную поверхность", можно использовать выражение (Правила классификации..., 2011)

$$\theta_{tr} = 109 k X_1 X_2 \sqrt{rS}, \quad (5)$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние скулового и брускового килей, при отсутствии килей $k = 1$; X_1 – безразмерный множитель, определяется в зависимости от отношения ширины к осадке; X_2 – безразмерный множитель, определяется в зависимости от коэффициента полноты судна; S – безразмерный множитель, определяется в зависимости от района плавания судна и периода качки.

В выражении (5) параметр r можно найти так:

$$r = 0,73 + 0,6 (z_g - d) / d,$$

где значение r не должно приниматься больше 1.

В то же время период качки можно определить так

$$T = 2 c B \sqrt{h}, \quad (6)$$

где h – исправленная метацентрическая высота (с поправкой на свободные поверхности); c – коэффициент, равен величине $c = 0,373 + 0,23B/d - 0,043L_{wl}/100$; L_{wl} – длина судна по ватерлинии.

Таким образом, при наличии пробоины в рефрижераторном трюме транспортного судна и фазовом переходе "груз – пульпа" расчет таких мореходных качеств, как непотопляемость, остойчивость может быть выполнен с учетом коэффициента проницаемости γ_n , близким к единице, по выражениям (2-4). Кроме того, выражения (4-6) в процессе фазового перехода груза способны дать представление о параметрах качки судна и характере изменения этих параметров.

В первом приближении объемный вес "пульпы" можно определить следующим образом. Зная количество поступившей в поврежденный трюм забортной воды, используя коэффициент проницаемости $\mu = 0,6$ и привлекая объемный вес забортной воды по району плавания $\gamma_{жс}$, а так же вес груза брутто P (включая картонную упаковку) в аварийном помещении по отгрузочным документам, можно найти общий вес "пульпы" (груз, вода, тара) после затопления рефрижераторного трюма, который составит

$$G' = P + p. \quad (7)$$

Тогда по известной формуле из теории корабля объемный вес "пульпы" γ_n в аварийном рефрижераторного трюма будет равен:

$$\gamma_n = G' / v. \quad (8)$$

Величина объемного веса "пульпы" γ_n , на наш взгляд, способна более объективно отражать ситуацию, связанную с затоплением рефрижераторного трюма, при проведении аварийных мероприятий, а также расчетах аварийной посадки и остойчивости судна.

3. Обсуждение и результаты

Результаты разбора отдельных аварий на транспортных судах показывают, что коэффициент проницаемости рефрижераторных трюмов с грузом мороженой рыбной продукции не всегда соответствует величине, установленной правилами Регистра. Проблема такого несоответствия заключается в том, что на практике полученная судном пробоина мгновенно не заделывается, а поступившая в грузовое помещение забортная вода за минуты не откачивается. Необходимы часы, чтобы проанализировать аварийную ситуацию, мобилизовать людей, произвести разведку аварийного трюма, определить место и размеры пробоины, оценить возможные риски и принять решение по методу заделки пробоины, приготовить соответствующее аварийное имущество и подручные средства, и после этого приступить к заделке пробоины. Перечисленные мероприятия являются только малой частью из общего достаточно длительного процесса борьбы за живучесть судна.

В процессе затопления рефрижераторного трюма с грузом мороженой рыбной продукции, можно наблюдать различные варианты посадки и остойчивости судна. Так, в первоначальный момент процесс затопления отсека, когда груз еще сохраняет свое твердое состояние и поступающая вода откачивается судовыми стационарными средствами, затопленный отсек можно отнести к четвертой категории (*Кацман и др.*, 1991). Здесь нужно оговорить следующие ситуации касательно уровня воды в отсеке. Уровень

- остается постоянным, когда производительность средств откачки равна количеству поступающей воду;
- уменьшается, когда производительность осушения выше производительности поступления;
- увеличивается, когда отливные средства не справляются с количеством поступающей воды в отсек.

В этом случае мы имеем отсек, заполненный не полностью, вода в нем сообщается с забортной водой, и уровень воды в отсеке не совпадает с уровнем забортной воды. В литературе (*Кацман и др.*, 1991) подобные герметические отсеки с низко расположенными повреждениями относят к отсекам четвертой категории. В период затопления потеря запаса плавучести определяется количеством поступившей в отсек воды. При этом потеря остойчивости определяется как промежуточная, между потерей остойчивости при одинаковом затоплении аналогичных отсеков второй и третьей категории.

В процессе дальнейшего поступления воды и повышения ее уровня в отсеке отливные средства не справляются из-за начинающегося процесса перехода груза и тары из состояния твердого в состояние "пульпы", в силу чего и происходит забивание решеток колодцев и всасывающих патрубков дефростированной рыбой и расплывшейся картонной тарой. В этом состоянии отсек заполнен не полностью, сообщается с забортной водой, уровень воды в отсеке совпадает с уровнем забортной воды, и количество влившейся воды изменяется в процессе изменения осадки, крена и дифферента аварийного судна. В этой ситуации по характеру затопления отсек относится к третьей категории и исключается из запаса плавучести. Изменение начальной остойчивости определяется геометрией и координатами центра тяжести (ЦТ) потерянной площади ватерлинии. В общем случае изменение осадки вычисляется по формуле

$$\delta d_v = v / (S - s), \quad (9)$$

где S – площадь исходной ватерлинии; s – площадь ватерлинии в поврежденном отсеке; v – объем затопленного отсека; δd_v – изменения средней осадки.

При вычислении крена и дифферента в практических расчетах пользуются методикой расчета для отсеков второй категории. Поправку метацентрической высоты определяют по формуле

$$\delta h_v = v(d + 0,5\delta d_v - h - ixv^{-1}) / V, \quad (10)$$

где v – потерянный объем; V – исходное объемное водоизмещение; d – исходная средняя осадка; h – исходная метацентрическая высота.

Бороться с вливающейся водой при незаделанной пробоине бесполезно. На небольшой глубине 5 м, через пробоину площадью около 1 м², за 1 час вливается 36000 м³ забортной воды. Отсюда ясно, что временной фактор заделки пробоины является основным в мероприятиях сохранения плавучести судна и сохранения груза, пусть даже частичного. Из разбора аварий рыболовных судов прослеживается, что даже правильное понимание конструктивных особенностей судна экипажем, но непонимание скрытого фактора в изменении состояния груза (переход из твердого состояния в "пульпу"), приводит к неправильному прогнозированию поведения судна в аварийной ситуации и неправильному принятию решений, что в итоге может являться причиной гибели судна и людей.

С момента установки пластыря прекращается поступление воды в поврежденный отсек и судно приобретает установившиеся элементы посадки и остойчивости. По мере откачки воды из отсека дифферент судна будет уменьшаться, и судно начнет возвращаться к первоначальной посадке и первоначальной остойчивости.

Груз из твердого состояния когда-то мороженой продукции, по мере осушения трюма будет переходить в состояние дефростированной массы рыбной продукции и размокшей картонной тары – "пульпы". В случае, когда отсек затоплен не полностью, и вода уже не сообщается с забортной водой, это рассматривается как затопление отсека второй категории.

Изменение плавучести при затоплении отсека второй категории рассматривается как при затоплении отсека первой категории с дополнительным учетом влияния свободной поверхности "пульпы" в отсеке. Изменение остойчивости определяется отрицательным влиянием свободной поверхности. Предполагается, что это влияние будет существенным ввиду значительной разности удельного веса "пульпы" от удельного веса морской воды. Поправка к метацентрической высоте отсека второй категории с грузом в состоянии "пульпы" будет определяться по формуле (4)

$$\delta h_{cn} = -(i_x \cdot \gamma_n) / \Delta,$$

где γ_n – объемный вес "пульпы", определяемый по формуле (4).

Анализируя формулы (4) и (10) видим, что поправки к метацентрической высоте от влияния свободной поверхности всегда отрицательны и пропорциональны моменту инерции свободной поверхности забортной воды и "пульпы". Значительно превосходящий объемный вес "пульпы" объемный вес забортной воды демонстрирует значительное отрицательное изменение метацентрической высоты судна с грузом в отсеке в состоянии "пульпы" от затопленного груза в твердом состоянии.

В последующем, при полном осушении отсека масса размороженного груза и размокшей тары уже не будет представлять собой ранее описанное состояние "пульпы". Такое "другое" под-состояние жидкой фазы – "пульпы", более вязкое, станет возможным ввиду способности "пульпы" к усадке при откачке воды из аварийного отсека. С усадкой появляется свободная поверхность обезвоженной "пульпы", по влиянию на остойчивость и посадку судна схожая с влиянием сыпучих грузов, со своим еще не известным углом естественного откоса. Методов, которые предотвращали бы усадку "пульпы" и исключали влияние свободной поверхности на остойчивость, сегодня не существует. Поэтому усадку, как естественный процесс дефростации мороженой рыбной продукции при затоплении и последующей откачки воды из аварийного отсека, никак не предотвратить.

В дальнейшем, для обеспечения безопасного мореплавания необходимо принять меры по восстановлению остойчивости и спрямлению судна. В ряде изданий считается, что восстановление остойчивости должно предшествовать спрямлению судна. С этим нельзя не согласиться, например, в случае затопления части помещений, как следствие борьбы за живучесть судна при тушении очага пожара. В свою очередь, при борьбе за непотопляемость судна при получении пробоины следует (если аварийная ситуация позволяет) проводить восстановление остойчивости и спрямление судна одновременно с работами по прекращению поступления и откачке воды, с минимально возможным расходом запаса плавучести. По данным затопления отсеков производится оценка остойчивости, и если есть сомнения, проводятся мероприятия по ее восстановлению. Рассматривающийся в литературе

(Кацман и др., 1991) общий принцип при проведении мероприятий по спрямлению поврежденного судна и восстановлению его остойчивости, который должен быть направлен на минимальное расходование запаса плавучести, видимо в большей степени можно отнести к несимметричному затоплению достаточно больших отсеков.

Из отмеченного следует, что временной параметр в борьбе за непотопляемость судна и в первую очередь время заделки пробоины в помещении с "двухфазным" грузом, является первостепенным, поскольку с переходом груза из твердого состояния в состояние "пульпы" даже незначительные воздействия внешней среды, например, ветер, могут значительно повлиять на аварийную посадку и остойчивость судна.

4. Заключение

В работе представлен подход к оценке непотопляемости рефрижераторных судов в условиях принятой технологии транспортировки рефрижераторных грузов, которые могут иметь двухфазовое состояние, и переходить в другое физическое состояние – состояние "пульпы" при затоплении отсека в аварийной ситуации.

Проведенный в данной работе анализ затопления аварийного отсека и его влияния на изменение посадки и остойчивости судна, показывает, что отсек второй категории представляет значительную опасность по отношению к другим типам отсеков. Это положение обосновывается следующими факторами:

– состояние рефрижераторного груза из твердого полностью переходит в состояние "пульпы" с неизвестным коэффициентом объемного веса, который во много раз превышает объемный вес морской воды;

– изменение физического состояния груза из твердого в "пульпу" неизбежно приводит к изменению коэффициента проницаемости помещения. Использовать в расчетах аварийной посадки и остойчивости судна коэффициент проницаемости $\mu = 0,6$ уже не совсем корректно, и для большей безопасности можно брать его равным 0,95.

Из вышесказанного можно заключить, что в повседневных эксплуатационных расчетах посадки и остойчивости судна вполне применим установленный в Правилах Регистра коэффициент проницаемости рефрижераторного трюма $\mu = 0,6$. Однако в расчетах в "Информации об аварийной посадке и остойчивости судна" необходимо учитывать переход груза из твердого в состояние "пульпы", который влечет существенное изменение принимаемого Правилами Регистра коэффициента проницаемости.

Литература

Кацман Ф.М., Дорогостайский Д.В., Коннов А.В., Коваленко Б.П. Теория и устройство судов. Учебник. Л., Судостроение, 416 с., 1991.

Мальцев Н.Я., Дорогостайский Д.В., Прытков Ю.К. Теория непотопляемости судна. Л., Судостроение, 320 с., 1973.

Правила классификации и постройки морских судов. СПб., РМРС, РД № 2-020101-061, 2011.

Семенов-Тянь-Шанский В.В. Статика и динамика корабля. Л., Судостроение, 607 с., 1973.