**УДК 656.62.052.4**

# МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОСАДКИ СУДОВ СМЕШАННОГО «РЕКА-МОРЕ» ПЛАВАНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ НА МЕЛКОВОДЬЕ

**Чурин М. Ю.**

*ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», Нижний Новгород, Россия (603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а), e-mail: churin@mail.ru*

**На базе выполненного анализа геометрических характеристик судов автором предлагается новый метод расчёта величин динамической просадки судов внутреннего и смешанного плавания, позволяющий определить характер просадки (на нос или на корму). Результаты расчётов по предложенному методу обладают хорошей сходимостью с результатами модельных и натурных испытаний судов речного флота, выполненные другими авторами. Вопросы, поднимаемые в статье, весьма актуальны: новый метод расчёта динамической просадки судов учитывает особенности форм корпусов судов внутреннего и смешанного плавания. В статье приводятся данные геометрических характеристик судов внутреннего и смешанного «река-море» плавания, которые были приняты автором под обработку. Для оценки сходимости статья содержит результаты расчётов величин динамической просадки, определенных для речных судов по другим методикам.**

Ключевые слова: судно, геометрические характеристики, характер динамической просадки, методика расчета.

# THE METHOD OF DYNAMIC SQUAT'S DETERMINATION OF SEA-AND-RIVER-GOING SHIP

**Churin M. Y.**

*FBEI HPE «Volga state academy of water transport», Nizhni Novgorod, Russia (603950 Nizhni Novgorod, Nesterov st., 5a), e-mail: churin@mail.ru*

**On the basis of analysis of ship's geometrical characteristics author offer new method of dynamic squat's calculation for river ship and sea-and-river-going ship. This new method allow to define squat's character ( squat on bow or squat on stern). Results of calculations of offering method have good agreeing with the results of model's and natural's trials of river ships, which were carry out by other authors. The rising questions are actual in this article. New calculation's method of dynamic squat take into account peculiarities of hull of river and sea-and-river- going ship . The article have values of geometrical characteristics of river and sea-and-river-going ships, which were taken by author for calculation's analysis. For the definition method's results the article have values of dynamic squats for river ships, which were calculated on other methods.**

Keywords: ship, geometrical characteristics, squat's character, method of calculation.

Суда ограниченного района плавания, и в первую очередь суда смешанного «река-море» плавания, имеют весьма существенные особенности работы. В процессе эксплуатации этих судов был накоплен богатый опыт работы как чисто в морских районах и на внутренних водных путях, так и на устьевых участках рек, впадающих в моря, где исходя из специфических условий этих районов суда смешанного «река-море» плавания зарекомендовали себя наиболее успешно.

Требования ИМО к проработке перехода, изложенные в Резолюции А.893(21) «Руководство по планированию рейса» [6] и целый ряд других нормативных документов определяют необходимость расчета минимального запаса воды под днищем судна. При следовании на мелководье одним из основных факторов, определяющих минимальный запас, является динамическая просадка судов. Как показывает практика, характер проявления динамической просадки у различных судов может существенно отличаться. Установлено, что в некоторых

случаях крупные морские суда могут иметь приращение осадки носом больше, чем кормой. В то же время натурные наблюдения, выполненные на речных судах, показывают, что они на мелководье просаживаются больше кормой. Например, «Brown' s Nautical Almanac» [10] содержит информацию о том, что для судов, имеющих коэффициент полноты водоизмещения δ>0,70, дифферент будет проявляться на нос, для судов с δ<0,70 – дифферент на корму, а для судов с δ = 0,70 – просадка судна будет проявляться без дополнительного дифферента. Методика К. Ремиша [7], во многих источниках называемая универсальной, содержит другой подход к определению просадки судна, связанный с расчетом дополнительного коэффициента:

$$C_{\delta_н} = \frac{90*\delta^2*B^2}{L^2}\ , \qquad (1)$$

где $C_{\delta_н}$ – коэффициент, зависящий от формы корпуса;

B – ширина судна;

L – длина судна.

При $C_{\delta_н} > 1$ проседание носа больше проседания кормы, а при $C_{\delta_н} < 1$ – больше проседание кормы. Так у судов с полными обводами и малым отношением L/B (например, у крупнотоннажных танкеров) больше проседает нос, а у судов с острыми образованиями больше проседает корма.

Вопросами приращения осадки при движении судна по мелководью занимались многие зарубежные и отечественные исследователи (в том числе В. Г. Павленко, В. В. Звонков, Г. И. Сухомел, А. Б. Карпов, П. Н. Шанчуров, Г. И. Ваганов, А. М. Полунин и др.). Существует несколько методов расчета приращения осадки при движении на мелководье. Наибольшее распространение получили методы В. Г. Павленко, А. М. Полунина, П. Н. Шанчурова, Г. И. Сухомела, А. П. Ковалева, универсальный метод Ремиша, графический метод NPL и др. Некоторые из методов относятся только к речным судам, некоторые только к морским, есть и универсальные методы расчета просадки. Для речных судов с традиционными обводами корпусов это, в первую очередь, основанные на результатах модельных испытаний методы В. Г. Павленко, П. Н. Шанчурова, Г. И. Сухомела и их дальнейшие разработки в виде формул А. М. Полунина и А. П. Ковалева.

Эксплуатация речных судов осуществляется в стесненных условиях на мелководье, критерии которого существенно отличаются от общепринятых в морском судовождении. Согласно требованиям «Правил плавания по внутренним водным путям» [5] минимальный запас воды под днищем судна должен составлять при песчаном грунте не менее 0,20 м., а при

каменистом грунте – 0,25 м. При плавании в морских районах указанные запасы абсолютно не приемлемы.

Авторы методик расчета динамической просадки речных судов исходили, прежде всего, из учета физического процесса, происходящего вокруг движущегося судна. Суть его сводится к следующему: поскольку вода обладает свойством неразрывности, то вытесняемые в стороны частицы воды, двигаясь по криволинейной траектории, за то же самое время должны пройти больший путь, чем частицы, движущиеся прямолинейно [1]. Следовательно, скорость частиц, обтекающих судно, выше скорости частиц, движущихся по прямой. Зависимость между скоростью потока и давлением жидкости описывается уравнением Бернулли [3]:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} = \text{const}\,, \qquad (2)$$

где $z$ – высота положения единицы веса жидкости;

$p$ – гидростатическое давление на данном участке;

$\rho$– плотность жидкости, его масса, заключенная в единице объема;

$g$ – ускорение свободного падения;

$v$ – скорость потока.

Из данного выражения видно, что если на каком либо участке скорость движения жидкости увеличивается, то для сохранения равенства должно понизиться давление. Следовательно, для того чтобы уравнение (2) выполнялось, вокруг судна во время его движения происходит падение давления и уровня воды. Поэтому в приведенных ниже методах расчета динамической просадки, разработанных с учетом физических процессов обтекания корпуса судна потоком воды, присутствует динамический элемент $\frac{v^2}{g}$ выражения (2).

Метод В. Г. Павленко [8]:

$$\Delta T_к = \frac{a\,v^2}{2\,g}\,, \qquad (3)$$

где $\Delta T_к$ – приращение осадки судна по корме;

а– числовой коэффициент, причем:

для крупнотоннажных грузовых судов и толкаемых составов

$$a = 0{,}04\left(16{,}5 - \frac{L}{B}\right)\sqrt{\frac{T}{H}}, \qquad (4)$$

где Т – осадка судна;

Н – глубина судового хода.

Метод П.Н. Шанчурова [9]:

а) для отношений $\frac{H}{T} \leq 1{,}6$

$$\Delta T_к = 0{,}00135\ \frac{k\,v^2}{g}\left(16{,}43 - \frac{L}{B}\right)\sqrt{\frac{T}{H}}; \qquad (5)$$

б) для отношений $\frac{H}{T} \geq 1{,}6$

$$\Delta T_к = 0{,}00112\ \frac{k\,v^2}{g}\left(16{,}43 - \frac{L}{B}\right)\sqrt{\frac{T}{H}}, \qquad (6)$$

где k – числовой коэффициент, принимаемый при 5 <L/B< 7 для винтовых судов 1,15, для колесных судов 1,10, при 7 <L/B< 9 для винтовых судов 1,10, для колесных 1,05.

Метод Г. И. Сухомела [8]:

а) при отношении $\frac{H}{T} \leq 1{,}4$

$$\Delta T_{ср} = \frac{k^2-1}{2\,g}\ v^2 \qquad (7)$$

б) при отношении $\frac{H}{T} > 1{,}4$

$$\Delta T_{ср} = \sqrt{\frac{T}{H}}\ \frac{k^2-1}{2\,g}\ v^2 \qquad (8)$$

где $\Delta T_{ср}$ – среднее приращение осадки на ходу судна;

k – числовой коэффициент, определяемый по таблице 1

Таблица 1

Зависимость коэффициента k от отношения L / B

| L/B | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 12,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| k | 1,32 | 1,27 | 1,23 | 1,19 | 1,17 | 1,15 | 1,10 |

Дифферент на корму учитывается коэффициентом a, зависящим также от отношения L/B. При этом приращение осадки кормой определяется как

$$\Delta T_k = a\ \Delta T_{ср}, \qquad (9)$$

где a – безразмерный коэффициент, для различных типов судов a может меняться в диапазоне 1,1 – 1,5 [4].

В выражениях (4)–(6) и (8) присутствует отношение $\sqrt{\frac{T}{H}}$, отражающее условия мелководья, для которых выполняется расчет динамической просадки. В указанных выражениях присутствуют также, напрямую или через коэффициент, значения ширины и длины судна.

Физический процесс обтекания корпуса судна жидкостью, помимо главных размерений судна и отношения его осадки к глубине в районе плавания, определяется формой корпуса судна, что не нашло отражения в приведенных выше формулах расчета просадки.

Для определения характера проявления динамической просадки автором были выполнены расчеты по соотношениям размерений корпусов пятнадцати судов внутреннего и сме-

шанного плавания, включая реконструированные суда (см. табл. 2). Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) универсальная методика К. Ремиша не во всех случаях соответствует характеру проявления динамической просадки речных судов. По методике К. Ремиша при коэффициентах $C_{\delta_н} > 1{,}0$ проседание носа должно быть больше проседания кормы. Но натурные наблюдения показывают, что речные суда больше проседают на корму;

Таблица 2

Геометрические характеристики судов

| № п/п | Тип судна | Проект | Длина, L | Ширина, B | Осадка, T | Коэф-т полноты водоизмещения δ | Коэффициент $C_{\delta н}$ по Ремишу | Соответствие характеру просадки | Соотношение $\delta_н / \delta к$ | Соотношение $\bar{\sigma} = \sigma_н / \sigma_к$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6-я пятилетка | 576 | 90,0 | 13,0 | 2,8 | 0,83600 | 1,31123 | нет | 0,86138 | 1,03674 |
| 2 | Невский | Р-32БУ | 108,57 | 14,8 | 3,0 | 0,84200 | 1,1856 | нет | 0,77185 | 1,05424 |
| 3 | Окский | Р-97 | 82,0 | 15,0 | 2,2 | 0,79760 | 1,9158 | нет | 1,03228 | 1,01678 |
| 4 | Волго-Дон | 507Б | 135,0 | 16,5 | 3,2 | 0,85100 | 0,9736 | да | 0,96145 | 1,08960 |
| 5 | Волгонефть | 550А | 128,6 | 16,5 | 3,5 | 0,84500 | 1,05789 | нет | 0,74360 | 1,0657 |
| 6 | Волго-Балт | 095 | 110,0 | 13,0 | 3,3 | 0,82500 | 0,85556 | да | 0,92651 | 1,03207 |
| 7 | т/х Якутск | 1743 | 105,0 | 14,8 | 2,5 | 0,82700 | 1,22287 | нет | 0,8053 | 1,0647 |
| 8 | Сормовский | 1557 | 105,0 | 13,0 | 3,5 | 0,84200 | 0,88313 | да | 0,9695 | 1,03484 |
| 9 | Нефтерузовоз | 1553 | 115,26 | 13,0 | 3,4 | 0,82340 | 0,77624 | да | 1,03346 | 1,02836 |
| 10 | Сормовский | 614 бол. | 110,15 | 13,0 | 3,3 | 0,80767 | 0,81776 | да | 0,98364 | 1,0243 |
| 11 | Родина | 588 | 90,0 | 11,5 | 2,2 | 0,57560 | 0,48688 | да | 0,75844 | 1,2150 |
| 12 | В. Куйбышев | 92-016 | 126,45 | 15,8 | 2,9 | 0,71500 | 0,7206 | да | 1,2837 | 1,04131 |
| 13 | М. Горький | Q-040 | 104,3 | 12,8 | 2,2 | 0,72440 | 0,7112 | да | 1,25026 | 1,03411 |
| 14 | Русь | 302 | 124,5 | 16,0 | 2,9 | 0,67500 | 0,6772 | Да | 1,04331 | 1,077967 |
| 15 | Волжский | 0574АМ | 103,8 | 16,5 | 3,49 | 0,830 | 1,5666 | нет | - | 1,08262 |

2) отношение коэффициентов полноты водоизмещения носовой $\delta_н$ и кормовой $\delta_к$ оконечностей корпуса судна также не отражает характер проявления динамической просадки (отношение больше или меньше 1,0);

3) отношение коэффициентов полноты носовой $\sigma_н$ и кормовой $\sigma_к$ половин диаметрального батокса судна носит постоянный характер (во всех случаях $\bar{\sigma} = \sigma_н / \sigma_к > 1{,}0$), что является характерной особенностью форм корпусов судов внутреннего и смешанного плавания.

Взяв за основу теорию обтекания корпуса судна жидкостью и проанализировав вышеизложенные заключения с учетом результатов натурных наблюдений, автором предлагается

для расчета динамической просадки речного судна на мелководье использовать следующее выражение:

$$\Delta T_{ср} = \overline{\sigma}\,\frac{B\,v^2}{L\,g}\sqrt{\frac{T}{H}} = \overline{\sigma}\,B\,F_r^2\sqrt{\frac{T}{H}}, \qquad (10)$$

где $\overline{\sigma} = \sigma_н / \sigma_к$ – отношение коэффициента полноты носовой половины к коэффициенту полноты кормовой половины диаметрального батокса корпуса судна, характеризующее форму его обводов;

$F_r = v/\sqrt{gL}$ – число Фруда.

Выражение (10) позволяет определить приращение средней осадки судна. Для расчета приращения осадки судов внутреннего и смешанного плавания по корме предлагается использовать выражение (9), в котором коэффициент а принимается равным 1,2, то есть

$$\Delta T_к = 1{,}2\overline{\sigma}\,\frac{B\,v^2}{L\,g}\sqrt{\frac{T}{H}} = 1{,}2\overline{\sigma}\,B\,F_r^2\sqrt{\frac{T}{H}}. \qquad (11)$$

Для проверки корректности результатов исследований были выполнены расчёты динамической просадки по корме по методам В. Г. Павленко, П. Н. Шанчурова и по предлагаемой автором формуле (11) для пятнадцати судов внутреннего и смешанного плавания. Примеры полученных результатов представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

Величины просадки по корме теплохода «Окский» (проект Р- 97)

| Соотношение Т/Н | Величина просадки по корме, м | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Средний ход | | | Малый ход | | |
| | Метод Павленко | Метод Шанчурова | Метод автора | Метод Павленко | Метод Шанчурова | Метод автора |
| 0,5 | 0,188 | 0,157 | 0,190 | 0,084 | 0,070 | 0,085 |
| 0,6 | 0,206 | 0,171 | 0,208 | 0,091 | 0,077 | 0,092 |
| 0,7 | 0,223 | 0,223 | 0,225 | 0,099 | 0,100 | 0,100 |
| 0,8 | 0,238 | 0,239 | 0,241 | 0,105 | 0,107 | 0,107 |
| 0,9 | 0,252 | 0,253 | 0,255 | 0,112 | 0,113 | 0,113 |

Таблица 4

Величины просадки по корме теплохода «Якутск» тип «Омский» (проект 1743)

| Соотношение Т/Н | Величина просадки по корме, м | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Средний ход | | | Малый ход | | |
| | Метод Павленко | Метод Шанчурова | Метод автора | Метод Павленко | Метод Шанчурова | Метод автора |
| 0,5 | 0,255 | 0,202 | 0,244 | 0,113 | 0,090 | 0,108 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,6 | 0,280 | 0,221 | 0,268 | 0,124 | 0,098 | 0,119 |
| 0,7 | 0,302 | 0,288 | 0,289 | 0,134 | 0,128 | 0,128 |
| 0,8 | 0,323 | 0,308 | 0,309 | 0,143 | 0,137 | 0,137 |
| 0,9 | 0,343 | 0,326 | 0,328 | 0,152 | 0,145 | 0,145 |

Таблица 5

Величины просадки по корме теплохода «Волжский» (проект 05074 МА-020-002)

| Соотношение Т/Н | Величина просадки по корме, м | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Средний ход | | | Малый ход | | |
| | Метод Павленко | Метод Шанчурова | Метод автора | Метод Павленко | Метод Шанчурова | Метод автора |
| 0,5 | 0,282 | 0,234 | 0,285 | 0,125 | 0,104 | 0,127 |
| 0,6 | 0,309 | 0,256 | 0,311 | 0,137 | 0,114 | 0,139 |
| 0,7 | 0,333 | 0,333 | 0,336 | 0,148 | 0,148 | 0,149 |
| 0,8 | 0,356 | 0,356 | 0,360 | 0,158 | 0,158 | 0,160 |
| 0,9 | 0,378 | 0,378 | 0,381 | 0,168 | 0,168 | 0,170 |

Сравнительный анализ результатов расчетов позволил сделать вывод об их хорошей сходимости. Наибольшие расхождения обнаруживаются в результатах расчетов, выполненных по методике П. Н. Шанчурова для соотношений Т/Н равных 0,5 и 0,6. Причиной указанных расхождений является тот факт, что при этих отношениях в расчетной формуле меняется числовой коэффициент, изменение которого и вызывает изменение конечного результата определения динамической просадки.

Максимальные расхождения расчетной величины динамической просадки речных судов по корме не превышают 6 %, а, как правило, находятся в пределах 4 %.

Предложенная методика расчета величины динамической просадки по корме у речных судов имеет хорошую сходимость и с результатами натурных наблюдений, выполненных по серийным речным судам [10].

На основании вышеизложенного, можно сделать заключение, что предложенная методика расчета динамической просадки, учитывающая характер обводов корпусов речных и смешанного плавания судов, может быть использована в практической деятельности судоводителей.

## Список литературы

1. Ганнессен В. Плавание на мелководье и в узкости / учебное пособие для судоводителей [Электронный ресурс], 2007. – Режим доступа: http://mariners.narod.ru/VGanessen_Plavanie_na_melkovodie.pdf.

2. Звонков В. В. Скоростные и тяговые характеристики грузовых теплоходов // Речной транспорт. – 1954. – № 5. – С. 17-21.

3. Гидравлика: учебник для вузов / А. А. Гусев. – М.: Изд-во Юрайт, 2013. – 285 с. – Серия: Бакалавр. Базовый курс.
4. Исследование движения судов по ограниченным фарватерам / Г. И. Сухомел, В. М. Засс, Л. И. Янковский. – Киев: Изд-во АН Украинской ССР, 1956. – 163 с.
5. Правила плавания по внутренним водным путям Российской Федерации. – М.: Транспорт, 2009. –128 с.
6. Резолюция ИМО А.893(21) « Руководство по планированию рейса» от 25 ноября 1999 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gfi.chat.ru/imo/A893(21).htm.
7. Справочник капитана дальнего плавания / Под ред. Г. Г. Ермолаева. – М.: Транспорт, 1988. – 211 с.
8. Управление судами и составами / П. Н. Шанчуров, Н. Ф. Соларев, И. А. Щепетов. – М.: Транспорт, 1971. – 347 с.
9. Управление судами и составами: учебник для вузов / Н. Ф. Соларев [и др.]. – 2-е изд. – М.: Транспорт, 1983. – 296 с.
10. Brown’s Nautical Almanac, Brown, Son and Ferguson. Ltd, Glasgow, G41 2SD, 2011.

**Рецензенты:**

Клементьев А. Н., д.т.н., профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», г. Нижний Новгород.

Тихонов В. И., д.т.н., профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», г. Нижний Новгород.