

Францев М. Э.
M. E. Frantsev

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАВУЧЕСТИ СУДНА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА КРЕНОВАНИЯ**

**RECOVERY OF THE THEORETICAL ELEMENTS OF VESSEL BUOYANCY
WHILE PROCESSING THE RESULTS OF AN INCLINING EXPERIMENT
WITH THE USE OF NUMERICAL METHODS**

Францев Михаил Эрнстович – кандидат технических наук, директор инжиниринговой компании «АОЗТ «Нептун-Судомонтаж» (Россия); 141703, Россия, Долгопрудный; тел. +7(903)7173125. E-mail: gepard629@yandex.ru.

Frantsev Mikhail Ernstovich – PhD in Engineering; Director of Engineering Company «JSC «Neptun-Sudomontazh» (Russia); 141703, Russia, Dolgoprudny; tel. +7(903)7173125. E-mail: gepard629@yandex.ru.

Аннотация. В статье рассмотрен пример восстановления теоретических элементов плавучести пассажирского судна проекта 305, подводная часть которого при переоборудовании не изменялась, численными методами при обработке результатов опыта кренования. Во всех расчётах, кроме расчёта абсциссы центра величины, аппроксимирующая функция была задана в виде степенной функции. Для сравнения с результатами, полученными с помощью численных методов, элементы плавучести были определены традиционными методами теории корабля по теоретическому чертежу. Расхождения в расчётах составили не более 0,5 %, а трудоёмкость выполнения расчётов численными методами оказалась существенно ниже.

Summary. The paper considers the recovery of the theoretical elements of the passenger ship buoyancy of the project 305. The underwater part of the ship was not changed when retrofitting, using numerical methods in processing the results of an inclining experiment. In all the calculations, except for center of buoyancy abscissa, the approximating function was given in the form of an exponential function. To compare with the results, obtained by the numerical methods, buoyancy elements were identified by the conventional methods of the ship theory on the theoretical drawing. The differences in the calculations were no more than 0.5 %, and the complexity of performing calculations using the numerical methods was proved to be significantly lower.

Ключевые слова: теоретические элементы плавучести, опыт кренования, численные методы, аппроксимация, переоборудование судов.

Key words: theoretical elements of buoyancy, inclining experiment, numerical methods, approximation, vessel retrofitting.

УДК 629.12.001

Введение

Последние десятилетия характеризуются резким уменьшением объёмов строительства новых судов. Судовладельцы, стремясь эффективно, с их точки зрения, использовать имеющийся флот, пытаются адаптировать его к требованиям нового времени. Адаптация имеющегося флота, как правило, ведётся путём его переоборудования. В ряде случаев целью переоборудования является изменение назначения судна. Можно привести множество примеров переоборудования сухогрузов в танкеры, судов-снабженцев – в плавучие рестораны, грузовых судов – в пассажирские и т.п. Другим направлением является усиление при переоборудовании определённых качеств судна. Это может быть, например, повышение уровня ком-

форта пассажирского судна за счёт увеличения вместимости определённых пассажирских помещений с одновременным изменением их компоновки.

Переоборудование любого судна – это творческий, технически сложный и весьма кропотливый процесс, главным девизом которого должен быть девиз «Не навреди». Однако часто встречаются суда, ставшие результатом переоборудования по принципу «разрушим до основания, а затем...». Введён даже официальный термин – «постройка с использованием элементов существующего судна». При этом от переоборудуемого судна может оставаться лишь часть килевой секции. За новыми очертаниями судна порой с трудом угадываются приметы его серийного «прародителя». И не всегда столь глубокие изменения оправданны. Часто большинство эксплуатационных качеств переоборудованного судна не претерпевает улучшения пропорционально масштабам внесённых в его конструкцию изменений. А некоторые важные свойства судна, такие как остойчивость, непотопляемость, мореходность, ходкость и управляемость, после переоборудования значительно ухудшаются. Тому есть достаточно примеров.

Возможно, главной причиной этого является отсутствие должной глубины в концептуальной проработке проекта переоборудования судна. Кажущаяся простота переоборудования, обусловленная, в первую очередь, самим фактом физического существования судна, а также возможностью быстрого преобразования его отдельных элементов, приводит к тому, что судовладелец, пытаясь заставить судно решать другие, ранее несвойственные ему задачи, разрабатывает концепцию его переоборудования самостоятельно. На начальном этапе разработки проекта, когда цена проектной ошибки особенно высока, к проектированию с правом совещательного голоса привлекаются в лучшем случае наёмные консультанты из числа плавсостава, а то и представителей рабочих специальностей. И только на завершающих стадиях проектирования, когда проект переоборудования необходимо оформлять для согласования с Российским Речным Регистром (РРР), к его разработке привлекаются специализированные проектные организации и дипломированные специалисты соответствующего профиля. Можно предположить, что процесс этот будет продолжаться и в дальнейшем, по мере смены собственников существующих судов.

Постановка задачи

Дополнительную сложность процессу переоборудования судна придаёт минимальное наличие, а в ряде случаев полное отсутствие его проектной и/или эксплуатационной документации. Большинство переоборудуемых судов построено более полувека назад. За столь долгий срок КБ и судостроительные предприятия, создававшие судно, исчезли вместе с его проектной документацией. Эксплуатационная документация судна из-за многократной смены его владельцев, как правило, утрачена полностью или частично. В лучшем случае она многократно подвергалась перекопированию и потому содержит существенные искажения.

Всё это приводит к тому, что в ряде случаев специалист или проектная организация, выполняющие завершающие стадии проекта переоборудования судна, в том числе подготавливающие проектную документацию для согласования с РРР, не располагают информацией об исходных качествах судна, и поэтому не могут оценить их изменения, произошедшие в процессе его переоборудования. Отсутствие такой информации часто приводит к проектным ошибкам. Цена этих ошибок, особенно когда они касаются таких важных эксплуатационных качеств судна, как его остойчивость, может оказаться неприемлемо высокой. Вследствие этого по общему правилу РРР требует проведения опыта кренования для судов после переоборудования. При этом результаты опыта должны быть внесены в Информацию об остойчивости и непотопляемости судна, а проект переоборудования должен быть по ним откорректирован. Поэтому опыт кренования является одним из ключевых моментов переоборудования судна, а его результаты трудно переоценить. В основе оценки результатов опыта лежит информация о теоретических элементах плавучести переоборудованного судна. Без этой информации объективная оценка результатов опыта невозможна.

В данной статье рассмотрен пример восстановления численными методами теоретических элементов плавучести пассажирского судна проекта 305, подводная часть которого при переоборудовании не изменялась, при обработке результатов опыта кренования.

В соответствии с методикой, изложенной в [1], положение центра тяжести судна при обработке результатов опыта кренования определяется следующим образом. Сначала определяется водоизмещение судна:

$$D = \gamma V ,$$

где D – весовое водоизмещение, т; γ – удельный вес пресной воды, т/м³; V – объёмное водоизмещение, м³.

Апplikата центра тяжести судна при дифференте $> 0,005L$ (рассматриваемый случай), где L – расчётная длина судна, определяется по формуле

$$z_g = z_c + (r - h) \cos \psi ,$$

где z_c – апplikата центра величины, м; r – малый метацентрический радиус, м; h – малая метацентрическая высота, м; ψ – угол дифферента, град.

Абсцисса центра тяжести судна при дифференте $> 0,005L$ определяется по формуле

$$x_g = x_c - (r - h) \sin \psi ,$$

где x_c – абсцисса центра величины, м.

Малая метацентрическая высота определяется в результате опыта. Теоретические элементы плавучести D , r , z_c , x_c определяются любым достаточно точным способом при соответствующих осадках носом и кормой [1].

Решение

При проведении опыта кренования переоборудованного судна проекта 305 в пресной воде была измерена высота надводного борта в носу, корме и на миделе по обоим бортам. По шкалам осадок, там, где они имелись, была определена осадка судна. Полученные значения осадок указывали на то, что в момент проведения опыта кренования переоборудованное судно имеет существенно большее водоизмещение, чем серийное пассажирское судно проекта 305.

Методы определения элементов плавучести в теории корабля хорошо известны, и здесь останавливаться на них нет необходимости. Однако для их определения необходимо наличие теоретического чертежа судна.

В связи с тем, что суда проекта 305 проектировались и строились за рубежом (Венгрия) более полувека назад, у разработчика проекта переоборудования на момент проведения опыта кренования отсутствовали исходные проектные и эксплуатационные документы переоборудуемого судна, включая теоретический чертёж.

Поэтому для получения необходимой информации об отдельных значениях осадки и водоизмещения, а также других теоретических элементов плавучести проекта 305 использовался Справочник по серийным транспортным судам [2]. В нём были приведены значения осадки для нескольких значений водоизмещения. Кроме того, там приводились значения абсцисс и апplikат центра величины судна, а также значения малого метацентрического радиуса для двух значений водоизмещения, которые были получены по результатам опыта кренования головного судна проекта 305. Значения водоизмещения для осадки и других теоретических элементов плавучести между собой не совпадали.

Для восстановления теоретических элементов плавучести, необходимых при обработке результатов опыта кренования, было решено использовать численные методы в соответствии с принципами, изложенными в [3].

В качестве единой независимой переменной при решении рассматриваемой задачи может рассматриваться осадка судна. Эта величина объективно отражается в соответствующую

щей справочной литературе [2], а также может быть получена измерением. Логико-физический смысл применения независимой переменной заключается в возможности соотнесения различных величин теоретических элементов плавучести судна с его осадкой. Обозначим независимую переменную как T .

Множества значений теоретических элементов плавучести, определяемых на заданном интервале, сопоставленных множеству значений одной и той же независимой переменной, определяемой на этом же интервале, пригодны для проектной аппроксимации, а также для исследования динамики изменения функции методами регрессионного анализа. Все теоретические элементы плавучести из области допустимых значений сбалансированы между собой, т.к. описывают качества одного и того же корпуса.

Представление зависимостей теоретических элементов плавучести в виде математических функций позволяет применить математические методы для их определения.

Таким образом, на рассматриваемом интервале между минимальной и максимальной осадками значения величин теоретических элементов плавучести D, r, z_c, x_c могут рассматриваться как значения функций, имеющих общий аргумент – осадку судна T .

Представим базу данных теоретических элементов плавучести рассматриваемого судна в интересующем нас размерном интервале в виде множеств, элементами которых являются их значения.

Так как формирование выборки значений, относящихся к заданному размерному интервалу, имеет случайный характер (они являются результатами несвязных опытов), становится возможным проведение необходимых расчётов и получение выводов чисто математическими средствами в рамках регрессионной модели.

Случайные величины, полученные методом случайной выборки из открытых источников, неизбежно содержат случайные ошибки. Случайные ошибки определяются большим числом факторов, которые не могут быть устранены или в полной мере учтены при обработке результатов. Они имеют случайный, несистематический характер, дают отклонения от истинного значения в ту и другую стороны.

Таким образом, мы приходим к задаче вычисления приближённых значений функции при любом значении аргумента на основе имеющихся табличных данных. Эта задача решается путём приближённой замены функции $f(x)$ более простой функцией $\varphi(x)$, которую можно вычислять при любом значении аргумента x в заданном интервале его изменения. Введённую функцию можно использовать не только для приближённого определения численных значений $f(x)$, но и для проведения аналитических расчётов при теоретическом исследовании модели. Приближение функции $f(x)$ более простой функцией $\varphi(x)$ называется аппроксимацией. Аппроксимация, при которой приближение строится на заданном дискретном множестве точек $\{x_i\}$, называется точечной.

Для получения точечного среднеквадратичного приближения функции $y = f(x)$, заданной таблично, аппроксимирующую функцию $\varphi(x)$ строят из условия минимума величины:

$$S = \sum_{i=0}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2,$$

где y_i – значения функции $f(x)$ в точках x_i .

Аппроксимация данных с учётом их частотных параметров относится к задачам регрессии. Задачей регрессионного анализа является подбор формул, наилучшим образом описывающих полученные данные.

Рассматриваемый интервал изменения осадки переоборудованного судна составил более 26 % от её расчётного значения при полном водоизмещении проекта 305. При таком интервале изменения осадки в расчётах теоретических элементов плавучести не было возможности использовать гипотезу прямолинейного судна и, соответственно, применять линей-

ную аппроксимацию имеющихся значений. Поэтому во всех расчётах, кроме расчёта абсциссы центра величины, применялось задание аппроксимирующей функции в виде степенной функции:

$$y = ax^b.$$

Таким образом, для идентификации зависимостей теоретических элементов плавучести судна от его осадки необходимо сформировать и сопоставить дискретные множества значений этих характеристик и аппроксимировать их по степенному закону в заданном интервале значений каждой из величин. Используя аппроксимирующие функции, мы можем получить достаточно достоверные зависимости, позволяющие определять теоретические элементы плавучести в первом приближении достаточно эффективно.

Для выполнения расчётов использовалась программа Microsoft Excel. Расчёты выполнялись на сайте <https://office.live.com>.

Сначала была вычислена аппроксимирующая функция, отражающая изменение осадки по интервалу водоизмещения, и был построен её график (см. рис. 1). Аппроксимирующая функция изменения осадки имеет вид

$$T = 0,0034D^{0,8987}.$$

где T – осадка, м.

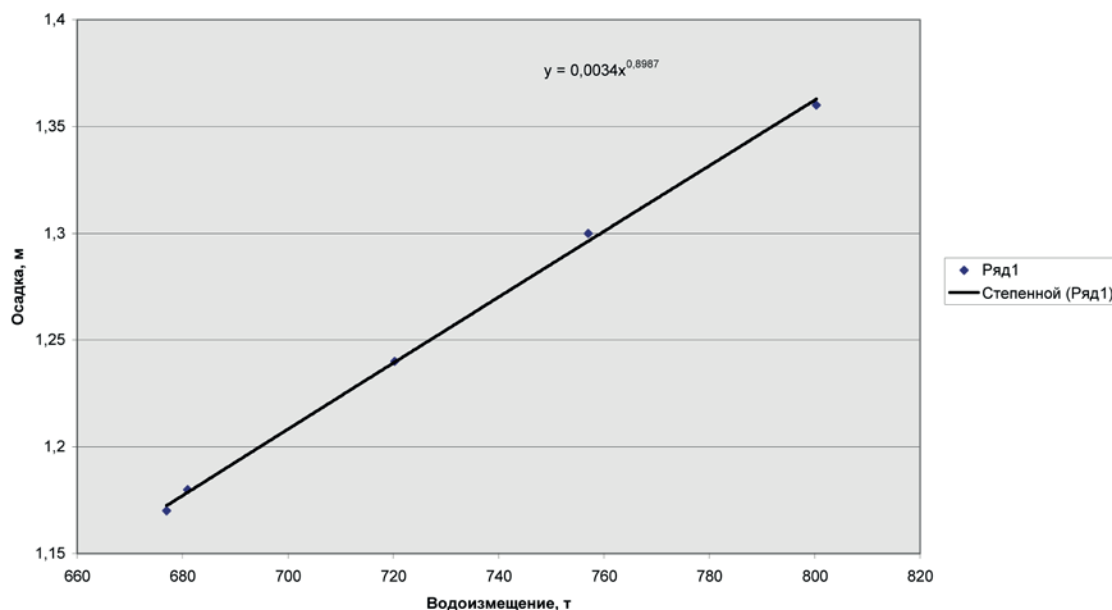


Рис. 1. Изменение осадки по интервалу водоизмещения

Далее была вычислена аппроксимирующая функция грузового размера судна, был построен её график (см. рис. 2). Аппроксимирующая функция грузового размера судна имеет вид

$$D = 567,28T^{1,1115}.$$

Вычисление аппроксимирующей функции грузового размера судна проекта 305 по интервалу осадок позволило по значениям осадки, измеренным при проведении опыта кренования, получить значение водоизмещения переоборудованного судна в момент проведения опыта. Оно превышало полное водоизмещение по проекту 305 на 11,8 % и превышало полное водоизмещение по проекту переоборудования на 2,7 %.

Следующим этапом стало вычисление аппроксимирующей функции, отражающей изменение абсциссы центра величины по интервалу водоизмещения (см. рис. 3). Она имеет вид

$$x_c = -0,0021D + 1,32.$$

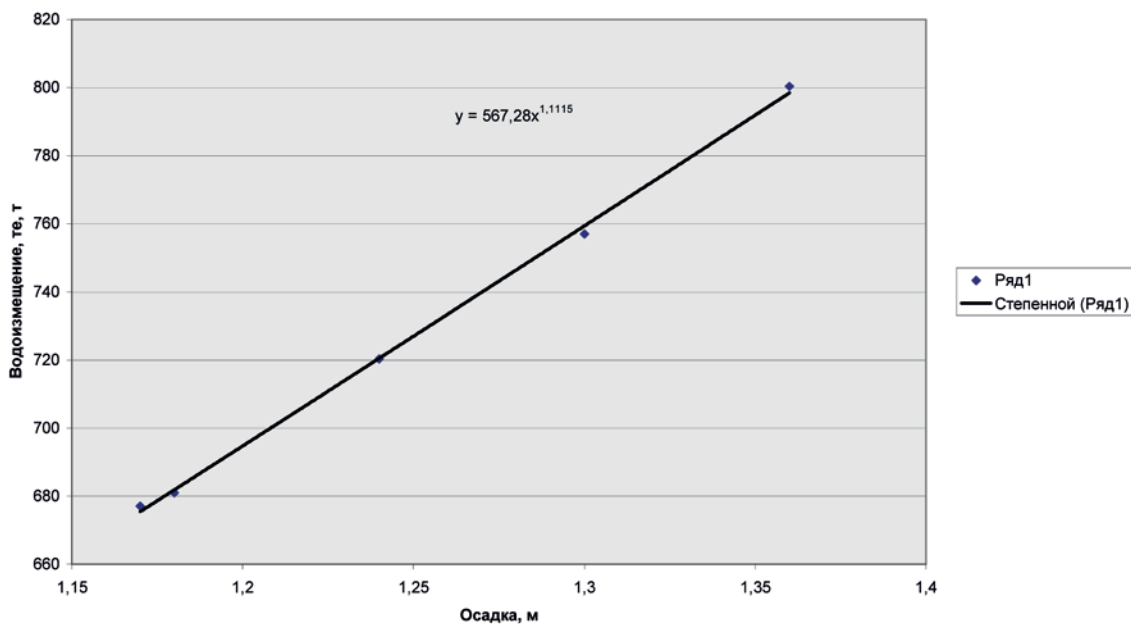


Рис. 2. Грузовой размер

Аппроксимирующая функция, отражающая изменение аппликаты центра величины по интервалу водоизмещения (см. рис. 4), имеет вид

$$z_c = 0,0011D^{0,9745}.$$

В дополнение к аппроксимирующим функциям, определяющим положение центра величины, была вычислена аппроксимирующая функция, отражающая изменение малого метацентрического радиуса по интервалу водоизмещения (см. рис. 5), которая имеет вид

$$r = 979,27D^{-0,7399}.$$

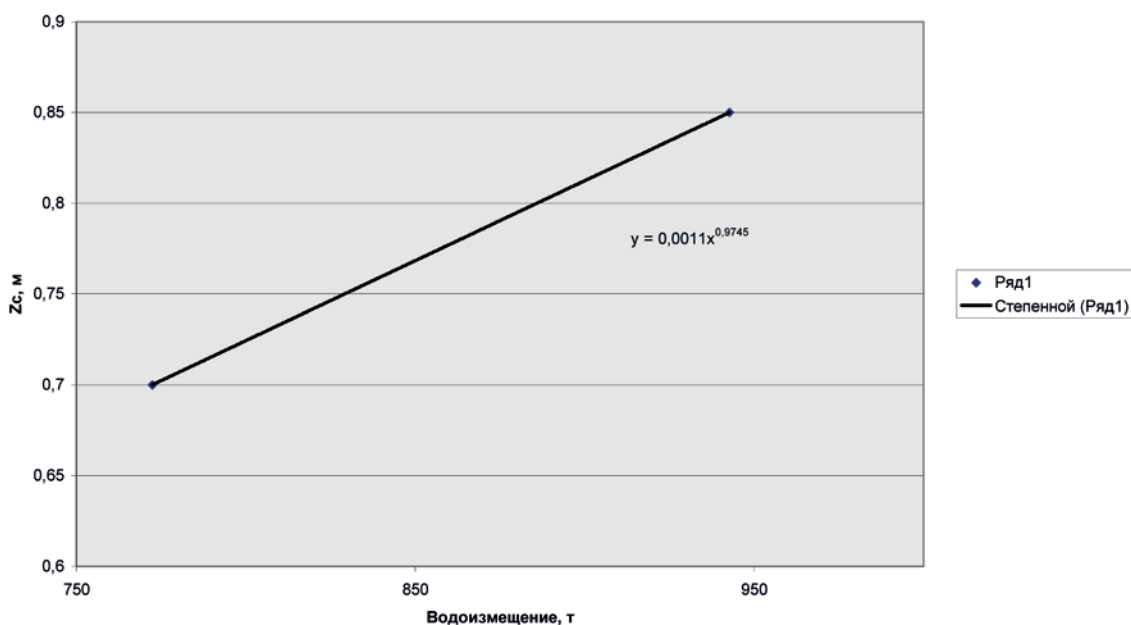


Рис. 3. Изменение аппликаты центра величины по интервалу водоизмещения

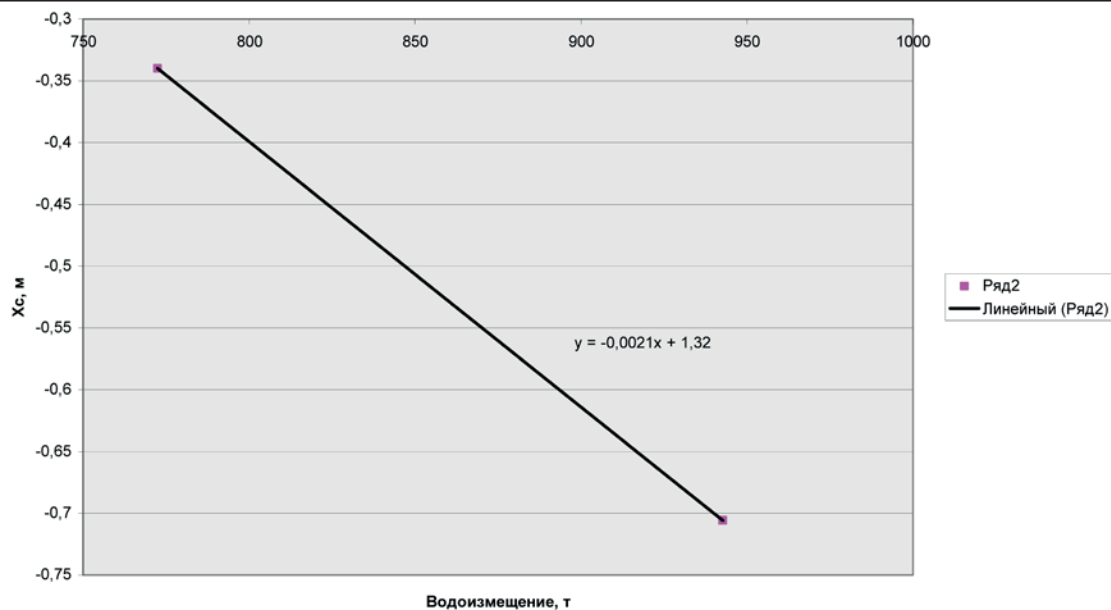


Рис. 4. Изменение абсциссы центра величины по интервалу водоизмещения

Выводы, заключение

Характер всех полученных графиков аппроксимирующих функций соответствовал конфигурации соответствующих участков кривых элементов плавучести, приведённых в литературе по теории корабля, например в [4]. Поэтому графики были признаны работоспособными для последующих расчётов.

По аппроксимирующим функциям теоретических элементов плавучести были определены их значения, соответствующие водоизмещению переоборудованного судна в момент проведения опыта кренования, для расчётов положения центра тяжести в соответствии с методикой [1]. Результаты опыта кренования были признаны достоверными проектантом и экспертом РРР.

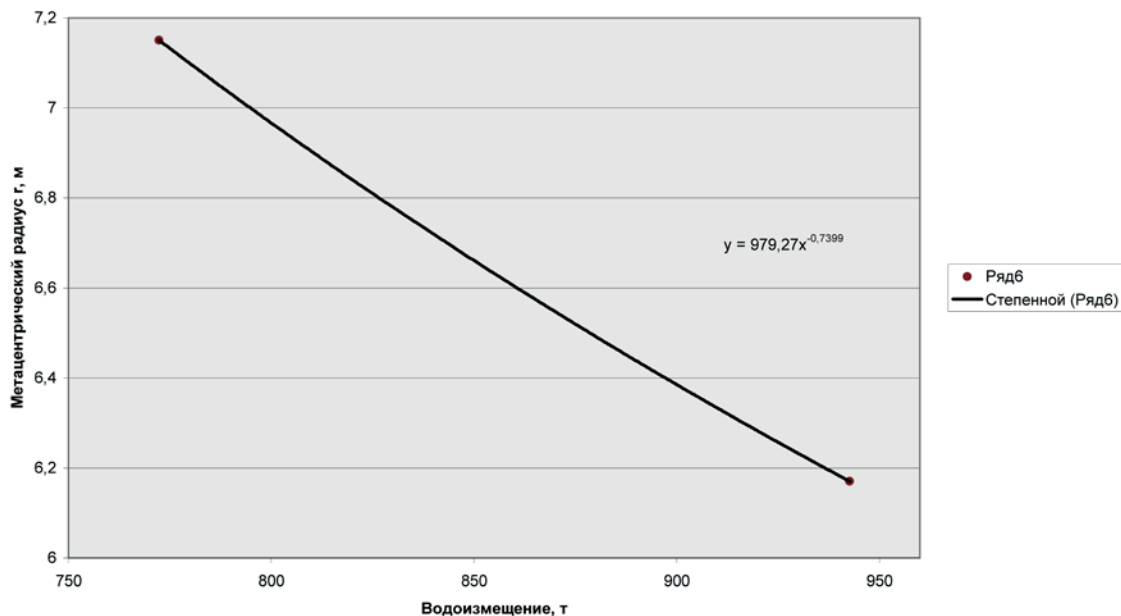


Рис. 5. Изменение малого метацентрического радиуса по интервалу водоизмещения



Уже после окончания обработки результатов опыта кренования численными методами в распоряжении автора статьи и его коллег оказалась светокопия теоретического чертежа проекта 305, к сожалению, достаточно низкого качества. Для сравнения с результатами, полученными численными методами, по теоретическому чертежу элементы плавучести были определены традиционными методами теории корабля. Расхождения в расчётах составили не более 0,5 %, а трудоёмкость выполнения расчётов численными методами оказалась меньше почти на порядок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Российский Речной Регистр. Правила. В 4 т. Т. 2. Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания. – М.: [б. и.], 2008. – 400 с.
2. Справочник по серийным транспортным судам. ЦБНТИ МРФ. В 11 т. Т. 1. – М.: Транспорт, 1972. – 224 с.
3. Францев, М. Э. Способ проектного обоснования главных элементов и других характеристик судов из композиционных материалов при помощи анализа баз данных / М. Э. Францев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология». – 2011. – № 3. – С. 37-46.
4. Алферьев, М. Я. Теория корабля / М. Я. Алферьев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1972. – 448 с.