

# Расчеты сопротивления малых судов

Альберт Назаров, к.т.н.

Как 20–40 лет назад, так и сейчас расчеты ходкости представляют собой определенную сложность для конструкторов яхт и катеров. Причина, во-первых, в том, что для малых судов характерно огромное разнообразие форм корпусов и пропорций, и их постоянное совершенствование, что вынуждает тщательно относиться к выбору методов расчета и систематических серий с аналогичными характеристиками. Во-вторых, дело осложняется тем, что малые суда движутся в диапазоне высоких относительных скоростей, где существующие методы расчета дают значительный разброс результатов. В-третьих, малые суда особенно подвержены влиянию стихии и неблагоприятных эксплуатационных факторов – ветра, волнения – что заставляет принимать большой запас мощности для сложных эксплуатационных условий. Ну, и в дополнение, малые суда зачастую проектируются людьми без специального образования, поэтому велик соблазн полагаться на упрощенные методики.

Считается, что для водоизмещающих судов погрешность в определении буксировочного сопротивления в 1% эквивалентна погрешности 0.3% в определении скорости. Наиболее острой проблема достоверности оценки ходовых качеств становится для глиссирующих судов, где ошибка в оценке сопротивления в 1% приближается к такой же погрешности для скорости. Стоит ли говорить, что неточности в расчете буксировочного сопротивления могут привести к недобору скорости на ходовых испытаниях и на приемке судна заказчиком? Актуальной представляется систематизация имеющихся в арсенале проектировщиков малых судов методов расчета буксировочного сопротивления, для их обоснованного выбора. Подобный обзор методов оценки ходовых качеств малых судов приведен в «Справочнике по малотоннажному судостроению» (сост. Б. Г. Мордвинов. Судостроение, 1987), но, к сожалению, в него не входят многие наиболее употребительные на сегодняшний день формулы и графики.

## Методы оценки буксировочного сопротивления

Существующие теоретические и экспериментальные методы оценки ходовых качеств и буксировочного сопротивления судна можно разделить на несколько групп:

- ✓ Упрощенные формулы и графики, связывающие, как правило в виде простых зависимостей, скорость с мощностью и основными характеристиками судна.
- ✓ Систематические серии – представляют результаты испытаний серий моделей корпусов судов с систематически изменя-

емыми параметрами; например серии Гроота, серии 62, 63, 64, БК и МБК, DSYHS и т.д.

- ✓ Серии схематизированных моделей – по аналогии с систематическими сериями, но для испытаний использованы простые геометрические формы. К таким методам относятся, например, метод Савицкого для глиссирующих призматических моделей и

метод Седова-Перельмутра для глиссирующих пластин.

- ✓ Статистические (регрессионные) методы, основанные на результатах анализа несвязанных между собой результатов испытаний моделей; например методы Холтропа, Мерсиера-Савицкого, Фунга и т.д.
- ✓ Методы численной гидромеханики (CFD-методы).
- ✓ Испытания моделей в опытовых бассейнах (рис.1).
- ✓ Использование результатов натурных испытаний – в основном применяется для верификации полученных другими методами данных.

Конструктору малого судна доступны в основном расчетные методы, поскольку затраты на проведение испытаний моделей обычно не укладываются в бюджет проектирования (кроме наиболее ответственных проектов). С другой

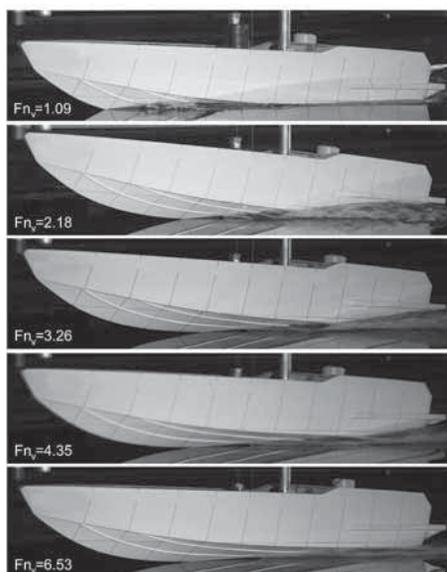


Рис.1. Испытания модели корпуса глиссирующего катера длиной 17 м (проект автора)

стороны, ведущие проектировщики накапливают материалы ходовых и модельных испытаний, что позволяет верифицировать и полностью полагаться на расчетные методы определения буксировочного сопротивления. Однако даже модельные испытания применительно к малым высокоскоростным судам не всегда достоверны – например, отсутствующий у модели движитель оказывает влияние на распределение поля давлений в кормовой части судна, в свою очередь это приводит к различиям в посадке модели и натуре и, соответственно, влияет на результаты оценки сопротивления. Как говорится, в результаты модельных испытаний верят все, кроме того, кто их проводил; в результаты CFD-расчетов не верит никто, кроме того, кто их выполнял. Наш опыт работы с субподрядчиками по расчету CFD-методами однозначно свидетельствует, что применительно к малым судам требуемая точность пока не обеспечивается, особенно когда кроме красивых картинок обтекания нужно получить достоверную величину сопротивления.

Принято считать, что среди расчетных методов систематические серии дают большую точность – в пределах 5% погрешности, но только если обводы моделей серии и проектируемого судна достаточно близки. Декларируемая погрешность регрессионных методов выше, в большинстве случаев – 10%, но они позволяют

анализировать сопротивление без жесткой привязки к характеру обводов корпуса, и, как правило, диапазон параметров регрессионных методов шире.

### Упрощенные методы

Упрощенные методы, графики и формулы адмиралтейских коэффициентов применяются для грубой оценки мощности на начальных этапах проектирования, а также при наличии близкого прототипа. Как правило, методы связывают скорость непосредственно с потребной мощностью, минуя расчет буксировочного сопротивления. Ряд упрощенных формул для водоизмещающих судов приведен в упомянутом справочнике, сюда же относятся формулы адмиралтейских коэффициентов, а также популярные среди иностранных конструкторов-любителей формулы Герра и Уаймана. Кроме того, автором статьи для оценки мощности двигателей малых парусно-моторных судов и моторных катамаранов разработаны диаграммы, связывающие потребную мощность с длиной по ватерлинии, скоростью и водоизмещением.

Наиболее часто упрощенные формулы – Кроуча, Леви, Рейеса, Щербакова, Кривоносова и др. – применяются для глиссирующих судов. Например, часто используемая формула Кроуча связывает скорость  $v$  в статутных милях в час (1.609 км/ч), с водоизмещением  $\Delta$  в фунтах (0.4536 кг) и установленной мощностью  $P$  в л.с.

$$v = C \cdot \sqrt{P/\Delta},$$

где коэффициент  $C=150 \dots 220$  в зависимости от типа судна.

Основная особенность этих формул в том, что их надежность зависит от принятых значений коэффициентов; даже выбранные согласно рекомендациям, они часто приводят к неудовлетворительной точности. Определять коэффициенты следует исходя из достоверных результатов испытаний близкого судна-прототипа, в первую очередь имеющего сходные относительную длину  $l = L/V^{1/3}$  для водоизмещающего/переходного режима или коэффициент статической нагрузки  $C_{\Delta} = V/V_c^3$  для глиссирующего.

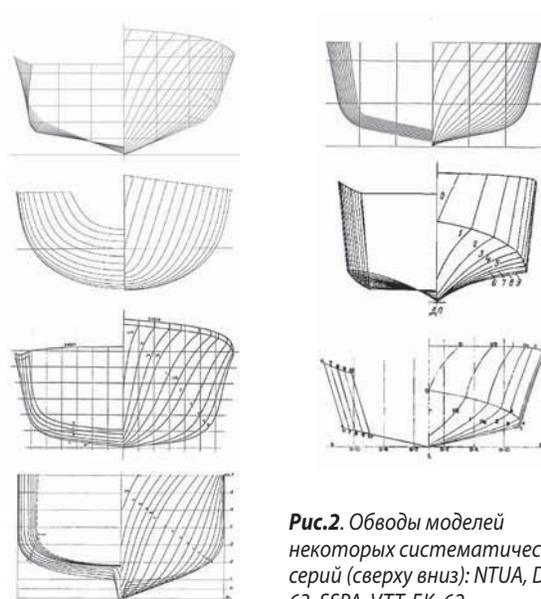
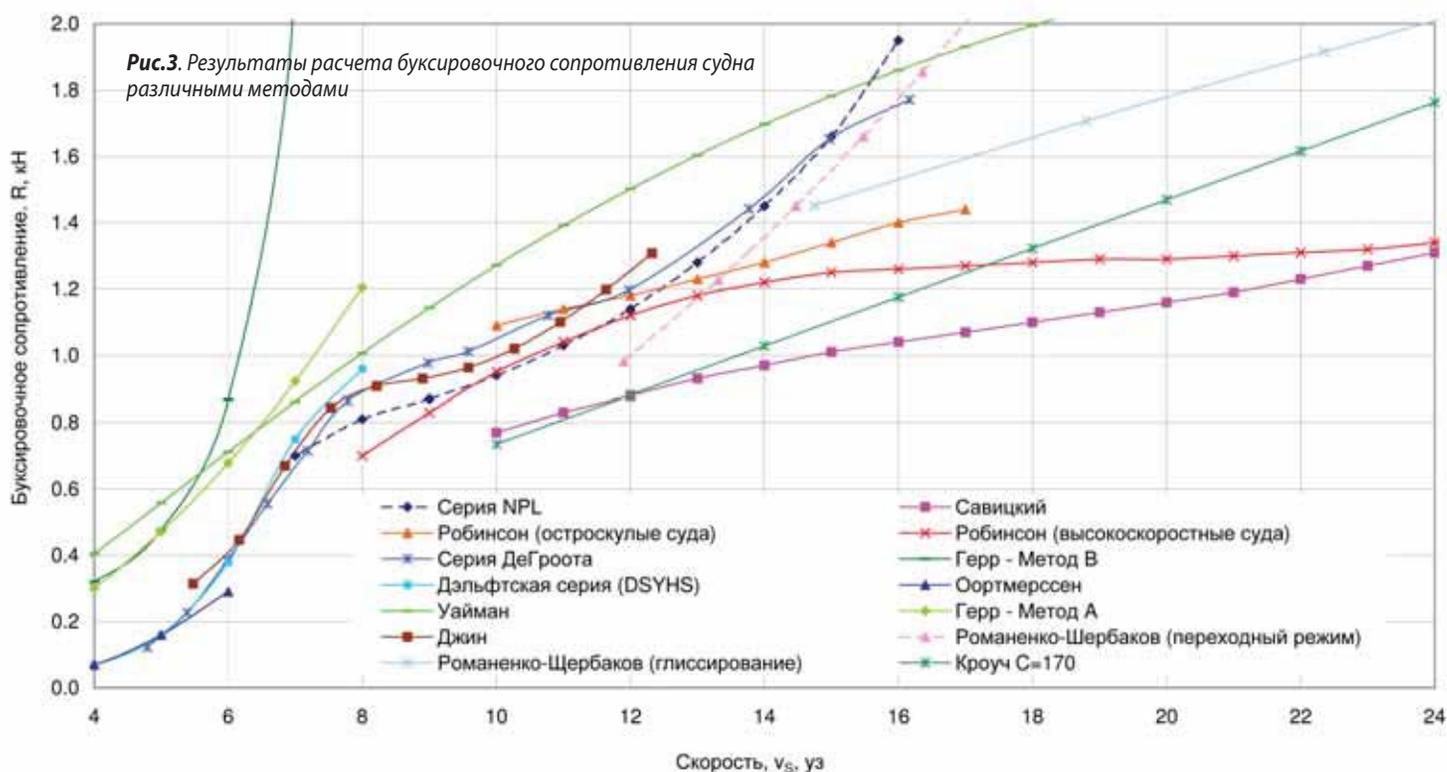


Рис.2. Обводы моделей некоторых систематических серий (сверху вниз): NTUA, DSYHS, 63, SSPA, VTT, BK, 62

Тем не менее, с учетом указанных ограничений, упрощенные формулы успешно применяются на ранних стадиях проектирования, для сравнения судов, а также при разработке параметрических моделей их оптимизации.

### Систематические серии

Систематическая серия объединяет результаты испытаний группы моделей с систематически изменяемыми параметрами, представленные в удобной для расчетов форме. Серии позволяют определять сопротивление (а иногда и некоторые другие параметры движения – ходовой дифферент, коэффициент попутного потока и т.д.) для корпуса, параметры которого лежат в пределах параметров серии (рис. 2). За десятилетия исследований накоплен обширный экспериментальный материал по корпусам различных типов, тем не менее правильный выбор серии,



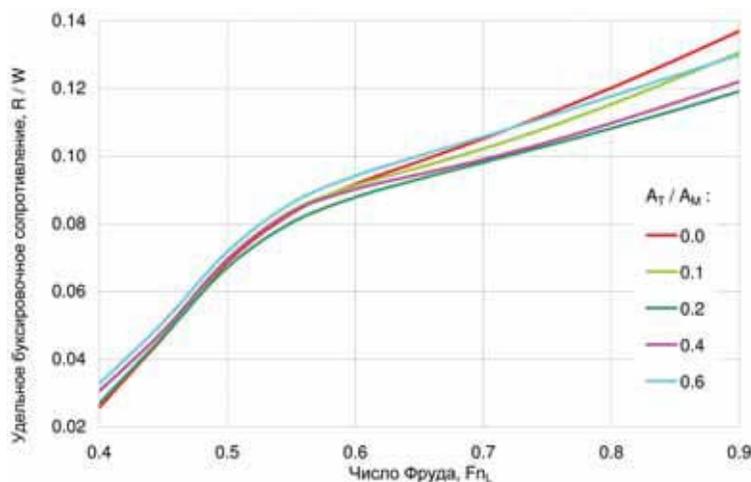


Рис. 4. Анализ буксировочного сопротивления судна при варьировании отношения погруженной площади транца к площади миделя  $A_T/A_M$

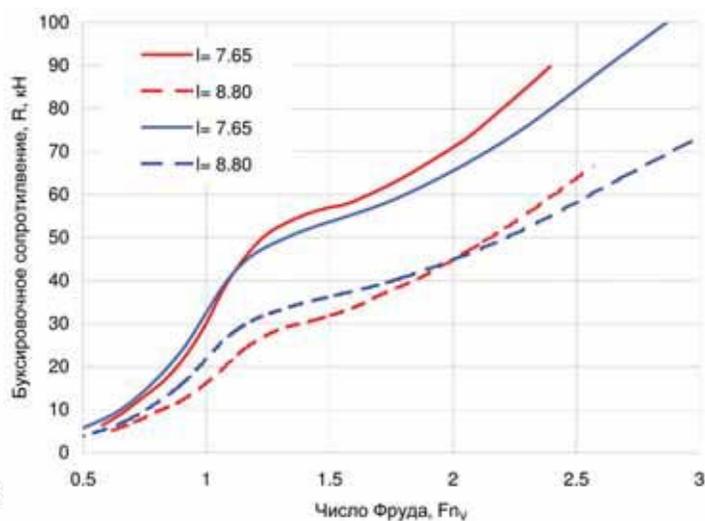


Рис. 5. Анализ буксировочного сопротивления катamarанов с круглоскулыми (красные линии) и остроскулыми (синие) обводами, для разных значений относительной длины

ее применение и верификация результатов иногда представляют проблему.

Первая в мире систематическая серия моделей корпусов парусных яхт – серия НКИ – испытана Л. В. Забурдаевым (Приближенный расчет сопротивления воды движению парусных яхт // Труды НКИ, 1978. Вып. 145). Но на сегодняшний день систематическая серия корпусов парусных яхт Дельфтского Университета DSYHS (Delft Systematic Yacht Hull Series) – это стандартный метод оценки буксировочного сопротивления парусных судов. Изначально серия DSYHS I состояла из 22 моделей, позднее серия неоднократно расширялась (до 73 моделей) за счет корпусов меньшего водоизмещения (DSYHS II–VII), а также была дополнена расчетом сопротивления на волнении. Модели с одинаковыми килями и рулями испытывались при  $F_n=0.15\dots0.75$ , углах крена  $0\dots30^\circ$  и с различным дрейфом. Поскольку серия неоднократно дополнялась, существует несколько версий коэффициентов и видов аппроксимирующих полиномов; это необходимо учитывать при сравнении старых и новых версий метода.

Серии быстроходных катеров БК и МБК испытаны в СССР в 1960–70-х годах и опубликованы М. Буньковым и коллегами; на сегодняшний день это самые крупные из систематических серий быстроходных судов, испытанные при  $F_{nV}=1.0\dots4.5$ . Считается, что расчет по серии БК дает несколько завышенное сопротивление, но в целом достаточно надежен для относительно тяжелых судов. Недостатком серий является устаревший характер обводов моделей.

Для глиссирующих судов используются Серия 62 (исходная серия Клементя-Блаунта и дополнительная 62DUT) и Серия 65 (изначально предназначенная для судов на подводных крыльях в докрьльевом режиме).

Серии водоизмещающих судов широко представлены методами для коммерческих судов, буксиров и траулеров. Из распространенных серий для судов переходного режима следует также отметить серии Гроота, 63, 64, SSPA, NPL – для круглоскулых судов; USNA, VTT (Лахтихари) – для остроскулых и круглоскулых корпусов; NTUA – для обводов с двойной скулой. Особый интерес представляют систематические серии катamarанов; в частности серия Молланда-Инсела для круглоскулых катamarанов и серия

VMS'89 (серия Мюлер-Графа) для остроскулых катamarанов переходного режима.

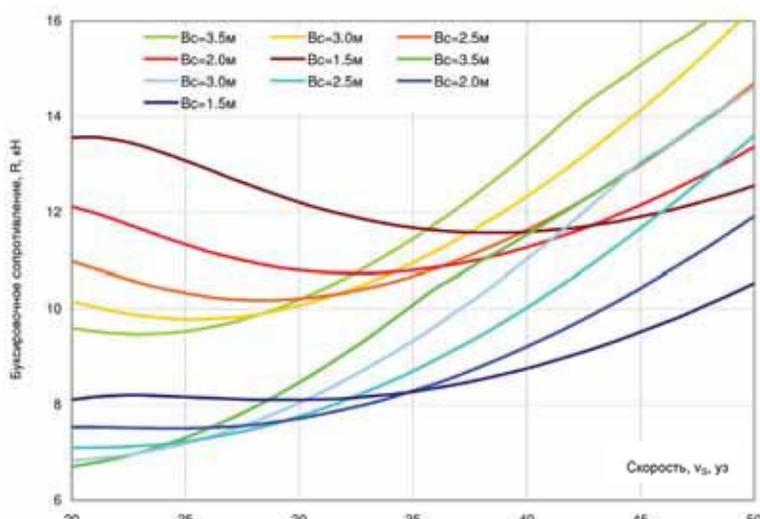
### Методы схематизированных моделей

Эта группа методов применяется в основном для режима чистого глиссирования. В основе метода Седова-Перельмутра – результаты испытаний плоских пластин, проведенные Зотторфом; для учета килеватости применяется поправка Любомирова. Несмотря на наличие более современных методов, он широко применяется в отечественной практике.

Метод Савицкого на сегодняшний день является наиболее распространенным для расчета буксировочного сопротивления глиссирующих корпусов с V-образными обводами при  $F_{nV}>2.5$ . Еще во время Второй мировой войны для нужд военной промышленности Д. Савицкий (родившийся в семье эмигрантов, из-за чего в советское время все его работы замалчивались; эта инерция продолжается до сих пор при издании отечественных учебников) проводил опыты с поплавками гидропланов и призматическими моделями; эти опыты легли в основу ставшего известным метода. В 1964 году вышла статья Савицкого (Savitsky D. Hydrodynamic Design of Planing Hulls // Marine Technology. Vol. 1), в которой он, по собственному заявлению, «лишь представил всем известные результаты в удобной для расчетов форме». Считается, что эта публикация является наиболее заказываемой и часто цитируемой из всего архива SNAME. Некоторые исследователи отмечают, что сопротивление призматических моделей в районе горба сопротивления неточно отражает поведение реальных корпусов. Существует несколько модификаций метода, в том числе позволяющих уточнить влияние «непризматичности» обводов в носовой части в диапазоне горба сопротивления, брызговое сопротивление и т.д.

### Статистические методы

Статистические методы становятся все более популярными, так как позволяют исследователям объединить результаты разрозненных испытаний, проводимых и накапливаемых опытовыми бассейнами, в единую методику. Как правило, методы представ-



**Рис. 6.** Анализ буксировочного сопротивления (метод Савицкого) катера длиной 9 м при варьировании ширины по скуле  $B_c$  с минимальной нагрузкой (синие линии) и при полном водоизмещении (красные)

ляют собой регрессионные формулы для компонентов сопротивления, коэффициентов взаимодействия винта и корпуса, смоченной поверхности и т. д. без привязки к конкретной форме корпуса.

Наиболее известным методом этой группы является метод Холтропа, опубликованный в нескольких вариантах и предназначенный в основном для крупных судов при  $F_n < 0.80$ . Метод имеет ограничения по отношению  $L/B$  и недооценивает сопротивление судов с погруженным транцем.

Некоторые другие методы, используемые в нашей практике для быстроходных судов: метод Фунга, метод Ван-Оортмерссена для траулеров и буксиров, методы Робинсона для быстроходных судов, метод Джина, метод Мерсиера-Савицкого для глиссирующих корпусов в переходном режиме. Многие из этих методов включены в коммерчески доступное программное обеспечение. Важно отметить, что каждый из них имеет свои границы применимости по соотношениям формы корпуса, с которыми необходимо ознакомиться прежде, чем «нажимать кнопку» в программе.

### Примеры использования различных методов

На рис. 3 представлены результаты расчета  $R$  для судна длиной  $L=5.1$  м и водоизмещением  $V=0.9$  м<sup>3</sup>. Для упрощенных формул при пересчете из потребной мощности в  $R$  использован пропульсивный коэффициент 0.55. Абстрагируясь от формы обводов корпуса, посмотрим на полученные результаты с точки зрения их повторяемости и применимости.

- ✓ Методы для круглоскулых судов Гроота, NPL, Джина дают достаточно хорошее совпадение. И это неудивительно – это наиболее надежные и проверенные годами методы; но тем не менее разброс есть, и в районе горба он максимален.
- ✓ Серия DSYHS всегда обеспечивает низкое сопротивление на малых скоростях – в ней применены обводы без погруженного транца, и значения призматического коэффициента у серии ниже, чем у рассматриваемого судна.
- ✓ Метод Оортмерссена предназначен для траулеров и буксиров и предусматривает соответствующий характер обводов.
- ✓ Методы Робинсона дают надежные результаты для остроскулых судов, в том числе в районе горба сопротивления.

- ✓ Метод Савицкого дает заниженное сопротивление в области низких скоростей, и это понятно – он рассчитан на чистое глиссирование и неточен в районе горба из-за «призматических допущений».
- ✓ Формулы Герра (варианты А, В) и формула Уаймана для водоизмещающих судов дают совершенно неправдоподобные результаты. По мнению автора статьи, применения этих методов следует избегать, или их авторам следует обозначить четкие границы применимости формул.
- ✓ Результат формул Романенко-Щербакова и Кроуча зависит от правильного выбора коэффициентов.

### Типичные ошибки расчетов

При расчете сопротивления судна перед инженером-кораблестроителем стоит задача не просто определить сопротивление с заданной точностью, но и избежать недобора скорости. Поэтому запас в 5...10% на погрешности методик может оказаться нелишним.

Как видно из результатов на рис. 3, было бы ошибкой всецело полагаться на расчет по одному методу; в нашей практике используется как минимум 2–3 метода одновременно, если нет результатов испытаний аналогичного по характеристикам судна. Кроме того, не следует брать оптимистичный прогноз сопротивления в качестве основного.

Распространенная ошибка – это применение систематических серий и методов вне пределов их применимости; так может быть получен практически любой результат. Экстраполировать результаты серий по некоторым параметрам возможно, но делать это необходимо осторожно и квалифицированно. При выборе методов необходимо учитывать характер обводов систематических серий.

Одна из распространенных ошибок оценки ходовых качеств судна связана с недооценкой его водоизмещения. Хотя данный фактор и относится к вычислению нагрузки масс проекта, тем не менее перетяжеление судна зачастую оказывается губительным для его ходовых качеств.

Конечно же, при расчете буксировочного сопротивления необходимо учесть аэродинамическое сопротивление и сопротивление выступающих частей, каждое из которых для быстроходных судов может достигать 15–20% от полного. По мнению автора, некорректно принимать сопротивление выступающих частей в процентах от общего, т. к. в целом оно зависит от скорости судна, от типа и характеристик пропульсивного комплекса, которые могут быть очень разнообразными.

В целом следует помнить, что физически обоснованные методы (серии и статистические) всегда более надежны, чем разного рода упрощенные формулы.

### Заключение

Сегодня, при доступности программного обеспечения, многие судостроители-любители, а зачастую и профессионалы, всецело полагаются на «софт». Но задумаемся – всегда ли мы можем гарантировать применимость заложенного в программу метода и дать правильную оценку полученному результату? Если при использовании очередной компьютерной «считалки» у конструктора возникнет желание ознакомиться с заложенным в нее методом – полагаю, цель настоящей публикации будет достигнута. ■