

УДК 629.5.022.25

**COMPUTER AIDED DESIGN OF SMALL WATERPLANE AREA  
TWIN HULL SHIPS****АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ С  
МАЛОЙ ПЛОЩАДЬЮ ВАТЕРЛИНИИ**

**A.P. Boyko**, *PhD, associate professor*, **A.V. Bondarenko**, *PhD, associate professor*  
**А.П. Бойко**, *к.т.н., доцент*, **А.В. Бондаренко**, *к.т.н., доцент*

*National Shipbuilding University, Ukraine*  
*Національний Університет Кораблестроєння, Україна*

**ABSTRACT**

The basic aspects of the computer-aided design of the small waterplane area twin hull ships process at conceptual stage are considered. The "SWATH Ships" software package is described.

**Keywords:** Small waterplane area twin hull ship, software package, optimum design, goal function, mathematical model.

**Постановка проблемы в общем виде**

В настоящее время на рынке программных комплексов представлен ряд CAD/CAM/CAE систем, позволяющих проводить автоматизированное проектирование судов различных типов. Наиболее известными являются:

- изначально предназначенные для судостроительной отрасли (специализированные) FORAN, Aveva Marine (Tribon), NAPA;
- переориентированные из других отраслей на использование в судостроении (универсальные) CATIA, Unigraphics, Pro/ENGINEER и др.;
- предназначенные для решения отдельных задач судостроения: ShipModel, Sea Solution, DEFCAR, AutoSHIP, DialogStatika, MaxSurf, FastShip и т.д.

В большинстве случаев указанные системы акцентируют внимание на более поздние этапы проектирования с целью автоматизации создания чертежей, подготовки и автоматизации технологических процессов, автоматизации хранения и передачи информации. На начальных этапах они, как правило, могут решать следующие задачи: формирование поверхности корпуса судна, разбиение корпуса на отсеки, проектирование конструкции корпуса, выполнение расчетов по статике, гидродинамике и т.д.

В тоже время проектирование судов до сих пор остается скорее искусством, чем наукой, и по-прежнему знания проектировщика являются важным и определяющим фактором при выборе проектных решений.

Для формирования таких решений инженеры пользуются своими наработками, основанными на накопленном опыте проектирования судов различных типов. В случае многокорпусных судов, и особенно судов с малой площадью

ватерлинии (СМПВ), процесс создания вызывает определенные трудности ввиду отсутствия такого опыта.

Поэтому **целью** статьи является изложение основных принципов автоматизированного проектирования СМПВ.

### **Изложение материалов исследования**

В настоящее время при выборе проектных характеристик судов различных типов используются несколько подходов.

Первый подход, основанный на методе последовательных приближений, позволяет определять главные размерения в несколько этапов или приближений. На каждом последующем приближении уточняются элементы проекта, полученные в предыдущем. Недостатком такого подхода является то, что рассчитанный проект судна является допустимым, но не оптимальным. Проектировщика обычно интересует оптимальный вариант, полностью отвечающий определенному сочетанию главных элементов из множества возможных решений, у которого наилучшие показатели экономической эффективности.

Получить оптимальный вариант также можно путем разработки и сопоставления десятков, иногда тысяч, вариантов проекта судна и выбором из них по экономическому показателю наилучшего. Этот способ получил название метода вариаций. Главное его отличие от метода последовательных приближений состоит в том, что значения некоторых искомых величин зачастую задаются в относительном виде, а не определяются в процессе выполнения приближений. Остальные величины вычисляются методом последовательных приближений одновременно с расчетом экономических показателей. Но метод вариаций гарантирует получение наилучшего варианта только среди рассмотренных.

Следующий подход предусматривает применение теории оптимизации и позволяет найти оптимальные характеристики судна для заданной системы ограничений.

Среди известных авторам работ в этом направлении в первую очередь следует отметить труды [1–3]. Часть из этих методов реализована в виде программных продуктов [1, 3].

Независимо от используемого метода поиска проектных решений на начальном этапе проектирования, инженеру приходится решать следующие задачи: расчет геометрических характеристик и коэффициентов полноты судна, разработка теоретического чертежа, определение массы судна порожнем, дедвейта и координат центра тяжести, оценка вместимости судна (определение требуемых площадей), выполнение проверочных расчетов гидростатики и мореходности, определение показателей экономической эффективности.

Для их решения, как правило, разрабатывается математическая модель судна в основу которой, в зависимости от типа судна, закладываются определенные алгоритмы расчета.

Поэтому рассмотрение основных принципов оптимального проектирования СМПВ целесообразно начать с математической модели судна на примере разработанного авторами комплекса программ (КП) "SWATH ships".

При оптимизационном подходе решается задача математического программирования в виде:

$$F(X, C) \rightarrow \min(\max) , X \in D \subset R^n;$$

$$D = \left\{ X \in R^n \mid g_j(X, C) \geq 0, \quad j \in [1, p], g_l(X, C) = 0, \quad l \in [p+1, k] \right\},$$

где  $F(X, C)$  – целевая функция;  $C(C_1, \dots, C_m)$  – вектор параметров задания на проектирование;  $X(x_1, \dots, x_n)$  – вектор искомых характеристик судна (независимых переменных);  $m$  – количество параметров;  $n$  – количество независимых переменных;  $k$  – общее количество ограничений задачи;  $p$  – количество ограничений задачи в виде неравенств;  $R^n$  –  $n$ -мерное Евклидово пространство.

В состав вектора исходных данных  $C$  входят основные характеристики технического задания на проектирование судна: назначение; скорость хода эксплуатационная,  $V_S$ ; дальность плавания; автономность плавания,  $N_{авт}$ ; количество пассажиров,  $N_{пас}$ ; тип энергетической установки; материал корпуса и надстройки; мореходность,  $h_{3\%}$ ; предполагаемый район эксплуатации.

Вектор независимых переменных включает следующие характеристики:  $x_1$  – относительное удлинение подводного корпуса  $l_H$ ;  $x_2$  – отношение длины стойки к ее ширине  $l_S$ ;  $x_3$  – коэффициент полноты площади ватерлинии стоек  $C_{WPS}$ ;  $x_4$  – относительная площадь ватерлинии  $k_W$ ;  $x_5$  – отношение горизонтального клиренса к длине судна  $h_c$ ;  $x_6$  – отношение осадки судна к диаметру погруженного корпуса  $l_d$ ;  $x_7$  – отношение ширины погруженного корпуса к его высоте  $b_H$ ;  $x_8$  – коэффициент продольной полноты подводного корпуса  $C_P$ ;  $x_9$  – параметр формы носового заострения погруженного корпуса  $n_f$ ;  $x_{10}$  – параметр формы кормового заострения подводного корпуса  $n_a$ ;  $x_{11}$  – параметр формы поперечного сечения подводного корпуса  $n_h$ ;  $x_{12}$  – параметр формы заострений стойки  $n_s$ ;  $x_{13}$  – относительная длина носового заострения корпуса  $l_{NH}$ ;  $x_{14}$  – относительная длина носового заострения стойки  $l_{NS}$ ;  $x_{15}$  – коэффициент утилизации водоизмещения по полезной нагрузке  $\eta_P$ ;  $x_{16}$  – выдвиг стойки  $S_b$ .

В функциональные ограничения задачи входят неравенства, определяющие требования к качествам судна. Все эти ограничения получены на основе анализа технических требований к характеристикам судна. В комплексе программ (КП) предусмотрена возможность регулирования допустимой области поиска путем включения/отключения тех или иных ограничений (рис. 1).

Основу математического обеспечения КП составляет математическая модель судна, как инженерного сооружения, и модель функционирования.

Математическое обеспечение оптимального проектирования СМПВ реализовано в следующих программных модулях: "SWATH\_Model", "Resist", "GeneticAlg", "Simulation", "Result", "QualitativeAnalysis".

Модуль "SWATH\_Model" содержит алгоритм определения основных характеристик судна с малой площадью ватерлинии.

Исходными данными для расчета служат: начальные значения независимых переменных, параметры, указанные в задании на проектирование, и дополнительные данные.

Выбор главных размерений начинается с расчета полезной нагрузки судна

$$W_P = (P_{Pas} + N_{авт} \cdot P_{Fr.w} + P_{Prov}) \cdot N_{Pas} / 1000, \text{ т,}$$

где  $P_{Pas}$  – масса одного пассажира, кг;  $P_{Fr.w}$  – запасы пресной воды на одного пассажира, кг;  $P_{Prov}$  – запасы провизии на одного пассажира в сутки, кг.

Затем определяется расчетное водоизмещение судна

$$\Delta = W_P / \eta_P, \text{ т,}$$

где  $\eta_P$  – коэффициент утилизации водоизмещения по полезной нагрузке.

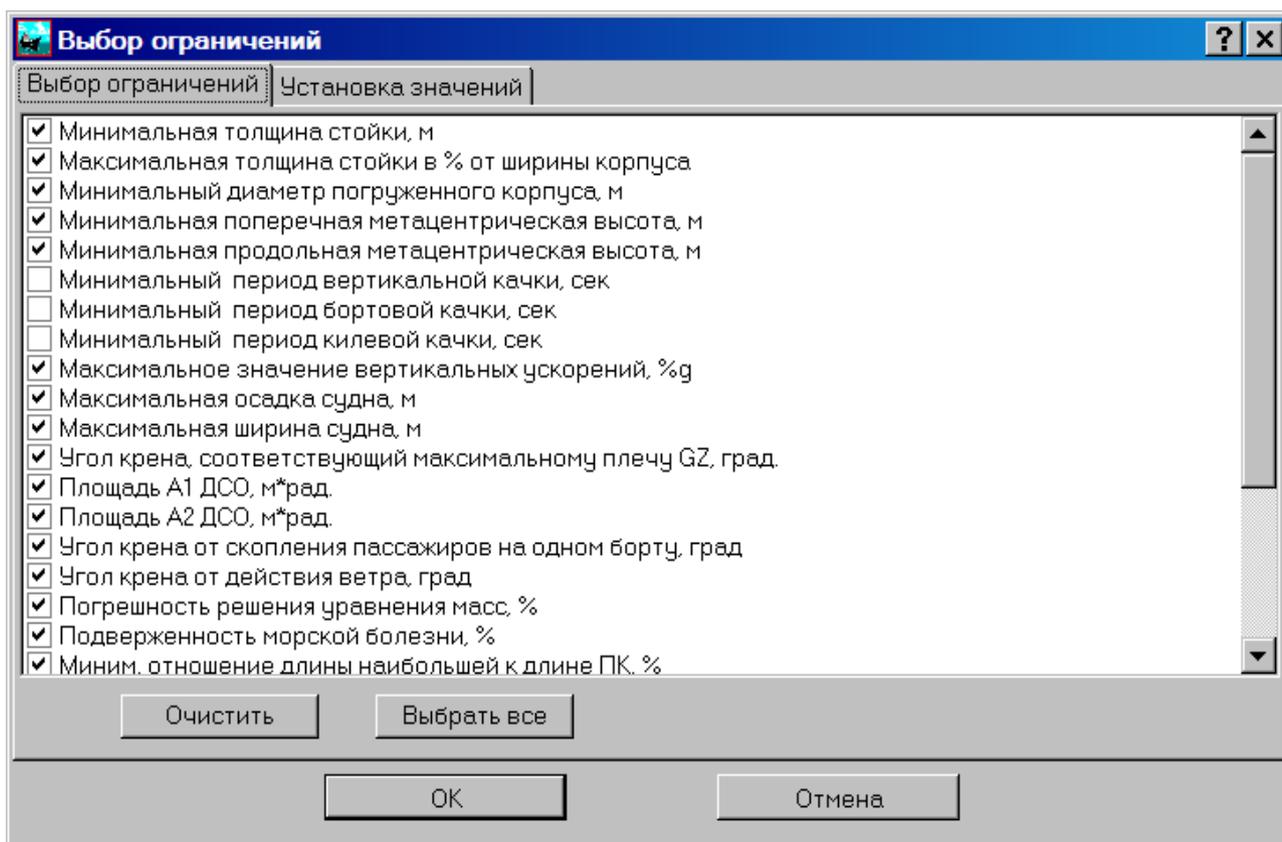


Рис. 1. Диалоговое окно выбора ограничений задачи

На следующем этапе выполняется расчет основных геометрических характеристик СМПВ. Некоторые из зависимостей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет геометрических характеристик СМПВ

Наименование	Формула
Площадь ватерлинии стойки, м <sup>2</sup>	$A_{WPS} = \nabla^{2/3} k_W$
Коэффициент полноты площади ватерлинии носовой части стойки	$C_{WL\_F} = \frac{n_s}{1+n_s}$
Коэффициент полноты площади ватерлинии кормовой части стойки	$C_{WL\_A} = \frac{n_s}{1+n_s}$
Длина стойки, м	$L_S = \sqrt{\frac{A_{WPS} l_S}{2C_{WPS}}}$
Ширина стойки, м	$t_S = l_S / L_S$
Длина подводного корпуса	$L_H = l_H D_H$
Коэффициент полноты площади мидельшпангоута подводного корпуса	$C_{MH} = \frac{\sqrt{\pi} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{n_h}\right)}{2^{n_h} \cdot n_h \cdot \Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{n_h}\right)},$ <p>где <math>\Gamma</math> – гамма-функция</p>
Коэффициент общей полноты подводного корпуса	$C_B = C_{MH} C_{PH}$
Ширина подводного корпуса, м	из решения уравнения $\frac{2C_b l_H B_H^3}{b_H^{3/2}} + \frac{A_{WPS} (l_d - 1) B_H}{b_H} - \nabla = 0$
Высота подводного корпуса, м	$H_H = \frac{B_H}{b_H}$
Диаметр подводного корпуса, м	$D_H = \sqrt{H_H B_H}$
Осадка судна, м	$d = l_d H_H$
Площадь мидель-шпангоута подводного корпуса, м <sup>2</sup>	$A_{MH} = C_{MH} H_H B_H$
Объемное водоизмещение одного подводного корпуса, м <sup>3</sup>	$\nabla_H = C_{PH} A_{MH} L_H$
Высота погруженной части стойки, м	$H_{SS} = d - H_H$
Объем погруженной части стойки, м <sup>3</sup>	$\nabla_S = \frac{A_{WPS} H_{SS}}{2}$
Выдвиг стойки относительно корпуса, м	$S_b = s_b L_H$
Длина платформы, м	$L_{Box} = \min(L_S + S_b; L_{OA})$
Длина наибольшая, м	$L_{OA} = \max(L_S + S_b; L_H)$
Вертикальный клиренс, м	$H_{DK} = \max(0,75h_{3\%}; 0,625\sqrt{B_H H_H})$
Высота стойки, м	$h_S = H_{SS} + H_{DK}$
Горизонтальный клиренс, м	$B_S = h_C L_H$
Высота моста платформы, м	$H_{DB} = (B_{Box} - 2B_H) / 7,5$
Высота борта судна до главной палубы, м	$D = H_H + h_S + H_{DB}$

Зависимости получены в предположении, что носовая часть подводного корпуса – эллиптическая, кормовая – параболическая, носовое и кормовое заострение стойки – параболической формы.

Значения геометрических характеристик СМПВ используются для генерации поверхности корпуса, а также в расчетах ходкости, нагрузки масс и мореходности.

Определение массы судна порожнем и дедвейта выполняется путем решения уравнения масс в виде

$$\Delta = W_{LS} + DW,$$

где  $W_{LS}$  – водоизмещение судна порожнем, т;  $DW$  – дедвейт, т.

На ранней стадии проектирования расчет водоизмещения порожнем СМПВ целесообразно проводить по следующим укрупненным разделам:

$$W_{LS} = W_{Hull} + W_{Sup} + W_M + W_{Out} + W_{SM},$$

где  $W_{Hull}$  – масса корпуса, т;  $W_{Sup}$  – масса надстройки, т;  $W_M$  – масса энергетической установки, т;  $W_{Out}$  – масса оборудования, т;  $W_{SM}$  – запас водоизмещения, т.

Наибольшие затруднения для расчета представляет масса корпуса ввиду отсутствия информации по нагрузке прототипов и статистических зависимостей. В КП для определения массы корпуса за основу взят подход, в соответствии с которым масса корпуса СМПВ определяется через толщины конструктивных элементов с учетом действующих давлений и требований Классификационного общества:

$$W_{Hull} = (1 + C_0) \sum_i (1 + C_i) W_{si},$$

где  $C_0 = 0,085$  – коэффициент, учитывающий массу дополнительных элементов (покраску, сварку);  $C_i$  – коэффициент, учитывающий массу элементов подкрепляющего набора;  $W_{si}$  – масса основных конструктивных элементов СМПВ: подводных корпусов, стоек, спонсонов, надводной платформы, внутренних палуб и платформ, продольных и поперечных переборок.

Масса конструктивных элементов корпуса СМПВ определяется по следующей зависимости

$$W_{si} = 0,001 \sum_{i=1}^n S_i t_i q_i, \text{ т,}$$

где  $S_i, t_i, q_i$  – площадь ( $\text{м}^2$ ), толщина (м) и плотность материала ( $\text{кг/м}^3$ )  $i$ -го элемента корпуса соответственно.

Для судов, корпуса которых изготовлены из стеклопластика, аналогичные коэффициенты получить затруднительно. Поэтому на основании расчетов, выполненных для ряда судов с малой площадью ватерлинии, изготовленных из стеклопластика, была получена следующая зависимость между массой корпуса и водоизмещением судна:  $W_{Hull} = 0,2168\Delta + 4,6129$ .

Масса надстройки в первом приближении рассчитывается в зависимости от материала по формуле

$$W_{Str} = g_{Str} V_{Sup}, T,$$

где  $V_{Sup}$  – объем надстройки с учетом рулевой рубки,  $m^3$ ;  $g_{Sup}$  – измеритель массы надстройки,  $T/m^3$ .

Остальные разделы водоизмещения порожнем, с некоторыми изменениями и доработками, определяются по формулам, используемым при проектировании скоростных пассажирских катамаранов.

Обеспечение вместимости пассажирского СМПВ выполняется путем расчета необходимых площадей:

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n S_i, m^2,$$

где  $S_i$  – требуемая площадь помещения,  $m^2$ ;  $n$  – количество размещаемых помещений на судне.

Для расчета стоимости постройки судна использовалось следующее выражение:

$$C = (1 + k_1)(C_M + C_O + C_W),$$

где  $k_1$  – коэффициент коммерческих расходов и плановых отчислений, включает: налог на добавленную стоимость и прибыль завода-строителя;  $C_M$  – стоимость материала, у.е.;  $C_O$  – стоимость оборудования, у.е.;  $C_W$  – стоимость работ судостроительного завода, у.е.

Модуль "Resist" реализует метод расчета полного сопротивления  $R_T$  и мощности главного двигателя  $P$ . Для определения  $R_T$  использовалась следующая формула:

$$R_T = R_F + R_W + R_{SP} + R_{AP} + R_{AA},$$

где  $R_F, R_{AP}, R_{AA}$  – сопротивление трения, выступающих частей и воздуха;  $R_W, R_{SP}$  – волновое и брызговое сопротивление.

Расчет сопротивления трения, выступающих частей и воздуха выполняется по известным зависимостям теории корабля с учетом особенностей конструкции СМПВ.

Полное волновое сопротивление судна с малой площадью ватерлинии определяется по формуле, кН:

$$R_W = \sum_i R_{Wi} + \sum_i \sum_j \Delta R_{Wij},$$

где  $\sum_i R_{Wi}$  – собственное волновое сопротивление каждого из тел, входящих в состав корпуса СМПВ, при их изолированном движении в жидкости, кН;  $\sum_i \sum_j \Delta R_{Wij}$  – дополнительное волновое сопротивление вследствие интерференции волновых систем, вызванных каждым телом, кН. Волновое сопротивление определяется для таких тел как подводный корпус, носовая и кормовая стойки. Также предусмотрена возможность расчета сопротивления для судов типа Slice и однокорпусных СМПВ.

Для вычисления составляющих волнового сопротивления СМПВ использовался интеграл Мичелла:

$$R_W = \frac{4\rho g^4}{\pi U^6} \int_0^{\pi/2} (I^2 + J^2) w^2 \sec^5 \theta d\theta,$$

где  $J(\theta) = - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-T}^0 Y(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \cos(k_0 x \sec \theta) dx dz$ ;  $\theta$  – переменная

интегрирования;  $k_0 = \frac{g}{U^2}$  – волновое число, 1/м;  $w = 2 \cos(k_0 b \sec^2 \theta \sin \theta)$ ;

$I(\theta) = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-T}^0 Y(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \sin(k_0 x \sec \theta) dx dz$ ;  $2b$  – расстояние между

ДП корпусов, м;  $\rho$  – плотность воды, т/м<sup>3</sup>;  $U$  – скорость судна, м/с;  $Y(x, z)$  – ординаты корпуса или стоек СМПВ, м. При расчетах волнового интеграла применена оригинальная методика интегрирования по методу Филона.

Затем определяется мощность главных двигателей

$$P = \frac{P_E}{\eta_s \eta_D} (SM + 1), \text{ кВт},$$

где  $\eta_s$  – пропульсивный коэффициент;  $SM$  – коэффициент, учитывающий запас мощности;  $P_E = R_T U$  – буксировочная мощность, кВт.

В программе предусмотрен вывод графиков мощности или кривых сопротивления, наглядно демонстрирующих зависимость как полного, так и отдельных видов сопротивления от скорости судна.

Модуль "GeneticAlg" реализует метод поиска оптимального решения с применением генетического алгоритма и штрафных функций. Использование данного метода объясняется особенностями решаемой задачи: нелинейностью,

многомерностью вектора независимых переменных, стохастичностью и наличием системы ограничений.

Эксплуатационные расходы и показатели эффективности определяются в процессе моделирования типовых операций пассажирского судна с помощью модели функционирования. При этом функционирование СМПВ представляется в виде последовательного описания процесса эксплуатации судна между пунктом отправления и пунктом назначения, обработки его в портах и т.д., с учетом гидро- и метеоусловий. В результате такого моделирования фиксируются определенные события и состояния, по которым вычисляются показатели эффективности.

Модель функционирования судна совершающего регулярные рейсы между двумя пунктами по заданному расписанию реализована в модуле "Simulation" и состоит из трех блоков: "Meteo", "Voyage", "Statistic" [4]. Перед выходом судна в рейс выполняется проверка на возможность его выполнения. При возникновении события "шторм" рейс судна отменяется на время продолжительности шторма, значение которого генерируется в блоке "Meteo". В других случаях моделируется переход судна между пунктом отправления и пунктом назначения. В процессе выполнения перехода рассчитывается коэффициент загрузки судна, среднерейсовая скорость с учетом высоты волн и скорости ветра, MSI и другие эксплуатационные показатели. По приходу в порт назначения моделируется посадка, высадка пассажиров. Процесс повторяется до завершения времени имитации. Затем управление передается блоку "Statistic", в котором выполняется статистическая обработка результатов моделирования и рассчитывается один из показателей экономической эффективности.

В программе предусмотрена возможность моделирования работы одного, двух и трех судов на линии по следующим схемам: одно судно с возвратом и без возврата в пункт отправления в тот же день; одно судно, совершающее несколько рейсов за день; два или три судна – последовательными рейсами; два или три судна – встречными рейсами. Рейсы могут выполняться ежедневно или по определенным дням.

Модуль "Result" позволяет в табличном и графическом виде выводить полученные оптимальные характеристики судна, сгруппированные по следующим разделам: главные размерения, гидростатика, нагрузка масс, мощность, остойчивость, стоимость, экономика, система стабилизации.

Модуль "QualitativeAnalysis" реализует метод сравнительного анализа скоростных пассажирских судов различных типов: однокорпусного, традиционного катамарана, СПК и СМПВ для предполагаемой линии перевозок. Данный модуль является дополнительным и предназначен для решения задачи выбора перспективного типа судна для заданного района эксплуатации.

Кроме указанных модулей, реализующих методику проектирования СМПВ, КП содержит модули интерфейса, обеспечивающие удобство работы пользователя системы. Интерфейс КП позволяет вводить исходные данные, выбирать тип целевой функции и показатели экономической эффективности, за-

давать начальные условия имитации и параметры генетического алгоритма, а также детерминированные и стохастические экономические данные.

Программный комплекс "SWATH Ships" разработан в системе программирования Borland Delphi Professional 7.0 и может использоваться в операционных системах Windows 98/XP/Vista.

Комплекс программ может быть использован в следующем диапазоне характеристик: пассажировместимость – 20...450 чел.; скорость хода – 20...40 уз; дальность плавания – 100...500 миль; длина судна – 20...50 м. Кроме того, с помощью "SWATH Ships" можно проводить различные эксперименты по проверке адекватности, чувствительности моделей и т. д.

На рис. 3 приведен пример применения технологии автоматизированного проектирования и КП "SWATH Ships" к решению задачи выбора проектных характеристик судна СМПВ для линии "Одесса–Варна".

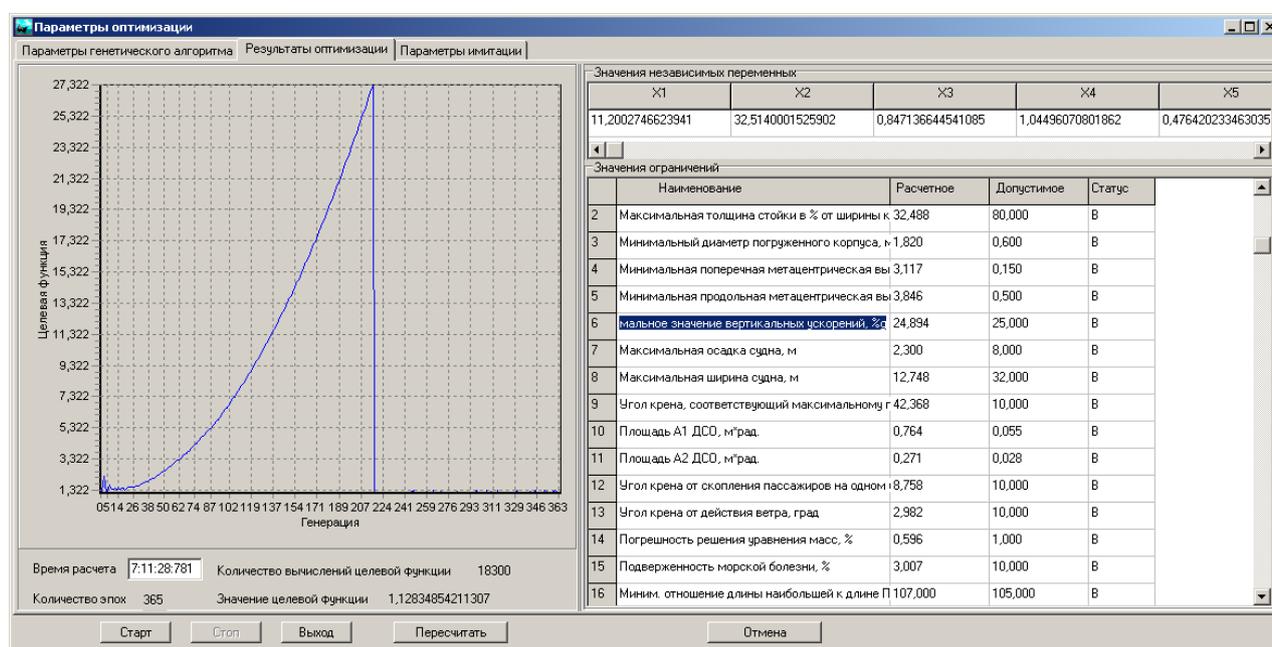


Рис.2. Результаты решения оптимизационной задачи

**Выводы.** Накопленный опыт разработки ПК и его практического использования позволяет сделать ряд обобщений и заключений:

1. Выбор проектных характеристик СМПВ желательно заканчивать разработкой геометрической поверхности корпуса с целью ее дальнейшего использования в современных CAD/CAE/CAM системах.
2. Используя "SWATH Ships" и реализованную методику проектирования, пользователь получает возможность определять оптимальные характеристики пассажирских судов с малой площадью ватерлинии, совершающих регулярные рейсы по заданному расписанию, с учетом реальных условий эксплуатации на ранних стадиях проектирования.
3. Программный комплекс, разработанный на основе применения в теории проектирования судов современного математического аппарата и имита-

ционного моделирования, позволяет выйти на качественно новый уровень начального проектирования.

**Перспективы дальнейших исследований.** В дальнейшем предполагается доработать программу в направлении расчета качки судна на волнении и, таким образом, качественно повысить уровень проектных исследований на этапе концептуального проектирования СМПВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nethercote W.C. A Concept Exploration Model for SWATH Ships / W.C. Nethercote, R.T. Scnmitke // *The Naval Architect*. – 1982. – Vol. 124, № 5. – P. 113–130.
2. Танцюра А.Г. Математическая модель судна с малой площадью ватерлинии (СМПВ) для оптимизации его характеристик / А.Г. Танцюра // *Труды НКИ*. – Николаев: Изд. НКИ, 1979. – Вып. 154. – С. 44–53.
3. Lee K.Y. A Computer-Based Design Model for Coastal Passenger SWATH Ships / K.Y. Lee, D.K. Lee, Y.D. Kim // *Journal of Ship Technology Research*. – 1989. – № 2 (36). – P. 72–83.
4. Бойко А.П. Исследование процесса функционирования пассажирских судов с малой площадью ватерлинии / А.П. Бойко, А.В. Бондаренко // *Вестник СевГТУ*. Вып. 88: Механика, энергетика, экология: Сб. науч. трудов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 58–62.