

Автоматическое построение NURBS поверхности корпуса корабля

Е.В. Попов¹, И.Н. Шоркина^{1,2}

¹ Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Ильинская, 65, Нижний Новгород, 603950, Россия

² Волжский государственный университет водного транспорта, ул. Нестерова, 5, Нижний Новгород, 603950, Россия

Аннотация

В статье описывается автоматизированный алгоритм формирования геометрической модели поверхности судового корпуса по электронному теоретическому чертежу. Представлен анализ традиционной технологии формирования судовых поверхностей на базе российской САД системы (Sea Solution). Определены основные недостатки традиционной технологии. Автоматизированный алгоритм формирования геометрической модели поверхности предназначен для снижения трудоемкости проектирования вручную. В качестве инструментальной основы алгоритма выступает математический аппарат построения NURBS кривых и поверхностей, который обеспечивает простое пользовательское управление формами. На базе теоретического чертежа, сформированного САД-системой, создано облако аппроксимационных точек для построения по ним поверхности судового корпуса. Дана укрупненная схема автоматического построения элементов поверхностной модели в начальном приближении.

Для решения данной задачи создан программный продукт на базе языков HTML5, JavaScript и библиотек Three JS и Verb. Применение языка JavaScript обусловлено его универсальностью, большим количеством информации в свободном доступе. Использованы технологии WebGL, реализующие проекты с 3D графикой. Функции из библиотек Three JS, позволили реализовывать методы, применяемые в аналитической геометрии.

Работоспособность разработанного алгоритма продемонстрирована на примере построения 3D модели поверхности корпуса рыболовецкого траулера.

Ключевые слова

NURBS, визуализация поверхности, поверхность корпуса судна, HTML5, JavaScript, Three JS.

Automatic Constructing the NURBS Surface of a Ship's Hull

E.V. Popov¹, I.N. Shorkina^{1,2}

¹ Nizhegorodsky State Architectural and Civil Engineering University, st. Ilyinskaya, 65, 603950, Nizhny Novgorod, Russia

² Volga State University of Water Transport, st. Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 5603950, Russia

Abstract

The article describes an automated algorithm for the formation of a geometric model of the ship's hull surface according to an electronic theoretical drawing. An analysis of the traditional technology for the formation of ship surfaces based on the Russian CAD system (Sea Solution) is presented. The main disadvantages of traditional technology are determined.

The automated algorithm for generating a geometric surface model is designed to reduce the complexity of manual design. The mathematical apparatus for constructing NURBS curves and

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: popov_eugene@list.ru (Е.В. Попов); irenika77@gmail.com (И.Н. Шоркина)

ORCID: 0000-0002-3058-2369 (Е.В. Попов); 0000-0002-0960-1801 (И.Н. Шоркина)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

surfaces serves as the instrumental basis of the algorithm, which provides a simple user control of forms. On the basis of a theoretical drawing generated by the CAD system, a cloud of approximation points was created to build the surface of the ship's hull from them. A general scheme of automatic construction of elements of the surface model in the initial approximation is given.

To solve this problem, a software product based on HTML5, JavaScript and Three JS and Verb libraries was created. The use of the JavaScript language is due to its versatility, a large amount of information in the public domain. WebGL is used to implement 3D graphics rendering pipeline. Functions from the Three JS libraries made it possible to implement methods used in analytical geometry.

The operability of the developed algorithm is demonstrated on the example of building a 3D model of the hull surface of a fishing trawler.

Keywords

NURBS, surface rendering, ship hull surface, HTML5, JavaScript, Three JS.

1. Введение

Современные технологии проектирования поверхностей судового корпуса, так же, как и в других отраслях техники, базируются на использовании CAD/CAM/CAE-систем, среди которых наиболее известными в мировой практике являются TRIBON, FORAN, ShipCAM, CADMATIC и некоторые другие, относящиеся к более легкому классу. Имеется также судостроительный модуль в широко известной CAD/CAM-системе тяжелого класса CATIA. Наиболее известной российской судостроительной системой является система проектирования поверхностей судового корпуса Sea Solution. Несмотря на все разнообразие CAD систем, практически все из них используют современный математический аппарат, основанный на теории так называемых В-сплайнов, или их более совершенной модификации NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Преимуществами этого аппарата является, во-первых, возможность моделирования поверхностей практически любой сложности, во-вторых, простота изменения поверхности при локальном редактировании путем изменения тем или иным образом координат конечного числа управляющих узлов поверхности, без изменения всей поверхности в целом. Каждая система проектирования судового корпуса снабжена соответствующим компьютерным инструментарием для простого интерактивного изменения положения управляющих узлов. Как известно, основным этапом в проектировании судового корпуса является формирование поверхностей, отвечающих самым жестким требованиям, предъявляемым к их качеству, одним из критериев которого является гладкость поверхности. Естественно, что при проектировании судового корпуса главной задачей является сокращение трудоемкости построения корпусных поверхностей, максимально удовлетворяющих условиям гладкости и монотонности изменения кривизны (см. [1] – [4]). При этом практически во всех системах основным инструментом модификации поверхностей предусмотрен ручной режим. В условиях, когда число управляющих узлов моделируемой поверхности достигает нескольких тысяч, трудоемкость формирования судовой поверхности резко возрастает. Как следствие, остро встает вопрос автоматизации процесса аппроксимации поверхности по заданному заказчиком набору координат реперных точек в системе координат «Теоретические шпангоуты - Теоретические ватерлинии» [10], с максимально возможной точностью и гладкостью.

2. Анализ традиционной технологии формирования судовых поверхностей

Учитывая, что доступ к лицензиям CAD-систем иностранного производства у российских судостроителей в настоящее время чрезвычайно затруднен, в дальнейшем анализируются приемы работы и технологии, принятые в рамках системы «Sea Solution». Предварительный анализ принятой в рамках системы «Sea Solution» технологии формирования поверхностей показал следующее:

1. Исполнитель получает от Заказчика исходные данные в виде Теоретического чертежа (как правило, файл в формате DXF), содержащего либо координаты неких точек в системе координат «Теоретические шпангоуты - Теоретические ватерлинии».

2. На базе теоретического чертежа формируется 3D проволоочная модель корпуса, содержащая облако характерных точек модели (далее именуемые реперными точками).

3. На корпусе Исполнитель выделяет отдельные участки (лоскуты) в виде параметрических четырехугольников (треугольников) и задает средствами системы «Sea Solution» границы лоскутов в виде В-сплайновых кривых, выбирая удобное для него число управляющих узлов кривых.

4. Формируемая далее средствами системы «Sea Solution» произвольная В-сплайновая поверхность в пределах параметрического четырехугольника подвергается редактированию вручную, первоначально с целью максимального приближения к заданным Заказчиком реперным точкам или кривым, далее с целью достижения гладкости и монотонности линий смены кривизны поверхности в трех взаимно-перпендикулярных плоскостях, что служит критерием совершенства сформированной поверхности.

Описанная технология построения поверхностей обладает высокой трудоемкостью, а именно:

1. Доля затрат ручного труда в процессе приближения как формируемых линий, так и поверхности к заданным реперным точкам чрезвычайно велика, поскольку уже на этой стадии требуется максимально возможное соблюдение требований по гладкости и монотонности линий кривизны.

2. Стремление Исполнителя к снижению количества бантиков вдоль контура поверхности, что вызвано необходимостью повысить «управляемость» поверхности при редактировании вручную, зачастую находится в противоречии с требованиями к этому параметру с точки зрения аппроксимации кривых и поверхностей В-сплайновой функцией в рамках заданных ограничений, определяемых реперными точками или линиями.

3. Параметрические линии, на которых расположены управляющие узлы обладают существенной немонотонностью и неравномерностью (нелогичное влияние, изломы - «напряженность параметрической сети»), что в конечном итоге определяет совершенство линий кривизны на поверхности.

3. Укрупненная схема разрабатываемого алгоритма

В данной статье описан алгоритм автоматического построения элементов поверхностной модели судового корпуса в начальном приближении, которые могут значительно снизить долю ручного труда при формировании судовых поверхностей в рамках любой судостроительной CAD системы. Практика показала, что именно технологическая операция построения черновой поверхности первого приближения является наиболее трудоемкой и длительной. Учитывая тот факт, что полностью автоматизированный алгоритм, исключающий любое последующее ручное редактирование поверхности, создать пока затруднительно, при разработке алгоритмического базиса подсистемы было принято решение придерживаться следующей методологической последовательности:

1. Преобразование плоского теоретического чертежа в 3D проволоочную модель корпуса судна средствами системы трёхмерного геометрического моделирования (в данной работе были использованы системы AutoCAD и K3). Формирование на базе проволоочной модели облака реперных точек.

2. На основе точечно-облачной модели корпуса судна построение в автоматическом режиме главных линий корпуса, а именно: линии диаметрального батокса, линии планширя фальшборта и линии (линий) ключевых шпангоутов, служащих условными границами построения участков поверхности корпуса.

3. Построение участков поверхности корпуса первого приближения в автоматическом режиме.

4. Экспорт построенных участков поверхности для использования в судостроительной CAD системе.

5. Окончательное редактирование поверхности вручную в рамках CAD системы (например, Sea Solution) с целью доведения ее до требуемой кондиции.

3.1. Описание алгоритма на примере поверхности корпуса рыболовецкого траулера

Следует отметить, что расположение поставляемых Заказчиком аппроксимационных точек, расположенных по основным направлениям судового корпуса, близко к хаотическому (см. рисунок 1). Математический аппарат построения NURBS-поверхностей на основе подобного расположения точек в настоящее время развит слабо. Среди подобных работ следует отметить лишь работы, посвященные построению поверхностей на базе полиномов Бернштейна на треугольных параметрических сетях [5] - [8]. В работах [9], [10] авторами описан подход к формированию NURBS поверхности судна на основе генетического алгоритма. И хотя данный подход и работает на основе хаотического расположения точек, но в практических целях малопригоден, поскольку слишком затратен в вычислительном смысле слова. Основным же требованием всех функций построения рациональных сплайнов по дискретному набору данных в доступных библиотеках работы с NURBS-сплайнами является наличие регулярной параметрической сетки ($L \times N$ для поверхности, где L и N число узлов сетки по каждому параметрическому направлению), узлы которой совпадают с аппроксимационными точками. Поэтому целью приведенного ниже алгоритма является преобразование данных, представленных в виде импортируемых реперных точек в набор аппроксимационных точек, необходимый для использования NURBS функций.

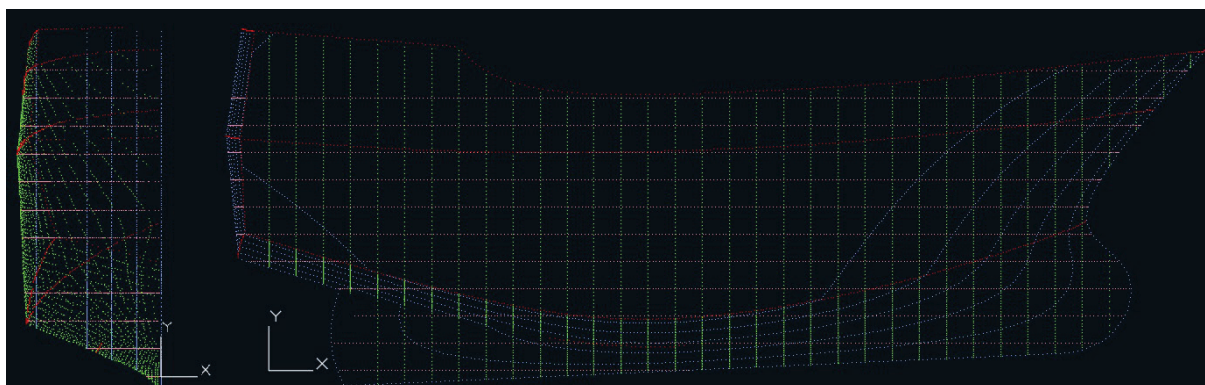


Рисунок 1 – Исходный электронный теоретический чертеж

1. На первом шаге облако точек, являющееся частью проволочной модели корпуса (рисунок 1) из системы AutoCAD с использованием промежуточной системы КЗ и специально написанного в ней макроса, экспортировано в текстовый файл для дальнейшей работы (рисунок 2).

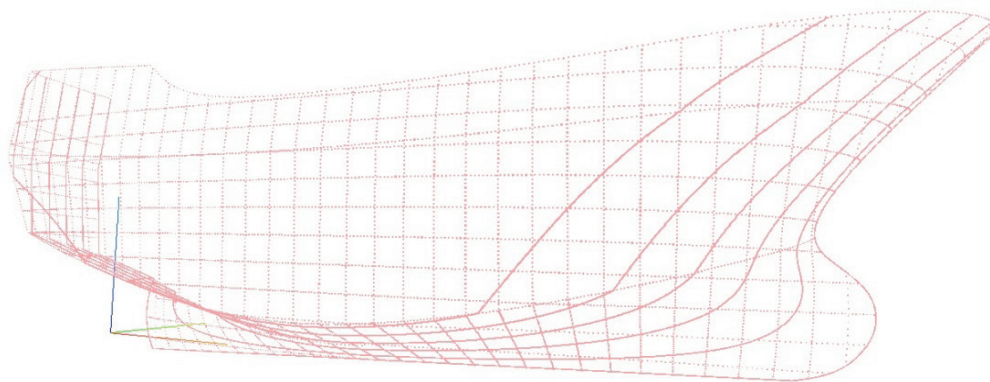


Рисунок 2 – Облако точек для автоматического формирования поверхности

2. Следующим шагом является построение в автоматическом режиме основных линий корпуса (рисунок 3). Для этого из общего облака точек сначала выделяются точки с нулевыми координатами по оси OY, то есть точки, принадлежащие диаметральному батоксу. Точки при помощи пузырьковой сортировки выстраиваются в строгом порядке, друг за другом, во избежание возникновения петель на кривой. Затем по построенному ряду точек вычисляется NURBS кривая. Следующей линией является линия планширя фальшборта. Для ее построения разработан специальный автоматический алгоритм, сущность которого заключается в использовании нескольких условий выбора точек из общего количества в облаке. Первым условием является выбор в качестве начальной точки в последовательности ранее найденной самой верхней точки диаметрального батокса. Каждая последующая точка выбирается из условия наибольшей близости к уже найденной, это, во-первых. Во-вторых, скалярное произведение векторов (P_{n-1}, P_{n+1}) , образованных предшествующей и последующей точками к текущей точке, должно быть строго отрицательны во избежание выбора точки, уже присутствующей в формируемом множестве точек. И, в-третьих, скалярное произведение векторов должно удовлетворять неравенству $-1.0 < (P_{n+1}, OZ) < -0.707$, что позволяет обеспечить возможность отслеживания подъема линии планширя в районе кормы вверх в пределах $45^\circ - 90^\circ$ по отношению к оси OZ. В данном примере эти две построенные линии доведены до точки второй теоретической шпации от начала координат, поскольку район кормового транца в данном варианте алгоритма не рассматривается. Дело в том, что все кормовые поверхности весьма близки к плоскостям и не представляют особой трудности в построении. В качестве третьей линии выступает линия 30 теоретического шпангоута от начала координат (количество шпангоутов отражено на рисунках 1 и 2).

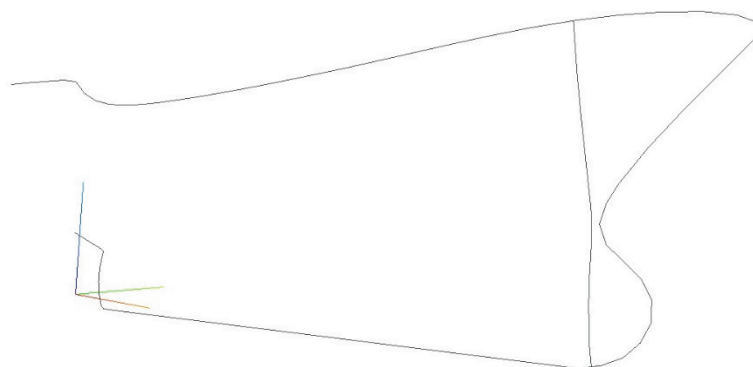


Рисунок 3 – Основные линии корпуса судна для построения в автоматическом режиме

Носовая часть корпуса выделена в отдельный фрагмент, поскольку она содержит бульбообразный форштевень, что влечет за собой особую сложность в построении автоматического алгоритма формирования поверхности в этой области. Для четкой идентификации точек, принадлежащих 30-му шпангоуту, выделена узкая часть диапазона координат по оси OX. Крайние точки в последовательности найдены путем определения точек на NURBS кривых диаметрального батокса и планширя, ближайших к найденной последовательности точек. Заключительным действием в этой части является разделение NURBS кривой планширя на две части точкой пересечения ее NURBS кривой шпангоута. Это действие нужно будет далее при построении поверхности носовой части.

3. Дальнейшее решение задачи касается построения поверхности корпуса судна в средней части, в промежутке между 3 и 30 теоретическими шпангоутами, отсчитывая от начала координат. В этой части поверхность может быть построена на основе сечений корпуса, проходящих по линиям шпангоутов. Линии шпангоутов предполагается строить с помощью аппарата построения NURBS кривых по соответствующим точкам. Для однозначного автоматического выделения точек из общего множества, конкретно принадлежащих нужному шпангоуту, производится пошаговый поиск по следующей схеме. Первоначально вся длина корпуса $L_{\text{лок}}$ в рассматриваемом диапазоне шпангоутов делится на ряд поддиапазонов, количество которых в данной реализации выбрано равным 5000. Затем просматривается

последовательно с шагом $S = L_{\text{лок}} / 5000$ весь диапазон, а все точки, попадающие в этот поддиапазон с заданным шагом, выделяются в отдельное подмножество точек для построения по ним нужных кривых. Найденные подмножества дополняются краевыми точками примыкания к линиям диаметрального батокса и планширя фальшборта. Все построенные NURBS кривые шпангоутов в данном диапазоне используются для построения поверхности в средней части корпуса судна. Построенная по данной схеме поверхность представлена на рисунке 4.

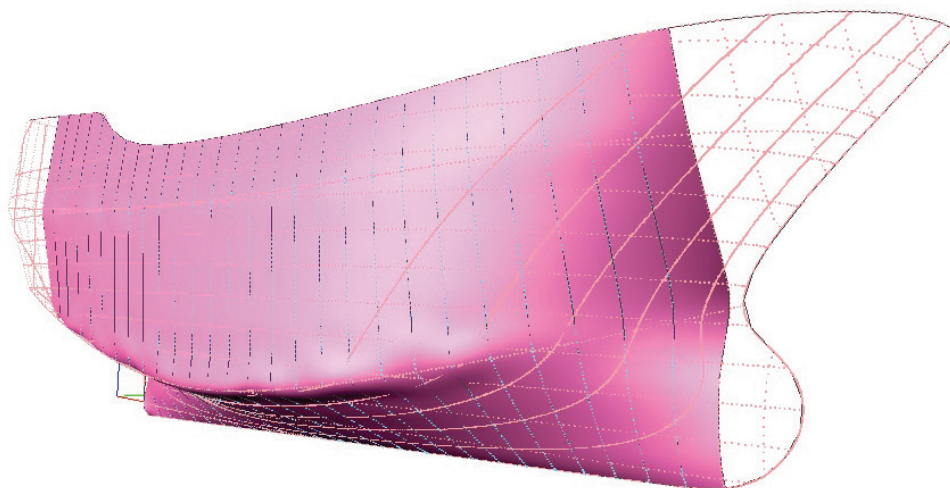


Рисунок 4 – NURBS поверхность в средней части корпуса судна

4. Носовая оконечность является самым сложным участком корпуса данного судна поскольку имеет бульбообразную форму. В силу этого, теоретические шпангоуты в этой части состоят из нескольких ветвей, что делает процедуру их использования в качестве базы для построения по ним поверхности, как это было сделано в средней части, непригодной. Однако, в данном случае можно использовать точки, принадлежащие теоретическим ватерлиниям. Для выделения точек, принадлежащим ватерлиниям, использован подход, аналогичный описанному выше в п.3 за тем исключением, что в качестве рассматриваемого диапазона формирования подинтервалов поиска нужных точек использована не длина корпуса, а его известная высота в носовой части. А подинтервалы чередуются не по направлению оси OX, а по направлению оси OZ. Аналогичным образом строятся далее NURBS кривые кусков ватерлиний в носовой части, а часть планширя, выделенная ранее, как описано выше в п.1, добавляется к списку кривых для построения итоговой NURBS поверхности, представленной на рисунке 5.

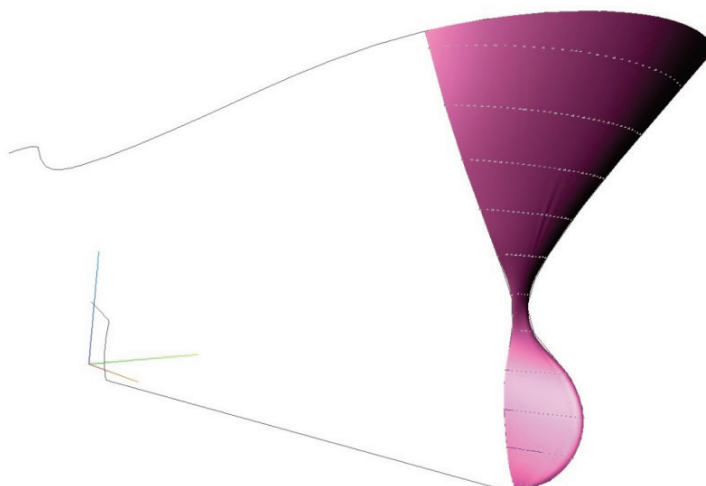


Рисунок 5 – NURBS поверхность в носовой оконечности корпуса судна

Итоговая объединенная NURBS поверхность рассматриваемой части корпуса рыболовецкого траулера представлена на рисунке 6. Далее эти части поверхности могут быть экспортированы в любую судостроительную CAD систему проектирования для дальнейшего совершенствования и использования.

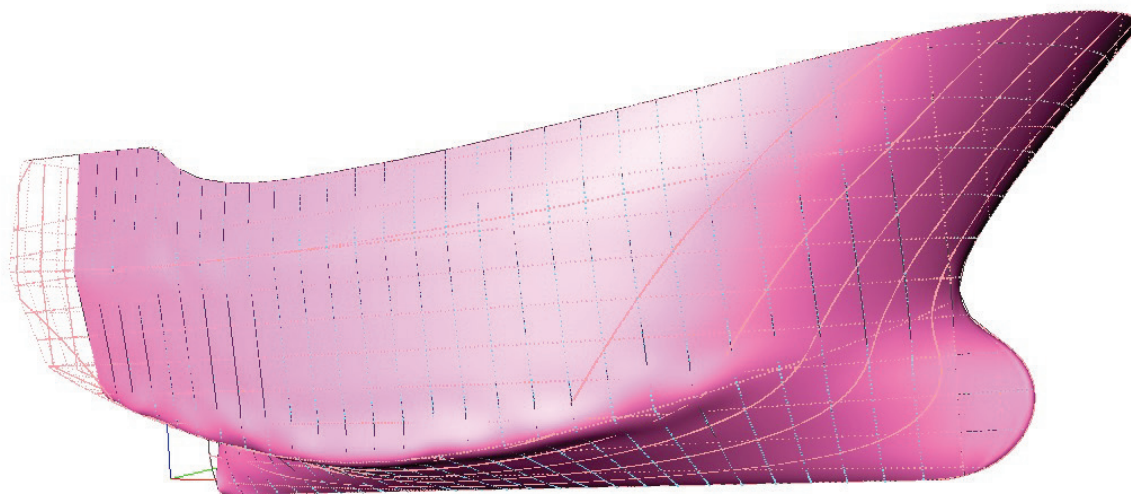


Рисунок 6 – Автоматически построенная NURBS поверхность корпуса судна в рассматриваемом диапазоне шпангоутов

4. Программа автоматизированного построения поверхности корпуса

На базе разработанного автоматического алгоритма создан прототип программного продукта, пользовательский интерфейс которого представлен на рисунке 7.

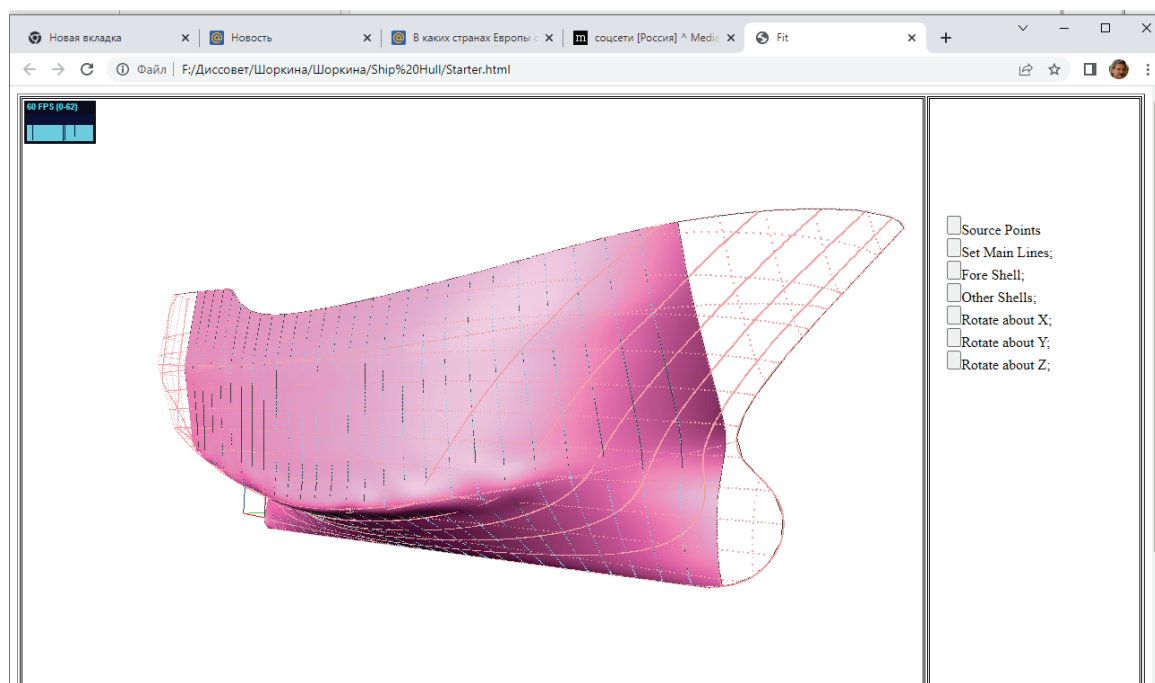


Рисунок 7 – Пользовательский интерфейс прототипа программного продукта

Основными требованиями, предъявляемыми к создаваемому программному продукту, являлась лицензионная чистота среды создания, простота в создании, использовании и платформенная независимость. На основе этого в качестве программной среды создания были выбраны следующие языки: HTML5 и JavaScript. Также были использованы следующие

открытые библиотеки: Three JS, реализующая интерфейс с графическими возможностями средств современной компьютерной графики WebGL, библиотека свободного доступа Verb, содержащая богатую функциональность работы с NURBS кривыми и поверхностями. Данная реализация имеет также платформенную независимость и работает в среде большинства известных интернет-браузеров, среди которых наиболее предпочтительными являются Chrome, Mozilla FireFox и ряд других. Программа является прототипом команды построения первого приближения поверхности по теоретической чертежу в любой судостроительной CAD системе.

5. Заключение

Разработанный алгоритм автоматизированного и программного продукта построения поверхностей судового корпуса обладает хорошими возможностями по значительному сокращению трудоемкости проводимых исполнителем работ. Следует, однако, иметь в виду, что описанный инструмент сокращает долю ручного труда только на стадии формирования поверхности в первом приближении, и предполагает ручную доводку ее до требуемой кондиции, согласно техническому заданию. В частности, на рисунках 4, 6 и 7 можно обратить внимание на неточное моделирование поверхности в области острой скулы корпуса судна. Эта часть требует ручной корректировки с помощью подбора величины узловых весов NURBS аппроксимации в этом районе. Кроме того, отдельной задачей представляется работа по приданию гладкости поверхности вплоть до второго порядка, и минимизации отклонений поверхности от аппроксимационных точек, что является существенным требованием, предъявляемым к судовым поверхностям. Часть из этих работ также может быть автоматизирована, что является основой для проведения дальнейших работ по совершенствованию разработанного алгоритма.

6. Список источников

- [1] Войткунский Я.И., Фаддеев М.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 472 с.
- [2] Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1980. 388 с.
- [3] Нейланд В.Я. Снижение вязкостного трения. М.: Машиностроение, 1985. 544 с.
- [4] Ходорковский Я.С. Теория турбулентности в задачах гидромеханики судна. Л.: ЛКИ, 1985. 362 с.
- [5] Beska M. Geometric properties on Bernstein polynomials over simplices. // Mathematical Methods in CAGD and Image Processing / Academic Press, Boston: MA. 1992, pp. 1-8.
- [6] Carnicer J.M., Floater M.S., Pena J.M. Linear convexity conditions for rectangular and triangular Bernstein-Bezier surfaces // Computer Aided Geometric Design. 1997. № 15, pp. 27-38.
- [7] Chang G.Z., Zhang J.Z. Converse theorems of convexity for Bernstein polynomials over triangles // Journal of Approximation Theory. 1990. № 61, pp. 265-278.
- [8] Lorento-Pardo J., Sablonniere P., Serrano-Perez M.C. Subharmonicity and convexity properties of Bernstein polynomials and Bezier nets on triangles // Computer Aided Geometric Design. 1999. № 16, pp. 287-300.
- [9] Popov E.V., Rotkov S.I. The retrieval of NURBS-surface by genetic algorithm on the basis of point cloud // 21st International Conference in Central Europe on computer graphics, visualization and computer vision / WSCG 2013 - Communication papers proceedings 21, 2013, pp. 194-202.
- [10] Попов Е.В., Рекшинский А.В. Построение поверхности судового корпуса с использованием генетического алгоритма // Вестник ИЖГТУ. 2007. № 3(35). С. 116-120.