

Н.А. Махнач, А.М. Мезенцев, С.И. Охремчик

*Белорусский национальный технический университет*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 3D – МОДЕЛЕЙ СОСТАВОВ СУДОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В РЕЖИМАХ ТОЛКАНИЯ И БУКСИРОВКИ**

*Научные руководители профессор, д.т.н. И.В. Качанов, доцент, к.т.н.  
В.А. Ключников, ассистент С.А. Ленкевич, ст. преподаватель В.В. Власов*

Гидромеханика в настоящее время не позволяет теоретически предсказать с требуемой для практики точностью геометрию обводов корпуса судна, кинематические и динамические характеристики потока вблизи поверхности судна и его сопротивление. Для количественных оценок этих характеристик используется модельный эксперимент на созданных 3-D моделях судов.

Для определения гидродинамических характеристик существующих барже-буксирных составов в ОАО «Белсудопроект» были разработаны цифровые модели судов исследуемого барже-буксирного состава (буксир-толкач проекта №570 и баржа проекта №775), а также в БНТУ были разработаны модели с оптимизированными обводами корпуса баржи для улучшения технологичности конструкции носовой части корпуса без ухудшения или с повышением показателей по сопротивлению движению судна, которые в последствии были напечатаны в БНТУ на 3D-принтере марки Premier-3D N1.

В первом варианте модернизации разрабатывались носовые части корпуса баржи с сохранением габаритных размеров корпуса и отношения габаритных длины и ширины  $L/B = 7,3$  для последующего сравнения гидродинамических характеристик с прототипом – баржа проекта 775.

Второй вариант модернизации предполагал разработку моделей с повышением грузоподъемности баржи путем увеличения габаритных размеров корпуса судна и отношением  $L/B = 5,43$  (с учетом ограниченной осадки несамоходных судов (барж) внутреннего плавания). Причем, при проектировании учитывалась возможность использования составных частей баржи проекта 775 в качестве донора при формировании корпуса баржи нового проекта.

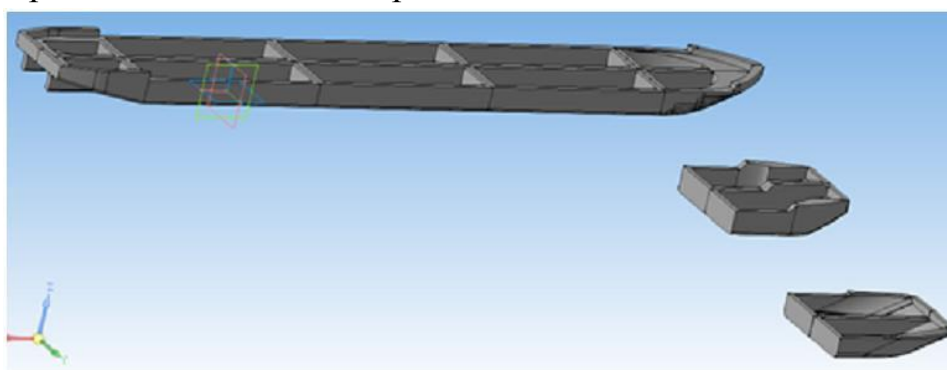
Далее изготовленные 3D-модели барже-буксирного состава были испытаны на сопротивление их движению в гидродинамическом лотке в

гидравлической лаборатории кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика».

Принимая во внимание габаритные ограничения лотка для проведения испытаний был выбран оптимальный масштаб моделей, равный 1:100. Создание цифровых моделей производилось в выбранном масштабе.

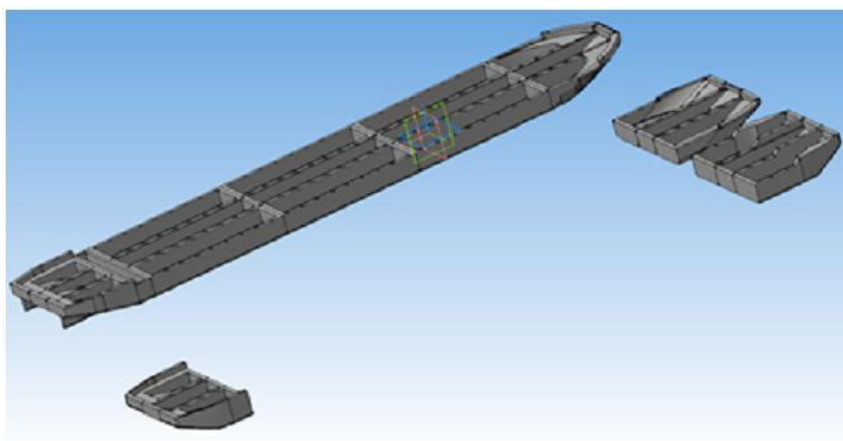
Также, разработка 3D-моделей производилась с учетом плотности материала для последующей 3D-печати с получением правильной развесовки судна, с целью обеспечения на спокойной воде посадку судна в грузу (в соответствии с масштабом) прямо и на ровный киль и исключить дифферент на его оконечности.

На рисунке 1 представлены варианты сборки с заменяемыми носовыми и неизменной кормовой частями для варианта №1.



**Рисунок 1 – Внешний вид 3D-модели варианта №1 в сборе и сменные части носовых оконечностей**

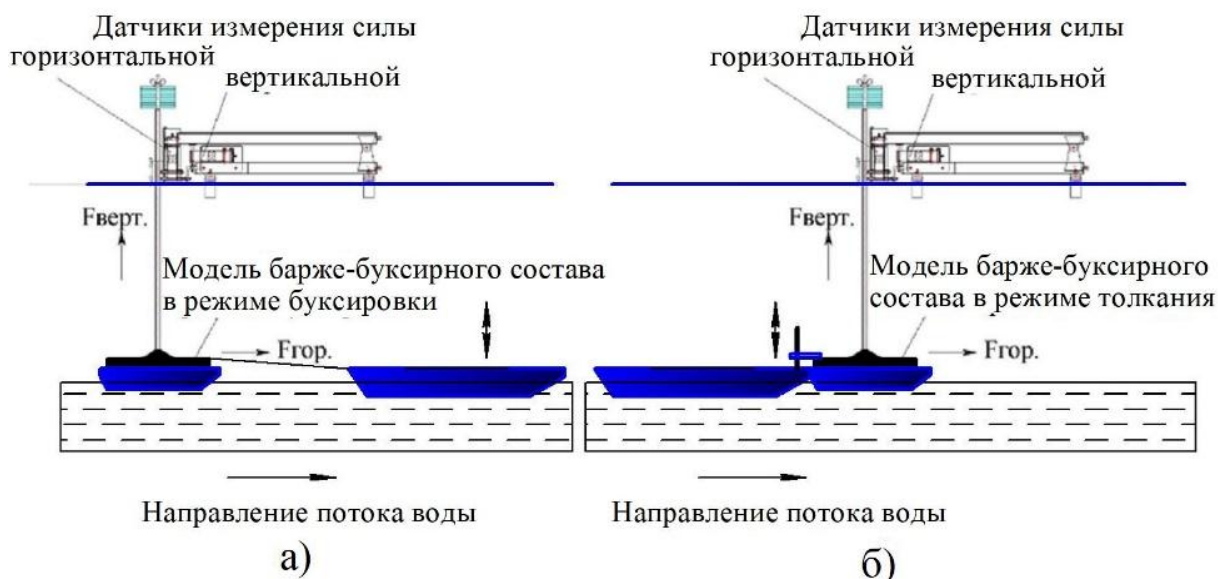
На рисунке 2 представлены варианты сборки с заменяемыми носовыми и кормовой частями для варианта №2.



**Рисунок 2 – Внешний вид 3D-модели варианта №2 в сборе и сменные части носовых и кормовых оконечностей**

На рисунке 3 схематично представлены варианты размещения баржи в лотке относительно измерительного комплекса.

На схеме, представленной на рисунке 3, а) модель баржи соединяется с измерительной штангой посредством гибкой сцепки (нитки), и сама модель свободно колеблется на воде. Данная схема предназначена для экспериментальных исследований влияния изменения геометрии обводов и отношения  $L/B$  корпуса баржи в режиме буксировки.



**Рисунок 3 – Схемы измерения силового воздействия потока воды на модели корпуса судна и внешний вид расположения датчиков измерительного комплекса**

На схеме, представленной на рисунке 3, б) модель баржи соединяется с измерительной штангой посредством полужесткой сцепки в виде пластины, которая жестко закреплена на измерительной штанге, а с баржей соединяется посредством двух цилиндрических направляющих, установленных на корме баржи и сама модель свободно колеблется на воде в вертикальном направлении. Данная схема предназначена для экспериментальных исследований влияния изменения геометрии обводов и отношения  $L/B$  корпуса баржи в режиме толкания.

Экспериментальные исследования моделей барже-буксирных составов проводились с целью оценки сил сопротивления движению при различных вариантах конструктивных параметров корпуса баржи с дальнейшим выбором его оптимальных параметров (формы обводов носовой части и отношения  $L/B$ ), соответствующих минимальному сопротивлению движению.

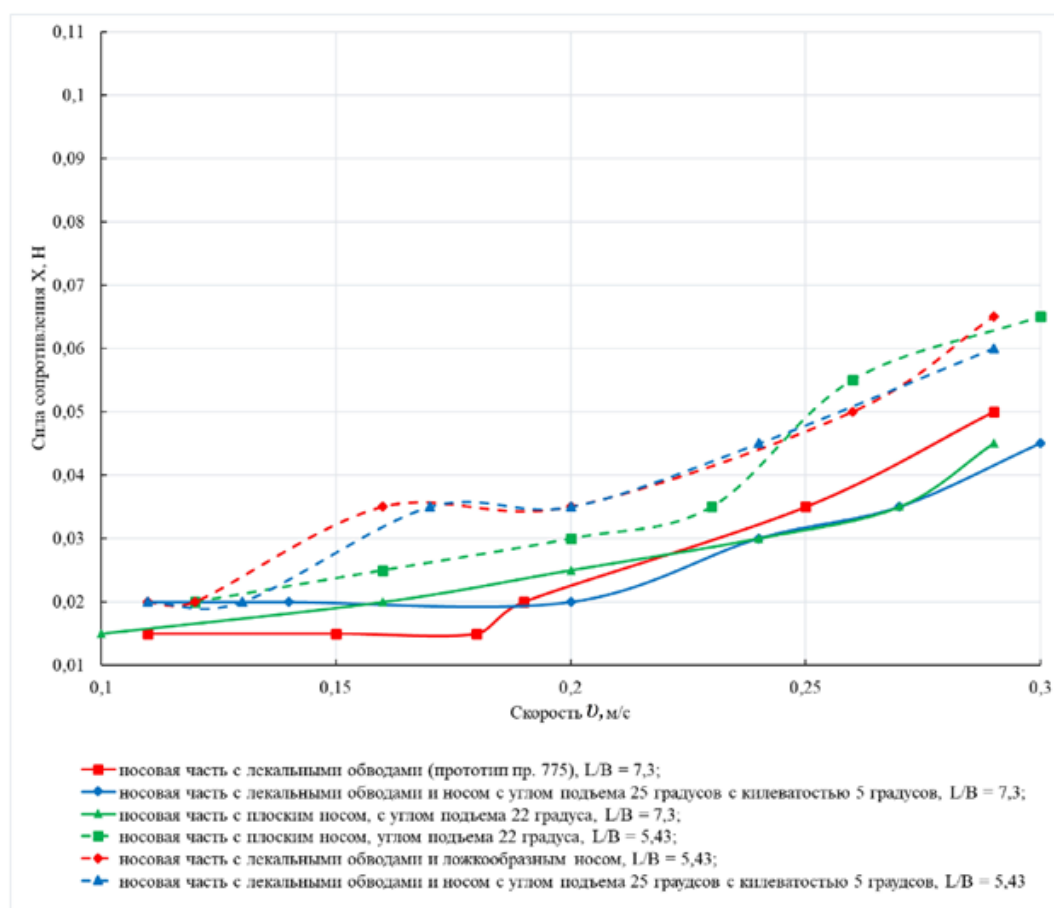
В исследованиях, в качестве критерия подобия был выбран критерий Фруда. Для оценки изменения сил сопротивления движению были выбраны три скорости состава с шагом относительно расчетной скорости  $v = 2$  км/ч, что позволило для проведения исследований в гидродинамическом лотке выбрать

следующий диапазон скоростей движения составов в реальных условиях водотока: 6 км/ч, 8 км/ч и 10 км/ч.

Исходя из выше сказанного, число Фруда, для трех выбранных значений скоростей движения состава соответственно составило:  $Fr_6 = 0,062$ ,  $Fr_8 = 0,083$ ,  $Fr_{10} = 0,104$ . Тогда средние скорости обтекания потока жидкости корпуса модели в гидродинамическом лотке при моделировании будут равны:  $v_6 = 0,16$  м/с,  $v_8 = 0,22$  м/с,  $v_{10} = 0,27$  м/с.

Для сравнительного анализа в режиме толкания использовались результаты экспериментальных исследований для отношения  $L/B = 7,3$  и для отношения  $L/B = 5,43$  с различными типами обводов. По экспериментальным данным были построены графические зависимости, представленные на рис. 4.

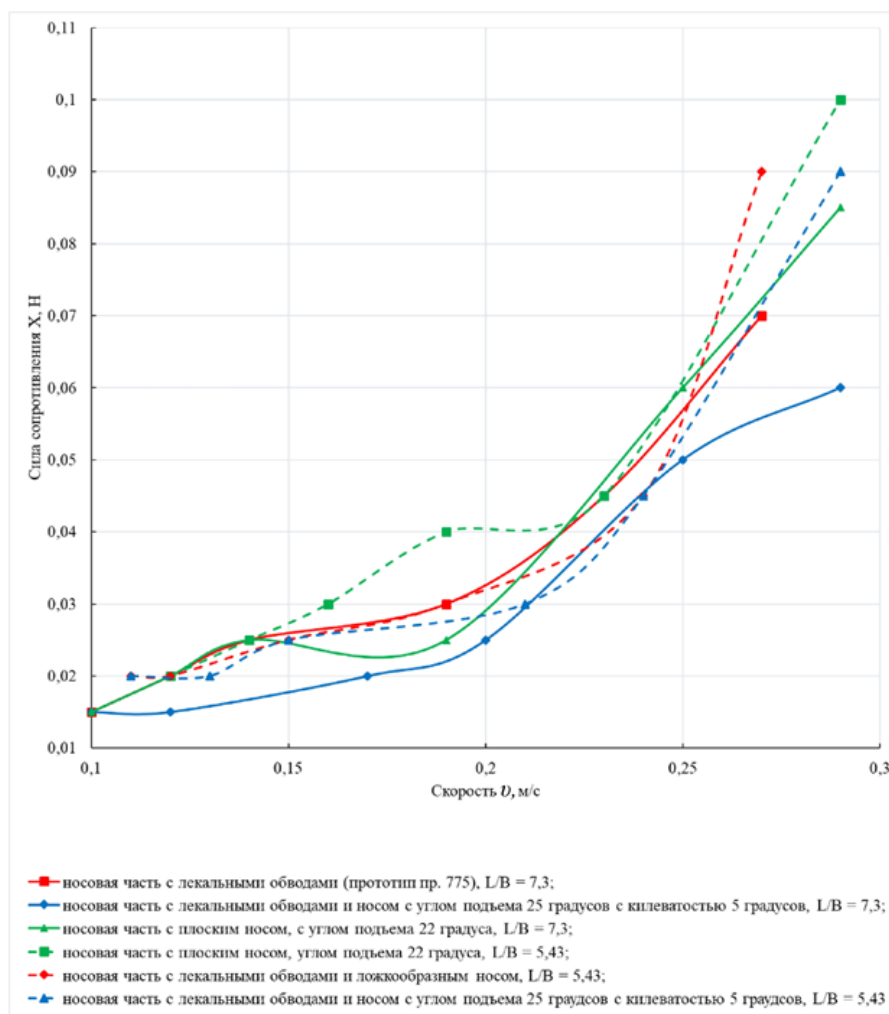
Из анализа графиков видно, что для отношения  $L/B = 5,43$  корпуса модели баржи, сила сопротивления движению  $X$  больше при всех формах носовой части чем для модели баржи при отношении  $L/B = 7,3$ .



**Рисунок 4 – График изменения силы сопротивления движению модели состава в режиме толкания в зависимости от формы носовой части модели баржи, отношения  $L/B$  и средней скорости набегающего потока**

При рабочих скоростях набегающего потока до 0,22 м/с (эксплуатационная скорость 8 км/час) оптимальные значения демонстрируют обводы с носовой частью с лекальными обводами и килеватым носом и лекальные обводы прототипа – проект 775 при  $L/B = 7,3$ , а при  $L/B = 5,43$  оптимальные значения демонстрируют обводы с носовой частью с плоским носом с углом подъема  $22^\circ$ .

Для сравнительного анализа в режиме буксировки использовались результаты экспериментальных исследований для отношения  $L/B = 7,3$  и для отношения  $L/B = 5,43$  с различными типами обводов. По экспериментальным данным были построены графические зависимости, представленные на рисунке 5.



**Рисунок 5 – График изменения силы сопротивления движению модели состава в режиме буксировки в зависимости от формы носовой части модели баржи, отношения  $L/B$  и средней скорости набегающего потока**

Из анализа графиков видно, что при рабочих скоростях набегающего потока до 0,22 м/с (эксплуатационная скорость 8 км/час) оптимальные значения демонстрируют обводы с носовой частью с лекальными обводами и килеватым носом и обводы с плоским носом и углом подъема  $22^\circ$  при  $L/B = 7,3$ , а при

$L/B = 5,43$  оптимальные значения демонстрируют обводы с носовой частью с лекальными обводами и килеватым носом и лекальные обводы с ложкообразным носом.

Из анализа представленных зависимостей видно, что при малых скоростях (0,16–0,22 м/с) лекальные обводы повышают эффективность движения состава даже при режиме буксировки. Однако при выходе на рабочие скорости (0,22–0,27 м/с) режим толкания эффективнее для всех типов обводов, а в режиме буксировки сопротивление движению резко возрастает.

Из зависимостей видно, что при выходе на рабочие скорости (0,22–0,27 м/с) режим толкания эффективнее порядка на 25 – 40 % в сравнении с буксировкой для обоих составов.

УДК 532.59+627.8

А.В. Максимович, И.В. Калиновский

*Белорусский национальный технический университет*

**ОБ ИНТЕГРИРОВАНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ  
НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ПОСТЕПЕННО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ  
ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА В ОТКРЫТОМ РУСЛЕ В УСЛОВИЯХ  
ВЫСОКОГОРЬЯ ПРИ ПРОРЫВЕ ПЛОТИНЫ**

*Научный руководитель ст. преп. кафедры «ГЭСВТГ» БНТУ И.М. Шаталов,  
М.К. Щербакова*

В реальных условиях высокогорья при прорыве плотины происходит относительно постепенное опорожнение водохранилища, при котором наблюдается падение уровня воды в водохранилище, уменьшение расхода воды в начальном створе и увеличение расхода в конечном сечении прямой отрицательной волны перемещения [1].

Движение воды в теле такой волны перемещения хорошо описывается двумя дифференциальными уравнениями баланса расхода и уравнением динамического равновесия [2].

Решение задачи о неустановившемся движении потока жидкости в открытом русле, как правило, заключается в интегрировании системы двух уравнений: уравнения баланса расхода (т. е. уравнения неразрывности постепенно или плавно изменяющегося неустановившегося движения потока жидкости в открытом русле) и уравнения динамического равновесия (т. е. дифференциального уравнения постепенно или плавно изменяющегося неустановившегося движения потока жидкости в открытом русле).

В работе [1] эта система уравнений представлена в следующем виде: