

УДК 629.124

## АДАПТАЦИЯ ФЛОТА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ВОДОТОКАХ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОВОДЬЯ

**Качанов Игорь Владимирович**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика»

e-mail: [hidrokaf@bntu.by](mailto:hidrokaf@bntu.by)

**Ключников Владимир Анатольевич**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент

e-mail: [hidrokaf@bntu.by](mailto:hidrokaf@bntu.by)

**Шаталов Игорь Михайлович**<sup>1</sup>, старший преподаватель

e-mail: [hidrokaf@bntu.by](mailto:hidrokaf@bntu.by)

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** В статье представлены эксперименты гидродинамических исследований корпусов судов. По результатам проведенных экспериментальных исследований позволил выработать рекомендации по эксплуатационным режимам для барже-буксирных составов и их модернизации для повышения эксплуатационных характеристик.

**Ключевые слова:** баржа, обводы, носовая часть, кормовая часть, угол наклона, прототип, главные размерения.

## ADAPTATION OF THE FLEET OF THE REPUBLIC OF BELARUS FOR OPERATION ON WATERMARKS IN SHALLOW WATER CONDITIONS

**Kachanov Igor Vladimirovich**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Hydrotechnical and Energy Construction, Water Transport and Hydraulics»

e-mail: [hidrokaf@bntu.by](mailto:hidrokaf@bntu.by)

**Klyuchnikov Vasily Anatolyevich**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: [hidrokaf@bntu.by](mailto:hidrokaf@bntu.by)

**Shatalov Igor Mikhailovich**<sup>1</sup>, Senior Lecturer

e-mail: [hidrokaf@bntu.by](mailto:hidrokaf@bntu.by)

<sup>1</sup> Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The article presents experiments in hydrodynamic studies of ship hulls. Based on the results of the experimental studies, it was possible to develop recommendations on operating modes for barge-tug trains and their modernization to improve operational characteristics.

**Keywords:** barge, contours, bow, stern, tilt angle, prototype, main dimensions.

На водотоках (реках и каналах) и в водоемах (озерах и водохранилищах) Республики Беларусь в настоящее время наблюдается низкий уровень воды и большое количество мелководных участков.

Эксплуатация представляет для судна определенные сложности, которые заключаются не только в том, что малый запас воды под килем в данных условиях представляет собой реальную навигационную опасность, но и в том, что поведение судна или состава судов (например, барже-буксирного состава) на мелководье существенно отличается от поведения на глубокой воде.

К основным отличительным особенностям поведения судна или состава судов (барже-буксирного состава) на мелководье можно отнести ухудшение управляемости, увеличение тормозного пути, дополнительное проседание с изменением посадки и падение скорости при тех же энергетических затратах [1, 2].

Еще более сложным управление судном или составом судов (барже-буксирного состава) становится при эксплуатации на мелководье с ограниченной акваторией, где на поведение судна или состава судов (барже-буксирных составов) влияют как берега, так и другие суда.

На кафедре «Гидротехническое, энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» Белорусского национального технического университета («ГЭСВТГ» БНТУ) были проведены лабораторные исследования и внесены конструктивные изменения для буксиров проекта 570, которые используются на водотоках или водоемах Республики Беларусь. В результате проведенных исследований были получены положительные результаты по снижению сопротивления движению буксиров проекта 570, однако эти результаты некорректно использовать для барже-буксирных составов в режимах толкания и буксировки. В связи с вышесказанным очевидна необходимость совершенствования методов и способов проектного обоснования вновь проектируемых и модернизируемых судов и их составов.

Сопротивление воды движению судна условно делят на вязкостное и волновое. Влияние мелководья на скорость движения судна заключается в изменении как вязкостного, так и волнового сопротивлений.

Увеличение вязкостного сопротивления на мелководье связано с изменением поля вызванных скоростей. Рост скоростного потока, естественно, приводит к росту вязкостного сопротивления.

Еще большее изменение при ограничении глубины претерпевает волновое сопротивление, т.к. движущееся судно создает вокруг себя систему поперечных волн и систему расходящихся волн в виде сектора. Из теории волн относительно малой амплитуды известно, что при равных скоростях распространения прогрессивных волн их длина на мелкой воде больше, чем на глубокой.

Сопротивление воды движению состава самоходных судов зависит от ряда характеристик самого состава и факторов, в которых осуществляется его перемещение: от формы счала состава, от формы образования носовой и кормовой оконечности отдельных барж состава, от количества барж и их загрузки, от глубины участка, по которому осуществляется судоходство, от величины волнения и многих других. При этом расхождение значений данной величины для одного и того же состава барж, загруженных на определенный уровень, при различных прочих условиях может составлять до 25 %.

Стремление при нормировании скорости движения составов к учету максимального числа факторов, влияющих на сопротивление воды его движению, приводит к увеличению сложности применяемых методик и, как правило, значительно усложняет теоретический расчет.

При движении составов, сформированных из барж, происходит интенсивное гидродинамическое взаимодействие барж, а также состава и буксировщика или, в случае



толкания, буксира-толкача, оказывающее существенное влияние не только на сопротивление их движению, но также на эффективность движителей толкача и управляемость буксируемого или толкаемого комплекса. Следует заметить, что числа Фруда при движении состава малы ( $Fr = 0,06-0,12$ ), поэтому основную роль для них играет вязкостное сопротивление и его изменения, обусловленные взаимодействием барж и состава с буксиром [2].

Эксплуатируемые на внутренних водных путях Республики Беларусь барже-буксирные составы, как правило имеют в составе не более двух барж. Исходя из этого наибольшее распространение получили баржевые толкаемые и буксирные составы.

Баржи, из которых формируются составы, имеют обтекаемые формы оконечностей корпуса, симметричные и несимметричные относительно миделя. Более ходки составы из барж с несимметричными обводами носа и кормы (с частично погруженным транцем), обеспечивающие пониженное сопротивление движению за счет меньшего угла наклона кормовых батоксов и оптимизации размеров шалмана в составе, что в совокупности способствует лучшему обтеканию межбаржевых промежутков.

Обводы корпусов судов внутреннего плавания отличаются рядом особенностей, что вызвано условиями эксплуатации судов: ограниченными глубинами, отсутствием большого волнения в ясную погоду.

Ввиду ограниченной осадки судов внутреннего плавания отношения В/Т и L/Т у таких судов получаются значительно больше, чем у морских. Так, у судов класса «О» значения В/Т и L/Т достигают соответственно 5,0 и 50. Суда класса Л могут иметь отношения  $V/T \geq 10$  и  $L/T \geq 70$ . При «плоской» форме корпуса (с большими значениями В/Т и L/Т) получается и несколько иной характер его обтекания, чем у морских судов. В рассматриваемом случае линии тока (рисунок 1) более резко отклоняются от направления основного потока воды на значительной части длины корпуса (особенно в оконечностях). Зато в средней части корпуса линии тока преимущественно располагаются не по бортам, а по днищу судна, где наблюдается некоторый переход к двумерному обтеканию его поверхности [3].

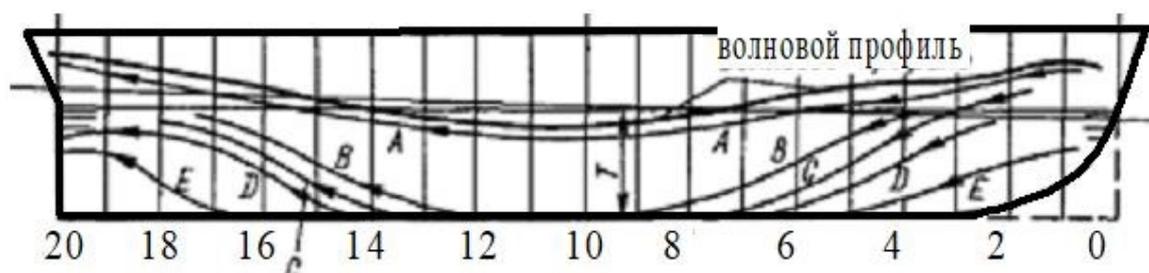


Рисунок 1 – Обтекание поверхности судна [3]

Отмеченные особенности корпуса судов внутреннего плавания являются причиной того, что параметры, определяющие форму его обводов, обычно существенно отличаются от оптимальных по величине буксировочного сопротивления. В частности, чтобы обеспечить достаточную заостренность корпуса и тем самым снизить остаточное сопротивление, во многих случаях приходится увеличивать относительную длину (или отношение L/B) по сравнению с рекомендуемой для морских судов. Однако это увеличивает смоченную поверхность судна, а, следовательно, и сопротивление трения. В связи с указанным характером обтекания корпуса судов внутреннего плавания при разработке их теоретического чертежа особое внимание следует уделять выбору формы носовых и кормовых обводов.

Теоретические расчеты в гидромеханике в настоящее время не обеспечивают требуемой точности создания геометрии обводов корпусов судов и составов с учетом кинематических

и динамических характеристик потока вблизи поверхности судна и его сопротивление движению. Для учета максимального количества данных факторов используется модельный эксперимент на созданных 3-D моделях судов.

Для определения гидродинамических характеристик существующих барже-буксирных составов и составов с измененными обводами оконечностей баржи в ОАО «Белсудопроект» и кафедре «ГЭСВТГ» БНТУ были разработаны цифровые модели судов на базе барже-буксирного состава (буксир-толкач проекта № 570 и баржа проекта № 775), которые в последствии были напечатаны в БНТУ на 3D-принтере марки Premier-3D N1.

Далее изготовленные 3D-модели барже-буксирного состава были испытаны на сопротивление их движению в гидравлической лаборатории кафедры на специальном экспериментальном гидродинамическом стенде.

Экспериментальный стенд (рисунок 2) представляет из себя гидродинамический лоток 1, в котором располагается 3D-модели исследуемого барже-буксирного состава 2. Скорость потока в гидродинамическом лотке 1 определяется при помощи гидрометрической микровертушки 3. Силовое воздействие потока воды на исследуемые 3D-модели барже-буксирного состава определяется системой измерения 4 при помощи программно-аппаратного комплекса измерения составляющих сил, действующих на 3D модель барже-буксирного состава в потоке воды (далее – ПАК).

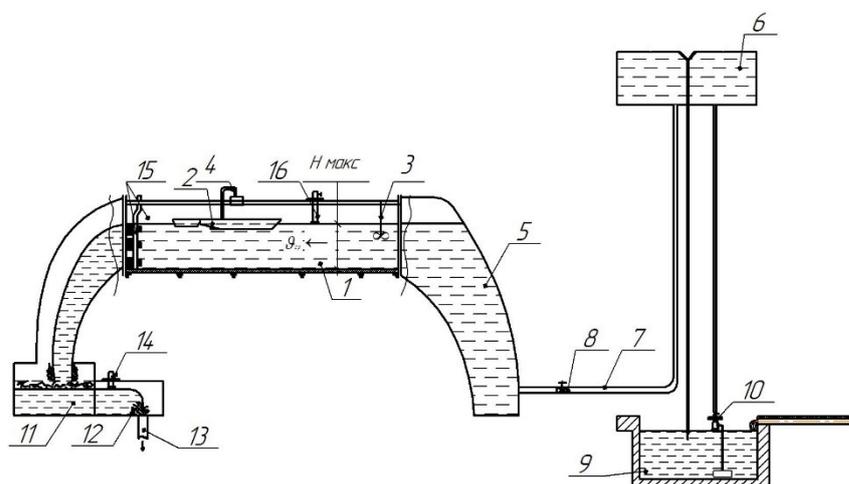


Рисунок 2 – Схема экспериментального стенда

Вода в гидродинамический лоток 1 поступает через успокоитель 5, куда она подается из напорного уравнивающего бака 6 по питающей трубе 7 при открытой регулирующей задвижке 8. В напорный уравнивающий бак 6 вода из водосборного бассейна 9 подается центробежным насосом 10. Из гидродинамического лотка 1 вода сбрасывается в металлический измерительный лоток 11, в котором установлен расходомер Томсона 12 и далее через сливную трубу 13 – в водосборный бассейн 9. Расходомер Томсона представляет из себя тонкостенный водослив (металлический лист с вырезанным углом) с углом при вершине, равным  $90^\circ$ . По напору  $H$  над вершиной водослива Томсона определяется величина расхода  $Q$  в системе с использованием тарировочного графика.

Для поддержания определенного уровня воды в гидродинамическом лотке 1 в конце его помещен затвор-жалюзи 15. Для измерения уровня воды  $H$  в гидродинамическом лотке (а затем и глубины потока воды  $h$ ) на бортах гидродинамического лотка устанавливается специальная подставка со штангой игольчатого уровнемера 16, которая свободно перемещается по вертикали и горизонтали и позволяет зафиксировать уровень воды  $H$ , установившейся в лотке.

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

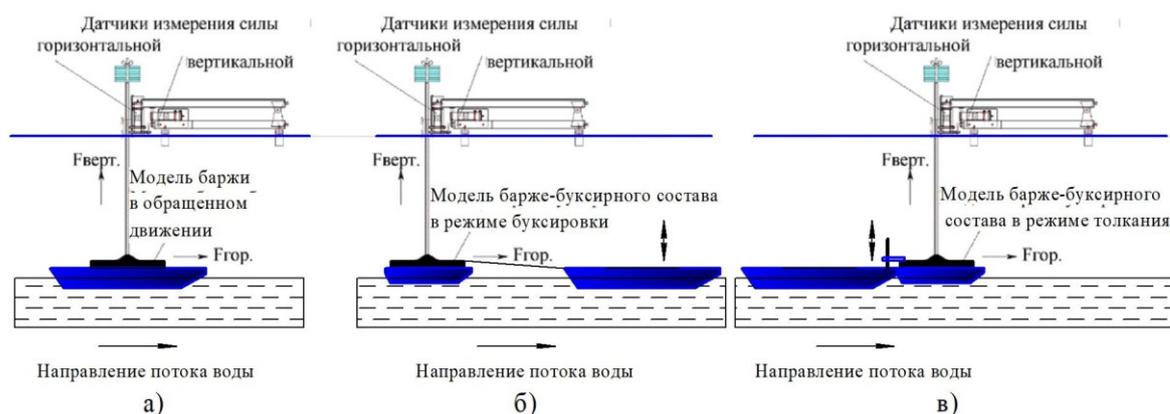


Рисунок 3 – Схемы измерения силового воздействия потока воды на модели корпуса судна и внешний вид расположения датчиков измерительного комплекса

На схеме, представленной на рисунке 3, а) модель баржи закрепляется непосредственно на измерительной штанге комплекса с целью фиксации параметров вертикальной подъемной силы  $Y$  при проведении экспериментальных исследований.

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

На схеме, представленной на рисунке 3, в) 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 изменения геометрии обводов и отношения  $L/B$  корпуса баржи в режиме толкания.

Экспериментальные исследования сопротивления движению разработанных моделей составов судов, эксплуатируемых на водных путях Республики Беларусь, в режимах толкания и буксировки в гидродинамическом лотке позволили установить, что для баржевых составов по параметру силы сопротивления  $X$  установлено, что режим толкания является более предпочтительным, чем режим буксировки. Экспериментально установлено, что при скорости потока воды  $v = 0,18$  м/с, сила сопротивления воды движению модели состава в режиме буксировки на 40 % больше, чем при режиме толкания. С ростом скорости эта разница возрастает и при скорости  $v = 0,28$  м/с сила сопротивления при буксировке, почти в два раза больше, чем при режиме толкания.

Анализ результатов, проведенных экспериментальных исследований различных моделей корпусов баржи в составе судов позволил установить оптимальную форму оконечностей баржи и позволил установить, что наиболее оптимальной формой обводов носовой части баржи являются лекальные обводы носовой части с углом подъема батоксов к грузовой ватерлинии  $25^\circ$ , с килеватостью носа  $5^\circ$ , а для кормовой части оптимальный угол подъема составил  $14^\circ$ , что позволило снизить силу сопротивления движению состава судов на 10–20 % по сравнению с лекальными обводами судна-прототипа (баржа проекта 775) как в режиме толкания, так и в режиме буксировки, в зависимости от скорости движения состава.

Также исследовались возможности увеличения грузоподъемности вновь проектируемых барж путем изменения соотношения L/B корпуса баржи и внедрения системы воздушной каверны с целью снижения сопротивления движению судна. []

Анализ полученных результатов проведенных исследований позволил выработать рекомендации по эксплуатационным режимам для барже-буксирных составов и их модернизации для повышения эксплуатационных характеристик.

#### **Список литературы:**

1. Казаков, Н. Н. Организация работы речного флота : учеб. пособие / Н. Н. Казаков ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 294 с. ISBN 978-985-554-039-8.
2. Роннов, Е. П. Проектирование судов: в 2 ч. : учеб. пособие / Е. П. Роннов. – Н. Новгород : Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2009. – 288 с.
3. Дормидонтов, Н. К. Проектирование судов внутреннего плавания. / Н. К. Дормидонтов, В. Н. Анфимов, П. А. Малый, Б. А. Пахомов, Н. Л. Шмуйлов // Л. : Судостроение, 1974. – С.335.

