

## АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ОТ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАСТИНЫ, ПАРЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ СТОЕК И ОБСУЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИХ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ<sup>1</sup>

*П. А. Бимбереков*

*Сибирский государственный университет водного транспорта,  
Новосибирск, Российская Федерация*

Сопоставляются фотоматериалы волновых картин от движущейся пластины с заостренной и полной оконечностями, из которой при исключении цилиндрической вставки получается стойка с каплевидным поперечным сечением, как у пары последовательно расположенных стоек. Длина пластины выбрана равной габаритному размеру указанной пары последовательно расположенных стоек. Сделано заключение о возможности выделения из общего сопротивления составляющей унифицированного волнового сопротивления, которое экспериментально может определяться по результатам исследования комбинации отдельных стоек и/или других объектов принятой формы. Обсуждаются возможные варианты составляющих волнового сопротивления, дополнительно предлагается вариант моделирования волнового сопротивления судна посредством движения на свободной поверхности не двух кельвиновских систем волн, а двух пар таких систем волн. Дополнительные, носовую и кормовую, кельвиновские системы волн предлагается смещать против хода движения на половину длины волны от основных систем волн. Эти дополнительные системы волн предназначаются для описания внутренних промежуточных волн, располагающихся между основными поперечными волнами. Приведены выражения для волнового сопротивления, содержащие некоторые коэффициенты пропорциональности, возможные составляющие волнового сопротивления от сглаживающих расходящихся волн в пределах зоны сглаживания волновых структур, начиная от носовой оконечности, прочие неучтенные составляющие волнового сопротивления. Предложенные фотоснимки были сделаны в опытовом бассейне Сибирского государственного университета водного транспорта (Новосибирской государственной академии водного транспорта) в 2006 г.

**Ключевые слова:** корабельная система волн, волновое поле, структура волнового поля, волновое сопротивление, графическая обработка, тонкая пластина с полной и заостренной оконечностями.

**Для цитирования:** Бимбереков П. А. Анализ волновых полей свободной поверхности воды от движущейся пластины, пары последовательно расположенных стоек и обсуждение возможных составляющих их волнового сопротивления // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 2. С. 30–38. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-30-38.

### **Введение**

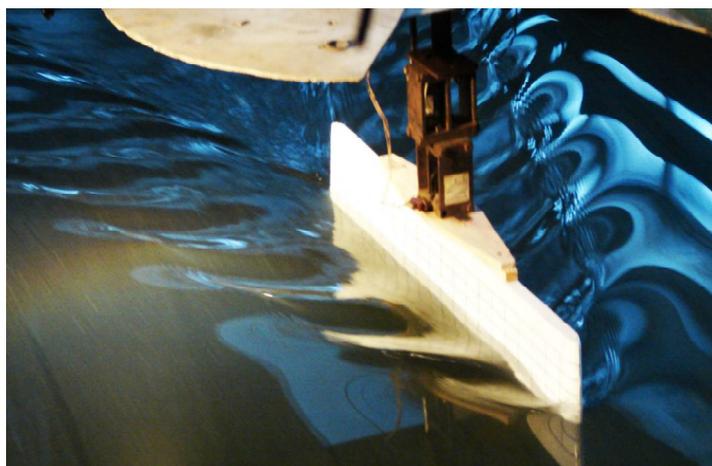
В современной практике расчета волнового сопротивления судов широко используется представление результирующей волновой картины корабельной системы волн в виде двух последовательно идущих друг за другом систем кельвиновских волн от двух (носового и кормового) точечных источников [1–5]. В работах [6–8] было указано на отличие кельвиновской системы волн от реальной волновой картины системы волн, в частности о наличии по концам поперечных волн воронок и внутренних малых промежуточных волн между основными поперечными волнами. Последние, по нашему мнению, являются продолжением задней по ходу движения границы воронок. Настоящая статья является продолжением работ [6–8], где были рассмотрены,

<sup>1</sup> Автор выражает благодарность М. Т. Азимбаеву, А. Ю. Кононенко, Е. Н. Крыловой за участие в экспериментальных исследованиях со стойками и пластиной. Особую признательность автор выражает профессору А. Ш. Готман за подвижность в исследовании проблемы волнового сопротивления судов и привлечение других к этой увлекательной тематике.

в частности, волновые поля от движущихся пары последовательно расположенных стоек и произведена графическая проработка этих полей. Ниже приводятся фотоматериалы волновых полей у пластины с габаритом и оконечностями указанной пары стоек, а для сравнения самих стоек с близкими скоростями движения производится сопоставление волновых картин и их графическая проработка. В результате обсуждаются возможные составляющие волнового сопротивления.

#### Анализ волновых полей

Проведем сравнение волновых полей свободной поверхности жидкости от движущихся пластины и двух последовательно расположенных стоек с одинаковыми габаритами и оконечностями. Волновые картины испытаний пластины и пары стоек, двигающихся соответственно с близкими скоростями острым концом вперед, представлены на рис. 1 и 2, а двигающихся разными концами вперед – на рис. 3.



*a*



*б*

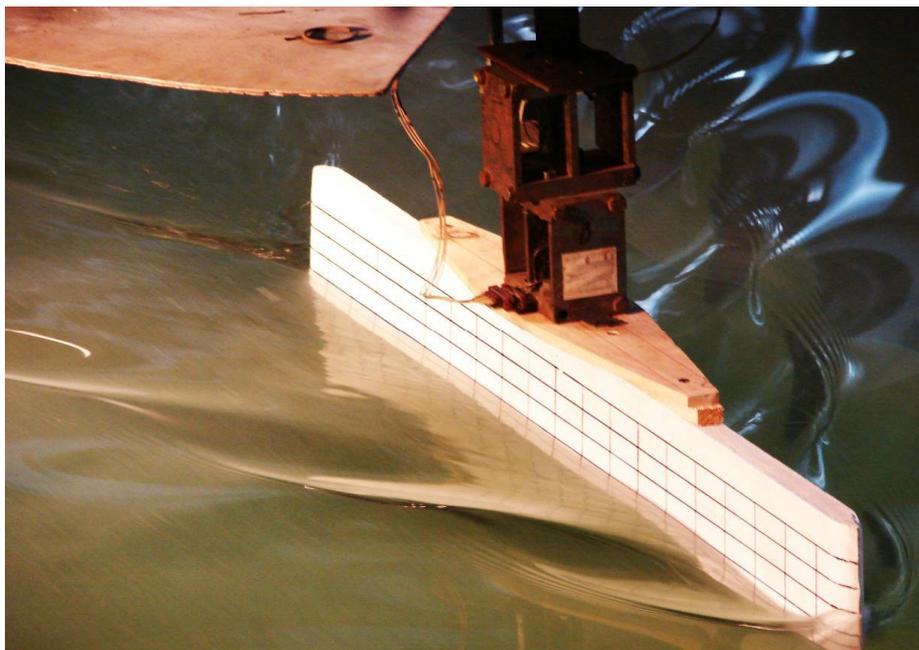
Рис. 1. Волновое поле: *a* – пластины; *б* – двух последовательно расположенных стоек каплевидного поперечного сечения, движущихся острым концом вперед



*a*

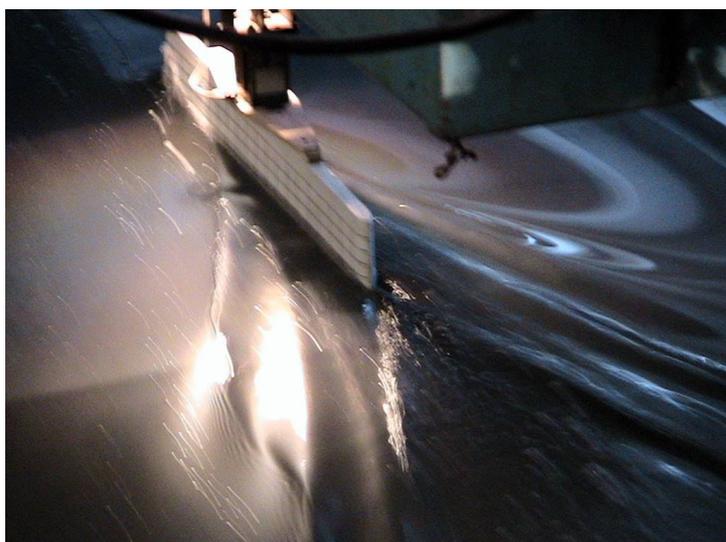
Рис. 2. Фотоизображение волновых картин у пластины и пары стоек при движении острым концом вперед с большей скоростью относительно рис. 1:

*a* – стойки



*б*

Рис. 2. Окончание. Фотоизображение волновых картин у пластины и пары стоек при движении острым концом вперед с большей скоростью относительно рис. 1:  
*б* – пластина



*а*



*б*

Рис. 3. Волновое поле: *а* – пластины, движущейся тупым концом вперед; *б* – двух последовательно расположенных стоек каплевидного поперечного сечения, двигающихся острым концом вперед

Анализируя рис. 1–3, можно сделать вывод, что волновые поля стоек и пластины одинаковых габаритов и близких скоростей вполне схожи, т. к. очевидных, привлекающих внимание различий волновых картин не наблюдается. Местное различие течения у передней оконечности разной формы не оказывает заметного влияния на основную часть волнового поля. В условиях созданного освещения и у пластины, и у двух последовательно расположенных стоек установлено, что волны в поперечном направлении не заканчиваются грядой расходящихся волн, а пересекают поперечные волны, отделяя воронки, являющиеся окончанием отдельных волн в поперечном направлении.

На рис. 4 приведено фотоизображение волновой картины при движении указанной пластины тупым концом вперед. Отчетливо фиксируется справа по ходу движения волновая картина, состоящая из основных и промежуточных волн. Для более удобной оценки волновой картины на ней сделаны следующие графические построения: нанесена поперечная сплошная линия по урезу крепления динамометра для отражения поперечного направления движению пластины, далее она перенесена в виде пунктирных линий на вершины поперечных волн левой стороны. Пунктирные линии взаимно увязали положение основных поперечных волн слева по движению пластины с аналогичным в рельефе зоны волн, не сглаженной потоком от носовой оконечности справа. Между ними регистрируем промежуточные волны. Удовлетворительно фиксируются получающиеся зигзаги, отходящие от гребней поперечных волн через границу воронок, промежуточные волны к фронтальной стороне следующих поперечных волн.

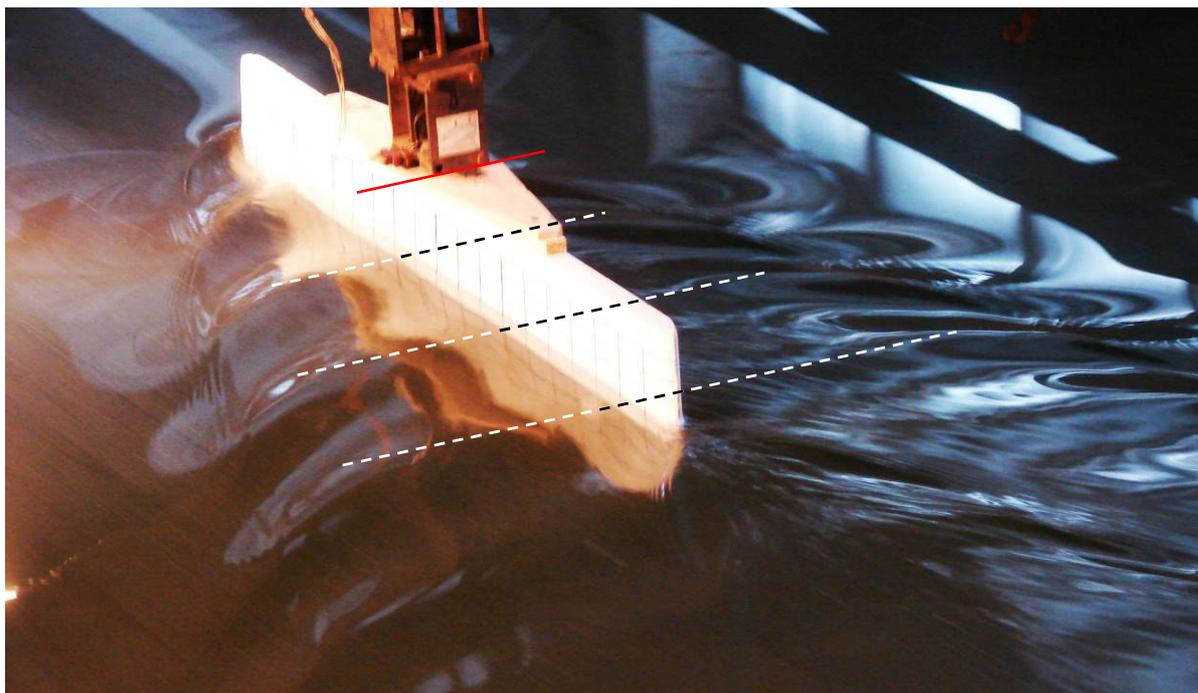


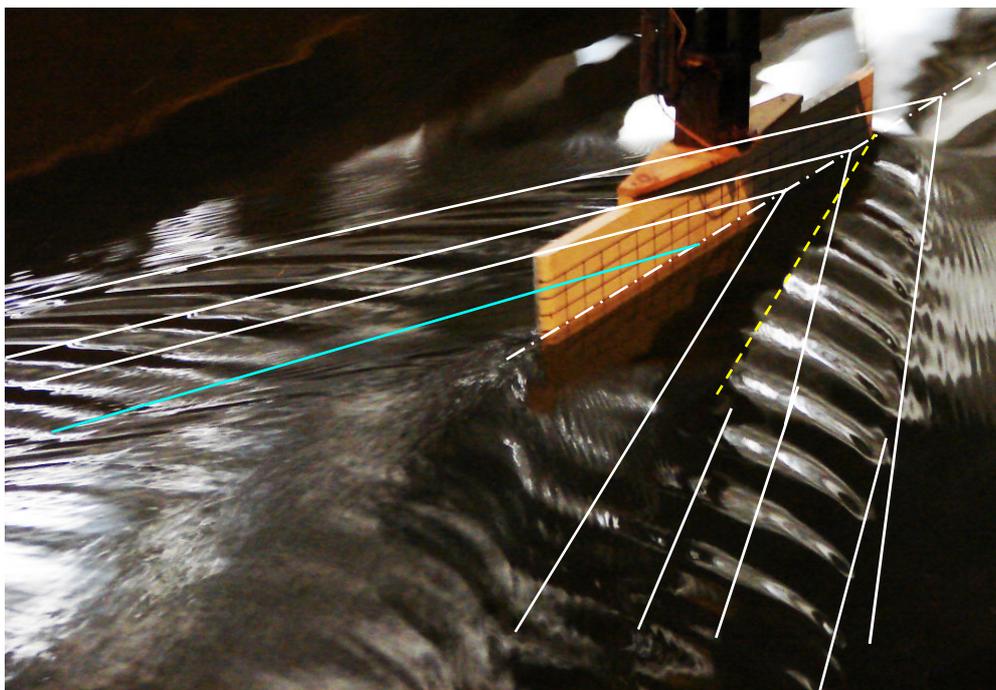
Рис. 4. Фотоизображение волновой картины у пластины с габаритами и оконечностями пары стоек при движении тупым концом вперед с графическими построениями

Таким образом, волновая картина представляет собой единую регулярную систему горбов и впадин, располагающихся как в продольном направлении (поперечные волны), так и поперечном (воронки). В поперечном направлении по ходу движения пластины происходит переход горбов поперечных волн по вершинам у внешних воронок с последующим образованием внутренних поперечных волн. В свою очередь, внутренние поперечные волны через вершины внутренних воронок приходят к следующей по ходу основной поперечной волне. Расходящиеся волны дополняют картину, отгораживая основную часть внешних воронок в конце поперечных волн от обычно регистрируемой зоны корабельной системы волн.

На рис. 5 представлен фотоснимок волновой картины у пластины, движущейся с малой скоростью. На рис. 5, б размещены линии под углами к оси движения пластины в удовлетворительно фиксируемых местах изменения формы поперечных волн. При доведении до диаметральной плоскости пластины они некоторым образом определяют нахождение источников давления, вызывающих изменение формы волн. Можно обратить внимание на изменение положения границ волнового поля, исходящего у носовой оконечности в зоне кормовой оконечности. Кормовая оконечность как бы подтягивает к себе волны в поперечном направлении. Похожий эффект заметен и у отдельных стоек (например, [7, с. 15, рис. 8, б]).



*a*



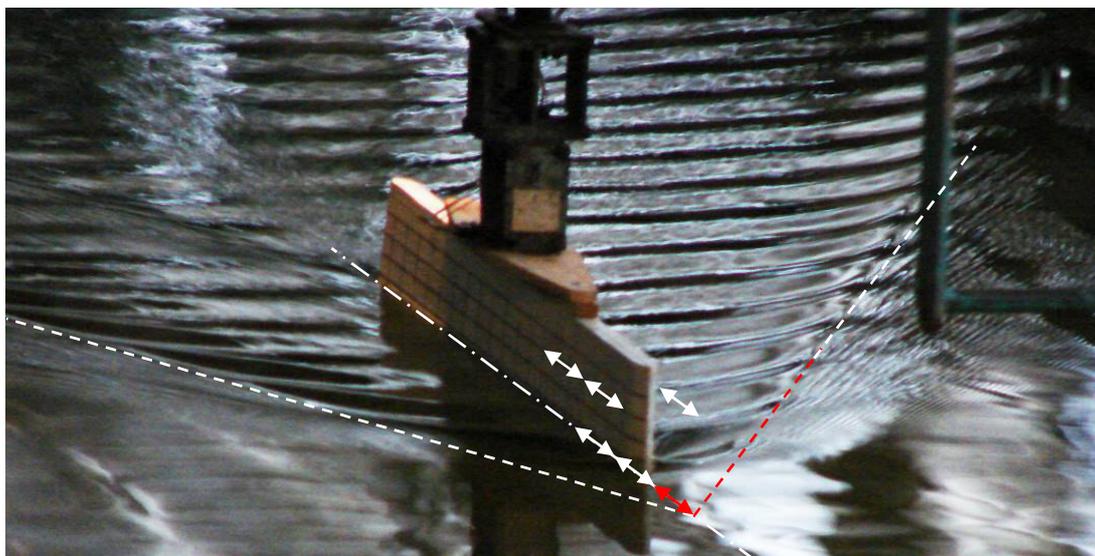
*б*

Рис. 5. Волновое поле (*a*) и его графическая проработка (*б*) пластины, двигающейся с малой скоростью острым концом вперед

На рис. 6 представлена графическая проработка фотоизображений движения пластины в разных направлениях. Точечной линией зафиксирована примерная граница воронок по концам в поперечном направлении поперечных волн. Вероятно, было бы правильно именно эту границу, исходящую примерно из точки, находящейся в двух длинах поперечных волн от вершины подпорной волны, считать границей волнового поля корабельной картины волн.



*a*



*б*

Рис. 6. Волновые поля с графической проработкой буксируемой пластины:  
*a* – тупым концом вперед; *б* – острым концом вперед

На рис. 6 можно наблюдать сглаживание высот поперечных волн волнового поля от границы расходящихся волн по направлению к диаметральной плоскости модели. Длина волны зафиксирована белой размерной линией между вершинами поперечных волн параллельно пластине на рис. 6, размерная линия перенесена на пластину, составила ровно две ячейки сетки по длине. Далее встык к ней отложена дополнительная размерная линия по ходу движения пластины. Видимого изменения длины по сравнению с длиной двух ячеек сетки пластины не зафиксировано. В итоге по осевой линии от вершины удовлетворительно фиксируемой первой после носа поперечной волны отложены последовательно три размерные линии, которые привели передний конец последней по ходу построения (темной) размерной линии примерно в точку схождения границы расходящихся волн волнового поля (пунктирные линии).

**Выводы**

1. В ходе рассмотрения материалов настоящей статьи были сделаны заключения о несущественном влиянии вида поперечного сечения стоек (при прогонке острым и тупым концом), единой пластины с оконечностями стоек, а также наличия промежуточной, соединяющей стойки пластины по [7] на общий вид волновой картины корабельной системы волн. Это приводит нас к выводу о возможности выделения из общего сопротивления судна значения некоторого унифицированного волнового сопротивления, которое может экспериментально определяться по результатам прогонки комбинации отдельных стоек, пластины и/или других объектов принятой формы. Сопротивление трения перечисленных объектов при этом должно быть исключено известными методами, например прогонкой под водой. Разумеется, при этом появляются другие вопросы, в частности об учете влияния воды, поднявшейся по стойкам.

2. Согласно результатам анализа волновых полей рассмотренных объектов можно допустить следующее принципиальное выражение для волнового сопротивления  $R_{\Sigma\text{волн1}}$ :

$$R_{\Sigma\text{волн1}} = k_1 R_{\text{волн1}} + k_2 R_{\text{волн2}} + k_3 R_{\text{волн3}},$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – некоторые коэффициенты пропорциональности;  $R_{\text{волн1}}$  – сопротивление согласно интегралу Митчелла;  $R_{\text{волн2}}$  – совместное сопротивление вихрей левого и правого борта носовой оконечности и кормовой, в том числе с учетом взаимодействия данных вихрей между собой и основной волновой системы (в частности, для оценки отдельного влияния вихря можно воспользоваться выражением для цилиндрического тела [9, с. 43]);  $R_{\text{волн3}}$  – возможные составляющие волнового сопротивления от сглаживающих расходящихся волн в пределах зоны сглаживания вышеуказанных волновых структур, начиная от носовой оконечности.

3. С целью уточнения расчетного алгоритма на основе кельвиновских источников давления, базируясь на рассмотренные материалы, можно также сделать предположение о возможной целесообразности введения в расчетный алгоритм волнового сопротивления двух пар кельвиновских систем волн, носовую и кормовую. Кроме основной системы волн, имитирующей каждую из оконечностей, соответственно генерирующей основные волны, предлагается добавить и системы для внутренних промежуточных малых волн со смещением наполовину длины волны против хода движения. Тогда для волнового сопротивления  $R_{\Sigma\text{волн2}}$  имеем:

$$R_{\Sigma\text{волн2}} = k_4 R_{\text{волн1}} + k_5 R_{\text{волн4}} + k_6 R_{\text{волн5}},$$

где  $k_4, k_5, k_6$  – некоторые коэффициенты пропорциональности;  $R_{\text{волн4}}$  – сопротивление второй системы между собой и основной волновой системой Митчелла;  $R_{\text{волн5}}$  – прочие неучтенные составляющие волнового сопротивления.

Вышеперечисленные выводы совместно с обсуждением представленных фотоматериалов мы оставляем на суд специалистов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Ходкость и управляемость судов*: учеб. для вузов / под ред. В. Г. Павленко. М.: Транспорт, 1991. 397 с.
2. *Эпитейн Л. А.* Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. Л.: Судостроение, 1970. 207 с.
3. *Войткунский Я. И. и др.* Справочник по теории корабля. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1985. 768 с.
4. *Кадоццев Б. Б., Рыдник В. И.* Волны вокруг нас. М.: Знание, 1981. 150 с.
5. *Трубецков Д. И., Рожнев А. Г.* Линейные колебания и волны. М.: Физматгиз, 2001. 415 с.
6. *Бимбереков П. А.* Экспериментальные исследования к вопросу моделирования корабельных волн и расчету волнового сопротивления судна // Scientific achievements of the third millennium. International United Academy of Sciences. Collection of scientific papers on materials VIII International Scientific Conference (Los Angeles, 30 сентября 2018 г.). Los Angeles: LJournal, 2018. С. 4–14.
7. *Бимбереков П. А.* Графический анализ волновых полей свободной поверхности воды от движущихся судов и пары последовательно расположенных стоек // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 7–22.

8. Бимбереков П. А. Графический анализ волновых полей свободной поверхности воды от движущейся пары последовательно расположенных стоек, связанных тонкой пластиной // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 45–53.

9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.

Статья поступила в редакцию 03.03.2020

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Бимбереков Павел Александрович** – Россия, 630099, Новосибирск; Сибирский государственный университет водного транспорта; д-р техн. наук, доцент; доцент кафедры теории корабля, судостроения и технологии материалов; bimberekov@yandex.ru.



## ANALYSIS OF WAVE FIELDS OF FREE WATER SURFACE FROM MOVING PLATE, PAIR OF CONSECUTIVE POSTS AND DISCUSSION OF LIKELY COMPONENTS OF THEIR WAVE RESISTANCE

*P. A. Bimberekov*

*Siberian State University of Water Transport,  
Novosibirsk, Russian Federation*

**Abstract.** The paper presents and compares photographs of wave patterns from a moving plate with pointed and full ends, from which, with the exception of a cylindrical insert, there develops a post with a teardrop-shaped cross-section, as in a pair of tandem posts. The plate length equals to the overall size of the specified pair of consecutive posts. The conclusion is made about the possibility of selecting a unified wave resistance component from the total resistance, which can be determined experimentally based on the results of the study of a combination of individual posts and/or other objects of the specified shape. Possible variants of wave resistance components are being discussed. Besides, a variant of modeling the ship's wave resistance by representing two pairs of such wave systems rather than two Kelvin wave systems on a free surface is proposed. Additional fore and aft Kelvin wave systems are proposed to be shifted against the course of motion by half the wavelength. These additional wave systems are intended to describe internal intermediate waves located between the main transverse waves. There have been presented the expressions for wave resistance that contain some proportionality coefficients, possible components of wave resistance from smoothing diverging waves within the smoothing zone of wave structures, starting from the bow extremity and other unaccounted components of wave resistance. The photos proposed were taken in the experimental pool of Siberian State University of Water Transport (Novosibirsk State Academy of Water Transport) in 2006.

**Key words:** ship's wave system, wave field, wave field structure, wave resistance, graphic processing, thin plate with full and sharp ends.

**For citation:** Bimberekov P. A. Analysis of wave fields of free water surface from moving plate, pair of consecutive posts and discussion of likely components of their wave resistance. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2020;2:30-38. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-30-38.

### REFERENCES

1. *Hodkost' i upravlyaemost' sudov: uchebnik dlya vuzov* [Ship propulsive quality and steerability: textbook for universities]. Pod redakciej V. G. Pavlenko. Moscow, Transport Publ., 1991. 397 p.
2. Epshtejn L. A. *Metody teorii razmernostej i podobiya v zadachah gidromekhaniki sudov* [Methods of the theory of dimensions and similarities in problems of hydromechanics of ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1970. 207 p.

3. Vojtkunskij Ya. I. i dr. *Spravochnik po teorii korablya*. Vol. 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli [Reference book on ship theory. Vol. 1. Hydromechanics. Resistance to ship propulsion. Ship propulsion unit]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 768 p.
4. Kadamcev B. B., Rydnyk V. I. *Volny vokrug nas* [Waves around us]. Moscow, Znanie Publ., 1981. 150 p.
5. Trubeckov D. I., Rozhnev A. G. *Linejnye kolebaniya i volny* [Linear fluctuations and waves]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 2001. 415 p.
6. Bimberekov P. A. Eksperimental'nye issledovaniya k voprosu modelirovaniya korabel'nyh voln i raschyotu volnovogo soprotivleniya sudna [Experimental studies of ship waves modeling and calculation of wave resistance of a ship]. *Scientific achievements of the third millennium. International United Academy of Sciences. Collection of scientific papers on materials VIII International Scientific Conference (Los Angeles, 30 sentyabrya 2018 g.)*. Los Angeles, LJournal Publ., 2018. Pp. 4-14.
7. Bimberekov P. A. Graficheskij analiz volnovykh polej svobodnoj poverhnosti vody ot dvizhushchihsya sudov i pary posledovatel'no raspolozhennykh stoek [Graphical analysis of wave fields of free water surface from moving vessels and pair of consecutive posts]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2019, no. 4, pp. 7-22.
8. Bimberekov P. A. Graficheskij analiz volnovykh polej svobodnoj poverhnosti vody ot dvizhushchejsya pary posledovatel'no raspolozhennykh stoek, svyazannykh tonkoj plastinoj [Graphical analysis of wave fields of free water surface from moving pair of consecutive posts connected by thin plate]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2020, no. 1, pp. 45-53.
9. Shlihting G. *Teoriya pogramichnogo sloya* [Boundary layer theory]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 711 p.

The article submitted to the editors 03.03.2020

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Bimberekov Pavel Aleksandrovich** – Russia, 630099, Novosibirsk; Siberian State University of Water Transport; Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Theory of Ship, Shipbuilding and Technology of Materials; bimberekov@yandex.ru.

