

СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФЛОТА

DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-7-22
УДК 532.593+004.932.2

ГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ОТ ДВИЖУЩИХСЯ СУДОВ И ПАРЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ СТОЕК¹

П. А. Бимберек

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

Представлены и сопоставляются фотоматериалы волновых картин от движущихся натурного и модельного судов, а также от двух последовательно расположенных стоек, определяются их закономерности посредством графической обработки. Проиллюстрирована возможность нахождения переднего мнимого источника кельвиновской картины волн, формирующей корабельную систему волн, на расстоянии одной длины волны перед вершиной носовой подпорной волны. Зафиксировано равенство длины поперечных волн и расходящихся волн вдоль внешних границ зоны последних. Сделано предположение о закономерности возникновения промежуточных волн между основными волнами у модели судна и стоек, а также отмечена закономерность наложения волновых картин у пары последовательно движущихся стоек в зависимости от попадания задней стойки в волновое поле первой стойки. Обсуждаются закономерности потоков около движущихся стоек. Проиллюстрирована носовая и кормовая система кельвиновских волн у корабельной системы волн (угол линии средин гребней расходящихся волн с диаметральной плоскостью судна и угол гребней расходящихся волн с диаметральной плоскостью судна); произведено её сопоставление с волновой картиной судна и пары последовательно движущихся стоек. Практически все представленные фотоснимки были сделаны в опытовом бассейне Сибирского государственного университета водного транспорта (Новосибирской государственной академии водного транспорта) в 2006 г. Тонкая плёнка, естественным образом возникшая на поверхности воды опытового бассейна и получившая в результате ранее сделанных прогонок направленную структуру вдоль бассейна, позволила визуализировать деформацию свободной поверхности воды в лучшем качестве, получить более очерченные её формы в условиях созданного освещения.

Ключевые слова: корабельная система волн, волновое поле, структура волнового поля, графическая обработка, каплевидное поперечное сечение.

Для цитирования: *Бимберек П. А.* Графический анализ волновых полей свободной поверхности воды от движущихся судов и пары последовательно расположенных стоек // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 7–22. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-7-22.

Введение

В современной практике расчёта 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]. Считается [1–3], что область зарождения поперечных волн в носовой оконечности представляет собой возвышение свободной поверхности, расположенное в корму от форштевня примерно в месте наибольшей кривизны судовой поверхности. Наряду с этим имеем свидетельство [6, 7] о нахождении мнимого источника носовой системы волн на

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

некотором расстоянии перед форштевнем судна. Сведения о его точном расположении отсутствуют. Для установления закономерности расположения мнимого источника носовой системы волн и поиска других закономерностей корабельной системы волн ниже производится анализ волновых полей от движущихся судна и модели судна, а также двух последовательно расположенных стоек, волновые картины которых некоторым образом моделируют носовую и кормовую системы корабельных волн.

Анализ волновых полей

На рис. 1 представлена волновая картина корабельной системы волн, моделируемая двумя последовательно идущими друг за другом системами кельвиновских волн от двух (носового и кормового) точечных источников [1–5].

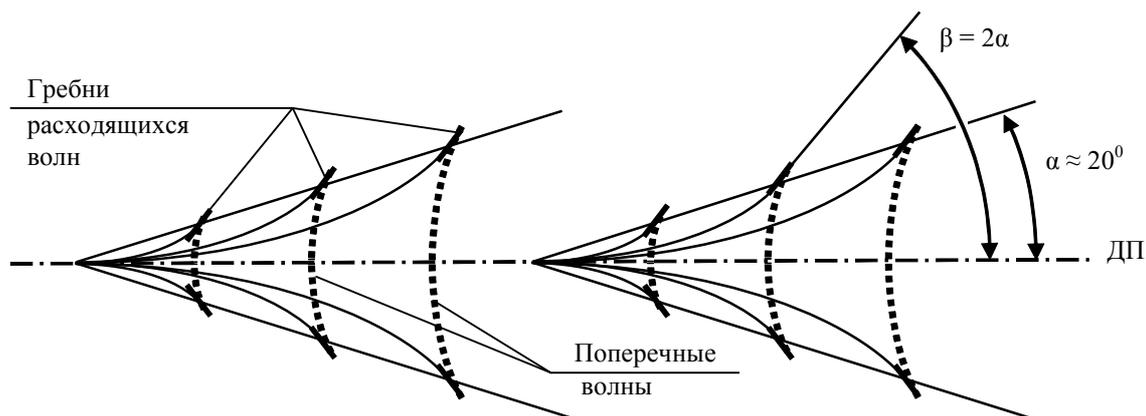


Рис. 1. Носовая и кормовая система кельвиновских волн у корабельной системы волн:
 α – угол линии середин гребней расходящихся волн с диаметральной плоскостью (ДП) судна (жирные отрезки); β – угол гребней расходящихся волн с ДП судна

С целью нахождения новых закономерностей и взяв во внимание данное представление волнового поля у движущегося судна, предпримем графический анализ волновых картин у натурального судна, модели судна и двух последовательно расположенных стоек каплевидной формы поперечного сечения, некоторым образом моделирующих импульсы носового и кормового точечного источника судна.

Рассмотрим рис. 2. Фотография (рис. 2, а), представленная изначально в работе [6], неоднократно использовалась и обсуждалась в научной литературе [5, 7, 8].

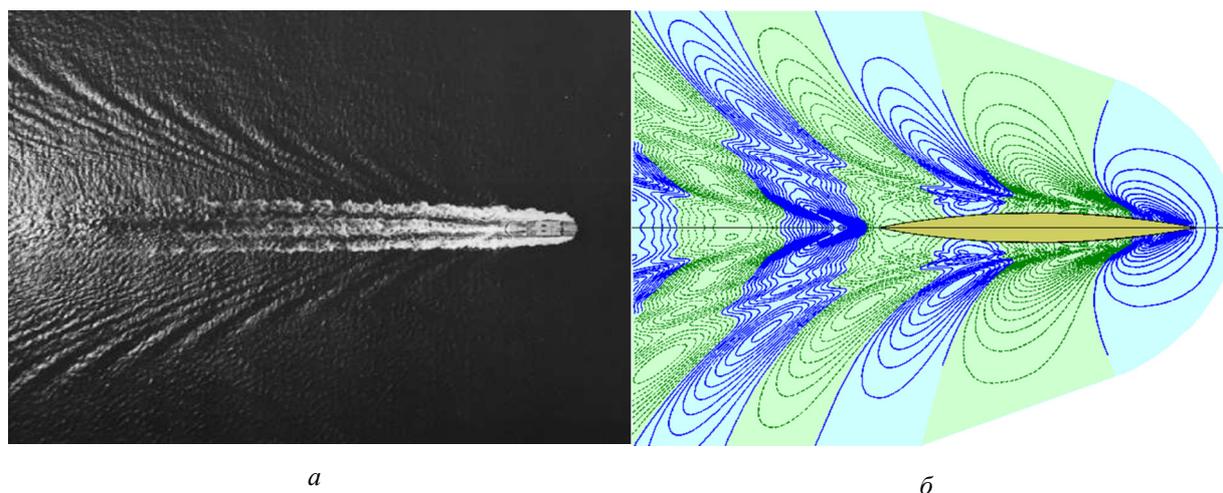
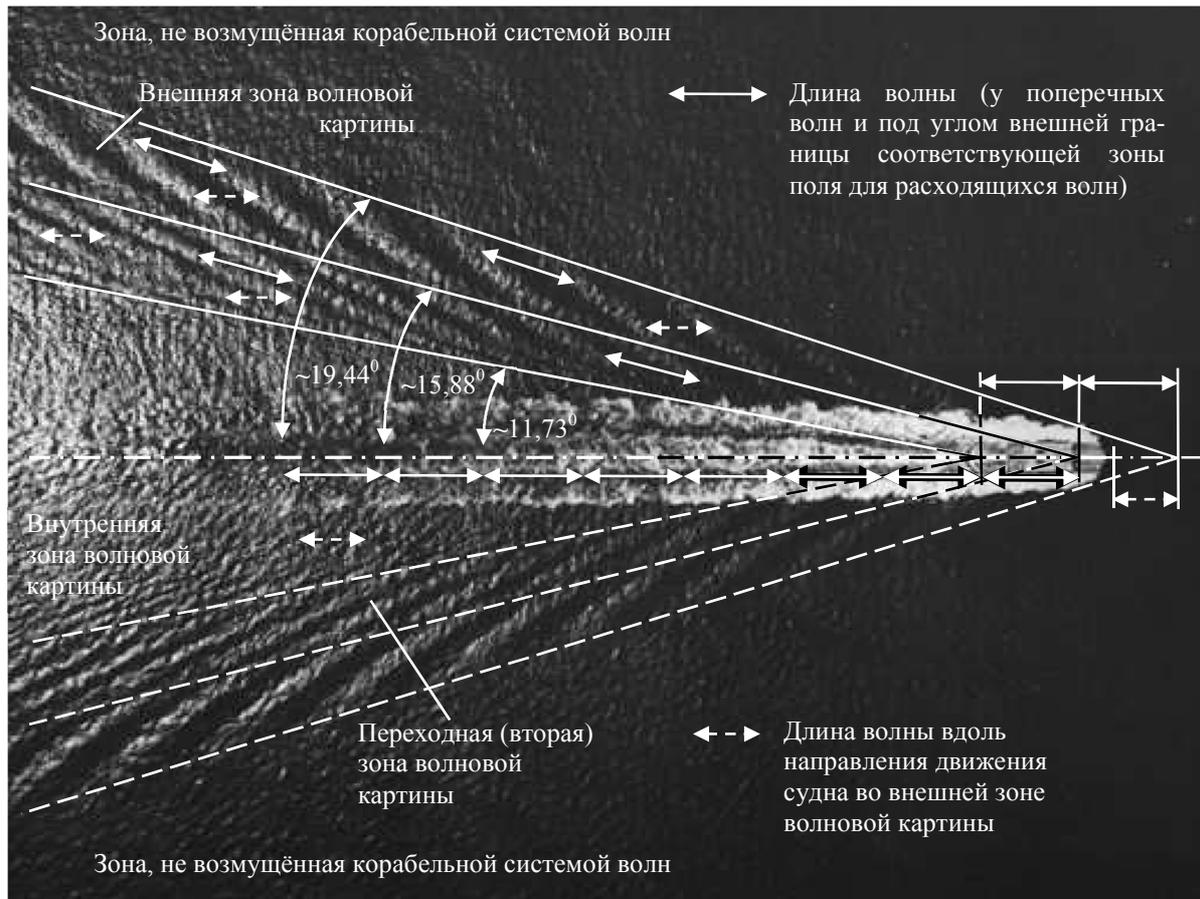


Рис. 2. Проработка поля волновой картины корабельной системы волн:
 а – исходный фотоснимок картины волнового поля от движущегося судна [5];
 б – графическая реализация расчётной картины волнового поля (сплошные линии фиксируют уровни повышения, а пунктирные – понижения спокойной поверхности воды) [9]



в

Рис. 2 (продолжение). Проработка поля волновой картины корабельной системы волн:
в – графические построения на исходном фотоснимке

В работе [7] отмечалось, что данный фотоснимок, сделанный с воздуха непосредственно над судном, иллюстрирует, в том числе, и асимптотическую структуру, теоретически установленную Кельвином. При этом в согласии с данной теорией волновая картина корабельных волн ограничена углом $19,5^\circ$ с каждой стороны направления движения, а виртуальная вершина этого угла смещена приблизительно на одну длину корпуса перед носом судна. Проанализируем данный фотоснимок [5], сделав при этом ряд графических построений. Отметим, что на фотографии имеет место некоторое смещение расходящихся волн волновой структуры в пределах границ указанного выше угла, образующее внешнюю границу переходной зоны волновой картины, которое некоторым образом фиксируется и на графической реализации расчётной модели из работы [9] (рис. 2, в). Кроме того, на фотоснимке хорошо фиксируется и внутренняя зона волновой картины, где уже явно не считаются расходящиеся волны, и видны, хотя и слабо выражены, поперечные волны. Предположив, что перечисленные выше отличия волнового поля, по сравнению с моделью на рис. 1, вызваны наличием отдельных источников, построим границы данных зон по левому борту сплошными, а по правому борту пунктирными линиями. В результате этих построений получены предполагаемые точки положения источников, влияющих на возникновение и деформацию волнового поля корабельной системы волн. У внешней границы, как это указывалось и в работе [7], эта точка находится перед носом судна, хотя на заметно меньшую величину, чем длина его корпуса. Ещё две точки, соответствующие последовательно оговоренным зонам волнового поля, пришлось на его носовую и кормовую оконечности. Углы внешних границ этих зон приближенно составили $19,44^\circ$, $15,88^\circ$ и $11,73^\circ$ соответственно к ДП судна. Разница в полученных углах к ДП судна у границ зон (рис. 2, в), начиная от внешней к внутренней, составила $3,56^\circ$ и $4,14^\circ$ соответственно, откуда получаем примерное изменение углов границ зон в $1/16$ и $1/14$ рад соответственно, т. е. в среднем около $1/15$ рад. Отметим, что с учётом точности построений угол внешней границы волновой картины (рис. 2, в) вполне соот-

ветствует результату, полученному в работе [10]: величина $\alpha = \arcsin(1/3) \approx 19,47^\circ$. Длина слабо видимых поперечных волн во внутренней зоне волновой картины графически зафиксирована нами сплошной размерной линией. С целью взаимного уточнения регистрируемых длин поперечных волн таких последовательных размерных линий построено три в части внутренней зоны волнового поля, где они сколько-нибудь удовлетворительно могли быть зафиксированы. После нескольких перестроений получены следующие результаты. Расстояние между расходящимися волнами в направлении, соответствующем внешней границе зон, оказалось равным длине поперечных волн. Кроме того, расстояния между полученными точками источников волновой картины также оказались равными установленной длине поперечных волн. Последовательное построение размерной цепи из длин поперечных волн вдоль ДП судна привело к её воссоединению с двумя размерными линиями между полученными источниками волнового поля.

По длине судна получено наличие двух вершин волн, находящихся в месте расположения источников изменения волновой картины, из чего можно предположить, что если число волн, укладывающихся в пределах длины судна, возрастёт, то число переходных зон волнового поля увеличится соответственно увеличению этого числа волн.

Дополнительно во внешней зоне волнового поля построена пунктирная размерная линия расстояния между вершинами расходящихся волн вдоль ДП судна и перенесена в другое место зоны, а также в две другие зоны. Эти построения подтвердили вполне очевидное равенство расстояний между волнами вдоль ДП судна внешней зоны, заметное отличие, меньшее примерно на $1/4$ расстояния волн внешней зоны для расстояния переходной зоны, и существенное, примерно на $1/3$ меньшее значение от длины поперечных волн во внутренней зоне. При пятикратном увеличении снимка перед носом судна обнаружены не фиксируемые ранее слабые буруны, начало зоны которых оказалось отстоящим от выдвинутой перед носом точки фиктивного (мнимого) источника на расстояние между волнами вдоль ДП внешней зоны волнового поля.

Какие из установленных зависимостей имеют случайный характер, а какие отражают строгие закономерности, требуется установить дальнейшим анализом. Возможным вариантом его продолжения может служить рассмотрение волнового поля от простых объектов, интерес к которым сохраняется [9, 11, 12]. В качестве простых объектов далее рассмотрена пара последовательно расположенных по ходу движения вертикальных стоек с расстоянием между их носами 1,0 м. Поперечное сечение стоек – каплевидное, длиной 0,039 м, шириной 0,023 м. На рис. 3 представлены фотоснимки волновой картины таких стоек, двигающихся острым концом каплевидного поперечного сечения вперёд при меньшей и большей скорости, без дополнительной графической проработки, а на рис. 4, 5 приводится дополнительная проработка фотоснимка 3, а.

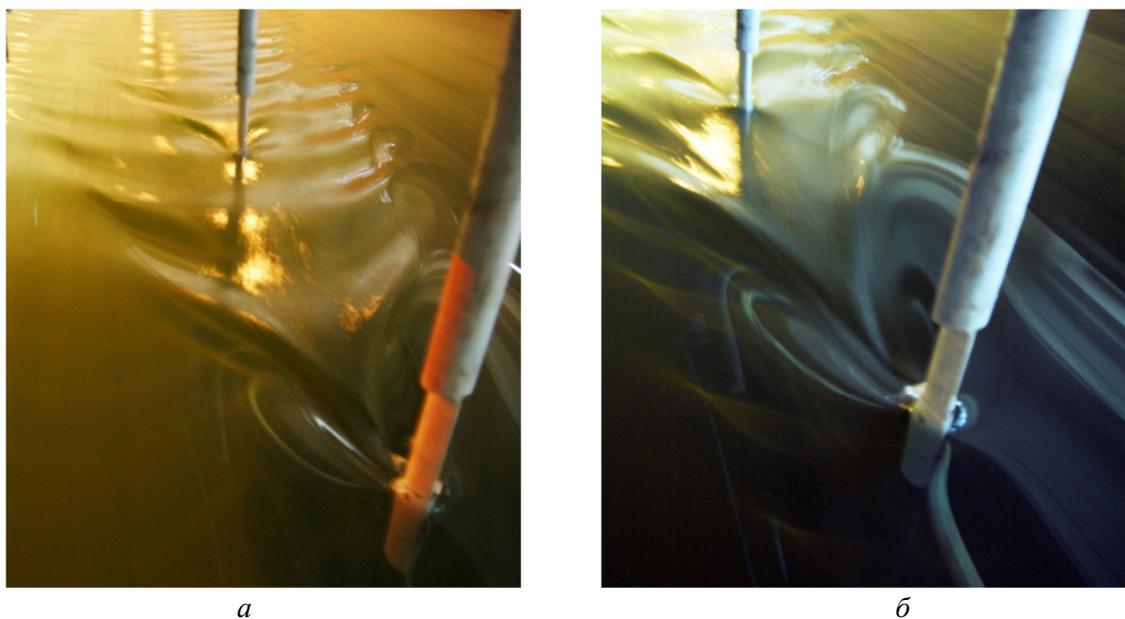


Рис. 3. Волновая картина у двух последовательно расположенных вертикальных стоек, двигающихся острым концом поперечного сечения вперёд:

а – меньшая скорость; *б* – большая скорость

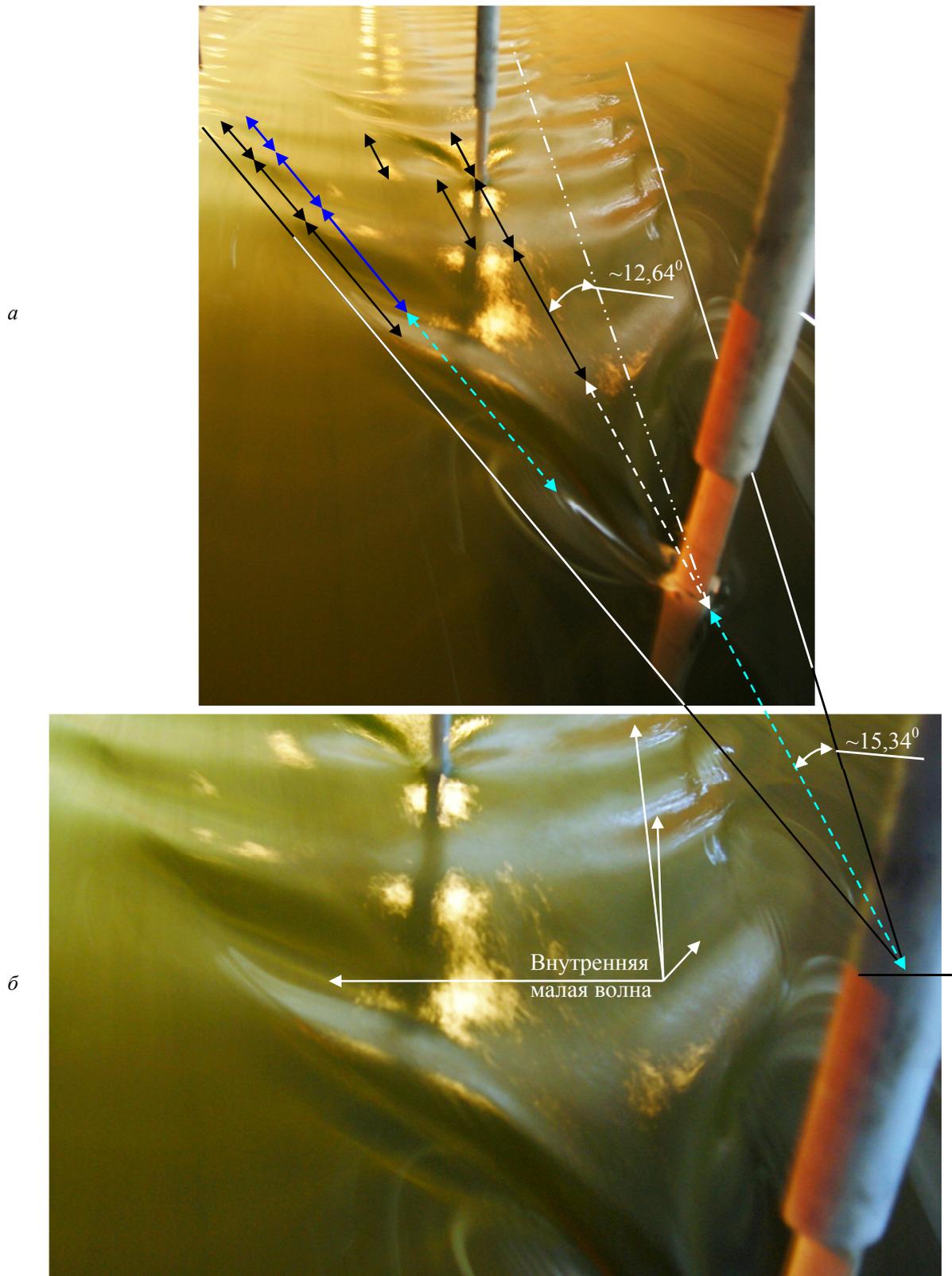


Рис. 4. Графическая обработка волновой картины от двух последовательно движущихся стоек:
a – построение размерных цепей структурных составляющих волновой картины;
б – деформация свободной поверхности жидкости около передней стойки

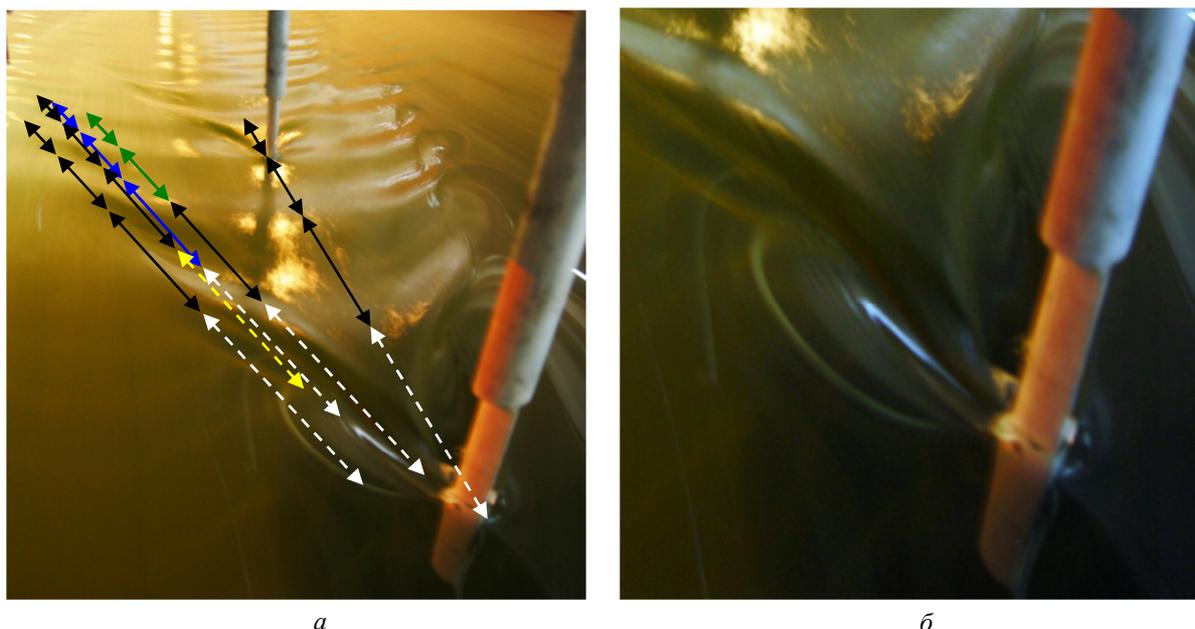


Рис. 5. Графическая обработка по выявлению взаимосвязности структурных составляющих волновой картины от двух последовательно движущихся стоек:
 а – построение размерных цепей структурных составляющих волновой картины;
 б – деформация свободной поверхности жидкости около передней стойки

На рис. 4, а выполнены следующие построения: нанесены размерные линии (чёрным цветом) между вершинами поперечных волн параллельно и слева (для наблюдателя) от осевой линии связывающей стойки, а также одна размерная линия непосредственно по указанной осевой (осевая удалена). Построение размерных линий вне осевой вызвано необходимостью выхода за зону деформации волнового поля передней стойки задней стойкой.

Затем все полученные размерные линии отложены в положении по осевой линии и продолжены по направлению движения стоек спрогнозированными по трём фактически построенным двумя дополнительными размерными линиями (дополнительные размерные линии выполнены светлым пунктиром). При прогнозировании длины дополнительных размерных линий принималось очевидным, что действительная длина волны одинакова для всех исходящих от стойки поперечных волн и как минимум зафиксированная фотоснимком волновая картина имеет единую закономерность изменения в перспективе волнового поля. В результате построений получено, что внешняя граница волнового поля пересекается с осевой линией на переднем конце последней спрогнозированной размерной линии (точка пересечения выделена горизонтальным чёрным отрезком). Таким образом, получено дополнительное свидетельство возможного места нахождения фиктивной вершины (виртуального точечного источника) поля корабельных волн в точке, отложенной вперёд от вершины носовой подпорной волны на длину поперечной волны по ДП судна. Используя полученное ранее на основании рис. 2 заключение о равенстве значения длин поперечных волн и расходящихся под углом к ДП судна для внешней границы зоны, а в последнем случае под углом к осевой линии, строим соответствующие размерные линии. В результате получаем удовлетворительное соответствие полученному по рис. 2 результату для случая судна и в отношении волнового поля стойки (как минимум для чёрных размерных линий). Для оценки реального значения угла внешней границы переходной зоны волнового поля стоек (белая штрихпунктирная линия с двумя точками) по зафиксированному с данного ракурса на рис. 4 произведём его пересчёт из соотнесения углов между внешними границами волнового поля судна (см. рис. 2) с соответственным у стоек. Тогда имеем при соответствии угла границы волнового поля судна в $19,44^\circ$ зафиксированной границе волновой картины у стоек в $15,34^\circ$ соответствие значению границы переходной зоны у стоек в $12,64^\circ$ величине $16,02^\circ$, что близко и с учётом точности построений вполне соответствует аналогичному значению у судна в $15,88^\circ$.

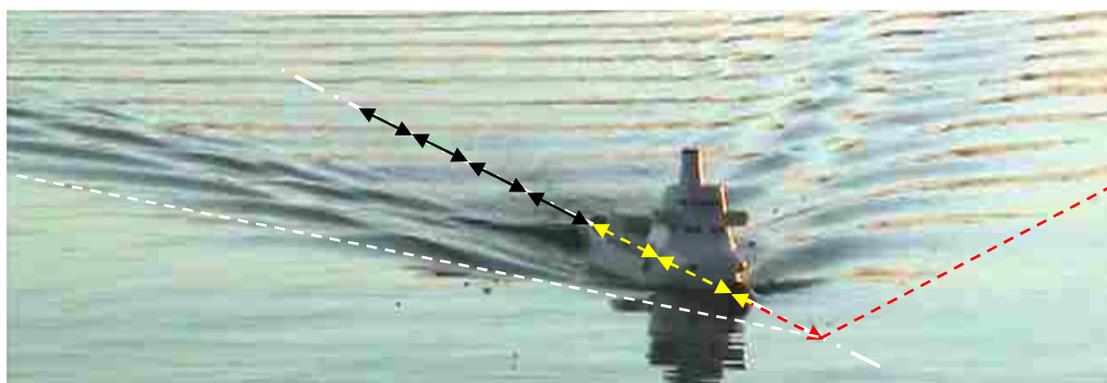
На рис. 4, а заметны особые структурные составляющие волнового поля стоек: промежуточные внутренние волны, дополнительные возвышения во фронтальной и тыльной по направлению движения части волн, воронка у носовой стойки и т. д. Для лучшего восприятия части

волновой картины первой стойки на рис. 4, б она дана в увеличенном масштабе в составе трёх волн, начиная со второй (за первую считаем подпорную волну у стойки).

С целью выявления взаимосвязности структурных составляющих волн на рис. 4, а дополнительно построена цепь размерных линий для внутренних промежуточных волн. Для этого первоначально построена первая за первой стойкой размерная сплошная линия между удовлетворительно фиксируемыми на фотографии двумя промежуточными волнами. Затем определены пропорциональным пересчётом значений размерной цепи расходящихся волн и построены остальные линии размерной цепи внутренних промежуточных волн. Результаты такого построения оказались удовлетворительными, и на рис. 5, а было продолжено построение размерных цепей для прочих структурных составляющих волн. Так, для тыльной зоны волн построена первая от осевой линии расположения стоек размерная цепь, для фронтальной зоны волн – третья от осевой линии стоек, а для зоны концов расходящихся волн – четвёртая от осевой стоек размерная цепь. Для лучшего восприятия части волновой картины непосредственно у первой стойки на рис. 5, б она дана в увеличенном масштабе. Отметим, что на фотоснимке из работы [9] у волновой картины от самоходной модели судна (рис. 6, а) также удовлетворительно фиксируются промежуточные внутренние волны меньшей высоты по сравнению с основными.



а



б

Рис. 6. Волновая картина у самоходной модели судна:
а – без графического построения; б – графическая обработка

С целью проверки выявленной позиции нахождения фиктивной точки зарождения волновой картины судна на расстоянии одной волны от вершины первой фиксируемой (подпорной) волны на рис. 6, б сделаны следующие построения. Отметим, что вследствие деформации первой волны судном положение её вершины может не достаточно точно определяться визуально и сколько-нибудь достоверно находится лишь прогнозом по следующим по ходу волнам. Поэтому порядок построений на данном фотоснимке предполагал прогноз плохо фиксируемых вершин волн непосредственно у модели и оценку удовлетворительности результата на непротиворечивость ранее установленной позиции. Изначально были нанесены белая штрихпунктирная линия в ДП модели примерно на уровне поверхности воды и пунктирные линии, ограничивающие волновое поле, по левому борту тёмного цвета, а по правому – белого. Затем по линии в ДП

построены четыре чёрных размерных линии между удовлетворительно фиксируемыми вершинами поперечных волн и спрогнозированные недостающие размерные линии до точки пересечения пунктирных линий границ волнового поля. Спрогнозированные, уже пунктирные, размерные линии в пределах корпуса модели взяты светлыми, а за пределами корпуса для улучшения считывания использована комбинированная частично тёмная, частично светлая пунктирная размерная линия. Результат построения показался не противоречащим ранее зафиксированной закономерности нахождения фиктивной точки источника корабельной системы волн. Дополнительно отметим, что заранее нельзя было утверждать, насколько точно совпадают по фазе вершины волн, индуцируемые носовой и кормовой оконечностями модели, и потому сделанные построения в первую очередь были призваны для критической оценки проверяемой позиции и возможного выявления каких-то новых моментов. Удовлетворительный результат построений (рис. 6, б) нацелил на дальнейший анализ.

Все представленные фотоснимки, за исключением рис. 2 и 6, сделаны в опытовом бассейне Сибирского государственного университета водного транспорта (в то время Новосибирской академии водного транспорта) в 2006 г. Отметим, что естественным образом возникшая на поверхности воды опытового бассейна тонкая плёнка, получившая в результате ранее сделанных прогонок направленную структуру вдоль бассейна, позволила (неожиданно) лучше визуализировать деформацию свободной поверхности воды, получить более очерченные её формы в условиях созданного освещения.

С целью проверки наличия некоторых полученных закономерностей формирования волнового поля пары стоек при иной скорости движения взяты в рассмотрение другие фотоизображения и с несколько другого ракурса (рис. 7 и 8).

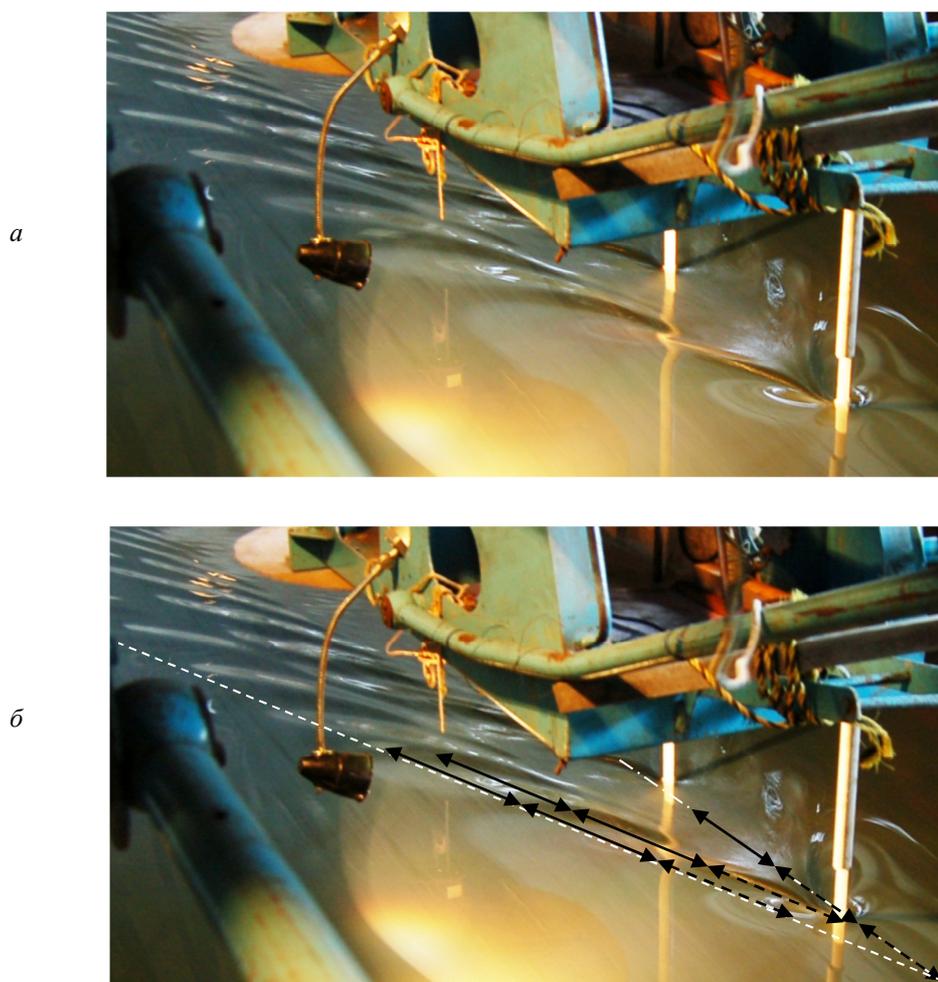


Рис. 7. Волновое поле от двух последовательно движущихся стоек острым концом каплевидного поперечного сечения вперёд:
а – без графического построения; *б* – с графической проработкой



а



б

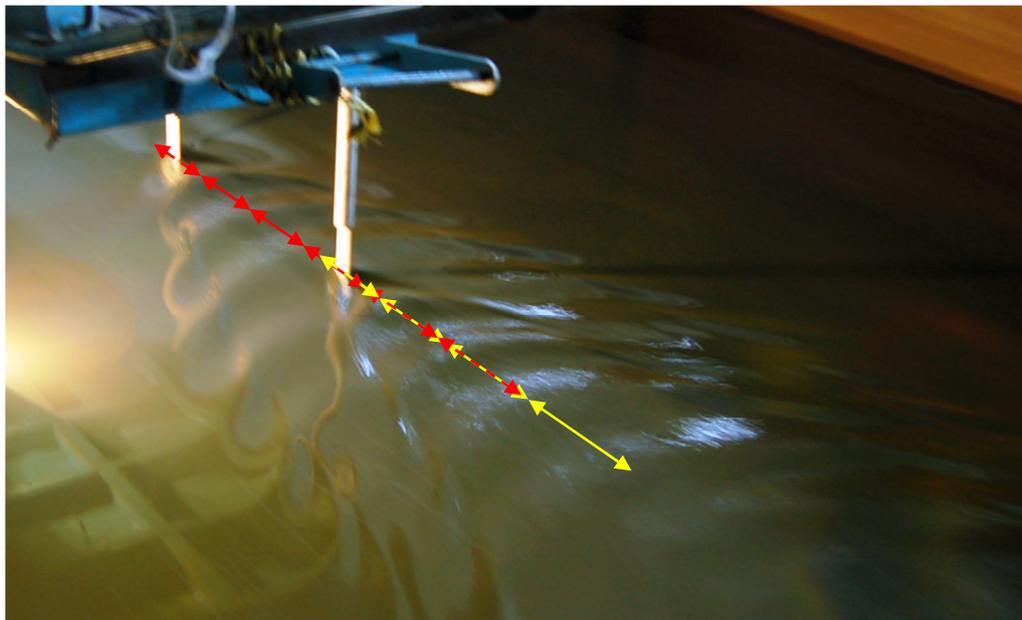
Рис. 8. Волновое поле от двух последовательно движущихся стоек острым концом каплевидного поперечного сечения вперёд с наименьшей из представленных фотодокументов скоростью:
а – без графического построения; б – с графической проработкой

Как и ранее, на рис. 7, а, 8, а приведены фотоснимки без построений, а на рис. 7, б, 8, б – с дополнительными графическими построениями. На рис. 7, б изначально построены осевая линия и линия внешней границы фиксируемого поля волн. Далее нанесены сплошные размерные линии между удовлетворительно фиксируемыми вершинами расходящихся волн параллельно внешней границе, при этом их размер с данного ракурса оказался одинаковой длины. Полученное начало размерной цепи длин волн было продолжено по направлению движения на длину волны, конец этой дополнительной, уже пунктирной, размерной линии пришёлся на вершину подпорной волны. Затем на осевой линии построена сплошная размерная линия между вершинами первой и второй после подпорной волны поперечными волнами и дважды отложена уже в пунктирном исполнении в направлении движения. Исходя из того, что длина размерных линий между расходящимися волнами на данном фотоснимке оказалась одинаковой, очевидно, из-за выбранного ракурса, то и длина пунктирных размерных линий по осевой была принята равной длине отложенной по ней сплошной размерной линии. В результате конец пунктирной линии перед передней стойкой попал в точку пересечения осевой линии и линии внешней границы.

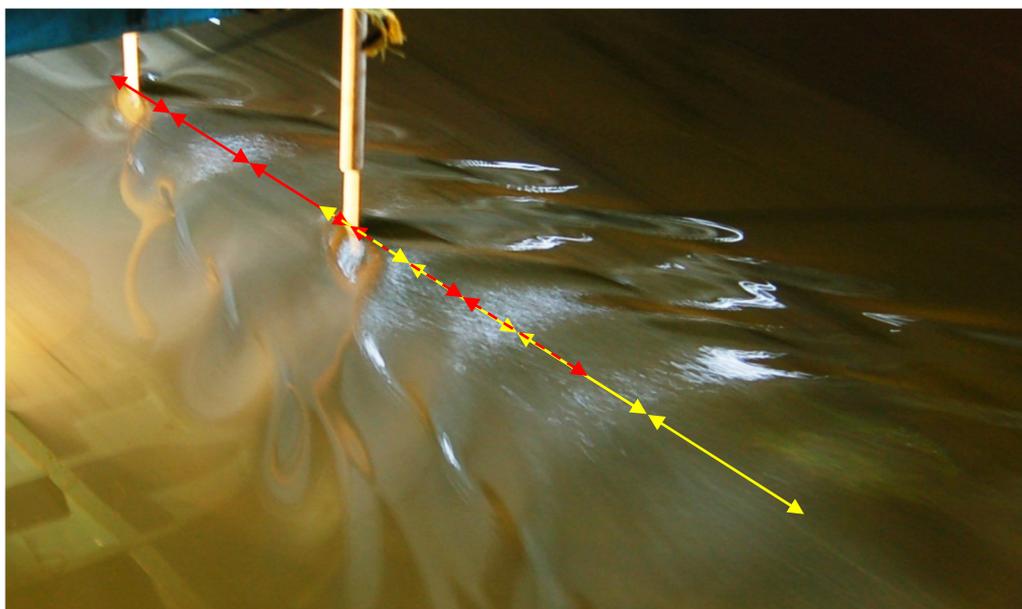
На рис. 8 скорость движения существенно ниже, чем в предыдущих случаях, что привело к увеличению числа волн между стойками. На рис. 8, а хорошо фиксируется сглаживание волновой картины вдоль связывающей стойки осевой (не показана). При этом непосредственно около осевой имеет место понижение уровня поверхности в форме клина, исходящего от первой стойки. В остальной зоне клина, расходящегося под существенно большим углом к осевой от первой стойки, имеет место повышенный уровень поверхности и, как уже указывалось, со сглаживанием волнового поля. На рис. 8, б отмечены чёрными сплошными отрезками на штрихпунктирной осевой белой линии вершины поперечных волн, считываемые по общему восприятию волновой картины. Между отрезками построены вдоль осевой размерные линии

чёрного цвета, затем спрогнозированы и отложены пунктирные размерные линии: две – по ходу, одна – против движения. Конец носовой спрогнозированной размерной линии совпал с местом пересечения осевой и пунктирной линии (отмечен горизонтальным чёрным отрезком), которая проведена по границе фронта расходящихся волн. То есть и в данном случае вполне подтверждается возможность нахождения фиктивного импульса системы волн вперёд на одну длину волны от подпорной у передней стойки.

Представим фотоснимки волновой картины от двух последовательно расположенных стоек, движущихся тупым концом поперечного сечения вперёд (рис. 9–11).



a



б

Рис. 9. Графическая обработка снимков волновых картин двух движущихся последовательно стоек тупым концом каплевидного поперечного сечения вперёд:
a – задняя стойка находится во впадине волны от первой стойки;
б – задняя стойка находится около вершины волны от первой стойки



Рис. 10. Фотоизображение волновой картины у двух движущихся последовательно стоек тупым концом каплевидного поперечного сечения вперёд



Рис. 11. Фотография волновой картины двух движущихся последовательно стоек с видом сбоку по ходу движения тупым концом каплевидного поперечного сечения вперёд

Из сопоставления рис. 3 и рис. 8 заключаем, что волновые картины при смене направления движения стоек не изменились. При этом как на рис. 3, так и на рис. 9, 10 удовлетворительно фиксируется окончание вершин волн в поперечном направлении от направления движения в виде пологих воронок. Наиболее удалённая от линии движения стоек граница воронок примерно совпадает с уровнем невозмущенной жидкости и по мере приближения к линии движения стоек превосходит этот уровень, при этом задняя по ходу движения часть границы воронки образует, по-видимому, внутреннюю (между основными волнами) дополнительную волну. При частичном наложении задней части воронки во впадину следующей волны фиксируется повышение уровня внутренних промежуточных волн, которое особенно хорошо видно на рис. 4, б.

В работе [13] отмечено совпадение фазы волн от обеих стоек при нахождении задней по ходу движения стойки во впадине волны, идущей от передней стойки (рис. 8, а). В противовес этому, как представлено на рис. 3, где задняя стойка расположена на вершине волны, и рис. 8, б, где задняя стойка располагается близко к вершине волны от первой стойки, получено смещение волн между стойками по фазе примерно на половину длины волны. Возможно, что похожий эффект и привёл в случае рис. 2 к сглаживанию поперечных волн волновой картины за кормой судна.

С целью пояснить указанный эффект произведём графические построения на рис. 9. Вдоль осевой между стойками (удалена) построим размерные линии идущих волн от передней стойки тёмным цветом, а от задней стойки – светлым цветом. При этом по три размерные линии, зафиксированные между последовательно расположенными вершинами волн, изображены сплошными линиями, а прогнозируемые – пунктирными. В обоих случаях, как на рис. 9, а, так и на рис. 9, б, положение одной из крайних вершин для цепи сплошных размерных линий пришлось восстанавливать из дополнительных построений или соображений. Так, на рис. 9, а вершина волны от передней стойки, находящаяся непосредственно за задней стойкой, восстановлена исходя из мысленного воссоздания профиля этой волны по сохранившимся ветвям этой волны вне волнового поля задней стойки и характера волнового поля от первой стойки.

На рис. 9, б вершина подпорной волны не видна и принята примерно в том же месте, как и на рис. 9, а. Остальные, уже пунктирные, размерные линии спрогнозированы по построенным сплошным линиям. Согласно рис. 9, а зафиксированные за задней стойкой вершины волн оказались близки по положению спрогнозированным вершинам волн от передней стойки. В то же время вершины спрогнозированных волн от передней стойки на рис. 9, б пришлось в пролет между фиксируемыми вершинами волн от задней стойки. При очевидно возможных погрешностях произведённых построений, отсутствии информации стадии движения (при равномерном поступательном движении или, может, торможении тележки) они, по нашему мнению, удовлетворительно проиллюстрировали качественный механизм сглаживания волн при наличии двух источников волнообразования.

При пятикратном увеличении, особенно рис. 9, б, заметно, что поток от подпорных волн пересекает первую поперечную за стойками волну, приходит к зоне расходящихся волн близко за вершиной второй после подпорной волны и, кроме того, несколько сглаживает волновое поле внутри переходной зоны, отходящей от стоек. При этом сходящие со стоек потоки уже к вершине первой поперечной волны расходятся с каждой стороны стойки к зоне расходящихся волн.

То же, на наш взгляд, фиксируется и на рис. 10 при скорости движения существенно выше, чем в случае рис. 9 (приводится без графических построений), где фиксируется незначительная деформация сходящих со стойки потоков от потока с подпорных волн стоек.

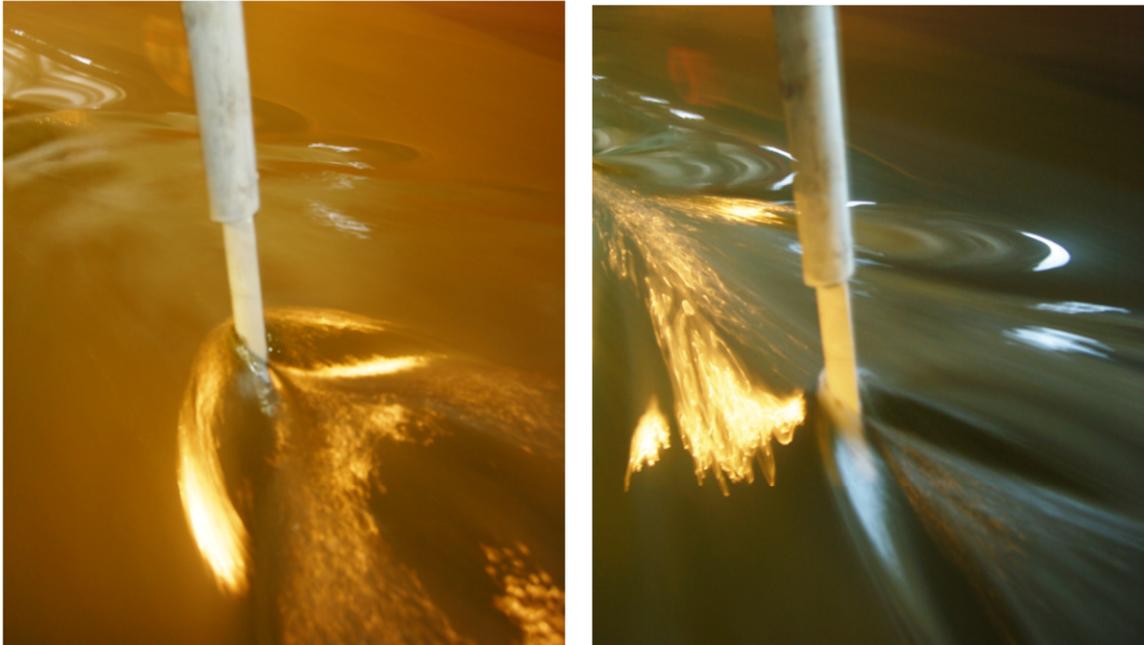
Аналогичную картину можно увидеть и на рис. 11, где дано фотоизображение волновой картины от двух последовательных стоек с видом сбоку по ходу движения (с данного ракурса съёмки обманчиво считывается уклон водной поверхности).

На рис. 11 удовлетворительно фиксируются, особенно в отсветах и отражении стоек, капиллярные волны. Эти капиллярные волны отходят фронтально от потоков подпорной волны, сходящих со стоек и разошедшихся потоков, и занимают поле перед расходящимися волнами наружу основной волновой картины. Отметим, что поток подпорной волны и сходящий со стойки поток показался, на наш взгляд, расслоившимся с добавлением в них элементов от потока, поднявшегося по стойке. Это заметно у задней стойки на первой после неё поперечной волне, где более турбулизированный поток поднявшейся воды по стойке потерял энергию движения в поперечном направлении раньше, чем достиг границы зоны расходящихся волн. В это место потери энергии сходящего со стойки потока поднявшейся воды пришёл и поток от поднявшейся воды, по характеру соответствующий потоку подпорной волны. Возможно, эта часть потока, как у подпорной волны, так и у сходящих со второй стойки, обеспечена наличием более турбулизированного поверхностного слоя, продуцированного первой стойкой. Анализируя представленные волновые картины, можно допустить, что потоки подпорной и сходящих волн сходятся на некотором удалении за стойками, как правило, в зоне границы расходящихся волн, участвуя в её формировании.

Рассмотрим волновые картины и их потоки у задней стойки при разных скоростях движения в увеличенном масштабе (рис. 12).

При малой скорости движения (рис. 12, а) видим подпорную волну со скобообразным вихрем, близким к U-образной форме, умеренный подъём вытесняемой жидкости по стойке. При этом не очень устойчивые сходящие со стойки потоки, которые достаточно близко от стойки по первой после неё поперечной волне начинают расходиться, а также расходится в разные стороны по первой поперечной волне и поток, идущий снизу между и из-под сходящих со стойки потоков. Стойка входит в скобообразный вихрь примерно на половину его толщины. Также можно фиксировать малые перемещения отдельных элементов указанных потоков у стойки, в частности струек и капелек. На рис. 12, б при несколько большей скорости движения поднявшийся по стойке поток несколько выше подпорной волны расходится относительно неё на части

как перед ней, так после неё по ходу движения. Потери устойчивости потока сразу около стойки, как это наблюдается в случае рис. 12, *а*, нет. Стойка входит в скобообразный вихрь, уже близкий к V-образной форме, почти на всю его толщину. На рис. 12, *б* представлена фотография движения задней стойки с большой скоростью. Здесь фиксируется значительный теряющий устойчивость поток подъёма по стойке при относительно невысоких уровнях самой системы волн, которому некоторым образом, возможно, способствовало и утолщение пленки на поверхности. Однако существенность подъёма жидкости по стойке при создании удельно малой по высоте основного поля волновой картины при этой, уже весьма высокой, скорости движения вполне может быть зафиксирована. Разветвляющиеся сходящиеся потоки здесь вполне удовлетворительно фиксируются, а вот часть поднявшегося по стойке потока с характером (кинематикой) движения как бы подпорной волны, очевидно, не фиксируется.



а

б



в

Рис. 12. Волновая картина у задней стойки при разных скоростях движения пары стоек тупым концом каплевидного поперечного сечения вперёд: *а* – меньшая скорость движения; *б* – средняя скорость движения; *в* – высокая скорость движения

Согласно рис. 12 угол раствора клина внешней границы системы волн уменьшается с увеличением скорости, что было зафиксировано ранее М. Рабаудом и Ф. Мойси в работах [14, 15]. Отметим, что на рис. 12, *а, б* удовлетворительно фиксируются и оговоренные выше воронки окончания волн в поперечном направлении.

Заключение

Получены следующие результаты по анализу волновых картин при движении судна, модели судна и пары последовательно идущих стоек каплевидной формы:

1. Установлено нахождение фиктивной (или мнимой, или виртуальной) точки расположения носового источника кельвиновской системы волн на расстоянии одной длины волны от вершины первой носовой (подпорной) волны у корабельной системы волн;

2. Зафиксировано равенство длин поперечных волн вдоль диаметральной плоскости судна длинам расходящихся волн вдоль их внешней границы;

3. Установлено сохранение закономерностей (пункты 1, 2) и для случая стоек;

4. Посредством графических построений произведена оценка наложения волновых картин от передней и задней стоек (возбуждающих точечные источники системы волн), последовательно идущих стоек в зависимости от попадания задней стойки в волновое поле от передней стойки, качественно проиллюстрирована закономерность получения совпадения и смещения фаз их волновых полей;

5. Зафиксировано наличие в волновой картине стоек и модели судна дополнительных структурных элементов волн, в первую очередь связанных с образованием воронок на концах вершин отдельных волн в поперечном направлении к направлению движения;

6. Установлено, что потоки у подпорной волны и сходящихся со стойки от поднимающейся по стойке жидкости сходятся у внешней границы внешней зоны расходящихся волн. При этом в случае разделения этих потоков по уровню турбулизации у более турбулизованной их части возможно преждевременное схождение по некоторой границе внутри зоны кельвиновской системы волн.

Допустимо, на наш взгляд, предположить, что дальнейший анализ волновых полей от простых источников, стоек и пластин позволит утвердиться, а может, и опровергнуть установленные закономерности, и, возможно, выявить ещё не установленные. При этом вполне допустима возможность распространения подобных закономерностей и на такие объекты сложной формы, как суда. Перспективным видится и установление зависимостей формы оконечностей судна и приведённых фиктивных (или мнимых, или виртуальных) точечных источников волнообразования у оконечностей корпуса, по анализу волновых картин используя подход, представленный на рис. 2. Приведённые фотоматериалы без дополнительных графических построений или с незначительными построениями позволят повторить произведённые построения и предоставят возможность более наблюдательным исследователям найти новые закономерности.

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.* Справ. по теории корабля. Т. 1. Гидромеханика. Соппротивление 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. *Newman J. N., Plesset M. S., Wu T. Y., Droroff S. W.* Eighth Symposium on Naval Hydrodynamics. Washington: U. S. Govt. Printing Office, 1970. P. 519–545.
7. *Альбом течений жидкости и газа* / сост. М. Ван-Дайк. М.: Мир, 1986. 184 с.
8. *Готман А. Ш.* Изучение вихревого сопротивления водоизмещающих судов // Мор. интеллектуал. технологии. 2013. № 4 (22). С. 11–19.
9. *Храмушин В. Н., Антоненко С. В., Комарицын А. А., Бровка П. Ф., Втюрина А. С., Красный М. Л., Малащенко А. Е., Недорез Ю. И., Солдатенков А. Е., Суров О. Э., Файн А. В., Шустин В. А.* История штормовой мореходности (от древности до наших дней). Южно-Сахалинск: Сахалин. книж. изд-во, 2004. 288 с.
10. *Thomson W. (Lord Kelvin).* On the waves produced by a single impulse in water of any depth, or in a dispersive medium // Proceedings of the Royal Society. 1887. Vol. 42 A. P. 80–83.

11. Аржанников А. В., Котельников И. А. Метод решения нестационарной задачи возбуждения корабельных волн подводным объектом // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер.: Физика. 2015. Т. 10. Вып. 4. С. 43–59.
12. Готман А. Ш., Бимбереков П. А., Кононенко А. Ю., Титов М. А., Азимбаев М. Т., Крылова Е. Н. Численные и экспериментальные исследования механизма влияния вязкости на корабельные волны // Мор. вестн. 2007. № 2 (22). С. 76–79.
13. Бимбереков П. А. Экспериментальные исследования к вопросу моделирования корабельных волн и расчёту 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: LJJournal, 2018. С. 4–14.
14. Rabaud M., Moisy F. Ship Wakes: Kelvin or Mach Angle? // Physical Review Letters. 2013. May. Vol. 110. P. 214503.
15. Rabaud M., Moisy F. Narrow ship wakes and wave drag for planing hulls // Ocean Engineering. 2014. Vol. 90. P. 34–38.

Статья поступила в редакцию 04.07.2019

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.



GRAPHICAL ANALYSIS OF FREE-SURFACE WAVE FIELDS FROM MOVING SHIPS AND A PAIR OF CONSECUTIVE POSTS

P. A. Bimberekov

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

Abstract. The paper presents a comparison of the photographic material of the wave patterns resulted from the movement of a ship in situ and a model ship, as well as from two consecutive posts, their regularities being found through graphical processing. The possibility to find the fore imaginary source of Kelvin wave pattern forming the ship's wave system is given at a distance of one wavelength before the top of the bow retaining wave. The equality of the length of transverse waves and divergent waves along the outer boundaries of the latter zone is fixed. It has been assumed that the intermediate waves generated between the main waves in the model ship and the posts are regular, imposition of wave patterns in a pair of consistently moving racks depending on the hit of the rear rack in the wave field of the first rack has been stated. Regularly occurring flows around moving posts are discussed. The bow and stern system of Kelvin waves in a ship wave system has been illustrated (the angle of the midpoint of diverging wave crests with the ship's diametrical plane and the angle of diverging wave crests with the ship's diametrical plane). The photographs presented were taken in the experimental tank of Siberian State University of Water Transport (Novosibirsk State Academy of Water Transport) in 2006. A thin film naturally generated on the water surface of the experimental tank and given a structure directed along the tank due to previous runs helped to visualize the distortion of the free water surface in better quality and to obtain clearly outlined contours in lighting.

Key words: ship wave system, wave field, wave field structure, graphic processing, guttate cross section.

For citation: Bimberekov P. A. Graphical analysis of free-surface wave fields from moving ships and a pair of consecutive posts. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;4:7-22. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-7-22.

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]. Leninrad, 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. Kadomcev B. B., Rydnik 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. Newman J. N., Plesset M. S., Wu T. Y., Droroff S. W. *Eighth Symposium of Naval Hydrodynamics*. Washington, U. S. Govt. Printing Office, 1970. P. 519-545.
7. *Al'bom techenij zhidkosti i gaza* [Album of fluid and gas flow]. Sostavitel' M. Van-Dajk. Moscow, Mir Publ., 1986. 184 p.
8. Gotman A. Sh. Izuchenie vihrevogo soprotivleniya vodoizmeshchayushchih sudov [Studying eddy resistance of displacement vessels]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2013, no. 4 (22), pp. 11-19.
9. Hramushin V. N., Antonenko S. V., Komariyyn A. A., Brovko P. F., Vtyurina A. S., Krasnyj M. L., Malashenko A. E., Nedorez Yu. I., Soldatenkov A. E., Surov O. E., Fajn A. V., Shustin V. A. *Istoriya shtormovoj morekhodnosti (ot drevnosti do nashih dnei)* [History of stormy seaworthiness (from antiquity to present day)]. Yuzhno-Sahalinsk, Sahalinskoe knizhnoe izd-vo, 2004. 288 p.
10. Thomson W. (Lord Kelvin). On the waves produced by a single impulse in water of any depth, or in a dispersive medium. *Proceedings of the Royal Society*, 1887, vol. 42 A, pp. 80-83.
11. Arzhannikov A. V., Kotelnikov I. A. Metod resheniya nestacionarnoj zadachi vozbuzhdeniya korabel'nyh voln podvodnym ob'ektom [Method of solving nonstationary problem of excitation of ship waves by underwater object]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika*, 2015, vol. 10, iss. 4, pp. 43-59.
12. Gotman A. Sh., Bimberekov P. A., Kononenko A. Yu., Titov M. A., Azimbaev M. T., Krylova E. N. Chislennye i eksperimental'nye issledovaniya mekhanizma vliyaniya vyazkosti na korabel'nye volny [Numerical and experimental studies of mechanism of viscosity influence on ship waves]. *Morskoj vestnik*, 2007, no. 2 (22), pp. 76-79.
13. 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.
14. Rabaud M., Moisy F. Ship Wakes: Kelvin or Mach Angle? *Physical Review Letters*, 2013, May, vol. 110, p. 214503.
15. Rabaud M., Moisy F. Narrow ship wakes and wave drag for planing hulls. *Ocean Engineering*, 2014, vol. 90, pp. 34-38.

The article submitted to the editors 04.07.2019

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 a Ship, Shipbuilding and Technology of Materials; bimberekov@yandex.ru.

