

## ИСТОРИЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

УДК 531.534

### Исследования сопротивления жидкости в работах Шарля Боссю

П. Е. Левковский<sup>1</sup>, В. И. Яковлев<sup>2</sup>

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева 15

<sup>1</sup>plevkovsky@mail.ru; тел. +7 (909) 119 15 10

<sup>2</sup>iakovlev@psu.ru; (342) 2 396-298

Представлен анализ экспериментальных исследований сопротивления жидкости на примере работ Шарля Боссю (XVIII в.). Эксперименты проводились с целью верификации ключевых положений теории сопротивления Ньютона, а также для разработки практических рекомендаций по снижению сопротивления при осуществлении навигации. Методика проведения экспериментов Шарля Боссю была образцом экспериментальных исследований того времени. Ценность результатов экспериментов состояла в точности измерений и универсальности полученных данных, что позволило использовать их при создании математической теории вязкой жидкости в XIX в.

**Ключевые слова:** Шарль Боссю; Жан Лерон Даламбер; гидродинамика XVIII века; теория сопротивления движущихся тел Ньютона; эксперименты по сопротивлению жидкости.

#### Введение

Среди множества прикладных задач, занимавших математиков XVII-XVIII веков, были такие, которые послужили своеобразным катализатором развития отдельных отраслей знаний. Например, решение проблемы движения тела, брошенного под углом к горизонту, способствовало развитию баллистики, решение проблемы ориентации судов на море – развитию астронавигации. А толчком к развитию гидродинамики послужило решение насущной проблемы XVIII в. – проблемы сопротивления жидкости.

Одним из первых исследователей сопротивления стал И. Ньютон, который рассматривал сопротивление как газообразных (воздух), так и жидких сред с различной вязкостью (вода, масло, ртуть). При создании

теории сопротивления жидкостей Ньютон исходил, прежде всего, из результатов собственных экспериментов, позволивших ему установить основные факторы, влияющие на величину сопротивления (скорость и форма тела, испытывающего сопротивление). Ученый рассматривал сопротивление как результат столкновения потока частиц с внешней преградой, которую частицы огибали в горизонтальной плоскости после соударения. Ньютон рассчитал, что сопротивление, которое испытывает цилиндр, движущийся в жидкости, равно весу цилиндра жидкости с таким же основанием и высотой, равной половине высоты, с которой должно упасть тело, чтобы достичь скорости движения цилиндра в жидкости. Другими словами, сопротивление одинаково при различных высотах цилиндра и пропорционально квадрату скорости движения цилиндра и площади его основания [1, 2].

В целом, теория Ньютона достаточно точно описывала сопротивление тел классической формы (шар, эллипсоид, цилиндр), полностью погруженных в жидкость. Однако при проведении экспериментов над более сложными телами (параллелепипедом, призмой), у которых каждая грань испытывала разное сопротивление, расхождение теоретически рассчитанного сопротивления с результатами экспериментальных данных было значительным. Причина подобного расхождения не могла быть объяснена исключительно погрешностью измерений, ошибочным оказался сам закон сопротивления тела, движущегося под углом к поверхности, гласивший, что сопротивление пропорционально квадрату скорости потока жидкости, умноженной на квадрат синуса угла наклона потока к движущейся поверхности:  $R \sim V^2 \cdot \sin^2 \alpha$ .

Одним из первых расхождение между теорией Ньютона и результатами проводимых экспериментов заметил Даниил Бернулли. Ученый внес некоторые уточнения в закон сопротивления, однако создать теорию, которая бы разрешила противоречия закона сопротивления жидкости Ньютона, ему не удалось [2].

В дальнейшем попытки решить данную проблему предпринимались многими известными учеными XVIII в. Не доверяя результатам, полученным коллегами, собственные экспериментальные исследования проводили Борда, Чапмен, Купле, Шези, Боссю, Дюбуа, Кулон [3]. В результате возникли многочисленные частные теории, которые описывали природу сопротивления для отдельного класса объектов с существенными ограничениями (скорости, материала тела, среды, в которой происходило движение и т.д.). Однако общей теории создано не было, как не были получены ответы на многие практические вопросы в области кораблестроения, навигации, артиллерии, строения гидравлических сооружений [1].

В апреле 1775 г. министр финансов Франции Тюрго обратился в Парижскую академию наук с просьбой найти способы улучшения навигации кораблей. Развитие экономики Франции привело к увеличению объемов перевозимых грузов по рекам и каналам. Одной из основных проблем того времени была малая скорость судов, производящих такие перевозки. Низкая скорость объяснялась тем, что с увеличением скорости сопротивление резко возрастало. На узких участках рек, в каналах и вблизи портов зависимость

сопротивления от роста скорости была наиболее заметна. Несмотря на появление к тому времени большого числа теоретических и прикладных работ по навигации (П. Бугер, Л. Эйлер и др.), предложений по снижению сопротивления, способных сделать прорыв в кораблестроении, высказано не было.

Для решения задачи, поставленной министром, была избрана специальная комиссия, в состав которой вошли ведущие академики-геометры Жан Лерон Даламбер, Жан Кондорсе и Шарль Боссю [4], назначенный секретарем комиссии. После ознакомления с проблемой академики отметили, что главной причиной, приводящей к снижению скоростных характеристик судна, является сопротивление жидкости, которое и требует дополнительного экспериментального исследования. Было выделено три ключевых направления исследования:

- 1) проверка ключевых положений теории сопротивления Ньютона на основе полученных экспериментальных данных;
- 2) исследование сопротивления тела, находящегося в бесконечной жидкости;
- 3) исследование сопротивления жидкости в каналах.

При описании проведения экспериментов было решено придерживаться геометрических методов. Описание взаимодействия жидкости и движущихся в ней тел с помощью этих методов давало одно важное преимущество: являлось простым в применении, хотя и не исключало некоторых погрешностей, которыми решено было пренебречь.

В качестве теоретической базы исследования была выбрана работа Даламбера "Опыт новой теории сопротивления жидкостей" ("Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides" (Paris, 1752)), посвященная исследованию сопротивления жидкостей. Ему удалось получить как аналитическое решение, которое не требовало дифференциальных вычислений, так и численное, основанное на последовательно сходящихся рядах.

Проведением экспериментальных исследований занялись Боссю и Кондорсе на территории Королевской военно-инженерной школы в Мезьере. Эксперименты проводились при участии профессоров математики Мезьерской школы А. Лежандра и Г. Монжа, а также при поддержке адмиралтейства, которое проявило немалый интерес к исследованию.

Эксперименты проводились в течение трех месяцев (с июля по сентябрь) 1775 г. в

соответствии с заранее составленным планом, утвержденным Тюрго. Каждый проводимый эксперимент был подкреплён собственной теоретической частью и был необходим для понимания всей природы сопротивления. Целью проведения эксперимента было определение влияния одного из главных факторов на величину сопротивления, с учетом условий проведения эксперимента и влияния других, менее значимых факторов. Несмотря на то что эксперименты проводились с наибольшей возможной на тот момент точностью, их результаты зачастую опровергали фундаментальные основы теории, ставя ученых в тупик. Экспериментаторы всевозможными способами пытались уточнить результаты, иногда сталкиваясь с невозможностью проведения экспериментов с нужной точностью либо их повторения. Важной задачей в этом случае становилось выделение главных факторов, которые бы объясняли результаты и согласовывались с теорией.

Основные результаты экспериментальных исследований были изданы отдельной книгой "Новые исследования сопротивления жидкости" в 1777 г. в Париже [5].

### Постановка и проведение экспериментов

Основная часть экспериментов проводилась в бассейне военно-инженерной школы

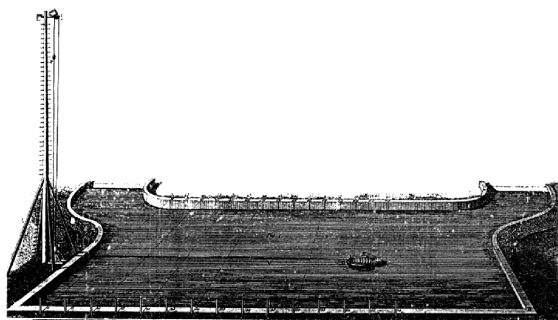


Рис. 1. Бассейн для проведения экспериментов. Уровнем воды можно управлять, спуская ее или наполняя ею бассейн через боковые отводы

города Мезьера. Бассейн длиной 100 футов (32,4 м), шириной 53 фута (17,2 м) и глубиной 6,5 фута (2,1 м) имел сложную форму (рис. 1). Такая форма бассейна позволяла проводить модельные эксперименты как на безграничной воде (открытое море), так и в стесненных условиях (узких, неглубоких каналах, на мелководных реках). В зависимости от условий

эксперимента уровнем воды могли управлять, спуская ее либо наполняя ею бассейн через боковые отводы.

Для проведения экспериментов по сопротивлению жидкости в ограниченных по ширине каналах были проведены дополнительные построения. Для этой цели в бассейне были установлены две вертикальные параллельные перегородки, которые могли сближаться или удаляться друг от друга, образуя канал большей или меньшей ширины. Глубину воды в канале изменяли в зависимости от проводимых экспериментов.

В экспериментах участвовало 22 модели кораблей, отличающихся друг от друга отдельными частями: формой кормы, носа, длиной (от 67 до 210 см), шириной (от 32,4 до 129,6 см). Корабли имели различную форму основания (четырёх-, пяти-, шестиугольник, с закругленной формой носа и прямоугольной кормой, рис. 2). При проведении экспериментов варьировался уровень погружения корабля, который определялся загрузкой корабля. Последовательное проведение серии экспериментов для макетов кораблей различной формы дало возможность определить время их движения и оценить сопротивление жидкости в зависимости от формы, размеров и погружения движущегося тела. Отдельной задачей стало определение влияния остроты носа на сопротивление плывущего корабля.

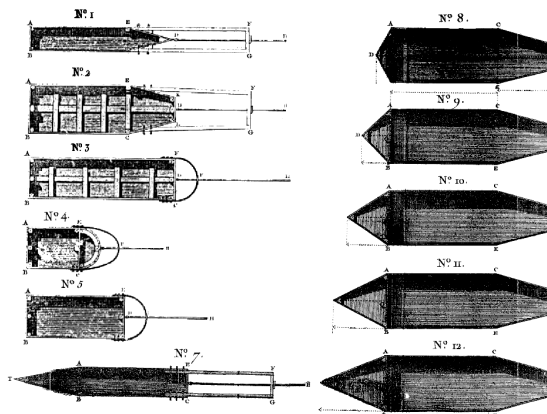


Рис. 2. Модели, используемые при проведении экспериментов Шарлем Боссю. Левая часть модели представляет собой носовую часть корабля

Для этого в экспериментах участвовали корабли №8–12 с остротой носовой части от 43,6° до 126,8°.

Эксперименты, направленные на изучение сопротивления жидкости, проводились посредством придания движения моделям, погружен-

ным в покоящуюся жидкость. Движение передавалось с помощью падающих с высоты грузов, соединенных с испытуемой моделью веревкой, перекинутой через систему блоков, состоявшую из медных роликов, легко вращающихся относительно оси. Система блоков крепилась на мачте высотой 76 футов (24,7 м), которая располагалась с торца бассейна. Падающие с мачты грузы приводили в движение корабли посредством гладкого шелкового шнура.

В процессе движения корпус корабля отклонялся от направления действия приложенной силы, поэтому управление кораблем происходило с помощью руля, установленного на корме. Управление кораблем с помощью руля на открытом, бесконечно большом пространстве воды происходило достаточно успешно, в отличие от движения в узких каналах. В последнем случае ученым приходилось неоднократно повторять эксперименты вследствие происходящих колебаний кормы корабля при прямолинейном движении, что вносило нежелательные поправки в результаты измерений.

Вдоль противоположных бортов по всей длине бассейна были нанесены метки, отстоящие друг от друга на расстоянии 5 футов (1,625 м). Полученные зоны длиной 5 футов и шириной, равной ширине бассейна, представляли собой зоны наблюдения и были предназначены для более точного вычисления времени движения корабля несколькими наблюдателями. Измерения также позволяли установить момент перехода от ускоренного к равномерному движению. Измерение времени проводили не только между пунктами в 5 футов, но и на всем пути равномерного движения. Расстояние, на котором проводили исследование движения корабля, составляло 66 футов (21,4 м). На первых 16 футах измерения не проводились, поскольку модель двигалась еще с ускорением. После прохождения этого расстояния скорость корабля становилась почти постоянной, а сопротивление – равным весу падающего груза. Все эксперименты были проведены по несколько раз для подтверждения полученных результатов.

В некоторых случаях, для большей точности, использовались средние значения полученных измерений. Обычно, на пути следования корабля в 50 футов разброс во времени для нескольких измерений составлял всего несколько долей секунды. Измерение времени движения проводилось с точностью до полусекунды.

Эксперименты проводились для двух основных режимов: плавание в неограниченном пространстве и плавание в стесненных условиях.

Проведение экспериментов в бассейне, при условии, что линия движения корабля была проведена более чем в 17 футах от берегов, явилось модельным испытанием плавания в неограниченном пространстве. В этом случае движение корабля ощущалось в границах двух футов от него, а остальное водное пространство было неподвижным. Глубину также можно было считать бесконечной, поскольку от дна корабля до дна бассейна расстояние было более четырех футов.

Большинство испытаний макетов в стесненных условиях проводилось на модели канала бесконечной длины. Для этого в бассейне были сооружены параллельные перегородки, имитирующие стенки канала. Открытые торцы канала позволяли допустить возможность неограниченной длины канала. Были также проведены эксперименты в закрытых каналах.

Всего в рамках исследования было проведено 293 эксперимента, каждый из которых был оформлен на отдельной карточке, фиксирующей данные испытуемой модели, движущий вес и время движения между пунктами отсчета 0-10-20-30-40-50 футов (рис. 3, время выражено в полусекундах, движущий вес – в марках. 1 марк равен 245 г). Результаты всех проведенных экспериментов можно разделить на четыре группы: испытания в неограниченной воде (201 эксперимент), испытания в узких бесконечных каналах (66 экспериментов), в узких ограниченных каналах (9 экспериментов), испытания дополнительных моделей (17 экспериментов).

**EXPÉRIENCE XCIV.**

VAISSEAU N <sup>o</sup> . 9.		POIDS MOTEUR = 24 marcs.			
haut. de la flottaison = 1 pied.		remou central = 28 lig.			
remou latéral = 11 lig.					
Nombre de pieds parcourus.	0	10	20	30	50
Temps du mouvement en de mi-secondes.	0	8,36	15,50	22,50	35,56

Рис. 3. Таблица результатов измерений для 94-го эксперимента с моделью корабля №9, погруженного на глубину 1 фут. Движущий вес равен 24 маркам

## Анализ результатов экспериментов

Прежде чем перейти непосредственно к анализу результатов экспериментов, Боссю сравнил их с результатами теоретических расчетов. А именно проверил справедливость трех основных положений теории сопротивления движения Ньютона: пропорциональность сопротивления квадрату скорости, площади поверхности и квадрату синуса угла, образуемого направлением потока, и касательной к поверхности движущегося тела. Помимо этого, было проведено сравнение значения сопротивления, полученного экспериментальным путем, с теоретическими расчетами согласно теории Ньютона.

**1. Пропорциональность сопротивления квадрату скорости.** По результатам наблюдений движение на последних 20 футах пути моделей во всех экспериментах было постоянным. Поэтому время, замеренное на этом пути, использовалось для расчета средней скорости движения модели. Результаты 201 эксперимента были сгруппированы в 29 отдельных таблиц (рис. 4), соответствующих разным заплывам 20 моделей кораблей. Каждая таблица содержала экспериментальные данные о времени прохождения заключительного участка (20 футов) и испытываемого моделью сопротивления, равного весу падающего с мачты груза, а также теоретически рассчитанное значение сопротивления, пропорциональное квадрату скорости движения модели.

VAISSEAUX.	EXPERIENS.	TEMPS en demifoon. fur les 20 derniers pieds.	MARCS calculés.	MARCS éprouvés.
N <sup>o</sup> . 1.	1	17,08	12...bafé.	12
	2	15,90	13,84	14
	3	14,84	15,89	16
	4	14,00	17,86	18
	5	13,50	19,21	20
	6	12,75	21,53	22
	7	12,45	22,58	24
N <sup>o</sup> . 2.	8	21,11	16,16	16
	9	18,92	20,11	20
	10	17,32	24...bafé.	24
	11	16,12	27,00	28
	12	15,12	31,49	32
	13	14,19	35,75	36
	14	13,68	38,47	40
	15	13,25	41,01	44
	16	12,59	45,42	48

Рис. 4. Таблица сравнения теоретических и экспериментальных результатов для двух моделей кораблей

Сравнивая экспериментальные результаты сопротивления с теоретическими, Боссю сделал вывод, что сопротивление, возникающее при движении тела в жидкости с различными скоростями, приблизительно равно квадратам этих скоростей. Этот закон выполнялся как для прямого сопротивления, направленного перпендикулярно поверхности, так и при взаимодействии под углом к касательной поверхности движущегося тела.

**2. Пропорциональность сопротивления площади поверхности.** Боссю отдельно рассмотрел влияния двух факторов: ширины модели и глубины ее погружения, допуская различный вклад этих величин. При сравнении результатов экспериментов для кораблей, погруженных на разную глубину, было установлено, "что сопротивление во время движения практически пропорционально площади поверхности, которая находится в воде в начальный момент движения" [5, гл. 5, §15]. Однако в действительности сопротивление оказывалось немного больше, чем теоретически рассчитанное, поскольку уровень воды впереди корабля в момент движения был выше, чем в состоянии покоя. В процессе движения в жидкости около кормовой части корабля образовывались вихри. Боссю объясняет их появление перетеканием жидкости из носовой части с повышенным уровнем в кормовую область с пониженным уровнем жидкости. При увеличении скорости корабля перепад уровней становится больше и, как следствие, увеличиваются вихри.

Увеличение ширины передней поверхности модели приводило к пропорциональному увеличению испытываемого ею сопротивления. Таким образом, и второе положение теории сопротивления Ньютона было экспериментально подтверждено.

**3. Сопротивление при наклонном воздействии.** Существующий закон пропорциональности сопротивления квадрату синуса угла между поверхностью и направлением потока ( $R \sim \sin^2 \alpha$ ) вызывал немалые споры в научном обществе середины XVIII в. Поэтому интерес многих ученых был прикован, прежде всего, к экспериментам, позволяющим пролить свет на решение данной проблемы.

Исследование этой стороны проблемы было решено начать со сравнения прямого и наклонного сопротивления схожих по форме моделей, двигающихся с одинаковой скоро-

стью (например, модели № 1 и № 7; № 2 с группой моделей № 8–12 (рис. 2)). Имея результаты экспериментов для прямого сопротивления (скорость движения и приводящий в движение вес), экспериментаторы подбирали величину веса, приводящую в движение вторую модель, которая испытывала наклонное сопротивление, таким образом, чтобы скорости движения обеих моделей совпадали. На основе данных экспериментов прямого сопротивления Боссю рассчитал значение наклонного сопротивления в соответствии с теорией Ньютона. Получившееся расхождение теоретических и экспериментальных результатов позволило сделать вывод, что "теория абсолютно неверна для определения сопротивлений при взаимодействии криволинейных поверхностей, и подходит только для очень ограниченного числа случаев, когда поверхности близки к плоскостям" [5, гл. 5, § 25]. Боссю сделал попытку эмпирическим путем установить зависимость сопротивления от угла наклона потока к поверхности тела в форме  $\text{Sin}^n \alpha$ , однако это ему не удалось в силу случайного характера изменения величины  $n$  для различных моделей кораблей. В экспериментах, проведенных с моделями № 7–12, величина  $n$  оказалась в пределах от 0,66 до 1,79.

**4. Абсолютное значение прямого сопротивления.** Одной из целей исследования Боссю стала экспериментальная проверка формулы вычисления величины прямого сопротивления, испытываемого телом при движении в жидкости, так называемая формула сопротивления Ньютона.

Полученное в результате эксперимента значение сопротивления равномерно движущейся на заключительном пути модели равнялось весу груза, приводящего модель в движение. В действительности, падающий вес "уравновешивал" не только сопротивление модели в жидкости, но и сопротивление воздуха надводной части модели, трение, которое имело место при движении троса через систему блоков, и трение модели при движении в жидкости. Отметив влияние этих факторов на результат измерения, Боссю оценил вклад этих величин и сделал соответствующие поправки. Сопротивление, которое испытывала модель в воде и воздухе, Боссю принял пропорциональным плотностям этих сред, а также площадям поверхности, которые оказались погруженными в эти среды. Величину трения движущейся модели принял пропор-

циональной ее длине. Сравнивая результаты сопротивления моделей, отличающихся только длиной, ученый заключил, что вклад трения незначительный. Таким образом, для большинства моделей и сопротивление воздуха, и трение в среде оказались пренебрежимо малыми величинами, однако уточнения сопротивления жидкости на эти величины были внесены.

Проведя расчет абсолютной величины сопротивления для нескольких моделей кораблей, движущихся с различной скоростью, и сравнив полученные значения с результатами эксперимента, Боссю пришел к выводу, что формула Ньютона в целом верно определяет значение сопротивления, а получившееся расхождение с экспериментальными данными можно объяснить погрешностью измерений.

Для определения влияния размеров канала на сопротивление движения использовалось 6 различных каналов, как стесненной ширины, так и неограниченные, бесконечной длины и ограниченные с торцов, уровень воды в канале также подвергался изменению. В экспериментах участвовали корабли различных форм (№ 1, 2, 4, 6, 7, 9, рис. 2).

Сравнение сопротивления, которое испытывает корабль в жидкости при движении в открытой воде и в канале, проходило методом подбора веса падающего груза, приводящего в движение корабль в различных условиях. При этом скорость корабля должна была быть одинаковой как при движении в канале, так и при движении в свободном бассейне на заключительных 20 футах движения. Отношение полученных движущих весов показывало то, во сколько раз сопротивление в данном канале больше, чем на свободной воде. Для каждого канала Боссю проводил эксперименты с несколькими кораблями, фиксируя это отношение и замеряя расстояние от бортов корабля до стен канала, а также глубину от днища корабля до дна водоема. В экспериментах, проводимых в каналах с открытыми торцами, коэффициент отношения сопротивлений изменялся от 1,06 до 4,25. Таким образом, Боссю экспериментально определил оптимальные размеры канала, в котором сопротивление корабля близко к его сопротивлению на открытой воде, а также максимально возможную для движения в канале величину этого соотношения. Для корабля № 1 (ширина 0,32 м) расстояние от бортов модели до стен канала составило 0,85 м, а глубина 0,095 м.

Сравнение сопротивления в закрытом канале с сопротивлением в канале бесконечной длины позволило Боссю заключить, что в широком канале (эксперимент с моделью №1) существенного различия в сопротивлении нет, однако при проведении эксперимента с моделью № 2, которая была в два раза шире, сопротивление в закрытом канале увеличилось.

Боссю, сравнив сопротивление, которое испытывает корабль при движении с различными скоростями в каналах различной ширины и глубины, пришел к выводу, что для каждого канала сопротивление пропорционально квадрату скорости движения корабля, как это было для бесконечной жидкости.

Результатом сравнения экспериментов, проведенных в неограниченной воде с плаванием в канале, стал вывод о том, что сопротивление воды в узких каналах, в общем случае, несколько больше, чем сопротивление воды на открытом пространстве, причем это относится к сопротивлениям во всех направлениях. Увеличение сопротивления в канале может быть и очень большим, в зависимости от поперечных размеров канала и формы движущегося корабля.

Подводя итог анализу экспериментов, Боссю так объясняет причину увеличения сопротивления в узких каналах: "есть расстояние под кораблем, между его бортами и берегами канала. Жидкость, на которую давит корабль при движении, проходит там, что приводит к возникновению обратных течений, которые всегда различны и могут зависеть от длины канала, движения корабля. Из-за этих обратных течений дополнительно возникает большая или меньшая прибавка к силе сопротивления" [5, гл. 6, § 13].

В 1778 г., через год после публикации работы с описанными результатами исследований, Боссю издает в сборнике Парижской академии наук статью с одноименным названием "Новые эксперименты по сопротивлению жидкостей" [6]. Статья, по сути, явилась продолжением предыдущих исследований автора в области сопротивления жидкостей при движении в них кораблей. Одними из основных вопросов исследования стали следующие:

1. Сопротивление кораблей с многогранной или криволинейной формой носа рассчитывается по тем же правилам, что и сопротивление кораблей с двугранной формой носа?

2. Влияют ли размеры кормы на сопротивление корабля?

3. Как зависит сопротивление корабля от его длины?

Для ответа на эти вопросы потребовалось более детальное изучение влияния формы носа корабля на испытываемое им сопротивление. Для экспериментального исследования Боссю выбрал 15 моделей кораблей с различной формой носа (от треугольной до полукруглой). Методика проведения экспериментов была оставлена прежней.

В новом исследовании Боссю использовал как данные экспериментов, полученных на территории Мезьерской военно-инженерной школы в 1775 г., так и новые результаты экспериментов с различными моделями кораблей.

Обобщая проведенные эксперименты, Боссю заключил, что закон сопротивления для кораблей с треугольной формой носа не является справедливым для кораблей с многоугольной либо простой формой носа, а удлиненная корма корабля заметно увеличивает его скорость. К примеру, модели с обычной формой кормы испытывают большее сопротивление, чем модели с треугольной формой кормы с углом  $48^\circ$  в отношении 1:0,89. Таким образом, Шарль Боссю экспериментально подтвердил утверждение Леонарда Эйлера о том, что для снижения сопротивления корабля необходимо заострять корму [7, с.185].

Сравнив эксперименты с существенным отличием величины отношения длины корабля к его ширине, Боссю отметил, что сопротивление становится пропорционально большим при меньшей длине корпуса корабля. Оптимальная длина для кораблей с плоским носом и скоростью в пределах от 2 до 3 футов/сек (0,65–0,97 м/с) должна быть втрое больше ширины корабля, и это отношение увеличивается с ростом скорости движения судна.

### **Заключение**

Рост промышленного производства в XVIII в. поставил перед инженерами и учеными множество важных технических задач, необходимых для дальнейшего развития. Одной из таких проблем стала проблема сопротивления жидкости движению в ней твердых тел. Многие механики – теоретики и экспериментаторы (И.Ньютон, Д.Бернулли, Л.Эйлер, Ж.Борда, Ш.Боссю, Ш. Кулон и др.) проводили глубокие исследования этой проблемы, выдвигая свои трактовки причин сопротивления, методов его расчета и снижения.

Результаты экспериментальных исследований Боссю–Кондорсе показали, что теория сопротивления, сформулированная Ньютоном, с высокой степенью точности описывает прямое сопротивление кораблей как на открытой воде, так и в канале. Ученые экспериментально подтвердили основные положения теории, а именно пропорциональность прямого сопротивления квадрату скорости и площади погруженной в жидкость поверхности движущегося тела. Величина прямого сопротивления, рассчитанная теоретически, достаточно точно соответствовала сопротивлению, полученному экспериментальным путем. Основным недостатком теории сопротивления Ньютона проявился в результате сравнения экспериментальных и расчетных данных сопротивления кораблей с угловой формой носа. Теория неверно описывала возникшее в этом случае не прямое сопротивление. Боссю предпринял попытку представить закон непрямого сопротивления в форме  $R \sim V^2 \cdot \sin^n \alpha$ , степень  $n$  найти эмпирическим путем, однако разброс величины  $n$  оказался существенным для различных углов  $\alpha$ . Вопрос оставался нерешенным.

Результаты исследования Боссю имели и практическое значение. Сравнение результатов экспериментов на открытой воде и в канале подтвердили утверждения штурманов барж о том, что суда испытывают повышенное сопротивление в периоды, когда уровень воды в реках падает. Причем значимым для величины сопротивления становится как глубина, так и ширина водоема.

Что касается нахождения оптимальной формы корпуса корабля, испытывающего наименьшее сопротивление, в частности формы носа корабля, то закон точного решения этого вопроса не дает. Боссю, однако, удалось экспериментально определить, что сужение кормы, а также увеличение длины корабля приводит к снижению сопротивления.

Развитие математического аппарата механики способствовало появлению новых аналитических теорий движения жидкостей, которые нуждались в проверке экспериментальными данными. Полученные Шарлем Боссю результаты экспериментов были применены как для проверки многочисленных гипотез движения тел в жидкости, так и при создании теории движения реальной жидкости в середине XIX в.

Экспериментальные исследования Шарля Боссю явились образцом профессионализма для экспериментаторов. Система исследований Ш. Боссю четко планировалась, эксперименты базировались на теории и были направлены на выявление влияния всевозможных факторов на результат эксперимента, при этом были выделены наиболее значимые из них. Особое внимание уделялось точности измерения результатов экспериментов.

За Шарлем Боссю – академиком и экзаменатором после издания работы "Новые исследования сопротивления жидкости" закрепилась слава одного из лучших экспериментаторов Франции, о чем свидетельствуют слова Жана Кондорсе: "Только геометр, хорошо владеющий теорией и практикой, может представить эксперименты в таком виде, в котором они должны быть, чтобы сравнить их с теорией. Только геометр может знать, какую поправку эксперимент может внести в теорию или с какой точностью эксперименты должны быть проведены, чтобы могли быть использованы в создании или проверке теории... Поэтому эксперименты, проведенные геометром, таким как Боссю, должны быть драгоценными в глазах математиков, изучающих теорию жидкостей, и механиков, занимающихся гидравликой" [8, с. 404].

### Список литературы

1. *Calero Julián Simón*. The Genesis of Fluid Mechanics, 1640–1780. Dordrecht: Springer, 2008. 517 p.
2. *Dugas René*. A History of Mechanics, translated into English by J.R. Maddox. N.Y.: Dover Publications, Inc, 1988. 661 p.
3. *Яковлев В. И.* Механики Франции XVIII в. // История науки и техники. 2006. №10. С.57–60.
4. *Levkovsky Petr E., Yakovlev Vadim I.* Charles Bossut, an outstanding French mechanic and mathematician of the XVIII century // XXIII International Congress of History of Science and Technology, 28.07–02.08.2009. Book of Abstracts and List of Participants. Budapest, 2009.
5. *D'Alembert, la Marquis de Condorcet, l'abbé Bossut*. Nouvelles expériences sur la résistance des fluides. Paris: C.-A.Jombert, 1777. 232 p.
6. *L'abbé Bossut*. Nouvelles expériences sur la résistance des fluides // Mém. Acad. roy. sci. 1777 (1781). P. 353–380.



7. *История механики с древних времен до конца XVIII века / под общ. ред. А.Т. Григорьяна и И.Б. Погребысского. М.: Наука, 1971. 298 с.*
8. *Delambre M.C. Biographical Account of Charles Bossut, by M. le Chevalier Delambre, Secretary of the Institute // Annals of Philosophy. 1815. Vol.VI. P. 401–408.*

## **Fluids resistance research in Charles Bossut's scientific papers**

**P. E. Levkovsky<sup>1</sup>, V. I. Yakovlev<sup>2</sup>**

Perm State National Research University, Russia, 614990, Perm, Bukireva st., 15

<sup>1</sup>plevkovsky@mail.ru; +7 (909) 119-15-10

<sup>2</sup>iakovlev@psu.ru; (342) 2 396-298

The article deals with the analysis of experimental researches of fluids resistance by the example of Charles Bossut's works (18-th century). The experiments were made with the purpose to verify key statements of Newton Theory of Resistance as well as for formulization of practical recommendations on decreasing of resistance during navigation. Charles Bossut's experiment method was a model of experimental researches of that time. The value of the experiments' results was in precision of measurements and generality of the obtained data, what let one use that during creation of mathematical theory of viscous fluid in 19-th century.

**Key words:** *Charles Bossut; Jean Le Rond d'Alembert; hydrodynamics in 18-th century; Newtonian theory on the resistance of fluids; experiments on the resistance of fluids.*