

ПРОВЕРКА КЛЮЧЕВЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ НЬЮТОНА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ Ш. БОССЮ

Левковский П.Е.¹, Яковлев В.И.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
Пермь, Россия (614990, Пермь, ул. Букирева 15) plevkovsky@mail.ru

В статье 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 Ш. 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.

Результаты экспериментальных исследований Ш. Боссю показали, что теория сопротивления, сформулированная И. Ньютоном, с высокой степенью точности описывает прямое сопротивление кораблей. В остальных случаях (наклонное сопротивление) расхождение теоретически рассчитанного сопротивления с результатами экспериментальных данных было значительным.

Ключевые слова: Шарль Боссю, гидродинамика XVIII века, теория сопротивления движущихся тел Ньютона, эксперименты по сопротивлению жидкости.

KEY STATEMENTS OF NEWTON THEORY OF RESISTANCE VERIFICATION IN CH. BOSSUTS EXPERIMENTAL RESEARCHES

Levkovsky P.E.¹, Yakovlev V.I.¹

¹Perm State University, Perm
Perm, Russia (614990, Perm, Bukirev str., 15) plevkovsky@mail.ru

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.

Charles Bossut's experimental researches results have proved that Newton Theory of Resistance correctly described the direct resistance of ships, in other cases (oblique resistance) the theoretical and experiments' results of resistance were different.

Keywords: Charles Bossut, hydrodynamics in 18-th century, Newtonian theory on the resistance of fluids, experiments on the resistance of fluids.

Введение

При создании теории сопротивления жидкостей И. 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 [1, 3]. 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 [4, 7].

В целом, теория Ньютона достаточно точно описывала сопротивление тел классической формы (шар, эллипсоид, цилиндр), полностью погруженных в жидкость. 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. Закон сопротивления, установленный И. Ньютоном для тела, движущегося под углом к поверхности, гласил, что сопротивление пропорционально квадрату скорости потока жидкости, умноженной на квадрат синуса угла наклона потока к движущейся поверхности: $R \sim V^2 \cdot \sin^2 \alpha$. Однако экспериментальные данные могли отличаться от теоретически рассчитанных в несколько раз. Причина подобного расхождения не могла быть объяснена исключительно погрешностью измерений.

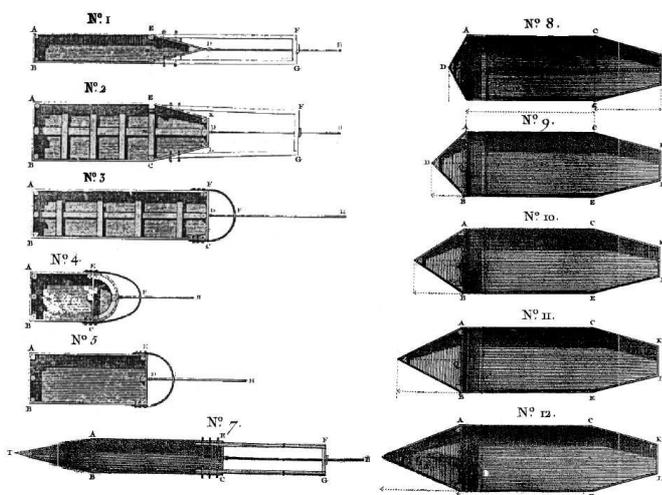
Одним из первых расхождение между теорией Ньютона и результатами проводимых экспериментов заметил Даниил Бернулли. Ученый внес некоторые уточнения в закон сопротивления, однако создать теорию, которая бы разрешила противоречия закона сопротивления жидкости Ньютона, ему не удалось [7].

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 [2]. 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 [4].

В апреле 1775 года по запросу Правительства Франции была создана комиссия, которая должна была провести экспериментальные исследования с целью улучшения навигации кораблей. В состав комиссии вошли ведущие академики-геометры Жан Лерон Даламбер, Жан Кондорсе и Шарль Боссю [9], 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. Одним из ключевых направлений исследования стала проверка ключевых положений теории сопротивления Ньютона на основе полученных экспериментальных данных.

При описании проведения экспериментов авторы придерживались геометрических методов, ввиду относительной простоты их применения, что не исключало некоторых погрешностей, которыми, однако, решено было пренебречь.

Проведением экспериментальных исследований занялись Боссю и Кондорсе на территории Королевской военно-инженерной школы в Мезьере. Эксперименты проводились в течение трех месяцев (с июля по сентябрь) 1775 года в соответствии с заранее составленным планом. Каждый проводимый эксперимент был подкреплен 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.



Модели кораблей, участвовавших в экспериментах

время движения. 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).

Результаты экспериментов Боссю сравнивал с результатами теоретических расчетов, проверяя 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,

Основные результаты экспериментальных исследований были изданы отдельной книгой «Новые исследования сопротивления жидкости» в 1777 году в Париже [5].

Всего в рамках исследования было проведено 293 эксперимента, каждый из которых был оформлен на отдельной карточке, фиксирующей данные испытуемой модели, движущий вес и

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 таблицах, 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.

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, глава 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 объяснил 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 ей 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 сопротивлений схожих по форме моделей,двигающихся с одинаковой скоростью (например, модели № 1 и № 7; № 2 с группой моделей № 8–12 (см. рисунок)). 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 $\sin^n \alpha$, 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, т.н. 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 пропорциональной 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.

Заключение

Таким образом, результаты экспериментальных исследований Ш. Боссю показали, что теория сопротивления, сформулированная Ньютоном, с высокой степенью точности описывает прямое сопротивление кораблей. Ученый экспериментально подтвердил 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.

Основной недостаток теории сопротивления Ньютона проявился в результате сравнения экспериментальных и расчетных данных сопротивления кораблей с угловой формой носа. Теория неверно описывала возникавшее в этом случае не прямое сопротивление. Ш. 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 α .

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, выделяя 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» [6, с. 404].

Список литературы

1. История механики с древних времен до конца XVIII века / Под общ. ред. А. Т. Григорьяна и И. Б. Погребыского. – М.: Наука, 1971. – 298 с.
2. Яковлев В. И. Механики Франции XVIII в. // История науки и техники. – 2006. – № 10. – С. 57-60.
3. Яковлев В. И. Начала механики. – М. – Ижевск: РХД, 2005. – 352 с.
4. Calero Julián Simón. The Genesis of Fluid Mechanics, 1640–1780. Dordrecht: Springer, 2008, 517 p.
5. D'Alembert, la Marquis de Condorcet, l'abbe Bossut. Nouvelles expériences sur la résistance des fluides. Paris: C.-A. Jombert, 1777. 232 p.
6. Delambre M.C. Biographical Account of Charles Bossut, by M. le Chevalier Delambre, Secretary of the Institute. //Annals of Philosophy. London, July to December, 1815. – Vol.VI. – P. 401–408.
7. Dugas René. A History of Mechanics, translated into English by J.R. Maddox. N.Y.: Dover Publications, Inc, 1988. 661 p.
8. L'abbe Bossut. Nouvelles expériences sur la résistance des fluides // Mém. Acad. roy. sci. Paris, 1777 (1781). P. 353–380.
9. 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.

Рецензенты:

Пенский О. Г., д.т.н., профессор кафедры «Процессов управления и информационной безопасности» ФГБОУ ВПО Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь.

Полосков И. Е., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой «Высшей математики» ФГБОУ ВПО Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь.