

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО УМЕНЬШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ (МЕТОД ПЛАНОК)

Л. Г. Лойцянский и В. А. Шваб (Ленинград)

Влияние турбулентной структуры потока на сопротивление обтекаемого тела является одним из важнейших вопросов современной гидро-аэродинамики. Классическая работа Прандтля,¹ в которой разница между коэффициентами сопротивления шара по опытам лабораторий в Париже и Геттингене была объяснена различием турбулентности потоков в рабочих участках этих труб в зависимости от расстояний обтекаемого тела до спрямляющих решеток и общей конструкцией труб (расположение успокаивающего сопла), послужила основой для ряда работ других исследователей в этом направлении. Основным гидродинамическим эффектом, имеющим следствием значительное уменьшение сопротивления обтекаемого тела, является несомненно перемещение мест отрыва струй с передней части тела (например, до поперечной потоку экваториальной плоскости цилиндра или шара) на кормовую его часть. Все стремления исследователей были направлены, главным образом, на выяснение механизма переноса мест отрыва струй, а также на установление методов искусственного смещения этих мест отрыва при значениях Рейнольдсовых чисел, для которых места отрыва остаются в естественных условиях еще на передней части обтекаемого тела.

Задача эта имеет большое практическое значение, так как решение ее означает возможность получения малых коэффициентов сопротивления при значительно меньших Рейнольдсовых числах, чем это имеет место в естественных условиях. Вместе с тем, в связи с отодвиганием мест отрыва на кормовую часть тела, мы получаем лучший охват тела потоком, а, следовательно, и лучшую теплоотдачу между потоком и обтекаемым телом. Все эти соображения заставили Физико-технический сектор ЛОТИ поставить экспериментальные работы по изучению методов искусственного улучшения обтекания тел, в частности круглых цилиндров. Результаты первых, весьма еще несовершенных, опытов по изучению одного из методов, именно, метода планок, и составляют предмет настоящей заметки.

1. Как известно, Прандтль объяснял изменение характера обтекания тела, а вместе с тем и уменьшение коэффициента сопротивления с ростом турбулентности потока тем фактом, что внешний поток турбулизует пограничный слой. Для подтверждения этого Прандтль поставил опыт с проволочным кольцом, прикрепленным к поверхности шара. Это кольцо, помещенное на передней части поверхности сферы (15° до экватора), при диаметре проволоки около 1 мм, должно было турбулизировать пограничный слой. Проведение этого опыта дало поразительный результат: сопротивление шара снижалось при наличии кольца с 0,24 до 0,058—0,09.

¹ L. Prandtl. Der Luftwiderstand an Kugeln. Göttinger Nachrichten 1914, S. 177.

О. Krell¹ и Fг. Ahlborn² выступили с критикой объяснения, даваемого Прандтлем. По их мнению турбулентность набегающего потока не может влиять на структуру пограничного слоя: изменение характера обтекания и коэффициента сопротивления является следствием изменения пограничного слоя, а внешней части потока, перераспределением давлений на поверхности тела, в частности передвижения минимума давлений. В этом смысле основной опыт с проволочным кольцом имеет совсем другой смысл, чем это полагал Прандтль. Здесь дело не в возмущении (турбулизации) слоя, а в создании мест минимумов давлений, сдвинутых ближе к экватору, чем при обычном обтекании без проволочного кольца. По опытам О. Krell³, без кольца минимум давления расположен, примерно, на угловом расстоянии 70° от критической точки разветвления (диаметр шара — 80 мм, скорость потока — 12 м/сек.); при тех же условиях с кольцом О. Krell получил два минимума давлений: один непосредственно за кольцом на 45° от критической точки, другой на самом экваторе (90°). Естественно, что при этом явление сноса мест отрыва³ привело к более плавному обтеканию шара и сдвигению мест отрыва приблизительно до 110° .

Ahlborn дает в своей работе ряд прекрасных фотографических снимков спектров обтекания цилиндра, подтверждающих то же заключение с качественной стороны.

Таким образом опыт Прандтля нельзя рассматривать как решающий в вопросе о влиянии турбулентности набегающего потока на структуру пограничного слоя. Ahlborn, показав спектры улучшенного обтекания цилиндра потоком, предварительно прошедшим сквозь решетку, состоящую из отдельных стержней прямоугольного сечения, здесь же упоминает, что эффект улучшения обтекания исчезает, если оставить только один или два стерженька из решетки, ближайšie к цилиндру; между тем как раз влияние этих стерженьков должно было турбулизировать пограничный слой.

В настоящей работе мы ограничимся исключительно рассмотрением эффекта помещения заградительных планок на поверхность цилиндра. Что касается влияния решеток, то этому вопросу будет посвящена специальная статья, в которой мы приведем результаты экспериментов в этом направлении. Нам кажется, что вопросы эти естественно следует расчленить.

2. Prandtl и Krell экспериментировали с шаром — телом, дающим возможность весьма точно подсчитывать сопротивление по давлениям, так как никакого концевго эффекта для шара нет. Гораздо хуже обстоит дело с цилиндром, где эффект подсоса на краях при малом отношении диаметра к длине весьма значителен. Ahlborn пользовался цилиндром, но наблюдал движение частиц алюминиевого порошка на поверхности воды канала, вдоль которого двигался цилиндр; таким образом для него эффект конечности цилиндра не мог иметь большого значения.

Мы при наших экспериментах находились в весьма мало благоприятных условиях. Во-первых, мы принуждены были пользоваться малой аэродинамической трубой Ленинградского Физико-механического института (замкнутая, с открытым рабочим участком), сечение рабочего участка которой всего лишь 30 см, а максимальная скорость около 30 м/сек., чтоставляло нас для получения Рейнольдсовых чисел до 100 000 перегружать сечение значительно выше нормы. Во-вторых, имея круглое сечение рабо-

¹ О. Krell. Druckverteilung an der luftumströmten Kugel. Zeitschr. f. Flugtechnik u. Motorluftschiffahrt, 1931 S. 97.

² F. Ahlborn. Turbulenz und Mechanismus des Widerstandes des Widerstandes an Kugeln und Zylindern. Zeitschrift f. techn. Physik. 1931 № 10, S. 482.

³ См. Л. Г. Лойцянский. Отрыв струй с поверхности цилиндра, обтекаемого вязкой жидкостью. Прикл. матем. и механика. Том I, вып. 1, 1933.

чего участка и помещая в него цилиндр диаметром до 30—50 мм, мы тем самым не исключали эффекта торцевого подсоса, так как вместо „бесконечного цилиндра“ мы имели цилиндр с отношением диаметра к высоте порядка 1:5 или 1:8. Все это, а также и отсутствие достаточно точной аппаратуры, заставляет нас смотреть на результаты настоящей работы с чисто качественной стороны. Дальнейшее продолжение этой работы, связанное с переходом в большую аэродинамическую трубу того же Института, даст нам возможность и количественного уточнения результатов, а также и увеличения диапазона Рейнольдсовых чисел, примерно, до 200 000.

Несмотря на вредное влияние торцевого эффекта, мы выбрали для исследования цилиндр, потому что именно эта форма представляет большой интерес для теплотехники (трубы котлов и др.); кроме того нам казалось интересным дополнить чисто описательные результаты Ahlborn'a (фотографирование спектров) хотя бы и не совсем точным, но все же количественным анализом.

Распределение давлений измерялось через отверстие на поверхности цилиндра, причем цилиндр вращался вокруг своей оси и углы расположения отверстия отсчитывались по лимбу.

Необходимость пользования одним и тем же подвижным отверстием, обусловленная малостью диаметра цилиндра (а это в свою очередь, как мы уже говорили, объяснялось малостью диаметра рабочего участка) и невозможностью нанесения ряда отверстий на поверхности цилиндра заставляла отказаться от пользования батарейным микроманометром с мгновенным наблюдением полной картины распределения давлений по поверхности. Особенно неприятно эта необходимость вращения цилиндра сказывалась на опытах с цилиндром с планками. Планки (подробнее о форме и размерах их — речь впереди) пришлось сделать подвижными по отношению к цилиндру, так чтобы при вращении цилиндра с отверстием для измерения давлений угол расположения планок по отношению к критической точке оставался постоянным. При всей тщательности подгонки планок к поверхности цилиндра все же между ними могла быть небольшая щель, несколько выравнивавшая давления перед планкой и за нею, тем более что как раз в этих двух, близких друг к другу геометрически, точках мы имели максимальную разность давлений (см. дальнейшие кривые).

В качестве измерителя давлений мы пользовались различными микроманометрами, главным образом, типов Прандтля, Фюса и наконец ЦАГИ, близкого по идее Фюссу. Скорость потока вдалеке от цилиндра измерялась обычной трубкой Прандтля. Для измерения суммарного сопротивления можно было пользоваться сравнительно грубыми весами, установленными в малой трубе для учебных целей.

3. Нами были исследованы различные формы планок, в результате мы остановились на сечении планки в виде прямоугольного треугольника, с большим катетом, направленным по поверхности цилиндра, и меньшим — перпендикулярным к поверхности, стоящим навстречу потоку. Форма этого сечения, как оказывается, не имеет большого значения; что касается высоты планки, т. е. длины меньшего катета, то, принимая во внимание толщину поверхностного слоя, ее следует выбирать равной около 3% диаметра цилиндра.

Ahlborn брал в качестве планки тонкую пластиночку — нам из конструктивных соображений, связанных с дальнейшими техническими применениями, показалась наиболее удобной формой — вышеуказанная.

Следующим важным и интересным вопросом является вопрос о расположении планок на поверхности цилиндра.

Ahlborn на своих photographиях дает примеры неправильного расположения планок, указывая, что как расположение слишком близкое к эк-

ватору, так и расположение близкое к критической точке, не дает нужного результата. Действительно, в первом случае мы помогаем отрыву струй в таком месте потока, где уже и без того создалась обстановка для отрыва, и таким образом усиливаем отрыв струй, что и приводит к плохому обтеканию со значительной вихревой областью, а следовательно и большим коэффициентом сопротивления. Во втором случае мы создаем искусственный отрыв и минимум давления за планкой в области потока слишком еще малых скоростей, вблизи ламинарного пограничного слоя. Эффект получается очень слабым и не отражается на дальнейшем поведении жидкости вблизи поверхности цилиндра. А Ниборг получил удовлетворительный эффект, помещая планку примерно на 45° от критической точки.

Мы углубили это исследование и нашли, что место расположения планки коренным образом зависит от Рейнольдсова числа потока, причем чем больше значение Re , тем меньшее значение угла расположения планки нужно брать для получения выигрыша в сопротивлении.

На рис. 1 отложены кривые сопротивления c цилиндра с планками и без планок в функции от Re , где под c понимается коэффициент в формуле сопротивления:

$$W = cS \frac{\rho V^2}{2}$$

(S — площадь миделя, V — скорость набегающего потока), а Рейнольдсово число равно:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

где d — диаметр цилиндра, ν — кинематический коэффициент вязкости.

Верхняя кривая относится к цилиндру без планок, нижние две пересекающиеся кривые соответствуют: I — планкам, расположенным под углом 40° , II — под углом 35° по отношению к критической точке.

Мы видим что, при $Re < 4,3 \cdot 10^4$ I кривая дает больший выигрыш сопротивления (около 30%), по сравнению с сопротивлением без планок, чем II; при $Re > 4,3 \cdot 10^4$, наоборот, II кривая дает лучшие результаты (почти до 50% уменьшения коэффициента сопротивления при $Re \sim 10^5$). При значениях Re , близких к $4,3 \cdot 10^4$, разницы между коэффициентами почти нет. Естественной является мысль проведения огибающей таких кривых, полученных для различных углов расположения планок, например, через 1° — 2° , и в широкой области значений Re . Такая огибающая дает возможность иметь твердое основание для выбора оптимального угла планок при заданном Re . Эту интересную кривую мы надеемся получить после проведения работы в большой аэродинамической трубе, где мы будем иметь более точные значения коэффициентов сопротивления (на весах N. P. L.) и с другой стороны будем располагать значительным диапазоном Рейнольдсовых чисел.

Высота планки, помещенной на поверхности цилиндра, имеет большое значение в получаемом эффекте уменьшения сопротивления. Кривые I, II, III сняты при установке планок с различной высотой под углом в 40° . На цилиндре с диаметром 49 мм наилучший эффект дает планка высотой в

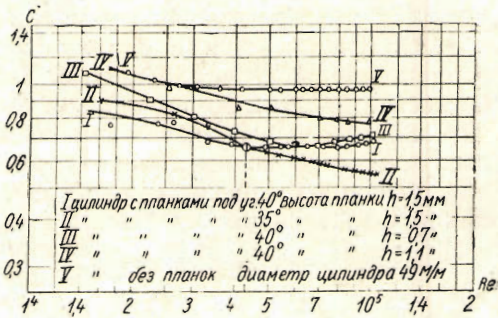


Рис. 1.

1,5 мм, меньший — с высотой 1,1 мм и совсем малый — при высоте 0,7 мм. Высота планки больше чем 1,5 мм также начинает давать отрицательный эффект на данном цилиндре.

Кроме того на рассматриваемых кривых видно, что выигрыш в сопротивлении, получаемый за счет планок, растет с Re . Конечно этот рост может идти только до второго критического значения $Re = 230 \cdot 10^3$, при котором происходит полная реконструкция потока с уменьшением коэффициента сопротивления и без применения планок. Этот результат также можно будет проверить на кривой, которую мы получим в результате дальнейших исследований при больших Re .

Полученный нами порядок уменьшения коэффициента (50%) не сколько меньше, чем в опытах Прандтля с шаром (от 50% до 75%). Объясняется это, во-первых, разными формами тел, а во-вторых, и значительно большими значениями Re , которые имел Прандтль. Кроме того в случае шара не имел место торцевой эффект.

4. Нами было снято значительное число кривых распределения давлений на цилиндре без планок и с планками. Отверстие, помощью которого получались давления на поверхности цилиндра, находилось посередине его, т. е. примерно на оси аэродинамической трубы; конечно, в сечениях, более близких к концам цилиндра, распределение давлений было иное.

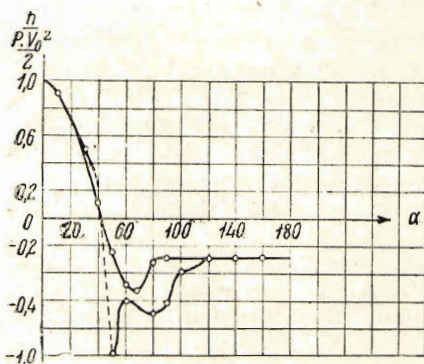


Рис. 2.

На рис. 2 показаны для сравнения кривые распределения давления на цилиндре без планок и с планками при значении $Re \sim 50\,000$.

Мы видим, что на передней стороне цилиндра до $\theta = 40^\circ$ кривые сначала мало расходятся (особенно в случае малых скоростей). Затем при наличии планки мы имеем: перед ней — увеличение давления (подпор), а за нею — быстрое падение, приводящее к разрежению примерно того же

порядка, как и динамический напор в критической точке. Далее картины давлений на цилиндр с планками и без планок резко разнятся. При отсутствии планок мы имеем минимум давлений, расположенный вблизи 65° , затем наступает почти постоянство давления за местом отрыва вблизи $82-85^\circ$. При наличии планок мы имеем два минимума: один непосредственно за планкой, другой в пункте, расположенном приблизительно около 90° . В связи с перемещением места минимума давления сносится и место отрыва струй примерно до 110° .

5. Проведенное нами исследование, несмотря на недостаточную точность эксперимента, во всяком случае показывает, что эффект применения планок весьма значителен. Опыты, качественно произведенные А. Н. И. Б. О. Г. П. О. М. на воде, проверены нами на воздухе, причем выяснены и основные количественные соотношения между характером обтекания и величиной коэффициента сопротивления; кроме того выяснены оптимальные условия применения метода планок. Наши дальнейшие работы продолжатся, во-первых, в направлении уточнения экспериментов с планками и расширения диапазона Рейнольдсовых чисел, во-вторых — в исследовании методики улучшения обтекания систем труб, и наконец, в-третьих — изучения других методов улучшения обтеканий (применение решеток и пр.).

Параллельно с этими исследованиями все время идет исследование

и теплоотдачи. Результаты этих тепловых исследований составят предмет следующих статей.

Физико-технический сектор
Лен. Теплотехн. института.
Март 1933 г.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER METHODEN ZUR KÜNSTLICHEN VERMINDERUNG DES KÖRPERWIDERSTANDES

L. Loitzansky und W. Schwab (Leningrad)

Mit der vorliegenden Arbeit beginnt eine Reihe von Untersuchungen der Methoden zur künstlichen Widerstandsverminderung.¹ Diese Arbeit ist der Leistenmethode gewidmet, die schon von Prandtl, Krell und Ahlborn untersucht wurde. Die folgenden Mitteilungen werden der Untersuchung der turbulierenden Wirkung von Gittern und andern Methoden zur Widerstandsverminderung gewidmet.

In der vorliegenden Mitteilung ist sowohl die Untersuchung der Leistenwirkung auf die Verschiebung der Ablösungsstelle und des Druckminimums als auch auf den Gesamtdruck durchgeführt, wobei die Abhängigkeit der optimalen Leistenanordnung von der Reynold'sschen Zahl festgestellt wird. Leider konnte bisher die Untersuchung nur bis $Re \approx 10^5$ durchgeführt werden. in der nächsten Abhandlung werden die Grenzen für Re bis $2,3 \cdot 10^5$ erweitert (kritisches Gebiet).

¹ Diese Untersuchungen sind von der Physikalisch-Technischen Abteilung des Wärmetechnischen Instituts zu Leningrad vorgenommen.