



Изв.вузов «ПНД», т.3, № 2, 1995

ДВЕ «ЗАДАЧКИ» (ИЗ ПРОШЛОГО)

С.П. Стрелков

История решения двух задач, связанных с колебательными явлениями в потоке воздуха. Первая задача: о колебаниях воздуха в открытой рабочей части аэродинамической трубы. Были установлены общие физические закономерности, проведены эксперименты по измерениям колебаний, разработаны практические меры устранения вибраций. Вторая задача: измерения нестационарных аэродинамических сил на колеблющейся поверхности в потоке аэродинамической трубы. Полученные результаты имели большое значение для установления точности расчетов на флаттер с применением различных аэродинамических теорий.

В начале тридцатых годов в ЦАГИ разрабатывались проекты больших аэродинамических труб, ныне труб Т-101, Т-104 и др. Все эти трубы имеют открытую рабочую часть. Начиная с 1935 года мне довелось заниматься исследованием физических причин возникновения вредных колебаний давления воздуха в таких трубах. Первые опыты с аэродинамическими трубами этого типа показали наличие сильных вибраций при определенных режимах работы трубы или в некоторых диапазонах изменения скорости потока. Вибрации при большой скорости потока довольно значительны и препятствуют нормальной работе в трубе и ближайших помещениях и даже могут угрожать целостности стенок трубы и окружающих сооружений. Вибрации или, как их тогда называли, «пульсации» наблюдались как у нас, так и за границей при пуске первых труб со свободной струей. Чисто эмпирическим путем были найдены некоторые способы ослабления пульсаций. Но физические причины и законы возникновения колебаний тогда по существу известны не были. В литературе приводились лишь сведения качественного характера и некоторые соображения о возможной физической картине со ссылкой на аналогичные с органами трубами. Так как явления в органических трубах до сих пор еще не изучены хорошо, то в ЦАГИ решено было предпринять подробное физическое исследование явления пульсаций в аэродинамических трубах со свободной струей.

В 1935 году по договору с НИИФ МГУ была организована специальная группа из физиков и сотрудников ЦАГИ, которая начала свою работу в БПТИЛ ЭАО*, в отделе К.К. Баулина, под его непосредственным наблюдением.

От МГУ в эту группу входили Г.А. Бендриков и пишущий эти строки, а ЦАГИ Э.П. Шубин (физик, только что окончивший МГУ) и Ю.Г. Захаров. На первых порах, как советовал нам К.К. Баулин, мы занялись созданием подходящих физических приборов для измерения переменного давления. Тогда не было нужных готовых приборов. Применявшейся еще в прошлом столетии «пайбой Мореля» можно измерить частоту колебаний, но измерения амплитуды и фазы были очень ненадежны.

* БПТИЛ - Бюро проектирования труб и лабораторий, ЭАО - экспериментально-аэродинамический отдел.

В то время большинство физиков работало по старинке - все приборы делали сами, сейчас только иногда приходится делать так.

Измерительные приборы разрабатывали и изготовляли сами. В основе нашего прибора лежал относительно грубый конденсаторный микрофон, пригодный для измерения статического и динамического давления в потоке воздуха (мы назвали его приемником давления). Диапазон частот был известен только ориентировочно, амплитуды неизвестны совсем. Шли практически ощупью. Регистрирующая система, превращающая давления в колебания электрического тока, была сделана при помощи радиогенератора высокой частоты с двумя контурами. Система простая и удобная, с выходом по току прямо на шлейфовый осциллограф. Простота, конечно, достигалась после длительной наладки.

Такими приборами измерялись давления в нескольких точках работающей трубы (по крайней мере, в двух) и записывались на осциллографе СИ**. Были довольно подробно исследованы колебания во всех моделях труб, стоявших в то время в «зале мелких опытов» (Т-4, Т-20, Т-23), и в трубах Т-5 и Т-1.

Часто приходилось работать по ночам, так как вначале нужно было исследовать явления в трубах без всяких демпфирующих приспособлений. Шум и вибрации в окружающих помещениях были настолько сильны, что работники института протестовали, если опыты шли днем. Кстати сказать, максимальная интенсивность шума в незадемпфированном варианте наблюдалась в трубе Т-104, она металлическая и скорость потока в ней большая. Помню, шум достигал иногда такой силы, что некоторые работники ложились на пол, не могли стоять, несмотря на то, что на всех были надеты специальные шлемы.

В результате подробных измерений амплитуды и фазы колебаний давления на различных режимах и в разных местах удалось представить картину поля колебаний давления в свободной струе, внутри различных частей обратного канала и в окружающих помещениях. Анализ поля показал: колебания в свободной струе и внутри трубы имеют различную физическую природу. В струе основные колебания гидродинамического характера, во всех остальных местах - акустические колебания вследствие сжимаемости воздуха. В свободной струе колебания давления вызваны образованием в пограничном слое струи эквидистантных кольцевых вихрей, движущихся от сопла к диффузору примерно с половинной скоростью ядра струи. Интенсивность вихрей и колебаний резко нарастает вдоль потока. Сравнение зависимостей частоты и амплитуды колебаний (в соответствующих точках) от скорости потока и числа оборотов вентилятора показало, что изучаемый процесс имеет чисто автоколебательный характер, вынужденные колебания потока около вентилятора быстро затухают и не влияют на процесс автоколебаний. Этот вывод и положен в основу разработки упрощенной теории явления и отыскания рациональных способов глушения вибраций.

Следующие этапы, довольно продолжительные, вплоть до пуска в эксплуатацию труб Т-104 и Т-101 в 1939-1940 годах, в основном были посвящены изучению особенностей вибраций в разных трубах с различным аэродинамическим контуром и устройством. Главное внимание обращалось на эффективность и целесообразность демпфирующих приспособлений, без которых невозможна эксплуатация больших труб. Основной результат - обеспечение нормальной работы важнейшего «прибора» ЦАГИ - трубы с открытой рабочей частью - был получен.

В работе некоторое время, особенно в напряженные моменты, принимали участие Н.А. Лошаков и В.П. Шальнов, сотрудники НИИФ МГУ. Мне и Г.А. Бендрикову пришлось вести эту работу до конца. В 1938 году Э.П. Шубин ушел из ЦАГИ и в работу в разное время включались Н.А. Смирнов, Н.А. Любимов, М.С. Филиппов, инженеры ЦАГИ, и техник А.М. Дыканюк.

Вспоминая пути решения первой задачи, которой мне довелось заниматься в ЦАГИ, и ту обстановку, в которой мы были тогда в ЭАО, хочется отметить особо благоприятные условия для нашего развития, тогда еще весьма «зеленых» научных работников.

Через год - полтора после начала мне пришлось фактически руководить всей работой, и, естественно, я был в очень большом затруднении. Физики-теоретики или,

** Осциллограф Сейсмологического института АН СССР

как называли выходцев из школы Манделштама, физики-«колебатели», мы вначале безнадежно плавали в аэродинамике и инженерных вопросах, в которых нужно было разбираться. Только благодаря своевременной и благожелательной помощи работников ЭАО, в первую очередь со стороны К.К.Баулина, с которыми нам приходилось тогда много общаться, нам удавалось относительно быстро устранять на ходу недостатки университетского образования. С другой стороны, у нас в запасе было только одно, правда, как показал опыт, довольно мощное оружие - хорошее знание «языка теории колебаний», которым можно пользоваться во всех разделах науки и техники. Сейчас важность этого обстоятельства всем ясна, а тогда... Но нам посчастливилось по линии «вибраций» познакомиться с рядом ведущих ученых: К.А.Ушаковым, Г.Н. Мусиняцем, Б.Н. Юревым, Б.А. Ушаковым, с тогда еще молодыми, но уже авторитетными учеными М.В. Келдышем и Г.Н. Абрамовичем. Деловое общение с ними и компетентные советы помогали решать наши задачи, а главное, учиться и учиться. Это, конечно, должен делать каждый научный работник всю жизнь. Но в молодости не всегда мы понимаем это. Некоторые наивно думают, что окончание ВУЗа или обладание кандидатской степенью делает их научными работниками.

По окончании работы с «пульсациями» в 1940 году решено было на основе опыта исследования переменных давлений в потоке создать в лаборатории № 2 группу по изучению явлений в неустановившемся потоке. В нее вошли, кроме меня, инженеры ЦАГИ: Н.А.Смирнов, Н.А. Любимов, О.А. Емельянов, Ю.Я. Запольский, М.С. Филиппов и А.М. Дыканюк. Группа была довольно хорошо по тому времени оснащена аппаратурой для измерений колебаний давления и вибраций. Имелась даже аппаратура для «мгновенного» спектрального анализа колебаний. Мы строили радужные планы дальнейших работ. Предполагалось заниматься исследованием колебаний давления на поверхности колеблющегося крыла и измерением сил, действующих на вибрирующее или мгновенно изменяющее угол атаки крыло и т.д.

Но война нарушила все наши планы. Группа была расформирована - часть перешла в лабораторию № 3, в отдел динамики М.В. Келдыша, Н.А. Смирнов был мобилизован, Ю.Я. Запольский ушел добровольцем с ополчением МГУ, О.А. Емельянов поступил в ВВА.

Прежде чем рассказывать о следующей задаче, хочу здесь остановиться особо на работе Ю.Я. Запольского, погибшего осенью 1941 года при отступлении от Ельни. Юра был освобожден от военной службы, у него в детстве была неудачно сломана рука. Он настойчиво добивался призыва в военкомате, но ему отказывали. Тогда он ушел с ополчением МГУ, с товарищами по университету. Юра успешно закончил физический факультет МГУ в 1940 году и поступил в ЦАГИ потому, что делал дипломную работу у меня на тему: «Водяная модель свободной струи аэродинамической трубы», которую он начал вместе с Л. Клячко еще в студенческом научном кружке. Это была довольно трудная экспериментальная работа с убедительными и красивыми результатами, которые были использованы в исследованиях «пульсаций». Из стекла изготовлялась геометрически подобная модель рабочего помещения аэродинамической трубы, камера, в которую входило сопло с одной стороны и часть диффузора - с другой. Струя воды протекала через камеру из вышестоящего резервуара. На поверхности струи воды образовывались кольцевые вихри. При помощи струйки чернил или краски можно сделать вихри видимыми и наблюдать за их развитием в стробоскопическом освещении. На фотографических снимках отчетливо видно и перемещение вихря со скоростью, примерно равной половине скорости струи, и увеличение размеров вихря в направлении к диффузору, и разрушение его у кромки диффузора. На модели все происходило аналогично тому, что мы наблюдали в воздушной струе аэродинамической трубы. Сжимаемость воды ничтожна, и очевидно, что она не играет никакой роли в этом явлении. Поэтому все процессы колебаний в свободной струе аэродинамической трубы мы назвали гидродинамическими. Опыты Ю.Я. Запольского дали наглядное подтверждение верности физической картины колебаний давления в аэродинамической трубе.

Следует заметить, что на водяной модели наблюдалась большая чувствительность системы вихрей к внешнему периодическому воздействию. Достаточно было неаккуратно поставить вблизи модели мотор стробоскопа, как система вихрей синхронизировалась с частотой оборотов мотора или кратной к ней («захватывалась»).

Помню, что у многих возникали сомнения в правильности *предложенных* ~~различных~~ толкований картины колебаний давления в свободной струе аэродинамической трубы. Но когда оппоненты знакомились с результатами опытов на водяной модели, то они снимали свои возражения. С.А. Христианович смотрел эти опыты в лаборатории МГУ.

Вся наша работа заключается в решении «задачек». Когда я был еще студентом и приехал домой, то мои сверстники задавали мне вопрос: «Чему тебя там учат?». Трудно было просто рассказать об университетской науке на уровне давно забытой начальной школы, поэтому обычно отвечал так: «Учат решать задачки». Можно было видеть, что спрашивающих такой ответ не устраивал. Им было непонятно, как это такой дядя занимается какими-то задачками. А по существу все было именно так: вся жизнь научного работника - это решение различных «задачек»: и больших, и сложных, и простых, и маленьких.

Я подробно рассказал о «задачке» исследования «пульсаций» и еще скажу об одной: об измерении нестационарных сил на колеблющемся крыле.

В 1940 году М.В. Келдыш пригласил меня в комиссию, которая рассматривала возможность создания универсального прибора для измерения сил, действующих в потоке на вибрирующее крыло. Не помню уже, по чьей инициативе, кажется по предложению Е.П. Гроссмана, в конструкторском отделе прорабатывали возможность создания такого прибора. Прибор в первом варианте представлял собой довольно сложную машину весом в несколько тонн. Изготовить такую машину можно было только на специальном заводе. Во время анализа проекта и довелось мне ближе познакомиться с Г.Н. Мусинянем и К.А. Ушаковым, которые принимали участие в работе комиссии. В результате детального рассмотрения проекта и всей задачи в целом все согласилось не строить универсальную машину и решать задачу путем физического эксперимента.

До этого Б.А. Ушаковым, Л.С. Поповым и Н.В. Альхимовичем была сделана небольшая простая установка для измерения колебаний подъемной силы колеблющегося крыла. Учитывая опыт создания этой установки, М.В. Келдыш предложил нам заняться аналогичными измерениями с записью колебаний на шлейфовом осциллографе. За эту работу взялся в 1940 году пришедший к нам после окончания физфака МГУ О.А. Емельянов. Он успел до начала войны провести довольно успешно первые опыты с новой установкой, спроектированной им в трубе Т-20. Труба Т-20 - это модель Т-101 (1/20). После пуска этой трубы модель была передана в полное распоряжение нашей группы. Но работать Олегу не пришлось. Он был призван в армию, поступил в Военно-воздушную академию, поехал в командировку, заболел сыпным тифом и умер.

В 1940-1941 годах М.В. Келдыш для своего отдела читал лекции по теории нестационарных аэродинамических воздействий на крыло. Все сотрудники нашей группы аккуратно посещали эти очень интересные лекции. Он излагал нестационарную теорию, используя не только вихревую модель обтекания крыла, но и потенциал скорости возмущений потока. Тогда это не было обычным изложением, и оно представлялось не только математически стройным, но и более физичным и понятным, поскольку нам теория электромагнитного поля была ближе, чем аэродинамика.

Основная цель измерения сил на колеблющемся крыле состояла в экспериментальной проверке допустимости расчетов аэродинамических сил по упрощенной теории, основанной на так называемой гипотезе стационарности. Последняя значительно проще для объяснения и давала менее сложные выражения для сил, чем «точная» теория нестационарных аэродинамических воздействий на колеблющееся крыло («нестационарная теория»). Гипотеза стационарности допускает пренебрежение влиянием следа за крылом на обтекание колеблющегося крыла. Поэтому согласно стационарной теории сила, действующая на крыло в данный момент, определяется стационарным потоком, который соответствует мгновенному значению «местных» углов атаки крыла. Более «точная» нестационарная теория основана на точном решении линейного приближения для возмущенного колебаниями потока идеальной жидкости около тонкого крыла, совершающего любые гармонические колебания. При обтекании выполняются условия Жуковского - Чаплыгина на задней кромке и возмущения достаточно малы, чтобы можно было считать законным линейное приближение.

Практически расхождение в определении сил по этим теориям заключалось в различной зависимости динамических коэффициентов от числа Струхала. При числе Струхала, равном нулю, обе теории, естественно, сходились к результату чистого обтекания в постоянном потоке. Для крутильных (вращательных) колебаний крыла различие в действующих на крыло силах и моментах становилось заметным, когда число Струхала было больше 0,25. Вообще, расхождение между двумя теориями, как показывали расчеты, могло привести к разным значениям критической скорости флаттера крыла. Тогда за рубежом критическую скорость флаттера определяли по нестационарной теории, а у нас, в основном, по стационарной. Поэтому и решено было для проверки допустимости расчетов по той или иной теории обратиться к прямым опытам. Война нарушила все эти планы, и только в 1947 году мы вернулись к решению поставленной задачи.

За работу по экспериментальному определению переменных аэродинамических сил взялся поступивший в ЦАГИ после окончания Казанского авиационного института Н.Н. Дорехин. После подробного анализа довоенных опытов и испытания целого ряда предварительных вариантов установки решено было применить появившиеся во время войны тензодатчики для измерения переменных сил, действующих на колеблющееся крыло. Далеко не сразу, но в конце концов удалось получить хорошие записи колебаний, в которых полезные сигналы значительно превышали неизбежный средний уровень «шумов и помех». Измерения колебаний подъемной силы и момента при вращательных колебаниях модели крыла в различных вариантах - крыла с шайбами («плоский» поток), конечного крыла, моделей разных масштабов (трубы Т-20, Т-102), в условиях различных амплитуд и т. д. - показали в основном следующее. Нестационарная теория более правильно определяет значения переменных сил для крыла бесконечного размаха. Однако практически для чисел Струхала в области от 0 до 0,25 отличие от значений, получаемых по стационарной теории, невелико. Линейная зависимость сил от амплитуды колебаний справедлива для амплитудных значений угла атаки, приблизительно равных 5° . Последнее обстоятельство довольно важно. Ведь колебания угла атаки с амплитудой 5° (размах 10°) при скорости потока 30 м/с давали уже не такие малые возмущения, во всяком случае не бесконечно малые, как считалось в теории. Тем не менее линейная теория, конечно при малых дозвуковых скоростях, оставалась справедливой. Так была решена вторая «задача».

© Труды ЦАГИ. 1983. Вып. 2200. С. 7.

TWO « SMALL PROBLEMS» (FROM THE PAST)

S. P. Strelkov

A history of solving of two problems about oscillation phenomena in airflow. The first problem : an air oscillations in the open part of wind tunnel. General physical conformities to natural laws were established, experimental measurements of oscillations were performed, the practical ways to remove oscillations were elaborated. The second problem : measurements of unsteady aerodynamic forces on oscillating surface in the wind tunnel flow. The received results had the essential significance for precision in flutter calculations.