

УДК 533.6.071

А.Н. Ковалев
КООРДИНАТНОЕ УСТРОЙСТВО
АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья содержит описание особенностей конструкции и работы координатного устройства, которым теперь располагает экспериментальная установка «Аэродинамическая труба» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. В качестве примера его использования показаны результаты измерения скоростей воздушного потока в пограничном слое пластины.

Ключевые слова: координатник, аэродинамическая труба, пограничный слой.

Лаборатория «Аэродинамическая труба и пневмопривод» имени профессора А.В. Васильева находится в составе кафедры «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов» НГТУ им. Р.Е. Алексеева и участвует в учебном процессе и исследовательских работах. Экспериментальная установка «Аэродинамическая труба», являясь частью этой лаборатории, всегда вызывает повышенный интерес у студентов, использующих ее на лабораторных занятиях, и у исследователей, предполагающих задействовать в своих изысканиях аэродинамический эксперимент.

С целью расширения возможностей аэродинамической трубы (АДТ) автором настоящего доклада было спроектировано и изготовлено (в домашних условиях, ручным инструментом) координатное устройство для проведения измерений в рабочей части трубы. Особенности его конструкции и работы и посвящен этот доклад.

Подробное описание самой трубы и ее измерительно-регистрирующего комплекса содержится в [1]. Она представляет из себя звуковую трубу замкнутого типа с открытой рабочей частью; габариты трубы 6,5×3,6×1,7 м (длина×высота×ширина); размеры (внутренние) сечения выходного сопла 80×80 см, длина рабочей части 102 см; наибольшая скорость воздушного потока в ней около 35 м/с (125 км/ч). С дополнительным оборудованием, которое используется в экспериментах с АДТ можно ознакомиться в методических указаниях к лабораторным работам аэродинамического цикла, которые имеются на кафедре «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов», секция «Аэро-гидродинамика».

Координатная система, координатное устройство или координатник – это устройство для перемещения приемной части измерительных приборов и точного определения её положения относительно осей координат трубы или исследуемого объекта. Термин «координатник», несмотря на свою упрощенность, часто оказывается более предпочтительным, поскольку с одной стороны, короче первых двух словосочетаний, а с другой стороны, позволяет лучше отличать координатную систему как устройство от системы координат как совокупности величин, характеризующих состояние (положение) объекта.

При проектировании координатной системы закладывались и были выдержаны в реальной конструкции следующие основные моменты:

- Координатник изготовлен и устанавливается так, чтобы вносить как можно меньше возмущений в поток в аэродинамической трубе.
- Вместе с этим, его минимальные размеры были ограничены его жесткостью, которая должна была исключить вибрацию приемника измерительного прибора в потоке воздуха.

- Вся конструкция должна быть, и является таковой, легко монтируемой одним человеком (лаборантом) в рабочей части трубы, а в разобранном виде по возможности не занимать в лаборатории много места.

В результате получилась координатная система, внешний вид которой показан на рисунке 1, где она установлена в рабочей части трубы. На этом же рисунке укрупненным планом вынесены фрагменты системы. Схема координатника изображена на рисунке 2 на примере его использования для измерений в пограничном слое пластины, которая также присутствует и на рисунке 1.

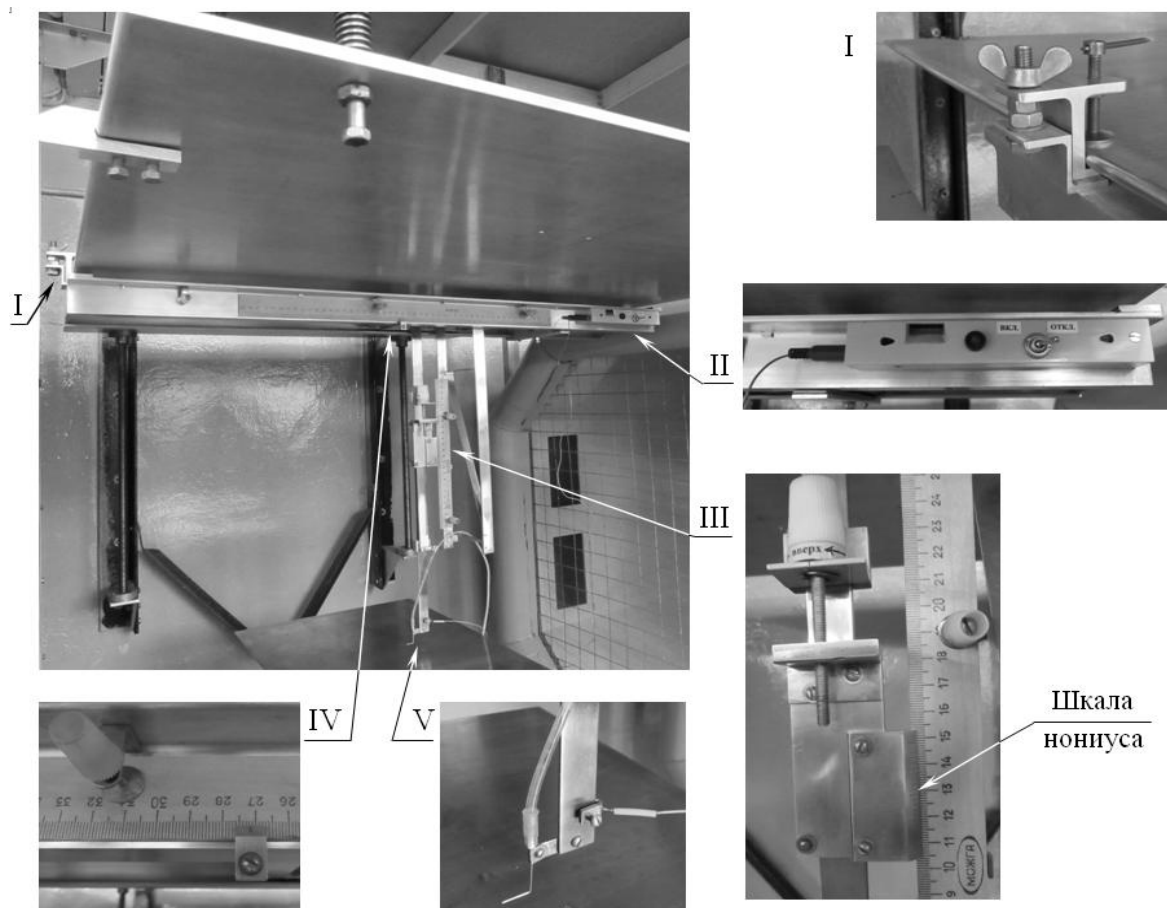


Рис. 1. Общий вид координатной системы и ее фрагменты

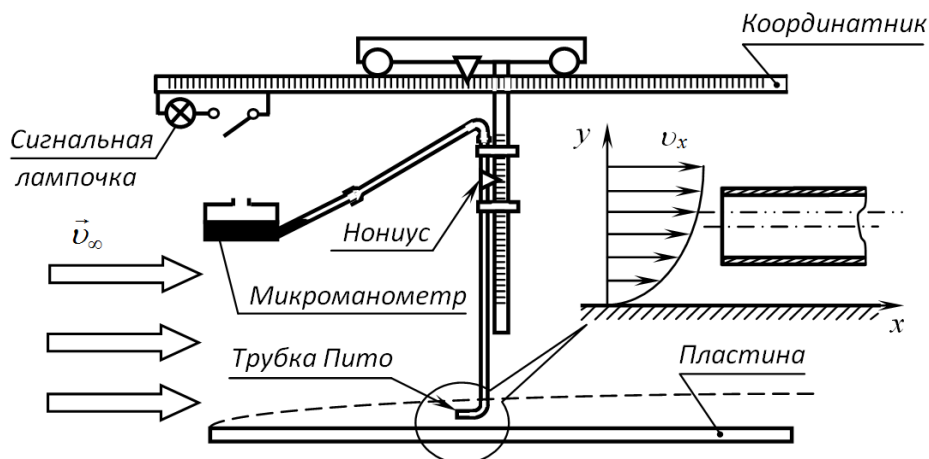


Рис. 2. Схема координатной системы

Основу конструкции составляют две взаимно перпендикулярные измерительные балки-направляющие, по которым перемещаются каретки. Первая балка – горизонтальная – в сборе со своей кареткой крепится двумя специальными кронштейнами-струбцинами к экрану АДТ (рис. 1, фрагмент I), при помощи которого в экспериментах моделируется полет на разном расстоянии от опорной поверхности. Такое базирование координатника хотя и не позволяет использовать его совместно с экраном в этих экспериментах, что мыслится вряд ли востребованным событием, зато дает возможность жестко закрепить его в рабочей части трубы и при необходимости иметь дополнительное вертикальное перемещение координатника вместе с подвижным по вертикали экраном. Барашковые гайки в болтовой системе кронштейнов-струбцин позволяют легко установить горизонтальное положение балки по пузырьковому уровню контроля горизонта, который закреплен на ней.

На каретку горизонтальной балки легко, на барашковых гайках, навешивается вертикальная балка-направляющая в сборе со своей кареткой, имеющей штангу-консоль, на нижнем конце которой крепится приемник измерительного прибора. Момент касания этого приемника с поверхностью металлического тела, около которого исследуется воздушный поток, фиксируется электрическим контактом малого напряжения, предотвращающего искрение при малых зазорах. Контакт отображается красной сигнальной лампочкой (светодиодом). Сигнальная лампочка, сменный «пальчиковый» (размер АА, напряжение 1,5 в) элемент питания, тумблер включения цепи, а также пузырьковый уровень контроля горизонта, о котором говорилось выше, и штекерный разъем смонтированы в едином компактном блоке, установленном на горизонтальной балке в зоне хорошего обзора (фрагмент II).

Каретки перемещаются по балкам-направляющим на подпружиненных шариковых радиальных подшипниках, что исключает их люфт во время движения и измерений. Каждая из кареток имеет «грубый» и «точный» ход. Первый осуществляется свободным перемещением кареток на произвольные расстояния в пределах длины соответствующей балки-направляющей. Такое свободное катание кареток дает возможность быстро расположить приемник измерительного прибора в районе предстоящих измерений. После этого фиксаторы, входящие в состав кареток, легко стопорятся на своих балках-направляющих при помощи ручных винтов-зажимов. И далее следует «точный» ход кареток относительно своих фиксаторов за счет работы винтовой пары, т.е. вращением неподвижного винта вызывают безлюфтовое перемещение каретки вдоль его оси. Длина «точного» хода горизонтальной каретки – 14 см, вертикальной – 5 см.

Координаты приемника измерительного прибора определяются по миллиметровым линейкам. Однако для снятия вертикальной координаты имеется возможность задействовать шкалу нониуса (фрагмент III), что необходимо, например, для измерений в пограничном слое. Сейчас на координатник установлена шкала нониуса с величиной отсчета 0,05 мм. На рисунке 1 координатник показан с деревянными ученическими линейками, поскольку на их светлом фоне лучше видны их черные деления. Это удобно при проведении студенческих лабораторных работ. Однако при необходимости на координатник легко, используя ручные винты-зажимы (фрагмент IV, а также III), могут быть установлены более точные металлические линейки.

На штанге-консоли вертикальной каретки можно закрепить разнообразные приемные (чувствительные) элементы измерительных приборов. Одним из наиболее востребованных при исследовании воздушных потоков является приемник давления, в качестве которого обычно выступает термоанемометр или трубка Пито. Последняя присутствует на рис. 1 и 2, и при проектировании координатника подразумевалось, что именно она вследствие своей простой и наглядной работы будет наиболее часто задействована в учебном процессе. В этой связи надо было учесть особенности использования такого приемника давления для увеличения точности измерений, например, в пограничном слое. Основными особенностями миниатюрной трубки Пито являются [2, 3]:

1. *Время запаздывания показаний манометра.* С целью уменьшения возмущения воздушного потока трубкой Пито ее делают как можно меньше. Однако малый внутренний диаметр трубки приводит к значительному запаздыванию показаний манометра, подключенного к ней через соединительную трубку. Кроме этого запаздывание еще зависит от сопротивления манометрической системы «трубка Пито – соединительная трубка – манометр» движению воздуха в ней, объема воздуха в системе, массы и вязкости жидкости в манометре.

Увеличение входного сечения трубки при малой его высоте достигается развальцовкой и сплющиванием приемного конца трубки (рис. 3). Автором было изготовлено три микроприемника давления по размерам на рисунке 3 из игл инсулиновых шприцов. Сплющивание входного отверстия иглы осуществлялось по лезвию бритвы: из него вырезался очень острый треугольник, острие которого вставлялось в изначально развальцованное острым металлическим конусом круглое отверстие иглы. Поскольку инсулиновые иглы короткие, то для увеличения длины вертикальной ножки трубки Пито, на эту ножку напаивалась игла от шприца объемом 5 мл. Трубка Пито без развальцовки и сплющивания, просто согнутая из этой большой иглы показана на рисунке 1 (фрагмент V), поскольку миниатюрная инсулиновая игла на виде координатника была бы совсем незаметна.

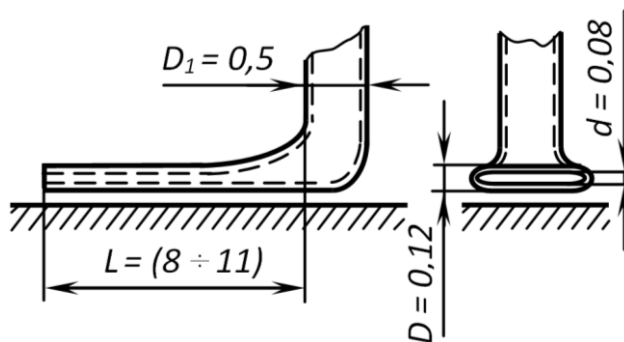


Рис. 3. Микротрубка полного давления

Увеличение диаметра соединительной трубки уменьшает ее сопротивление, но увеличивает воздушную емкость системы. Его оптимальное значение подбирают экспериментально. Длина этой трубки должна быть наименьшей, чтобы уменьшить сопротивление и воздушную емкость системы. Сейчас на координатнике стоит соединительная трубка длиной 0,5 м и внутренним диаметром 2 мм.

Поскольку в лабораторных работах студентов часто используется жидкостный чашечный микроманометр, то для уменьшения его воздушной емкости его следует подключать через наклонную трубку, а не через чашку, как обычно (рис. 2).

В результате время запаздывания такой манометрической системы оказалось не менее двух минут, что при проведении лабораторных работ может оказаться слишком затратно, если планируется сделать большое количество измерений. Это потребовало провести сравнительный анализ работы игл разного диаметра, который показал, что иглы от шприца в 5мл, с одной стороны, даже без развальцовки и сплющивания вполне приемлемы для точности измерений в студенческих лабораторных работах (рис. 4), а с другой стороны, почти не вызывают времени запаздывания.

Здесь же можно добавить, что в конструкции координатника предусмотрено крепление трубки Пито (и других приемников) на штанге-консоли под различными углами к горизонту, что позволяет делать измерения в потоке рядом с выпуклыми телами, например, вокруг крыла.

2. *Смещение «эффективного центра» приемного отверстия.* Это связано с тем, что в потоке с градиентом скорости (профиль скорости рис. 2) приемник измеряет давление не в

геометрическом центре входного отверстия (штрихпунктирная линия с одной точкой), а в точке, смещенной на расстояние $l_{эф}$ от центра в сторону больших скоростей (штрихпунктирная линия с двумя точками). Эта точка называется *эффективным центром*, а ее положение можно найти по эмпирической формуле

$$l_{эф} = 0,131 D + 0,082 d,$$

которая справедлива, если $dv/dy = (0,05 \div 0,6)v/D$, v – скорость, средняя по приемному сечению трубки Пито. Для размеров приемника на рис.3 величина $l_{эф} = 0,02$ мм, поэтому ее следует учитывать, если только на координатник будет установлен нониус с величиной отсчета 0,02мм или микрометр.

3. *Влияние вязкости.* Измерение давления трубкой Пито основано на уравнении Бернулли

$$p = p_{ст} + \alpha \rho v^2 / 2,$$

где p и $p_{ст}$ – полное и статическое давление в данной точке потока, ρ – плотность воздуха, При этом воздух считается идеальной жидкостью. В большинстве случаев можно принять $\alpha \approx 1$ и скорость в точке потока определять по формуле

$$v = \sqrt{2(p - p_{ст}) / \rho}.$$

Однако при числах Рейнольдса $Re = \rho v d / \mu < 100$ вязкость μ начинает влиять на показания прибора: с уменьшением числа Re давление p возрастает. Малые значения Re получаются в непосредственной близости от поверхности обтекаемого тела, где скорость v очень мала. В этом случае коэффициента можно назначить по эмпирической формуле $\alpha = (1 + 5,6/Re)$, и тогда откорректированная скорость будет равна $v_{\alpha} = v / \sqrt{\alpha}$.

4. *Скос потока.* Скорость v_y вдоль оси y , нормальной к поверхности обтекаемого тела (см. рис. 2), хотя и мала, но все же конечна. Поэтому линии тока в пограничном слое не параллельны этой поверхности и подходят к приемнику давления под некоторым углом скоса. Однако приемник типа представленного на рисунке 3 оказывается нечувствительным к углам скоса потока до 10° . И так как v_y мала, то ошибка измерений здесь будет ничтожна, а измеренные профили скоростей можно считать распределением полной скорости v .

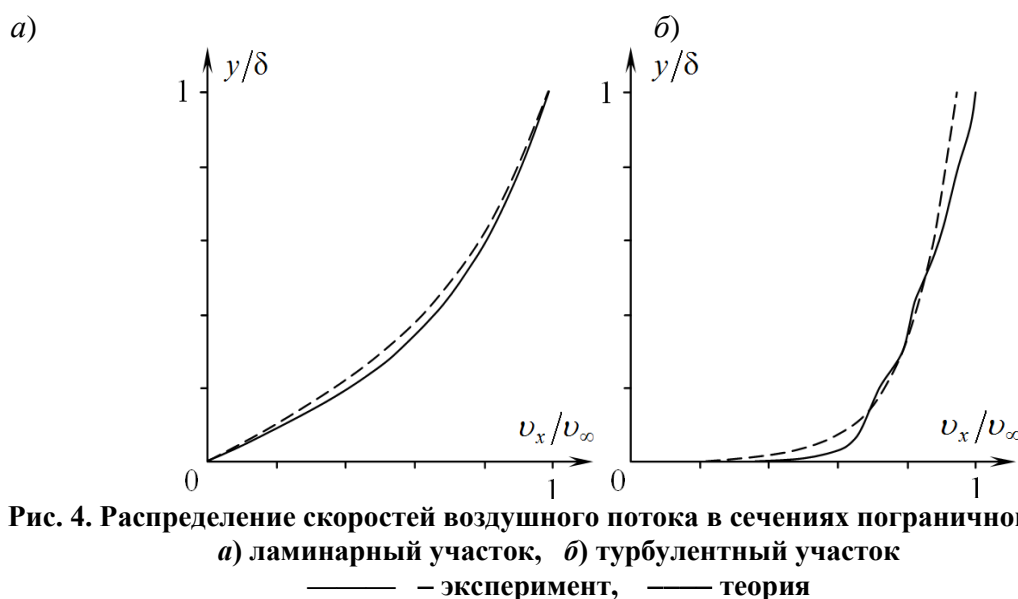


Рис. 4. Распределение скоростей воздушного потока в сечениях пограничного слоя
 а) ламинарный участок, б) турбулентный участок
 — эксперимент, — теория

Чтобы постепенно начинать задействовать координатную систему в учебном процессе автором была разработана лабораторная работа «Исследование пограничного слоя пластины» [4]. На рисунке 4, в качестве примера, сплошными линиями показаны результаты измерения скоростей потока в пограничном слое пластины, выполненные студентами.

Прямоугольная металлическая пластина имела длину вдоль потока 26 см и размах поперек потока 54 см. Графики на рисунке 4 соответствуют ламинарному (а) и турбулентному (б) участкам пограничного слоя. Координата x (рис. 2) сечений этих участков отсчитывалась вдоль потока от передней кромки пластины и была равна соответственно 5 мм и 100 мм. Профили скорости изображены в безразмерном виде: ось абсцисс – это относительная скорость v_x/v_∞ , где v_x – скорость в точке потока, а $v_\infty = 19$ м/с – его скорость перед пластиной (рис. 2); ось ординат – это относительное расстояние y/δ от пластины до точки, в которой определялась скорость v_x , y – абсолютное значение этого расстояния, δ – толщина пограничного слоя. Последняя определялась в ходе эксперимента и соответствует такой координате y , при увеличении которой скорость v_x перестает изменяться. Для первого сечения пограничного слоя по результатам измерений было принято $\delta = 0,6$ мм, а для второго – $\delta = 3,5$ мм. Шаг по координате y между последовательными положениями трубки Пито составлял 0,2 мм. Построением профилей скорости в безразмерном виде обычно преследуют цель выявить степень их подобия в различных сечениях пограничного слоя.

Для сравнения на графиках штриховыми линиями нанесены рассчитанные студентами теоретические профили скорости, предложенные Г. Блазиусом для ламинарного пограничного слоя и Л. Прандтлем и Г. Шлихтингом – для турбулентного (логарифмический профиль) [5]. Блазиус, а также Прандтль и Шлихтинг получили приближенное решение задачи о соответствующем виде пограничного слоя, которое, однако, хорошо зарекомендовало себя в инженерных расчетах.

И хотя, с одной стороны, решение Блазиуса и решение Прандтля-Шлихтинга не являются точными. А с другой стороны, некачественными являются измерения студентов – выполнялись по одному разу для каждой экспериментальной точки на графике и, как упоминалось выше, для этого использовалась трубка Пито относительно большого диаметра. Сопоставление результатов этих неточных теории и эксперимента позволяет их считать вполне пригодными для наглядного формирования у студентов представления о пограничном слое и его структуре. Тем самым можно признать и реализовать полезность такой лабораторной работы в составе аэрогидродинамического лабораторного практикума.

По завершению лабораторной (или исследовательской) работы координатную систему, как уже отмечалось, можно легко разобрать и сложить в лабораторный шкаф. На рисунке 5 координатная система показана в разобранном виде.

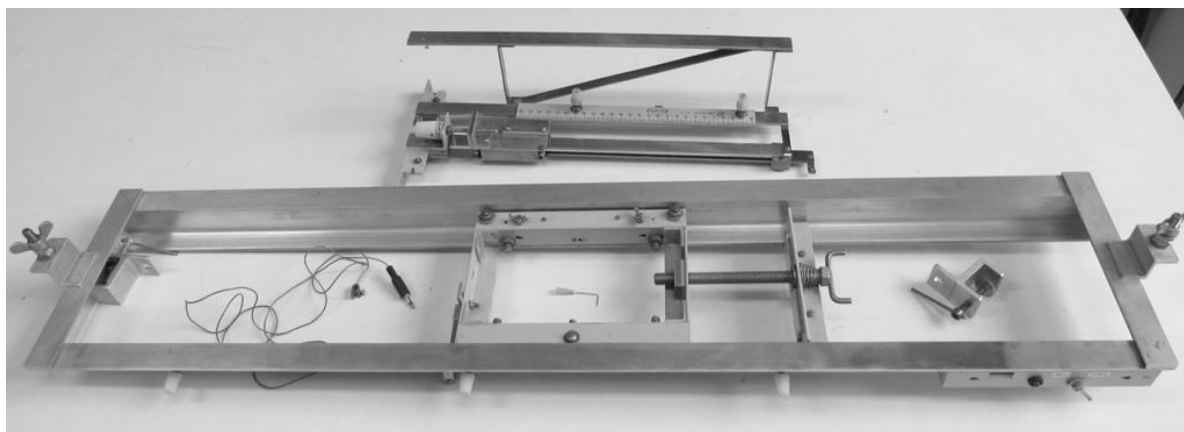


Рис. 5. Координатник в разобранном виде

Библиографический список

1. Исследование характеристик крыла в аэродинамической трубе: Метод. указания к лаб. работе [Текст] / сост.: А.А. Болотин, А.Н. Попов, В.Ф. Чеботаев. – Н.Новгород: НГТУ, 1997. – 24 с.
2. Горлин, С.М. Аэромеханические измерения (методы и приборы) [Текст] / С.М. Горлин, И.И. Слезингер. – М.: Наука, 1964. – 720 с.
3. Краснов, Н.Ф. Прикладная аэродинамика: Учеб пособие для вузов [Текст] / Н.Ф. Краснов и др. –М.: Высшая школа, 1974. –732 с.
4. Исследование пограничного слоя пластины: Метод. указания к лаб. работе [Текст] / сост.: А.Н. Ковалев. – Н. Новгород: НГТУ, 2003. – 27 с.
5. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.