

В.Н.Щелкунов, Н.З.Руденко

КРИОГЕННАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ  
НА БОЛЬШИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

Закон подобия при моделировании аэродинамических процессов требует равенства для модели и образца двух основных определяющих чисел подобия — Маха ( $M$ ) и Рейнольдса ( $Re$ ). Исходя из этого, одним из главных требований, предъявляемых при создании испытательных аэродинамических устройств, является возможность обеспечения широкого диапазона чисел Рейнольдса, перекрывающего их значения на натуре.

Методы повышения числа  $Re$  при заданном значении числа  $M$  вытекают из определения  $Re = \rho V l / \mu$  или  $(\rho M_\infty^2 l / \mu) (k/RT)^{1/2}$ : за счет увеличения характерного размера модели, рабочего давления в потоке, применения газа с большим молекулярным весом, снижения его температуры. Здесь  $Re$  — число Рейнольдса,  $\rho$  — плотность свободного потока;  $\mu$  — коэффициент вязкости свободного потока;  $V$  — скорость свободного потока;  $l$  — характерный линейный размер;  $P$  — давление;  $M_\infty$  — число Маха свободного потока;  $k$  — отношение удельных теплоемкостей;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — температура свободного потока.

Первые три метода описаны в литературе [1, 2]. Как известно, изменение числа Рейнольдса приводит к изменению мощности привода силовой установки аэродинамической трубы пропорционально величине  $\rho l^2 V^3$ . Следовательно, при увеличении числа  $Re$  посредством роста размеров рабочей части мощность привода возрастает пропорционально квадрату характерного размера. Конструкторские проработки и опыт создания таких установок показали, что при этом капитальные затраты на их создание пропорциональны кубу линейного размера.

Использование труб меньшего размера, работающих при высоких

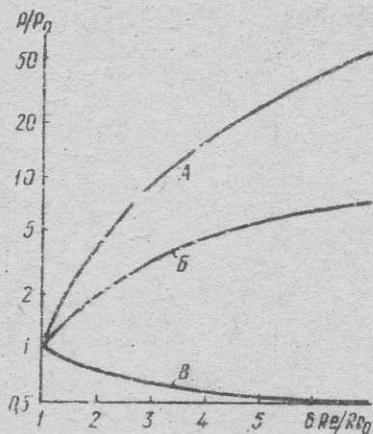


Рис. 1. Сравнение необходимой мощности привода для трех методов повышения числа Рейнольдса при  $M_\infty < 1$ , где  $P/P_0$  - отношение мощности привода к заданной,  $Re/Re_0$  - отношение числа Рейнольдса к заданному  $[3]$ : А - увеличение размеров при постоянном давлении торможения, динамическом давлении, температуре,  $M_\infty$ ; Б - повышение давления торможения и динамического давления при постоянных размерах, температуре,  $M_\infty$ ; Б' - снижение температуры при постоянном давлении торможения, динамическом давлении и размерах

давлениях (до 25 атм)  $[1]$ , позволяет снизить необходимую мощность привода, но приводит к существенным нагрузкам на модель и элементы ее крепления, что весьма нежелательно из-за появления проблем, связанных с аэроупругостью и интерференционными эффектами элементов крепления модели. В последнее время большое внимание уделяется методу увеличения числа Рейнольдса за счет снижения температуры рабочего газа до уровня криогенной  $[3]$ . Применение такого метода дает возможность значительно уменьшить мощность привода силовой установки аэродинамической трубы, поскольку она при постоянном числе Маха и неизменном давлении торможения пропорциональна величине  $\mu^2 T_0^{3/2}$ , где  $T_0$  - температура торможения.

Как следует из анализа кривых (рис. 1), иллюстрирующих изменение мощности привода при изменении числа  $Re$ , наибольший положительный эффект достигается при одновременном увеличении давления и снижении температуры рабочей среды  $[3]$ . Разработана и испытана малогабаритная криогенная газодинамическая установка непрерывного действия, предназначенная для исследования тепло- и массообмена в процессах конденсации и испарения веществ в потоке газа в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Высокие значения чисел  $Re$  при минимальных энергетических затратах получены за счет увеличения рабочего давления до 15 атм, снижения рабочей температуры до 100 К и возможности применения любого рабочего газа или смесей газов ( $N_2$ ,  $O_2$ , He,  $CO_2$ , Ar и т.д.). Максимальное число Рейнольдса достигает значений, равных  $10^7$  (в качестве характерного размера взят диаметр рабочей части аэродинамической трубы, соответствующий 0,22 м), при этом мощность привода составляет 1 кВт

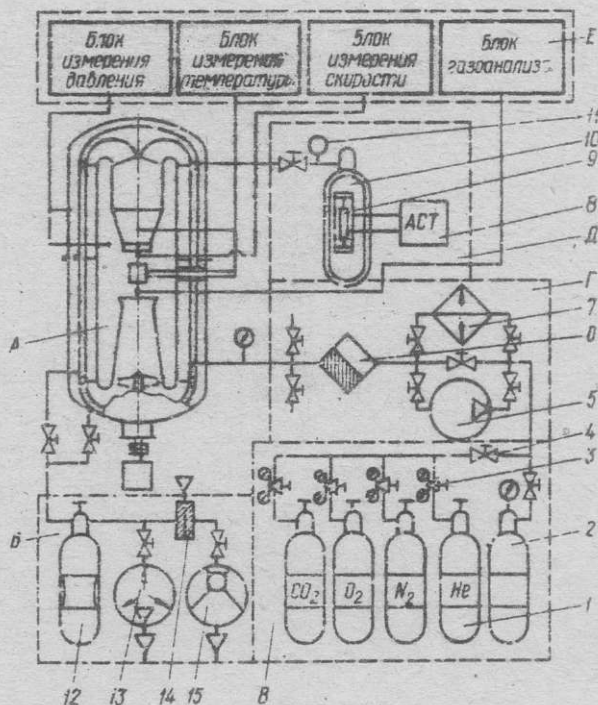
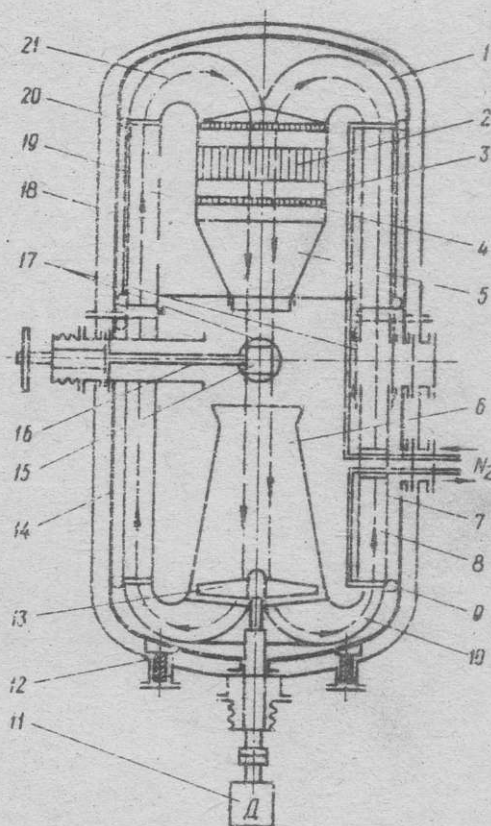


Рис. 2. Блок-схема криогенной газодинамической установки высокого давления

Такое число  $Ne$  (при том же числе Маха) в нормальных условиях может быть достигнуто при размерах рабочей части порядка 11 м и огромных энергетических затратах.

На рис. 2 представлена блок-схема установки, имеющая экспериментальную камеру А, представляющую собой вертикальную газодинамическую трубу замкнутого типа с открытой рабочей частью; блок приготовления смеси В, состоящий из рамы баллонов 1, ресивера 2, редукторов 3, вентилях 4; блок очистки и циркуляции Г, позволяющий многократно использовать рабочую смесь и содержащий компрессор 5, теплообменник предварительного охлаждения 6, узел очистки 7; блок термостатирования Д, обеспечивающий поддержание заданной температуры рабочей среды и поверхности модели, и включающий сосуд Дьюара 10 с жидким азотом, нагреватель 9, автомат стабилизации температуры (АСТ) 8, манометр 11; блок вакуумирования Б,



предназначенный для очистки рабочего объема и создания охранного вакуума с помощью форвакуумного насоса 15, азотной ловушки 14, высоковакуумного сорбционного насоса 13 и форколбы 12; измерительный блок 5, контролирующий рабочие параметры.

На рис. 3 показан общий вид газодинамической трубы. Основные параметры установки: высота 2 м, диаметр рабочей камеры 0,76 м, диаметр вакуумной камеры 0,88 м, диаметр рабочей части 0,22 м, степень поджатия потока 4, рабочее давление  $1 \div 15$  атм, рабочая температура  $80 \div 320$  К, скорость газового потока  $1 \div 10$  м/с, мощность привода 1 кВт, размах модели  $0,1 \div 0,2$  м, хорда модели  $0,1 \div 0,3$  м.

Рис. 3. Общий вид газодинамической трубы

Поскольку труба рассчитана на рабочие давления выше атмосферного, циркуляционный контур помещен в герметичный корпус 1 цилиндрической формы из нержавеющей стали, наличие которого позволяет использовать в качестве рабочего вещества различные газы или их смеси. Конфузорная часть, состоящая из конфузора 5, форкамеры 3, с размещенными в ней дегурбулизирующими сетками 4 и спрямляющей решеткой 2, выполнена из нержавеющей стали толщиной 0,4 мм. Диффузор 6 также изготовлен из нержавеющей стали толщиной 0,8 мм. Двухстенный обратный канал 7 кольцевого типа выполнен из листового меди и оборудован спрямляющими поток ребрами 8 и двухсекционным термостатирующим теплообменником 19, в верхний коллектор 20 которого

по трубопроводам подается хладагент, а с нижнего  $\Phi$  отводится на сброс. Труба имеет угловые поворотные устройства 10 и 21. Установка оборудована шлюзовой камерой 16, позволяющей устанавливать модель 15 в рабочей части трубы и извлекать ее оттуда без разгерметизации рабочего объема и вакуумной рубашки, что обеспечивает непрерывность проведения исследований. Для уменьшения теплопритоков из окружающей среды труба снабжена экранно-вакуумной теплоизоляцией, представляющей собой вакуумную камеру 18, заполненную 30-ю слоями металлизированной пленки 14. Вакуумная рубашка, кроме того, способствует снижению уровня шума при работе установки. Вакуумная и силовая камеры разделены посредством четырех теплоизолирующих опор 12. Для наблюдения за моделью и элементами конструкции труба имеет два ортогонально расположенных окна 17. Вентилятор 13 центробежного типа выполнен из сплава АМГ. Регулировка скорости потока осуществляется изменением числа оборотов вентилятора, приводимого во вращение двигателем постоянного тока 11. Для удобства монтажа экспериментальная камера имеет один горизонтальный разъем в виде фланце-болтового соединения. Герметичность разъема силового корпуса достигается с помощью индиевого, а вакуумной камеры - резинового уплотнителей. Для герметизации внутренних низкотемпературных вводов используется конусное уплотнение с медным уплотнителем, а для наружных - фланцевое с резиновым уплотнителем. Все основные входы отделены от вакуумной рубашки сальфонами, что позволяет уменьшить технологическое время подготовки эксперимента.

Таким образом, снижение температуры рабочего газа при одновременном увеличении его давления дало возможность повысить число Рейнольдса по сравнению с установками, работающими в нормальных условиях (при том же числе Маха и линейном размере), в 60 раз. Затраты мощности на привод криогенной аэродинамической установки в 19 раз ниже, чем в такой же установке высокого давления с нормальной температурой газа при том же давлении торможения и числе Маха. Применение вакуумной рубашки в качестве теплоизоляции помимо основного эффекта решило проблему снижения шума работающей установки.

1. Пенкхост Р., Холдер Д. Техника эксперимента в аэродинамических трубах. - М.: Изд-во иностр. лит., 1955. - 667 с.  
2. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения. - М.: Наука, 1964. - 352 с.