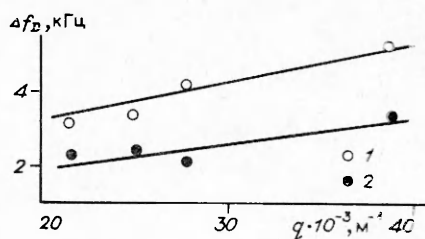


зительно соответствует зависимости  $\omega(q) \sim q^{2/3}$  (линии); из этого следует, что более мелкие неоднородности, отвечающие большим волновым числам рассеяния, живут меньше, а увеличение скорости вращения ведет к уменьшению времени существования неоднородностей фиксированного характерного размера.



Р и с. 6

Можно также отметить, что точное соотношение  $\Delta f_D = \omega(q)$  позволяет определить величину средней скорости диссипации кинетической энергии по формуле  $\epsilon = (\Delta f_D / 0,42 q^{2/3})^3$ . Таким образом, измерение спектральных характеристик излучения, рассеянного в потоке движущейся жидкости, дает информацию о некоторых сторонах временной и пространственной природы флуктуаций плотности, возникающих в процессе формирования турбулентного режима течения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубнищев Ю. П., Ринкевичус Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии.— М.: Наука, 1982.
2. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Лазерное гетеродинамирование.— М.: Наука, 1985.
3. Frisch H. L. Study of turbulence by spectral fine structure of scattered light // Phys. Rev. Lett.— 1967.— V. 19, N 22.
4. Бенедек Дж. Спектроскопия оптического смещения и ее приложения к задачам физики, химии, биологии и техники // УФН.— 1972.— Т. 106, вып. 3.
5. Кросиньяни Б., Ди Порто П., Берголотти М. Статистические свойства рассеянного света.— М.: Наука, 1975.
6. Соловьев В. П. Спектр света, рассеянного турбулентной жидкостью // Молекулярная физика неравновесных систем.— Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1984.
7. Yoshizawa A. A statistical investigation of shear turbulence: the Reynolds-stress transport equation / J. Phys. Soc. Japan.— 1982.— V. 51, N 2.
8. Ключков В. П., Козлов Л. Ф., Потыкевич И. В., Соскин М. С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия.— Киев: Наук. думка, 1985.
9. Дьяконов А. М., Капшин Ю. С., Клубин В. В. и др. Спектрометры оптического гетеродинамирования для анализа рассеянного света.— Л., 1978.— (Препр./АН СССР, ЛИЯФ; № 427).
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: Наука, 1974.
11. Федоров Б. П., Плавник Г. З., Прохоров П. В., Жуховицкий Л. Г. Исследование переходного режима течения на вращающемся диске // ИФЖ.— 1976.— Т. 31, № 6.
12. Kobayashi R., Kohama Y., Takamada Ch. Spiral vortices in boundary layer transition regime on rotating disk // Acta Mech.— 1980.— V. 35, N 1.

г. Новосибирск

Поступила 29/VII 1988 г.,  
в окончательном варианте — 17/XI 1989 г.

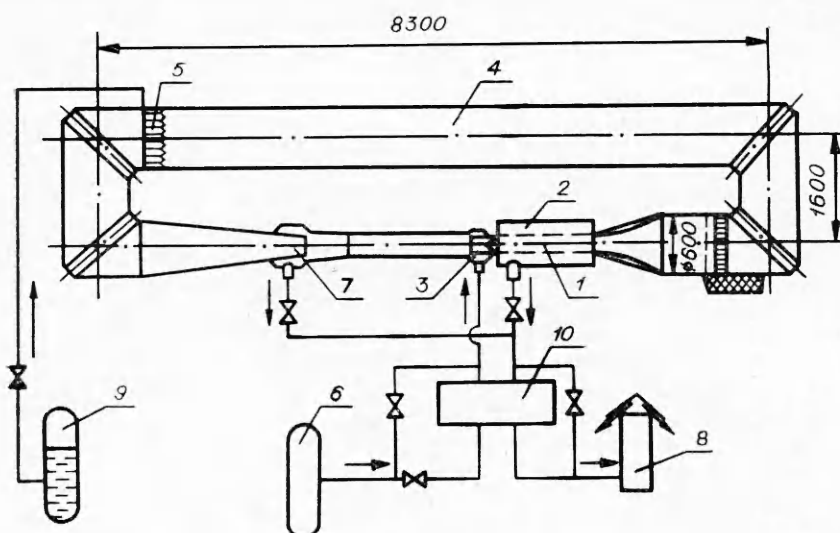
УДК 533.6.071.6

С. Ю. Борисов, А. Л. Искра, В. П. Кулеш, А. М. Наумов

#### ДИАГНОСТИКА ПОТОКА В КРИОГЕННОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

При создании и наладке криогенной аэродинамической трубы важной проблемой является обеспечение высокого качества потока. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по изучению причин и условий возникновения двухфазного потока в криогенной аэродинамической трубе Т-04 [1, 2], выявлению режима работы указанной установки с наиболее чистым потоком.

Принципиальная схема установки Т-04 дана на рпс. 1: 1 — рабочая часть размером  $200 \times 200 \times 740$  мм, 2 — камера давления, 3 — эжектор, 4 — обратный канал, 5 — форсунки для распыления жидкого азота.



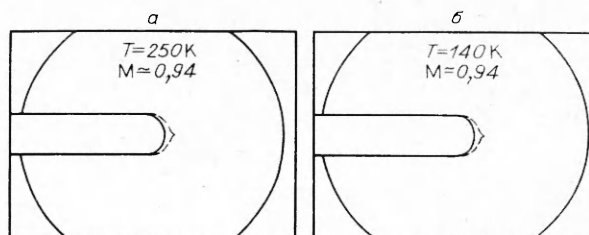
Р и с. 1

6 — емкость со сжатым воздухом, 7 — диффузор, 8 — шахта шумоглушения, 9 — емкость с жидким азотом, 10 — блок регенераторов.

Начальное охлаждение корпуса трубы, трубопроводов и насадки регенераторов производится впрыском в поток жидкого азота. Система регенерации холода обеспечивает охлаждение эжектирующего воздуха и нагрев газа, сбрасываемого из трубы. Последовательное переключение трех регенераторов обеспечивает длительное поддержание криогенной температуры потока при отключенных форсунках. Предусмотрена работа трубы и без использования системы регенерации холода. В этом случае воздух в эжектор попадает, минуя блок регенераторов, а сброс газа из трубы осуществляется одновременно через все регенераторы.

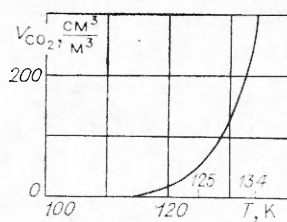
В ходе экспериментов проводились измерения давления в форкамере и камере давления установки, температуры в форкамере и обратном канале. Для определения условий возникновения двухфазного потока при охлаждении трубы был применен метод лазерного ножа. Визуализация течения около модели в рабочей части производилась с помощью прямо-теневого метода. Схемы оптических систем для реализации этих методов приведены и описаны в [3].

Исследования по охлаждению установки с отключенной системой регенерации холода показали полную невозможность работы трубы в таком режиме без дополнительной осушки эжектирующего воздуха. При достижении температуры 280 К в потоке появлялся пульсирующий туман, а при уменьшении температуры до 270 К туман становился сплошным и в нижней части потока появлялись хлопья снега. Дальнейшее охлаждение потока приводило к значительному намерзанию снега на стенках элементов проточной части трубы и трубопроводов в трассе сброса газа, забивке приемников полного и статического давления. После отогрева установки в нижней части канала трубы скапливалась вода, что осложняло проведение испытаний.



Р и с. 2

Наблюдения за состоянием потока в процессе одновременного захлаживания установки и регенераторов от нормальной до криогенной температуры показали образование тумана в потоке и инея на стенках обратного канала дважды при температурах 270 и 140 К, что связано с вымерзанием из воздуха соответственно воды и двуокиси углерода. При полном охлаждении установки и отключении форсунок поток становился визуально прозрачным, поскольку вымораживание паров  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  происходило на охлажденной насадке регенераторов.



Р и с. 3

Анализ фотографий, полученных с использованием прямотеневого метода, показал, что в процессе охлаждения трубы ( $P = 0,24$  МПа,  $M \approx 0,94$ ) на оптических стеклах и линзе появляется тонкий слой инея, а на затупленной части модели образуется пикообразное намерзание. Это происходит дважды и видно впервые на снимках, полученных при  $T = 253$  и  $143$  К (рис. 2, а, б). С помощью метода лазерного ножа обнаружено, что при температуре потока  $260 \div 190$  К в последнем присутствует равномерный однородный туман. При дальнейшем понижении температуры плотности тумана становилась заметно меньше. При  $T = 145$  К туман вновь усиливался, но становился неоднородным и пульсирующим. При  $T < 140$  К происходило интенсивное нарастание инея на внутренней поверхности оптических стекол и линзе, что не дало возможности проводить диагностику потока оптическими методами. При полном охлаждении установки и поддержании низкой температуры в пределах  $110 \div 120$  К только за счет переключения регенераторов поток становился оптически прозрачным, а оптические стекла и линза очищались от инея.

Вывод о кристаллизации углекислоты из газгольдерного воздуха при  $T < 140$  К подтверждается графиком на рис. 3. В атмосферном воздухе содержится, как известно, около 0,03 %  $\text{CO}_2$  ( $300 \text{ см}^3/\text{м}^3$ ) [4]. При  $P = 0,24$  МПа насыщение данного количества паров  $\text{CO}_2$  происходит при  $T = 134,5$  К. Понижение температуры приводит к резкому уменьшению содержания газообразной фазы  $\text{CO}_2$  и увеличению твердой фазы в виде кристаллов  $\text{CO}_2$  в потоке и инея на стенках. В процессе непрерывного охлаждения первое появление пульсирующего тумана при средней температуре потока 140 К можно объяснить наличием зон с более низкой температурой в следе за форсунками. При  $T \leq 134$  К происходит резкое усиление тумана по всему сечению обратного канала, поскольку условие кристаллизации  $\text{CO}_2$  выполняется во всем потоке. Дальнейшее понижение температуры до 125 К ведет к образованию инея  $\text{CO}_2$  на стенках трубы. Для иллюстрации на рис. 3 отмечен температурный диапазон возгонки  $\text{CO}_2$  при естественном отогреве установки без потока. Процесс происходит в диапазоне температуры  $125 \div 160$  К, причем после его завершения содержание  $\text{CO}_2$  в газе в канале трубы может значительно превысить уровень 0,03 %, характерный для атмосферного воздуха.

Для того чтобы в трубе Т-04 избежать вымораживания в потоке паров  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , испытания следует начинать лишь после полного охлаждения регенераторов. По этой причине в криогенной трубе такого типа предпочтительнее иметь автономную систему охлаждения регенераторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Л. П., Фуке М. А. Криогенная аэродинамическая труба // Тр. ин-та/Гипроиниавиапром.— 1983.— Вып. 19.
2. Искра А. Л., Борисов С. Ю. Экспериментальное исследование криогенной эжекторной трубы // IV Всесоюз. шк. по методам аэрофизических исследований.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1986.

3. Борисов С. Ю., Кулеш В. П., Наумов А. М. Исследование качества потока в эжекторной криогенной аэродинамической трубе // Тр. Междунар. семинара по проблемам моделирования в аэродинамических трубах.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1989.— Т. 2.
4. Васюнина Г. В., Глебова Л. И., Денисенко Г. Ф., Катина Н. Ф. Очистка воздуха от двуокси углерода и осушка воздуха // Разделение воздуха методом глубокого охлаждения.— М.: Машиностроение, 1973.— Т. 2.

г. Жуковский

Поступила 11/1 1989 г.,  
в окончательном варианте — 10/XI 1989 г.

Зав. редакцией *Н. С. Каламшикова*  
Художественный редактор *М. Г. Рудакова*  
Технический редактор *Г. Я. Герасимчук*  
Корректор *Г. И. Шведкина*

Сдано в набор 22.02.91. Подписано к печати 17.05.91. Формат 70 × 108<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 2. Высокая печать. Усл. печ. л. 15,4. Усл. кр.-отт. 15,8. Уч.-изд. л. 16. Тираж 1255 экз. Заказ № 675. Цена 2 р. 90 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука», Сибирское отделение.  
630099 Новосибирск, ул. Советская, 18.  
4-я типография издательства «Наука». 630077 Новосибирск, ул. Станиславского, 25.