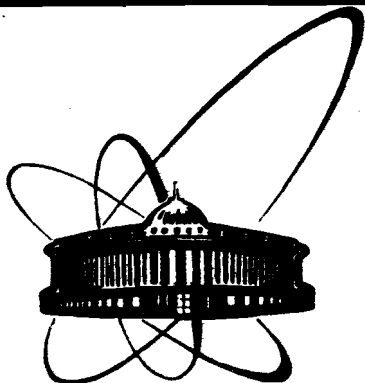


89-636



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

A 471

P8-89-636

**А.И.Алексеев, В.И.Батин, И.С.Мамедов,
С.Ю.Селюнин**

**СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ГЕЛИЯ**

1989

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие существенный практический интерес представляют результаты исследований теплофизических процессов в системах, криостатируемых с помощью вынужденных потоков гелия. Интерес к этой тематике обусловлен необходимостью получения информации для проектирования и анализа работы таких установок, как УНК, КЕК, NET, HERA, TORE SUPRA¹⁻⁴ и т.д. Значительная часть публикаций связана с экспериментальными исследованиями двухфазных потоков (ДП). Начиная с 1981 года, исследования ДП гелия проводились и на криогенном стенде ОНМО ОИЯИ, что отражено в работах⁵⁻¹⁰. Однако сведения о применявшемся оборудовании, представляющие, на наш взгляд, практический интерес для экспериментаторов, изложены в этих публикациях весьма конспективно. В связи с этим в настоящей работе представлено сравнительно подробное описание методик и оборудования, применяемых при изучении ДП гелия.

Основными характеристиками двухфазных потоков служат: гидравлическое сопротивление $\Delta P_{\text{дф}}$, массовое расходное паросодержание X (отношение массового расхода газовой фазы к полному расходу), истинное объемное паросодержание ϕ (отношение сечения, занятого газовой фазой, к полному поперечному сечению канала), а также режимы течения потока (характер распределения фаз по сечению канала). Наиболее распространенная экспериментальная методика исследования ДП основана на получении зависимости одной из характеристик ψ от величины $X - \psi = \psi(X)$. При этом, как правило, давление P и массовая скорость потока m поддерживаются постоянными. В дальнейшем производится набор массива экспериментальных данных вида:

$$\psi = \psi(X) \left\{ \begin{array}{l} m = m_1, m_2, \dots, m_n \\ P = P_1, P_2, \dots, P_n \end{array} \right.,$$

причем, кроме P и m , обычно варьируются ориентация, геометрические размеры, форма канала, исследуется влияние неадиабатичности потока. Все это приводит к существенному объему данных и требует значительного времени накопления. Процесс сбора экспериментальной информации можно значительно ускорить, если использовать одновременную регистрацию всех характеристик при прохождении потока через экспе-

риментальные модули различного назначения. Следует также отметить, что для определения взаимосвязей между характеристиками двухфазных потоков необходимо одновременно производить контроль параметров в одном и том же участке экспериментального канала. Поэтому предпочтительно использовать многофункциональные криостаты, позволяющие регистрировать несколько характеристик, что приводит к дальнейшему увеличению потока информации и естественному применению автоматизированной системы сбора и обработки данных.

На основе приведенных выше соображений был разработан и создан экспериментальный стенд, все узлы которого можно условно разделить на три основные системы:

- 1) экспериментальные криостаты (модули), предназначенные для регистрации различных характеристик ДП гелия;
- 2) криогенная гелиевая установка (КГУ) и система обеспечения циркуляции потока с заданными параметрами X , m и P ;
- 3) система сбора и обработки экспериментальных данных.

Остановимся на каждой из этих систем более подробно.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КРИОСТАТЫ

2.1. Визуальные исследования

Информация о структуре двухфазных потоков в основном была получена посредством высокоскоростной фотосъемки. Предназначенные для этого два криостата имеют каналы круглого и щелевого сечений. В реальных конструкциях сверхпроводящих устройств¹¹⁻⁴¹ используются, как правило, каналы круглого и кольцевого сечений, но т.к. визуальная идентификация режимов течения в кольцевых каналах затруднена, то вместо них для изучения структуры потока использовались каналы щелевого сечения со сходными гидродинамическими характеристиками¹⁹¹.

Общий вид криостата с каналом щелевого сечения представлен на рис.1. Визуальный участок гелиевого канала (см. рис.2) высотой 30 мм, зазором 1 мм и длиной 56 мм образован двумя стеклами 1 марки ЛК-5, вклеенными в инваровую обечайку 2. Расположенный перед визуальным участком канал из стали X18H10T имеет такое же сечение, а сопряжение выполнено таким образом, что обеспечивает движение потока практически без гидродинамических возмущений. Гелиевый канал окружен азотным экраном 3 и вакуумным корпусом 4. В азотном экране сделаны окна размером 70x30 мм. Для уменьшения теплопритоков излучением эти окна "застеклены" специальными стеклами 8



Рис. 1. Прокачной криостат с каналом щелевого сечения.

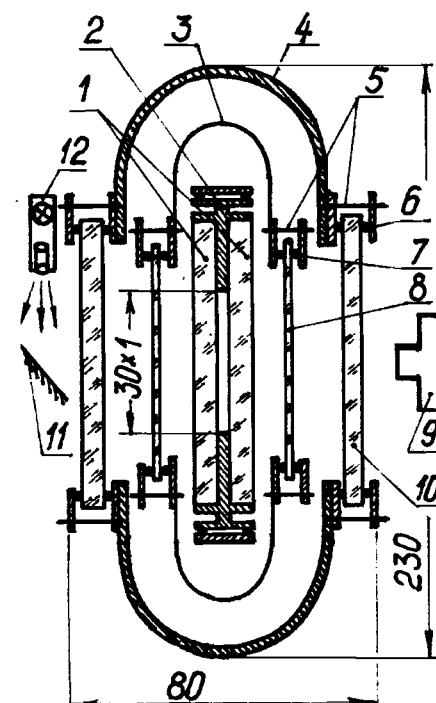


Рис.2. Конструкция участка для визуализации течения двухфазного гелия в канале щелевого сечения. 1 — стеклянный диск $\varnothing 56$ мм, $\delta = 8$ мм; 2 — инваровая обечайка; 3 — азотный экран; 4 — вакуумный корпус; 5 — фланцевые соединения; 6 — резиновая прокладка; 7 — прокладка из индия; 8 — стеклянная пластина 80×40 мм, $\delta = 1$ мм; 9 — фотоаппарат; 10 — стеклянный диск С-49-1, $\varnothing 80$ мм, $\delta = 8$ мм; 11 — зеркало; 12 — источник света.

с помощью уплотнений из индия 7. Такая конструкция обеспечивает как хороший тепловой контакт между стеклом и экраном, так и целостность конструкции при термических усадках. В корпусе 4 сделаны посадочные места под стекла 10 диаметром 80 мм. Герметичность вакуумного объема обеспечивается применением резиновых прокладок 6.

Источник света 12 представляет собой осветитель от микроскопа, в котором установлена импульсная лампа ИФК-120. Источник питания лампы обеспечивает длительность вспышки около 8 мкс. Вспышка синхронизирована с затвором фотоаппарата 9.

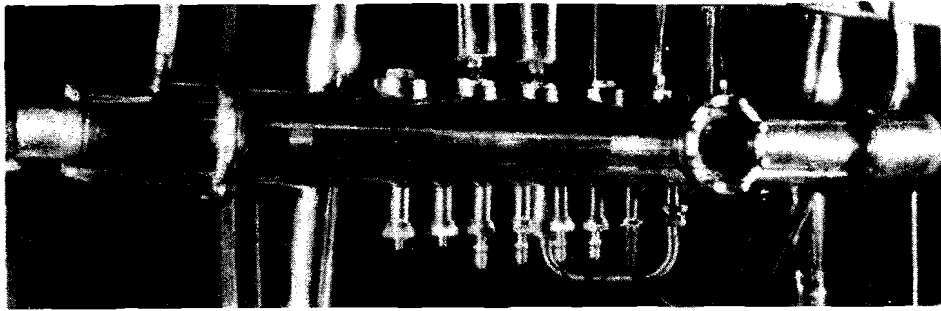


Рис.3. Прокачной криостат с каналом круглого сечения.

Криостат с каналом круглого сечения представлен на рис.3. Визуальный участок канала — трубка из молибденового стекла длиной около 400 мм. Перед визуальным участком предусмотрен участок гидродинамической стабилизации потока длиной около 200 мм (материал — сталь X18H10T). Соединение стеклянного и стального участков канала осуществляется посредством "сваренных" между ними коваровых вставок. Азотный экран, окна, вакуумный корпус и оборудование для фоторегистрации режимов течения идентичны соответствующим узлам криостата с каналом щелевого сечения.

Применение соединения "шар — конус" с целью стыковки гелиевых каналов и откатывающихся муфт для соединения вакуумных полостей позволяет относительно легко демонтировать модули и менять размеры экспериментальных участков.

Помимо визуальных наблюдений оба криостата могут использоваться для измерения гидравлического сопротивления ΔP . В модуле с каналом круглого сечения (рис. 3), кроме того, установлен датчик истинного объемного паросодержания, на котором остановимся подробнее в следующем разделе.

2.2. Измерение истинного объемного паросодержания

Как было показано в^{10/}, для измерения истинного объемного паросодержания (ИОП) ДП гелия целесообразно использовать метод, основанный на разнице величин диэлектрической проницаемости жидкой $\epsilon_{ж}$ и газообразной $\epsilon_{г}$ фаз^{11/}. При этом средняя диэлектрическая проницаемость двухфазной смеси $\epsilon_{дф}$ зависит от величины ИОП. Помещая двухфазный поток в электрическое поле \vec{E} измерительного конденсатора, по изменению его емкости $C(\epsilon_{дф})$ можно определить соот-

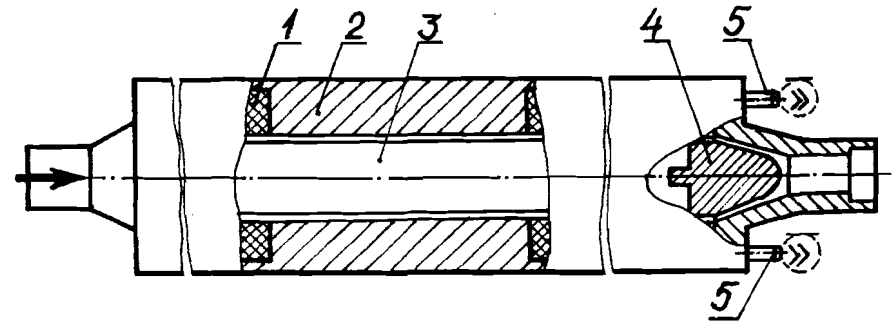


Рис.4. Датчик истинного объемного паросодержания с каналом кольцевого сечения. 1 — диэлектрическая вставка; 2 — корпус; 3 — центральный электрод; 4 — вставка для формирования потока; 5 — ВЧ разъемы.

ветствующее значение ϕ . Непосредственное измерение этой емкости является довольно сложным, поэтому мы использовали более удобный высокочастотный метод, применявшийся и другими авторами^{12,13/}. Этот метод состоит в том, что емкость $C_{дф}(\epsilon_{дф})$ включается в некоторый резонансный контур, собственная частота которого соответствует вполне определенному значению $\phi(\epsilon_{дф})$.

Схема датчика ИОП с каналом кольцевого сечения приведена на рис.4. Обкладками сигнальной емкости служат непосредственно стенки канала. Измерительный резонатор образуется путем подключения к этой емкости индуктивного элемента в виде закороченных отрезков коаксиальных линий. Электромагнитные колебания в датчике возбуждаются генератором качающейся частоты. С обеих сторон измерительной части датчика расположены участки гидродинамической стабилизации.

В датчике паросодержания с каналом круглого сечения (рис. 5) для создания измерительного резонатора использован другой принцип^{14/}. На поверхности части канала из стеклянной трубки 4 наносится меандровая "длинная линия" 3. При возбуждении в этой линии стоячей волны распределение потенциала поля U на поверхности трубки в некотором сечении $z = \text{const}$ близко (для первой гармоники) к синусоидальному. Это обеспечивает высокую однородность поля \vec{E} при достаточной длине меандра и относительно большом числе проводников в линии.

Существенное преимущество обоих датчиков состоит в том, что при работе на гелии их рабочая характеристика практически линейна, а калибровка предельно проста^{15/}.

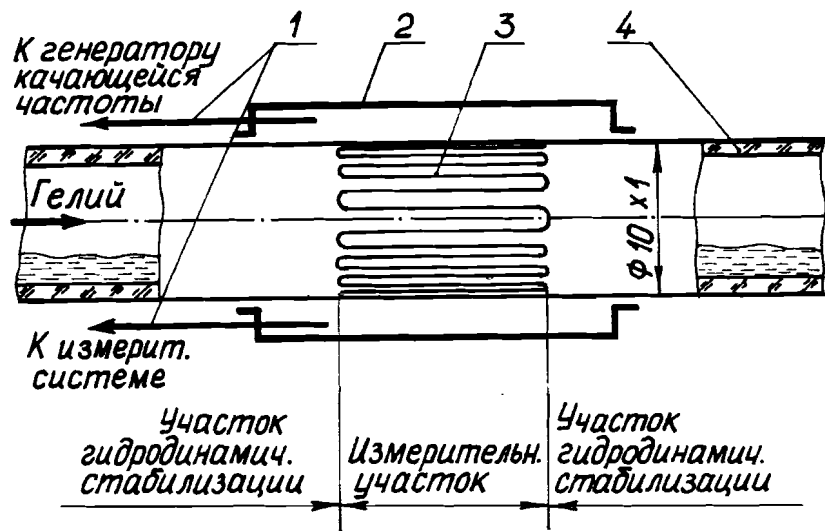


Рис.5. Датчик истинного объемного паросодержания с каналом круглого сечения. 1 — штуры связи; 2 — металлический экран; 3 — меандр; 4 — стекланный канал для гелия.

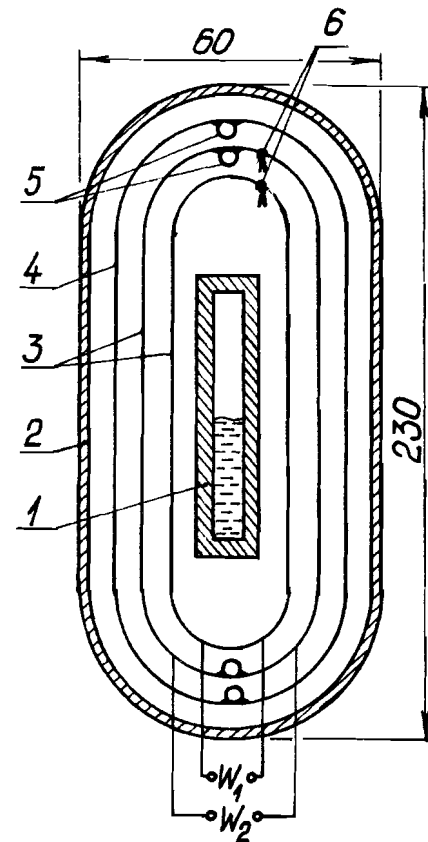
2.3. Измерение гидравлического сопротивления

Как отмечено выше, в криостатах с визуальными участками предусмотрена возможность измерения гидравлического сопротивления. Для этого в канале круглого сечения (рис. 3) служат камеры отбора давления с впаянными в них импульсными трубками.

Сечение криостата со щелевым каналом (рис.1) схематично представлено на рис.6. Экспериментальный канал сечением 30×1 мм, длиной 400 мм изготовлен из стали X18H10T. Через равные промежутки на нем установлены шесть импульсных трубок для отбора давления. Перед экспериментальным каналом расположен участок гидродинамической стабилизации потока длиной 100 мм.

Возможность измерения гидравлических сопротивлений предусмотрена как в адиабатных, так и неадиабатных условиях. Обогрев канала осуществлялся за счет излучения от медных экранов 3 с нагревателями W1 и W2¹⁷. При подаче определенной мощности на нагреватель W1 мощность на W2 подбирается так, чтобы температура экранов была одинаковой. В этом случае вся энергия, подаваемая на нагреватель W1, излучается на гелиевый канал, что позволяет точно регулировать и просто определять величину плотности теплового потока к гелию

Рис.6. Сечение участка для измерения гидравлического сопротивления в канале щелевого сечения. 1 — гелиевый канал; 2 — вакуумный корпус; 3 — экраны для подвода тепловой нагрузки; 4 — азотный экран; 5 — трубки для подачи азота; 6 — термопары; W1 и W2 — нагреватели.



(в диапазоне от ~ 1 до ~ 1500 Вт/м²). Температура экранов контролируется с помощью двух медь-константановых термопар 6.

Для измерения гидравлического сопротивления в трубах при адиабатных и неадиабатных условиях предназначен еще один криостат. Экспериментальный участок этого модуля, представляющий собой трубку $\varnothing 5,03 \times 0,21$ мм длиной 2 м из стали X18H10T, имеет три камеры отбора давления, расположенные на расстоянии 1 м друг от друга¹⁷. Обогрев осуществляется непосредственным пропусканием электрического тока через трубку.

В качестве измерителей гидравлического сопротивления во всех криостатах используются преобразователи разности давлений "Сапфир-22ДД".

3. СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ГЕЛИЯ

Схема криогенного стенда приведена на рис.7. В соответствии с этой схемой поток гелия из установки КГУ-250/4,5 проходит дроссельные вентили 2 и 3, криостат 15, последовательно соединенные экспериментальные модули 4 — 9, затем возвращается в сборник 1 КГУ. За счет разности давлений в криостате 15 и теплообменнике 14 поток гелия охлаждается до состояния недогретой жидкости. Необходимое разрежение в криостате 15 создается эжектором 11. В криостате 15 также установлены диафрагмы для измерения расхода 13 и формирователь входного паросодержания 12. Подпитка криостата 15 гелием осуществляется через магистраль 16.

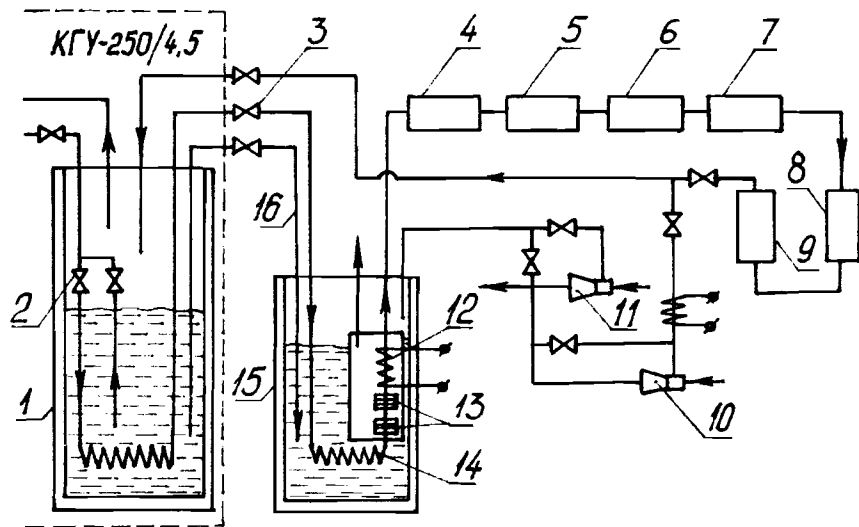


Рис.7. Схема экспериментального стенда (обозначения в тексте).

Помимо работы по замкнутому циклу предусмотрен вариант работы стенда по разомкнутой схеме. При этом гелий поступает в экспериментальные криостаты из сборника 1 КГУ под действием избыточного давления или разрежения, создаваемого эжектором 10. Такой вариант позволяет исключить пульсации потока, вызываемые работой компрессора, а также проводить исследования при пониженных давлениях.

Для измерения расхода и контроля термодинамических параметров криоагента в криостате 15 и модулях 4 – 9 установлены германиевые термометры сопротивления и преобразователи абсолютного давления типа "Сапфир-22ДА". Опрос датчиков производится системой сбора и обработки данных.

4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Структурная схема системы сбора и обработки данных приведена на рис.8. Все электронные блоки выполнены в стандарте КАМАК. Связь между ЭВМ и шиной КАМАК осуществляется через контроллер крейта типа 106А. Измерительная часть системы состоит из трех относительно автономных подсистем, предназначенных для регистрации сигналов с датчиков паросодержания, давления и температуры.

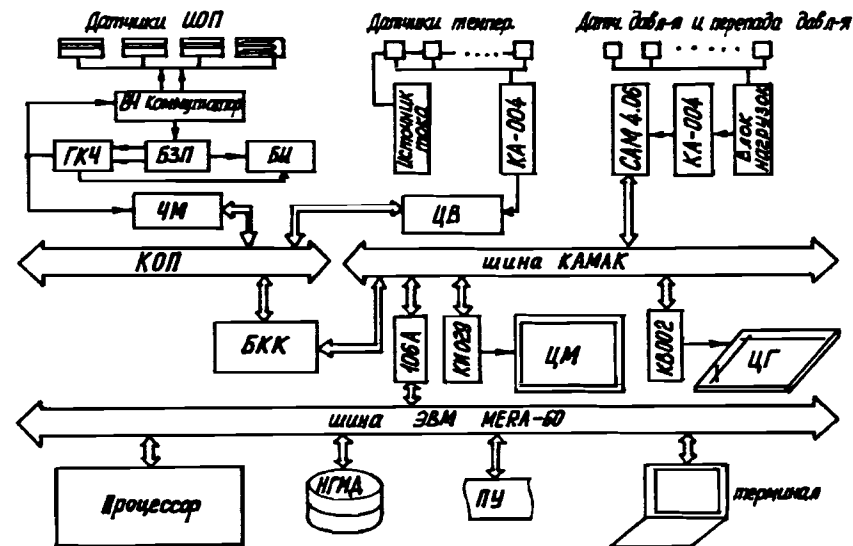


Рис.8. Структурная схема автоматизированной системы сбора и обработки данных: БИ — блок индикации, ГКЧ — генератор качающейся частоты; БЗП — блок захвата пика; ЧМ — частотомер ЧЗ-47А; ЦВ — цифровой вольтметр; КА 004 — коммутатор; САМ 4.06 — интегрирующий АЦП САМ4.06-21; 106А — контроллер крейта КАМАК; КИ 029 — интерфейс цветного телевизионного монитора; ЦМ — цветной монитор; КВ 002 — выходной регистр; ЦГ — цветной графопостроитель; НГМД — накопитель на гибких магнитных дисках; ПУ — печатающее устройство; БКК — блок контроллера канала общего пользования (КОП) (интерфейс IEEE/КАМАК).

Измерение ϕ производится с помощью описанных в разделе 2.2 датчиков ИОП. Коммутация сигналов с датчиков осуществляется высокочастотным коммутатором. Для определения резонансной частоты используются характеристикограф Х1-43, блок захвата пика БЗП и частотомер ЧЗ-47А. Считывание данных с частотомера в магистраль КАМАК производится через блок интерфейса IEEE-488¹⁸. При передаче сигналов от преобразователей давления к измерительной части используется токовый выход "Сапфиров", что сделано для повышения помехоустойчивости. Диапазон измеряемых токов 0-20 мА. Коммутация сигналов осуществляется релейным коммутатором КА-004¹⁹. Перед коммутацией токи преобразуются в напряжения на нагрузочных резисторах типа ПТМН-0,5÷200 Ом. Измерения производятся интегрирующим АЦП САМ 4.06-21²⁰.

Измерение сопротивлений термометров, установленных на стенде, производится вольтметром "Keithley-181" по 4-проводной схеме. Измерительный ток — 10 мкА. Вольтметр связан с шиной КАМАК через блок интерфейса IEEE-488.

На основе показаний датчиков давления, температуры, истинного объемного паросодержания и величины мощности, выделяемой в формирователе паросодержания, автоматизированная система производит расчет основных характеристик потока. Необходимые термодинамические свойства гелия (например, для вычисления расхода G и расходного массового паросодержания X) определяются методом линейной аппроксимации по таблицам^{12,11}, которые введены в оперативную память ЭВМ. Погрешности определения основных характеристик следующие: расхода — не более $6 \div 7\%$, расходного массового паросодержания — $9 \div 10\%$, температуры потока — 1% , ИОП — 5% , гидравлического сопротивления — 2% .

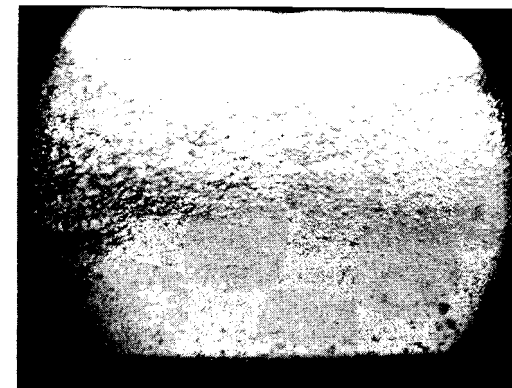
В ходе эксперимента результаты измерений и расчетов выводятся на цветной монитор ВКУ-42Ц и/или графопостроитель WX4675, что позволяет получать информацию в удобной форме. Управление монитором и графопостроителем осуществляется через блоки КИ-029^{12,2} и КВ-002^{12,3}.

Программное обеспечение написано на языках FORTRAN и MACRO-11 с использованием пакетов GRAFOR^{12,4}, CAMLIB^{12,5}. Предусмотрено четыре режима работы системы: "Инициализация", "Сбор", "Рисование", "Запись". В режиме "Инициализация" определяются параметры экспериментальной системы: конфигурация аппаратуры, количество опрашиваемых датчиков, имена служебных файлов и т.д. В режиме "Сбор" осуществляется непрерывное сканирование сигналов с датчиков. Измеряемые величины записываются в кольцевые буферы, отведенные для каждого датчика в оперативной памяти ЭВМ. При проведении эксперимента всегда присутствуют некоторые флуктуации потока в стенде. Чтобы исключить их влияние на результат, в режиме "Рисование" проводится статистическая обработка собранных данных. При этом предполагается, что измеряемые случайные величины имеют нормальное распределение. Полученные экспериментальные зависимости выводятся на графические устройства. Для сравнения также могут быть выведены результаты расчета характеристик ДП по наиболее распространенным теоретическим зависимостям. В режим "Запись" экспериментальные данные записываются на гибкий магнитный диск или магнитную ленту.

5. ХАРАКТЕРНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рассмотренном криогенном стенде проводятся комплексные исследования характеристик двухфазных потоков гелия в широком

Рис.9. Структура двухфазного потока гелия при $P=125$ кПа; а) канал щелевого сечения 30×1 мм, $X = 0,23$, $m = 66$ кг/м²/с; б) канал круглого сечения $\varnothing 8$ мм, $X = 0,11$, $m = 20$ кг/м²/с.

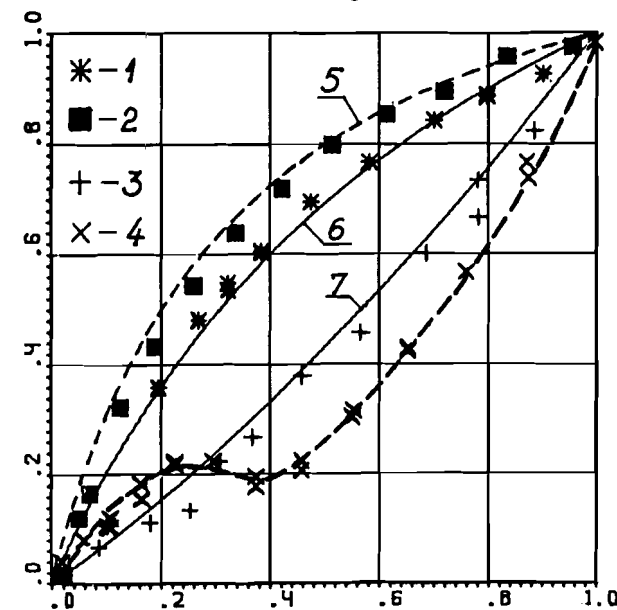


а



б

Рис.10. Зависимости истинного объемного паросодержания ϕ и приведенного гидравлического сопротивления $\bar{\Delta P}$ от расходного массового паросодержания X : 1 — $\phi(X)$, $m=27$ кг/м²/с, $P = 138$ кПа, труба; 2 — $\phi(X)$, $m = 86$ кг/м²/с, $P = 160$ кПа, труба; 3 — $\bar{\Delta P}(X)$, $m = 27$ кг/м²/с, $P = 138$ кПа, канал щелевого сечения; 4 — $\bar{\Delta P}(X)$, $m = 110$ кг/м²/с, $P = 160$ кПа, канал щелевого сечения; 5 — $\phi(X)$ расчет по гомогенной модели при $P = 160$ кПа; 6 и 7 — $\phi(X)$ и $\bar{\Delta P}(X)$, расчет по зависимостям¹⁹ для расслоенного течения при $P = 138$ кПа.



диапазоне изменения режимных параметров (давление насыщения 100 — 200 кПа, расход криоагента $0,5-15 \times 10^{-3}$ кг/с, паросодержание 0 — 1).

Остановимся на двух характерных примерах. На рис. 9 приведены фотографии двухфазных потоков в каналах круглого и щелевого сечений соответственно при расслоенном гладком и прерывистом режимах течения^{17,91}. На основе таких фотографий могут быть построены карты режимов течения, позволяющие определять характер распределения фаз в потоке по известным режимным параметрам (см.^{16,71}). На рис.10 представлены зависимости приведенного гидравлического сопротивления $\Delta \bar{P} = (\Delta P_{\text{дф}} - \Delta P_{\text{ж}}) / (\Delta P_{\text{г}} - \Delta P_{\text{ж}})^{1/3}$ и истинного объемного паросодержания ϕ от массового расходного паросодержания X . Из рисунка видно, что массовая скорость существенно влияет на вид зависимостей $\Delta \bar{P}(X)$ и $\phi(X)$, что обусловлено изменением режима течения ДП.

В заключение авторы выражают благодарность В.Н.Павлову за ценную помощь в создании визуального участка с каналом щелевого сечения, а также Ю.П.Филиппову за постановку задач, ряд технических решений и координацию работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ageev A.I. и др. — Препринт ИФВЭ ОУНК 80-138, Серпухов, 1980.
2. Hirabayashi H., Tsuchiya K. — ICFA Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics, 1986 12-16 May, Brookhaven National Laboratory, p. 11.
3. Bruzzese R. et al. — Proc. Twelfth Intern. Cryogenic Engineering Conf., 1988, Batterworths, p. 107.
4. Studygroup Superconducting Magnets for HERA. Hamburg, June 1981. DESY-HERA 81/82.
5. Rubin N.B., Filippov Yu.P. — III International ICFA Workshop, Protvino, USSR, 19-23 October, 1981, p. 172.
6. Мамедов И.С., Салимов С.Е., Филиппов Ю.П. — Сообщение ОИЯИ P8-84-156, Дубна, 1984.
7. Filippov Yu.P., Mamedov I.S., Selyunin S. Yu. — Proc. Twelfth Intern. Cryogenic Engineering Conf., 1988, Batterworths, p. 198.
8. Селюнин С.Ю., Филиппов Ю.П. — Теплоэнергетика, 1988, № 9, с. 48.
9. Мамедов И.С., Селюнин С.Ю., Филиппов Ю.П. — ИФЖ, 1987, т. 52, № 1, с. 154.
10. Данилов В.В. и др. — Краткие сообщения ОИЯИ № 15-86, Дубна, 1986, с. 42.
11. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. — Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. М.: Наука, 1978.
12. Никитин Г.А., Крутов Е.В. — Метрологическая служба в СССР, М., 1983, вып.5, с. 23.

13. Александров В.А. и др. — Препринт ИЭА-4036/10, М., 1984.
14. Лункин Б.В., Иванов А.В., Совлуков А.С. — Авторское свидетельство СССР № 1020774А, Бюллетень изобретений, 1983, № 20, с. 133.
15. Danilov V.V., Filippov Yu.P., Mamedov I.S. — JINR Preprint E8-89-495, Dubna, 1989.
16. Bald W.B. et al. — Cryogenics, 1977, v. 17, No. 1, p. 33.
17. Мамедов И.С. и др. — ИФЖ, 1983, т. 44, № 5, с. 725.
18. Калинин В.А. — Сообщение ОИЯИ P10-87-57, Дубна, 1987.
19. Антюхов В.А. и др. Сообщение ОИЯИ 10-11636, Дубна, 1978.
20. CAM 4.06-21. INTEGRATING ANALOG-DIGITAL CONVERTER. KFKI, Budapest, 1983.
21. McCarty R.D. — Thermophysical Properties of Helium-4 from 2 to 1500 K with Pressures to 1000 Atmospheres. NBS Technical Note, 631, 1972.
22. Вьонг Дао Ви и др. — Сообщение ОИЯИ 10-81-755, Дубна, 1981.
23. Журавлев Н.И. и др. Сообщение ОИЯИ 10-8754, Дубна, 1977.
24. Баяковский Ю.М., Галактионов В.А., Михайлова Т.Н. — ГРАФОР. Графическое расширение фортрана. М.: Наука, 1985.
25. Виноградов В.И., Каравичева Т.Л., Прохвятилов М.А. — П-0192 ИЯИ АН СССР, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 сентября 1989 года.