

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

6204/2-80

22/12-80
8-80-586

А.И.Агеев, В.Ф.Буринов, Ю.С.Дерендяев,
А.Б.Кузнецов, В.И.Пряничников, Н.Б.Рубин

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ
ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ГЕЛИЯ
ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ
ДОКРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

1980

Предварительный анализ теплосъема показывает, что применение двухфазного гелия имеет ряд преимуществ перед применением однофазного при криостатировании протяженных систем. Например, однофазный гелий, отводя тепло от магнитов УНК^{1/}, нагревается сам, что приводит к повышению температуры обмоток магнита. Увеличение же расхода однофазного гелия с целью снижения величин разогрева технически сложно и экономически нецелесообразно.

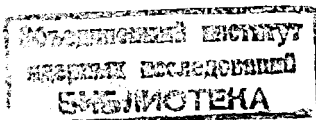
При использовании двухфазного потока гелия тепловая нагрузка /как стационарная, так и импульсная/ не приводит к разогреву магнита, т.к. изменяется лишь паросодержание, а температура потока остается постоянной или, при наличии гидравлического сопротивления каналов, даже уменьшается на выходе из каналов.

Существующие методы расчета гидравлического сопротивления в двухфазных системах разработаны главным образом для пароводяной смеси, возможность экстраполяции этих методов на случай применения гелия требует экспериментальной проверки. В этой связи задача исследования гидродинамики двухфазного потока гелия весьма актуальна, так как существующий экспериментальный материал на эту тему^{2,3/} еще недостаточен.

Для исследования гидродинамики двухфазных и однофазных потоков гелия на базе серийной криогенной установки ХГУ/250/4,5^{4/} в ОНМУ ОИАИ создан стенд^{5/} /рис.1/, состоящий из криогенного имитатора магнита /КИМ/ 1, криостата 2, криогенных гелиевых магистралей /КГМ/ 3,4,5, вакуумной системы и контрольно-измерительных приборов.

Жидкий гелий из установки ХГУ-250/4,5 проходит последовательно через вентиль ДЗ, КГМ-3, КИМ, КГМ-4, вентиль Д4 и сепарируется в криостате на пар и жидкость. Пары гелия из криостата возвращаются через магистраль КГМ-5 в установку. В криогенном имитаторе магнита тепловой поток передается жидкому гелию непосредственно от стенок каналов, для чего через них пропускается электрический ток.

В процессе проведения экспериментов тепловая нагрузка на КИМ q изменялась от 32 до 57 Вт/м², паросодержание двухфазного потока на входе в КИМ изменялось с помощью нагревателя W_3 в пределах $x_1 = 0,25 \div 0,75$ при массовой скорости потока гелия через КИМ $\rho w = 140 \text{ кг/с}\cdot\text{м} \div 180 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ и давлении $P = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.



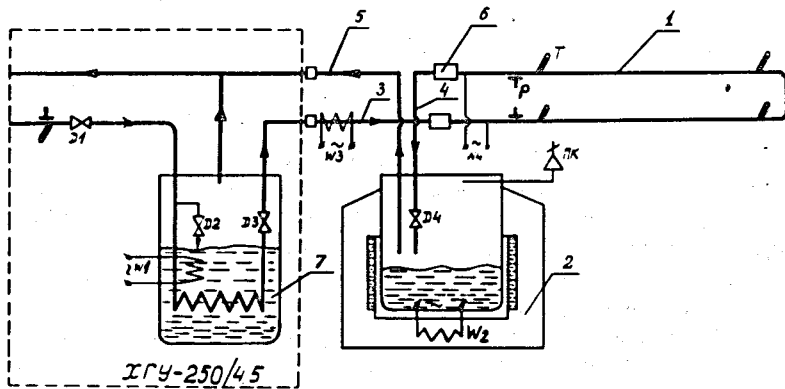


Рис.1. Принципиальная схема стенда. 1 - криогенный имитатор магнита; 2 - криостат гелиевый; 3,4,5 - криогенные гелиевые магистрали; 6 - соединительная муфта; 7 - гелиевый сосуд установки ХГУ-250/4,5; Д1, Д2, Д3, Д4 - дроссельные вентили; W₁, W₂, W₃, W₄ - электрические нагреватели; ПК - предохранительный клапан; P - измерение давления; T - измерение температуры.

Измерение гидравлического сопротивления потока гелия в каналах проводилось сильфонным дифманометром. Массовое паросодержание гелия и значения расхода его потока через КИМ определялись из уравнений энергетического баланса, для чего измерялись значения тепловых потоков, создаваемых электрическими нагревателями W₁, W₂, W₃, W₄, давления и температуры потока гелия после вентилей Д3, на входе и выходе из КИМ и в криостате 2 /рис.1/.

Энергетический баланс стенда выглядит следующим образом:

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad /1/$$

где Q - производительность ХГУ-250/4,5; Q₀ - теплопритоки из окружающей среды; Q₁ ÷ Q₄ - нагрузки электронагревателей. Равенство /1/ будет выполняться при поддержании постоянными уровней жидкого гелия и положения газгольдера, что достигается регулированием как мощностей Q₁ ÷ Q₄, так и всей установки ХГУ-250/4,5.

Массовый расход потока гелия через КИМ регулировался вентилем Д3 и определялся по формуле:

$$G = \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_0}{i_2 - i_1}, \quad /2/$$

где i₁, i₂ - соответственно энтальпии жидкости и пара, определенные по параметрам гелия после вентилей Д3 и в криостате. Паросодержание на входе x₁ и выходе x₂ КИМа определялось по формулам

$$x_1 = \frac{Q_3 + Q_{01}}{G \cdot r} + \frac{i_1 - i^1}{r}, \quad /3/$$

$$x_2 = x_1 + \frac{Q_4 + Q_{02}}{G \cdot r}, \quad /4/$$

где Q₀₁, Q₀₂ - теплопритоки из окружающей среды соответственно к КГМ-3 и КИМу; r - скрытая теплота парообразования; i¹ - энтальпия жидкости, определяемая по параметрам на входе в КИМ. Для последующей обработки результатов эксперимента паросодержание в КИМе бралось как

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2}. \quad /5/$$

Гидравлическое сопротивление потока гелия определяется по формуле /6/

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{(\rho w)^2 \cdot L}{2d \cdot \rho'} [1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)], \quad /6/$$

где λ - коэффициент сопротивления; ρw = $\frac{G}{F}$ - средняя массовая скорость потока по сечению каналов КИМа; F - сечение каналов; L - длина каналов; d - диаметр канала; ρ', ρ'' - соответственно плотности жидкости и пара на линии насыщения.

Экспериментальные результаты исследования гидравлического сопротивления двухфазного потока гелия в каналах КИМа с постоянным тепловым потоком представлены в виде зависимостей интегральных величин ΔP_{экс}(x), λ(x) * при различных параметрах P, ρw, q.

Зависимость ΔP_{экс}(x) для разных массовых скоростей при среднем давлении в КИМе P = 0,15 МПа и постоянном тепловом потоке q = 32 Вт/м² изображена на рис.2. На этом же рисунке показаны соответствующие зависимости ΔP(x), рассчитанные по гомогенной модели, т.е. по формуле /6/, в которой

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \left(\frac{\rho \cdot w \cdot d}{\mu'} \right)^{-0,237} \cdot \left[1 + \left(\frac{\mu''}{\mu'} - 1 \right) x \right]^{0,237}, \quad /7/$$

* Определение величин теплопритоков из окружающей среды ведет к относительной погрешности в вычислениях массовых расходов и паросодержания ~10%; относительная погрешность ΔP ~1%.

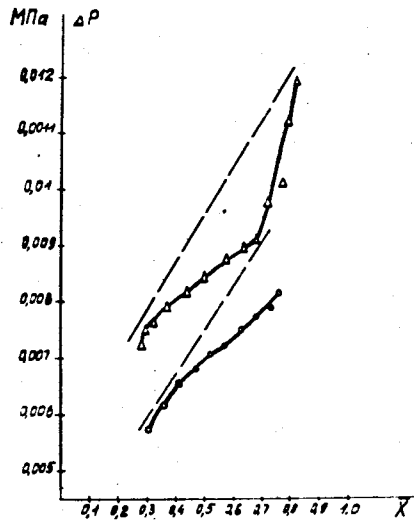


Рис.2. Зависимость гидравлического сопротивления КИМ от среднего паросодержания при различных массовых скоростях: $\circ - \rho w = 140 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$; $\Delta - \rho w = 170 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$; - - - - соответствующие зависимости $\Delta P(x)$, рассчитанные на основе гомогенной модели.

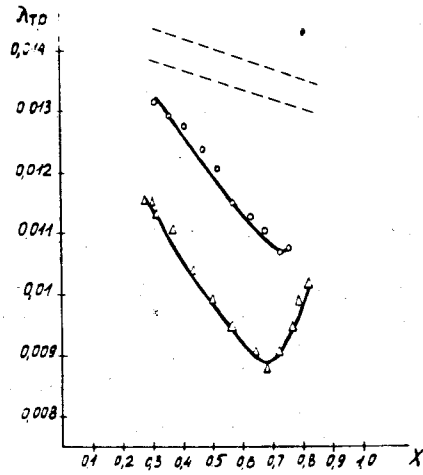


Рис.3. Зависимость коэффициента сопротивления от среднего паросодержания при различных массовых скоростях: $\circ - \rho w = 140 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$; $\Delta - \rho w = 170 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$; - - - - соответствующие зависимости, рассчитанные на основе гомогенной модели.

μ', μ'' - соответственно динамические коэффициенты вязкости жидкости и пара на линии насыщения. На рис.3 приведены зависимости $\lambda(x)$, рассчитанные по формуле /6/ на основе экспериментальных значений $\Delta P_{\text{экс}}$, приведенных на рис.2. Там же пунктиром показаны зависимости, соответствующие /7/.

Как видно, в исследованной области x от 0,3 до 0,8 гидравлическое сопротивление заметно меньше рассчитанного по гомогенной модели и при фиксированном $x < 0,8$ растет с увеличением массовой скорости медленнее, чем это следует из теории. Экспериментальные значения $\lambda(x)$ также существенно отличаются от соответствующих теоретических величин, причем это различие растет с увеличением массовой скорости. Подобные зависимости $\lambda(x)$ наблюдались для парожидкостных потоков калия /7/.

Отклонение экспериментальных значений гидравлического сопротивления и коэффициента сопротивления от величин, соответ-

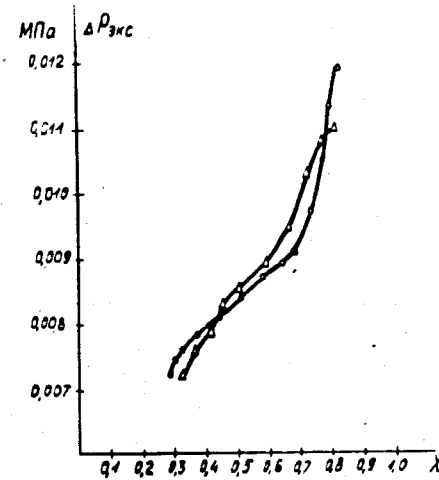


Рис.4. Зависимость гидравлического сопротивления КИМ от среднего паросодержания при различных тепловых потоках: $\circ - q = 32 \text{ Вт/м}^2$; $\Delta - q = 57 \text{ Вт/м}^2$.

ствоющих гомогенной модели, можно объяснить следующим образом. В условиях развитой турбулентности парожидкостная смесь представима в области малых x как жидкость, внутри которой находятся пузырьки пара /причем с ростом x число пузырьков растет/, а в области больших x - как пар, внутри которого находятся капельки жидкости /причем число капелек растет с уменьшением x /. Средние размеры пузырьков и капелек, очевидно, определяются поперечным градиентом продольной скорости, т.е. при заданной геометрии зависят от средней скорости потока. Как известно, наличие взвесей в потоке ведет к уменьшению кинематического коэффициента турбулентной вязкости и, следовательно, к уменьшению его гидравлического сопротивления, тем больше, чем больше количество взвесей /8/. Так как в обсуждаемых экспериментах на КИМе имелся внешний теплоприток, то это должно было приводить к обогащению пристеночного ламинарного слоя паровой фазой. Последнее также должно уменьшать гидравлическое сопротивление потока. Все эти факторы могут объяснить полученные экспериментальные различия с теоретическими результатами, основанными на гомогенной модели.

На рис.4 представлены зависимости $\Delta P_{\text{экс}}(x)$ при давлении $P = 0,16 \text{ МПа}$, массовой скорости $170 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$ и различных тепловых нагрузках. Как видно, в пределах экспериментальных погрешностей /относительная погрешность вычисления $x \approx 10\%$ эти зависимости совпадают.

Приведенные экспериментальные результаты показывают, что законы течения двухфазного гелия существенно отличаются от законов течения гомогенных сред. Для выявления этих закономерностей, достаточных для проведения обоснованных расчетов, необходимы дальнейшие, более точные эксперименты.

В заключение авторы выражают благодарность Т.Б.Беловой и Ю.П.Филиппову за полезные обсуждения и сотрудникам научно-

экспериментального отдела ускоряющих систем, принимавшим участие в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балбеков В.И. Ускорительно-накопительный комплекс ИФВЭ. В кн.: X Международная конференция по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Серпухов, 1977, т.1., с.127-141.
2. Теплопередача при низких температурах. Сборник под ред. У.Фроста. "Мир", М., 1977.
3. Деев В.И. АЭ, 1977, т.42, в.4, с.339.
4. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 8-10477, Дубна, 1977.
5. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 13-12162, Дубна, 1979.
6. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин И.Г. Гидродинамика и теплообмен парообразования. "Высшая школа", М., 1977.
7. Аладьев И.Т., Гаврилова Н.Д., Додонов Л.Д. Гидродинамика двухфазного потока в трубах гелия. В сборнике: Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства. "Наука", М., 1968.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. ГИТТЛ, М., 1957.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 августа 1980 года.