

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

663/2-81

9/2-81
8-80-699

Л.Яншак

АНАЛИЗ ЕМКОСТНОГО МЕТОДА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРСОДЕРЖАНИЯ
В ПОТОКЕ ДВУХФАЗНОГО ГЕЛИЯ

1980

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных параметров потока двухфазного гелия, используемого для криостатирования объектов, является его истинное объемное паросодержание, которое определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\delta V_{\text{п}}}{\delta V}, \quad //1/$$

где $\delta V_{\text{п}}$ - объем пара в элементарном объеме δV . Для определения влажности водяного пара применяются разные методы, в том числе емкостные или резистивные ^{/1/}, калориметрические и радиационные ^{/2/}.

Калориметрический метод был использован для определения паросодержания в потоке двухфазного гелия на выходе из объекта криостатирования ^{/3/}.

Основным недостатком этого метода является то, что в процессе измерения паросодержания к потоку необходимо подвести тепло для испарения жидкой фазы, в результате чего двухфазный гелий превращается в пар.

Поэтому для контроля паросодержания на входе в объект такой метод неприемлем. Требования к методу определения паросодержания в таком случае можно сформулировать следующим образом:

- сохранение величины паросодержания на входе и выходе потока из датчика параметра, т.е. минимальное значение теплового потока от датчика к криоагенту;
- малая инерция измерительной системы;
- минимальные размеры датчика;
- надежность датчика и измерительной системы;
- простая калибровка системы;
- малая чувствительность датчика к магнитному полю и радиационному облучению.

На основе приведенных выше требований и физических свойств жидкого и газообразного гелия можно использовать емкостный метод, который основан на разнице диэлектрической проницаемости газообразного и жидкого гелия. Хотя эта разница относительно невелика /несколько процентов/, емкостные системы измерения уровня жидкого гелия нашли широкое применение ^{/4-6/}.

В работе обсуждена проблема определения паросодержания двухфазного равновесного гелия емкостным методом, приведены ре-

зультаты анализа требований точности измерения емкости датчика и температуры потока гелия.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРСОДЕРЖАНИЯ ЕМКОСТНЫМ МЕТОДОМ

Диэлектрическую проницаемость ϵ однородной системы, состоящей из жидкой матрицы и пузырьков пара, определяет формула Винера ^{/1/}:

$$\frac{1 - \epsilon/\epsilon_{\text{ж}}}{2 + \epsilon/\epsilon_{\text{ж}}} = a \cdot \frac{1 - \epsilon_{\text{п}}/\epsilon_{\text{ж}}}{2 + \epsilon_{\text{п}}/\epsilon_{\text{ж}}}, \quad /2/$$

где $\epsilon_{\text{п}}, \epsilon_{\text{ж}}$ - диэлектрическая проницаемость жидкого и газообразного гелия соответственно, a - объемное паросодержание. При использовании емкостного датчика /конденсатора/ с однородным электрическим полем можно заменить в уравнении /2/ величины $\epsilon, \epsilon_{\text{ж}}$ и $\epsilon_{\text{п}}$ соответственно величинами $C, C_{\text{ж}}$ и $C_{\text{п}}$, где C - емкость датчика, заполненного двухфазным гелием, $C_{\text{ж}}$ - емкость датчика, заполненного жидким гелием, и $C_{\text{п}}$ - емкость датчика с газообразным гелием. В таблице приведены величины диэлектрической проницаемости жидкого и газообразного гелия в диапазоне температур 3,5÷5 К ^{/1/}, а также величины $b = \epsilon_{\text{п}}/\epsilon_{\text{ж}}$ и $k = 1 - b$, используемые в дальнейшем.

В случае пузырькового или эмульсионного течения двухфазного гелия в направлении, перпендикулярном электрическому полю конденсатора, необходимо ввести так называемый фактор формы f , который включает форму пузырька и ориентацию его главных осей относительно электрического поля ^{/1/}.

Уравнения для паросодержания можно потом написать

$$a = \frac{(1 - C/C_{\text{ж}}) [1 + (f-1) C_{\text{п}}/C_{\text{ж}}]}{(1 - C_{\text{п}}/C_{\text{ж}}) [1 + (f-1) C/C_{\text{ж}}]}, \quad /3/$$

Используя обозначения $b = \epsilon_{\text{п}}/\epsilon_{\text{ж}}$ и $f_0 = f - 1$, получаем:

$$a = A \frac{1 - C/C_{\text{ж}}}{1 + f_0 \cdot C/C_{\text{ж}}}, \quad /4/$$

где

$$A = \frac{1 + f_0 \cdot b}{1 - b}. \quad /5/$$

Таблица

T	$\epsilon_{\text{ж}}$	$\epsilon_{\text{п}}$	b	k
3,50	1,05113	1,00300	0,95421	$4,579 \cdot 10^{-2}$
3,60	1,05066	1,00334	0,95496	4,504
3,70	1,05016	1,00371	0,95576	4,424
3,80	1,04963	1,00411	0,95663	4,337
3,90	1,04906	1,00455	0,95757	4,243
4,00	1,04845	1,00503	0,95858	4,142
4,10	1,04780	1,00555	0,95967	4,033
4,20	1,04710	1,00612	0,96086	3,914
4,30	1,04635	1,00674	0,96214	3,786
4,40	1,04553	1,00744	0,96356	3,644
4,50	1,04463	1,00821	0,96513	3,487
4,60	1,04364	1,00909	0,96689	3,311
4,70	1,04252	1,01010	0,96890	3,110
4,80	1,04125	1,01128	0,97121	2,879
4,90	1,03974	1,01273	0,97402	2,598
5,00	1,03785	1,01461	0,97760	2,240

Из формулы /4/ получаем

$$\frac{C}{C_{\text{ж}}} = \frac{A - a}{A + f_0 \cdot a}. \quad /6/$$

В случае симметричных /сферических/ пузырьков с размерами на много меньше, чем размер датчика, фактор формы равен величине 1,5 ^{/1/} и, следовательно, $f_0 = 0,5$.

Можно показать, что при аппроксимации формулы /6/ линейной зависимостью типа

$$C/C_{\text{ж}} = 1 - ka, \quad /7/$$

где $k = 1 - b$, разница в определении величины a по формуле /7/ и /6/ не превышает 0,5%. На рис.1 приведена температурная за-

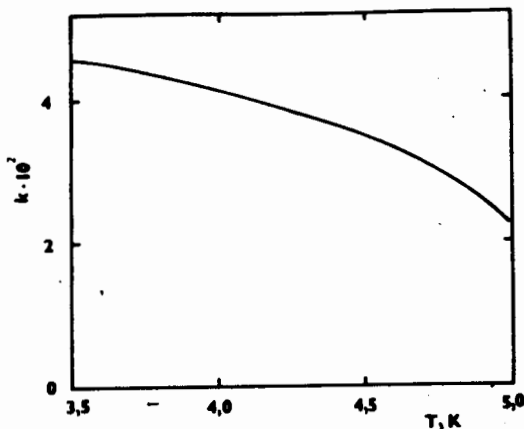


Рис.1. Температурная зависимость величины $k = 1 - \epsilon_{II} / \epsilon_{Ж}$ в области температур $3,5 \div 5$ К.

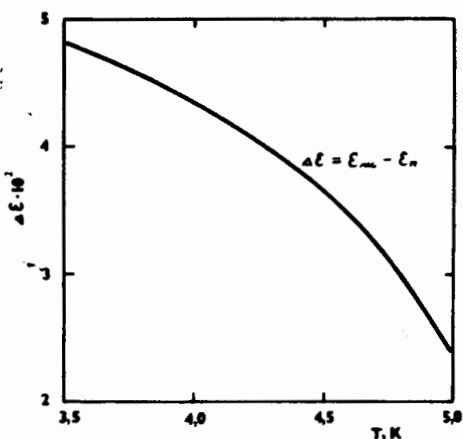


Рис.2. Температурная зависимость величины $\Delta\epsilon = \epsilon_{Ж} - \epsilon_{II}$ в области температур $3,5 \div 5$ К.

Из формулы /8/ следует, что кроме величины емкости датчика необходимо знать величины k и $C_{Ж}$, которые являются функциями температуры. Необходимую точность измерения температуры можно оценить следующим образом.

зависимость величины k в диапазоне $3,5 \div 5$ К, на рис.2 - температурная зависимость $\Delta\epsilon = \epsilon_{Ж} - \epsilon_{II}$. Уравнение для объемного паросодержания можно написать из /7/ в виде

$$a = \frac{1}{k} \left(1 - \frac{C}{C_{Ж}} \right). \quad /8/$$

Уравнение /8/ является основным для определения паросодержания на основе величины емкости датчика. В случае однородного потока двухфазного равновесного гелия ($da/dt = 0$) имеет силу предположение $C = \text{const}$. Дифференцированием /8/ получаем

$$\frac{da}{dC} = - \frac{1}{k \cdot C_{Ж}}. \quad /9/$$

На основе /9/ можно написать

$$\Delta a = \frac{da}{dC} \cdot \Delta C = - \frac{\Delta C}{k \cdot C_{Ж}}. \quad /10/$$

Для определения величины a с точностью Δa необходимо измерить емкость датчика с относительной погрешностью

$$\left| \frac{\Delta C}{C_{Ж}} \right| \leq k \cdot \Delta a. \quad /11/$$

На рис.3 приведена зависимость $\Delta C / C_{Ж}$ в температурном диапазоне $3,5 \div 5$ К в случае $\Delta a = 0,01$, т.е. погрешность равна 1%.

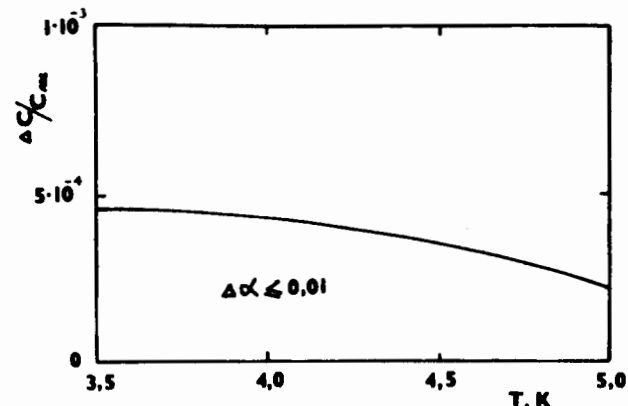


Рис.3. Необходимая чувствительность измерения емкости датчика для определения величины паросодержания с точностью 1%.

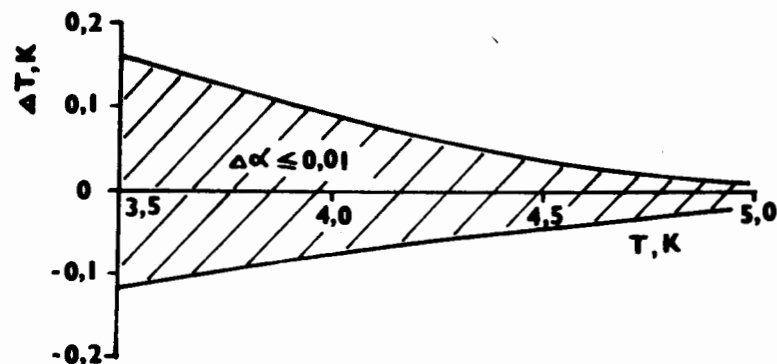


Рис.4. Необходимая точность измерения температуры двухфазного потока гелия для определения величины паросодержания с точностью 1%.

Емкость датчика можно представить как сумму емкости, которая заполняется двухфазным гелием, и емкости, которая не заполняется двухфазным гелием /емкость корпуса датчика/

$$C = C_{Д0} + C_{Д} \cdot \epsilon. \quad /12/$$

Дифференцируя уравнение /12/ по температуре, получаем

$$\frac{dC}{dT} = \frac{dC_{Д0}}{dT} + \frac{dC_{Д} \cdot \epsilon}{dT} + \frac{d\epsilon \cdot C_{Д}}{dT} . \quad /13/$$

Величины $dC_{Д0}/dT$ и $dC_{Д}/dT$ определены температурным изменением геометрии датчика, которым в диапазоне 3,5÷5 К можно по сравнению с величиной $d\epsilon/dT$ пренебречь. Итак,

$$\frac{dC}{dT} = C_{Д} \cdot \frac{d\epsilon}{dT} . \quad /14/$$

На основе /14/ можно написать:

$$\Delta C = \frac{dC}{dT} \cdot \Delta T . \quad /15/$$

Используя уравнения /14/, /15/ и /10/, получаем

$$\Delta \alpha = - \frac{\Delta T}{k(C_{Д0}/C_{Д} + \epsilon_{ж})} \cdot \frac{d\epsilon}{dT} . \quad /16/$$

Область необходимой точности измерения температуры определена граничными кривыми

$$\Delta T(0) = \Delta \alpha \frac{k(C_{Д0}/C_{Д} + \epsilon_{ж})}{d\epsilon_{ж}/dT} , \quad /17a/$$

$$\Delta T(1) = \Delta \alpha \frac{k(C_{Д0}/C_{Д} + \epsilon_{ж})}{d\epsilon_{п}/dT} . \quad /17б/$$

При предположении, что $C_{Д0}/C_{Д} = 0,1$ и $\Delta \alpha = 0,01$, получаем область требуемой точности измерения температуры, которая показана на рис. 4.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что приведенный выше анализ относится к пузырьковому или эмульсионному течению.

В общем случае, когда режим течения не известен, определение паросодержания является затруднительной проблемой, и на сегодняшний день нам неизвестно его практическое решение.

В заключение автор выражает благодарность Г.Г.Ходжибагияну за полезные замечания и Е.И.Дьячкову за постоянный интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин В.И. и др. Теплоэнергетика, 1974, №6, с.63.
2. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. "Энергия", М., 1968.
3. Агапов Н.Н. и др. ОИЯИ, Р8-12786,, Дубна, 1979.
4. Пешков В.П., Ветшинин А.Н. ПТЭ, 1978, №4, с.270.
5. Griffin J.A. Rev.Sci.Instr., 1975, 46, p.5.
6. Khirnyj V.G., Malyshev E.N. Cryogenics, 1973, 13, p.432.
7. NBS Technical Note 631, November, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 октября 1980 года.