

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P8-86-208

И.С.Мамедов, С.Ю.Селюнин, Ю.П.Филиппов

**ХАРАКТЕРИСТИКИ
РАССЛОЕННЫХ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ГЕЛИЯ**

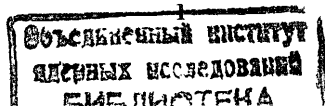
Направлено в "Инженерно-физический журнал"

1986

Введение. Зависимости гидравлических сопротивлений $\Delta P_{\text{гв}}$, истинных объемных паросодержаний φ и скольжений фаз U от расходных массовых паросодержаний X служат основными исходными данными для анализа тепловых режимов протяженных систем с горизонтальными каналами, например, магнитных систем ускорителей заряженных частиц, криостатируемых с применением двухфазных потоков гелия [1,2,3]. Характерными сечениями каналов таких систем являются кольцевые, щелевые и круглые (трубы). Число работ, посвященных этим исследованиям, весьма ограничено [4,5,6,7,8] и содержит, как правило, информацию о гидравлических сопротивлениях для труб. Следует отметить, что объем информации и форма представления результатов не дают пока оснований для выбора адекватных расчетных соотношений $\Delta P_{\text{гв}}$ в зависимости от диапазона режимных параметров двухфазного потока гелия, таких, как давление P , массовая скорость m и паросодержание X , что будет показано ниже. Исследованию истинного объемного паросодержания в горизонтальных каналах посвящена, видимо, одна работа [8], а литературные данные по гидравлическому сопротивлению каналов щелевого и кольцевого сечений при движении в них двухфазного потока гелия нам неизвестны.

Для вертикальных каналов отмеченные характеристики исследованы более полно [9,10,11,12], чем для горизонтальных. Так, в [10,11] на основе анализа экспериментального материала представлена методика расчета гидравлических сопротивлений труб для $m = 30+400 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$, $X = 0+1$, $P = (0,04+0,18) \text{ МПа}$, а в [12] приведены результаты исследования истинного объемного паросодержания в канале кольцевого сечения с относительно большим зазором $d/d_1 = 1+1,25$ при $m = 8+160 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$, $X = 0+1$, $P = (0,1+0,2) \text{ МПа}$.

Однако соответствующие характеристики горизонтальных и вертикальных каналов могут совпадать лишь для частных случаев, когда сходны режимы течений потоков. Например, при относительно больших массовых скоростях ($m > 180+200 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$) двухфазного гелия гидравлические сопротивления за счет трения в горизонтальных и вертикальных каналах практически совпадают, что отмечено в работе [5]. При относительно низких массовых скоростях ($m < 80+90 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$) режимы



течения двухфазного гелия в горизонтальных каналах становятся расслоенными [13], что несвойственно вертикальным каналам. В частности, поэтому соответствующие характеристики горизонтальных и вертикальных каналов могут различаться при прочих равных условиях.

Данная работа посвящена исследованию характеристик горизонтальных двухфазных потоков гелия, и в первую очередь, расслоенных, поскольку именно они характерны [13,24] для каналов проточной части магнитов электрофизических установок, например, ускорителей заряженных частиц [1,2,3].

Основные соотношения. Анализ характеристик горизонтальных расслоенных двухфазных потоков посвящен ряд работ, которые (в случае термодинамического равновесия фаз) базируются на уравнениях импульса для каждой фазы [14,15]:

$$A_L \left(\frac{dP}{dz} \right)_L = \tau_L S_L - \tau_i S_i \quad (1)$$

$$A_G \left(\frac{dP}{dz} \right)_G = \tau_G S_G + \tau_i S_i \quad , \text{ где} \quad (2)$$

$$\tau_L = f_L \frac{\rho_L U_L^2}{2}; \quad \tau_G = f_G \frac{\rho_G U_G^2}{2}; \quad \tau_i = f_i \frac{\rho_G (U_G - U_L)^2}{2}; \quad (3)$$

$$f_L = C_L \left(\frac{D_L U_L}{\nu} \right)^{-m}; \quad f_G = C_G \left(\frac{D_G U_G}{\nu} \right)^{-n}; \quad f_i = \kappa f_G. \quad (4)$$

Геометрические размеры каналов кольцевого, щелевого и круглого сечений показаны на рис.1.

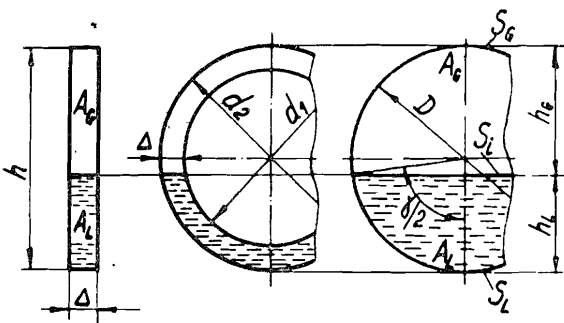


Рис. 1. Геометрические характеристики каналов щелевого, кольцевого и круглого сечений.

в [17] для определения величин τ_L и f_L используется так называемая псевдосредняя скорость U_{L1} вместо средней $U_L = \frac{1}{A_L} \int_0^{A_L} U(z) dA$

в [16], причем $U_{L1}(\varphi) > U_L$ при $0,5 < \varphi < 1$. Такой подход позволил авторам работы [17] получить удовлетворительное согласование расчетных соотношений для гидравлического сопротивления и истинного объемного паросодержания двухфазной смеси из компонентов с относительно высоким отношением плотностей ρ_L/ρ_G - воздуха и нефти. Применение такого подхода для случая двухфазных потоков гелия, отличающихся относительно низким отношением плотностей ρ_L/ρ_G , приводит к завышенным результатам по гидравлическому сопротивлению. Наконец, решение уравнений (1) и (2) приведено в графической форме для конкретной двухфазной смеси, что затрудняет применение полученной информации для анализа других сред.

В статье [18] при решении уравнений (1), (2) для каналов круглого сечения в соотношениях (3), (4) эквивалентные гидравлические диаметры D_L и D_G определялись так же, как и в [17]:

$$D_L = \frac{4 A_L}{S_L}; \quad D_G = \frac{4 A_G}{S_G + S_L}, \quad (5)$$

а скорости U_L и U_G равны их средним по сечению величинам. Полученные в безразмерном виде соотношения удовлетворительно согласуются с рядом экспериментальных данных для двухфазных потоков с относительно высоким соотношением ρ_L/ρ_G . Однако использованное авторами работы [18] упрощающее соотношение $U_G \gg U_L$ несправедливо для такой среды, как двухфазный гелий, что будет показано ниже.

В данной статье для определения характеристик расслоенных двухфазных потоков гелия при движении в каналах кольцевого, щелевого и круглого сечений использованы уравнения (1)+(5) с учетом приведенных замечаний.

Приравняв градиенты давления для обеих фаз, из (1) и (2) получим

$$\frac{\tau_L}{\tau_G} = \frac{A_L S_G}{A_G S_L} \left(1 + \frac{A S_i \tau_i}{A_L S_G \tau_G} \right). \quad (6)$$

Выражая касательные напряжения τ_L , τ_G и τ_i через средние скорости

$$U_L = \frac{G(1-x)}{A(1-\varphi)\rho_L}, \quad U_G = \frac{Gx}{A\varphi\rho_G}, \quad (7)$$

можно получить уравнение для определения одного из искомых соотношений $\varphi(x)$, которое в дальнейшем будет необходимо для нахождения гидравлического сопротивления канала двухфазному потоку $\Delta P_{\text{гг}}$.

Из (3) и (7) следует, что

$$\frac{\tau_L}{\tau_g} = \frac{f_L}{f_g} \frac{\rho_g}{\rho_L} \left[\frac{(1-x)\varphi}{x(1-\varphi)} \right]^2. \quad (8)$$

Анализ показывает, что в реальных конструкциях даже при относительно низких массовых скоростях двухфазного потока гелия ($m < 20+30$) режимы течения обеих фаз будут турбулентными. В связи с этим коэффициенты гидравлического сопротивления f_L и f_g (4) можно вычислять с помощью соотношения Блазиуса [19], в котором $C_L \approx C_g$, а $m = \rho = 0,25$. С учетом этого

$$\frac{f_L}{f_g} = \left[\frac{(1-x)\varphi \nu_g D_L \rho_g}{x(1-\varphi) \nu_L D_g \rho_L} \right]^{-0,25}, \quad (9)$$

а соотношение (8) принимает вид

$$\frac{\tau_L}{\tau_g} = \left(\frac{\nu_L D_g}{\nu_g D_L} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0,75} \left[\frac{(1-x)\varphi}{x(1-\varphi)} \right]^{1,75} = \beta. \quad (10)$$

Из (3), (4) и (7) следует, что другое соотношение τ_i/τ_g можно записать как

$$\frac{\tau_i}{\tau_g} = \kappa \left[1 - \frac{(1-x)\varphi \rho_g}{x(1-\varphi)\rho_L} \right]^2 = \alpha. \quad (11)$$

После этого уравнение (6) примет вид

$$\beta - \frac{A_L S_g}{A_g S_L} \left(1 + \frac{A S_i}{A_L S_g} \alpha \right) = 0. \quad (12)$$

Уравнение (12) служит для определения зависимости $x(\varphi)$. Для этого, задавшись уровнем жидкости в канале h_L , можно рассчитать геометрические характеристики A_L , A_g , S_g , S_L , S_i и величину истинного объемного паросодержания $\varphi = A_g/A$, и, решив уравнение (12) при известных теплофизических свойствах, можно определить расходное массовое паросодержание x для данного значения $\varphi(h_L)$.

Зная зависимость $x(\varphi)$, можно определить величину коэффициента скольжения фаз \bar{u} [14]:

$$\bar{u} = \frac{(1-\varphi)x \rho_L}{\varphi(1-x)\rho_g}. \quad (13)$$

Наконец, при известной зависимости $x(\varphi)$ можно найти гидравлическое сопротивление двухфазному потоку, используя, например, уравнение (1):

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{\partial\beta} = \tau_L \frac{S_L}{A_L} - \tau_i \frac{S_i}{A_L}. \quad (14)$$

Для обработки результатов и их сопоставления удобно пользоваться величиной безразмерного перепада давления $\Delta\bar{P}$, предложенного авторами [20]:

$$\Delta\bar{P} = \frac{\left(\frac{dP}{dz} \right)_{\partial\beta} - \left(\frac{dP}{dz} \right)'_L}{\left(\frac{dP}{dz} \right)''_g - \left(\frac{dP}{dz} \right)'_L}, \quad (15)$$

где величины $\left(\frac{dP}{dz} \right)'_L$ и $\left(\frac{dP}{dz} \right)''_g$ характеризуют гидравлическое сопротивление канала сечением A в случаях, когда весь расход G представляет собой жидкость или пар.

С учетом приведенных выше соотношений величина $\Delta\bar{P}$ запишется в виде

$$\Delta\bar{P} = \frac{\left[\frac{D_L(1-x)}{D(1-\varphi)} \right]^{-0,25} \frac{S_L}{4A_L} \left\{ \frac{(1-x)^2 \left[\frac{D_g \nu_L x(1-\varphi)\rho_L}{D_L \nu_g \varphi(1-x)\rho_g} \right]^{-0,25} \left[\frac{x(1-x)}{(1-\varphi)\rho_L} \right]^2 \frac{S_i}{S_L} \right\} - 1}{\left(\frac{\nu_L}{\nu_g} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_L}{\rho_g} \right)^{0,75} - 1}. \quad (16)$$

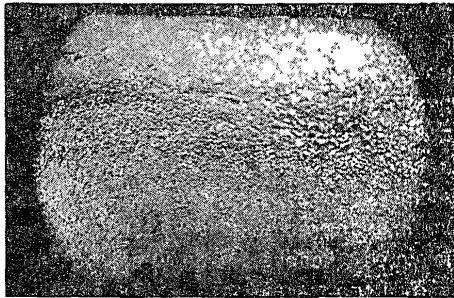
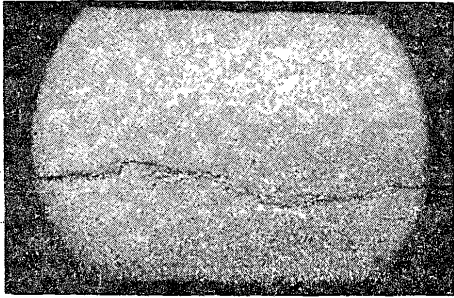
Располагая экспериментальными данными по гидравлическому сопротивлению $\Delta P(x)$ и сравнивая их с результатами расчета на основе уравнения (16) при различных величинах κ , можно оценить значение этого коэффициента $\kappa = f_L/f_g$. Искомая величина гидравлического сопротивления двухфазному потоку в канале длиной l может быть определена из соотношения

$$\Delta P_{\partial\beta} = f'_L \frac{G^2 l}{A^2 2 \rho_L D} \left\{ 1 + \Delta\bar{P} \left[\left(\frac{f_g'' \rho_L}{f_L' \rho_g} \right) - 1 \right] \right\}, \quad (17)$$

где f_g'' и f_L' - относятся к полному расходу G .

Результаты для каналов кольцевого и щелевого сечений. Проточные части конструкций электрофизических установок [1,2,3] целесообразно выполнять так, чтобы зазор для потока гелия был относительно мал, т.е. $4/h (\Delta/d_1) < 0,03+0,1$ [2,3,24]. Для этих условий на фотографиях представлены в качестве примера расслоенные режимы течения двухфазного гелия в канале щелевого сечения $h \times \Delta = 30 \times 1$ мм. Анализ серии таких фотографий показывает, что диапазон существования расслоенных режимов ориентировочно можно оценить величинами $0,05 < x < 0,8$, что примерно соответствует $0,1 < \varphi < 0,9$ [8].

Для отмеченного диапазона величин ψ уравнения (6) или (12) можно упростить, что позволит получить аналитическое выражение для зависимости $\psi(x)$. Это положение иллюстрирует рис. 2, на котором представлены зависимости отдельных составляющих уравнения (6) от величины ψ



Расслоенные режимы течения двухфазного гелия в канале щелевого сечения высотой $h = 30$ мм с зазором $\Delta = 1$ мм при давлении $p = 0,125$ МПа. Верхняя фотография - $m = 36$ кгм⁻²с⁻¹, $x = 0,39$; нижняя фотография - $m = 66$ кгм⁻²с⁻¹, $x = 0,23$.

для каналов щелевого и круглого сечений. Так, из рис. 2 видно, что при $0,1 < \psi < 0,9$ максимальное отличие от единицы величины $\frac{A_L S_G}{A_G S_L}$ не превышает 14% для канала щелевого сечения и практически равно нулю для канала кольцевого сечения (на рис. 2 для последнего величина $\frac{A_L S_G}{A_G S_L}$ не показана). Максимум соотношения $\frac{A S_i \tau_i}{A_L S_G \tau_G}$ не превышает $0,18 \pm 0,3$, причем меньшее значение относится к каналу щелевого сечения.

Отношение касательных напряжений τ_i/τ_G можно оценить на основе экспериментальных данных по истинному объемному паросодержанию в горизонтальных каналах кольцевого сечения при течении в нем двухфазного гелия [8]. Из этих данных следует, что, например, при давлении $p = 1,3 \cdot 10^5$ Па и массовой скорости $m = 35,5$ кгм⁻²с⁻¹ величина коэффициента скольжения фаз \bar{u} находится в пределах $1,75 \pm 2$. Следовательно, при $f_i \approx f_G^*$ [14, 15]

$$\frac{\tau_i}{\tau_G} \approx 1 - \frac{2}{\bar{u}} + \frac{1}{\bar{u}^2} \leq 0,25, \quad (18)$$

*) Применимость этого соотношения для гелия будет подтверждена ниже.

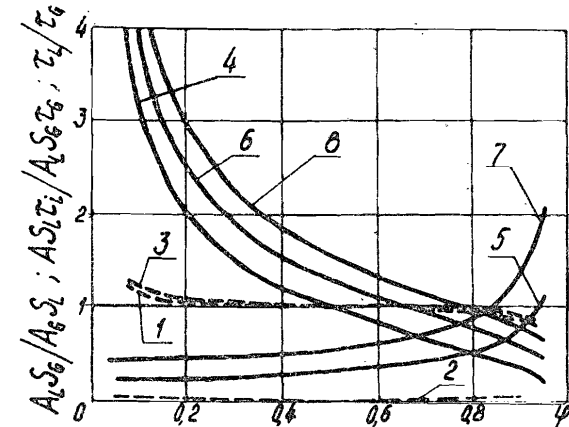


Рис. 2. Зависимости составляющих уравнения (6) $A_L S_G / A_G S_L$, $A S_i \tau_i / A_L S_G \tau_G$ и τ_i / τ_G от истинного объемного паросодержания ψ для каналов щелевого и круглого сечений. 1, 2, 3 - соответственно $A_L S_G / A_G S_L$, $A S_i \tau_i / A_L S_G \tau_G$ и τ_i / τ_G ($\bar{u} = 2$) для канала щелевого сечения $h \times \Delta = 30 \times 1$ мм; 4, 5, 6, 7, 8 - соответственно $A_L S_G / A_G S_L$, $A S_i \tau_i / A_L S_G \tau_G$ ($\bar{u} = 2$), τ_i / τ_G ($\bar{u} = 2$), $A S_i \tau_i / A_L S_G \tau_G$ ($\bar{u} = 3$) и τ_i / τ_G ($\bar{u} = 3$) для канала круглого сечения.

а величина $\frac{A S_i \tau_i}{A_L S_G \tau_G} < 0,045 \pm 0,075$ (большее соотношение относится к каналу кольцевого сечения).

Таким образом, в уравнении (6) можно принять $A_L S_G / A_G S_L \approx 1$, а $A S_i \tau_i / A_L S_G \tau_G \approx 0$, после чего оно преобразуется к виду

$$\tau_i / \tau_G \approx 1, \quad (19)$$

что иллюстрирует рис. 2. Решая уравнение (10) с учетом (19), т.е. при $\beta = 1$, $(D_G / D_L)^{0,25} \approx 1$ *), получим

$$\psi = \frac{\left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{3/7} \left(\frac{V_G}{V_L}\right)^{1/7} x}{1 - x + \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{3/7} \left(\frac{V_G}{V_L}\right)^{1/7} x}. \quad (20)$$

Проводя аналогичные рассуждения, можно показать, что в выражении (16) для относительного гидравлического сопротивления $\Delta^{\bar{p}}$ произведением членов при S_i / S_L можно пренебречь. Следовательно, величина $\Delta^{\bar{p}}$ запишется в виде

*) Максимум соотношения $(D_G / D_L)^{0,25}$, достигаемый при $\psi = 0,1$, не превышает 1,06 для канала щелевого сечения и практически равен единице для канала кольцевого сечения, остальные значения $(D_G / D_L)^{0,25}(\psi)$ меньше 1,06

$$\bar{\rho} = \frac{\left(\frac{1-x}{1-\varphi}\right)^{7/4} - 1}{\left(\frac{v_g}{v_l}\right)^{1/4} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{3/4} - 1} \quad (21)$$

Подставляя в эту формулу соотношение (20), окончательно получим

$$\bar{\rho} = \frac{\left[1-x + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{3/4} \left(\frac{v_g}{v_l}\right)^{1/4} x\right]^{7/4} - 1}{\left(\frac{v_g}{v_l}\right)^{1/4} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{3/4} - 1} \quad (22)$$

Из соотношений (13) и (20) можно определить коэффициент скольжения фаз

$$\bar{u} = \left(\frac{v_l}{v_g}\right)^{1/7} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{4/7} \quad (23)$$

Для проверки полученных соотношений (20)+(23) и границ их применимости были проведены эксперименты.

Величина истинного объемного паросодержания φ измерялась с помощью резонансного датчика [8], чувствительным элементом которого служит коаксиальная емкость, образованная электродами с диаметрами $d_1 = 14,7$ мм и $d_2 = 16,0$ мм. На рис.3 представлены соответствующие результаты для случая расслоенного режима течения двухфазного гелия в горизонтальном канале кольцевого сечения при характерном для современных электрофизических установок давлении $p = 0,125$ МПа и условиях, близких к адиабатным. Этот рисунок показывает, что максимальное расхождение большинства полученных экспериментальных данных с результатами расчета на основе соотношения (20) (кривая 1) не превышает 10+15%, а максимальная погрешность в определении величин φ и x не превышала соответственно 4,5 [8] и 5%. Здесь же приведена зависимость $\varphi(x)$, полученная с помощью формул (13), и

$$\bar{u} = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{1/3} \quad (24)$$

из работы [21] (кривая 2). Из известных зависимостей она наилучшим образом согласуется с полученными экспериментальными данными для гелия. Следует отметить, что обе зависимости 1 и 2 располагаются существенно ниже зависимости 3, построенной по уравнению для однородной модели.

На рис.3 представлены также результаты для коэффициентов скольжения фаз \bar{u} - линии 4 и 5, рассчитанные с помощью выражений (23), (24), и экспериментальные точки, которые пересчитаны из соответствующих точек $\varphi(x)$ по зависимости (13). Из рисунка видно, что практически все экспериментальные данные заключены в узком диапазоне

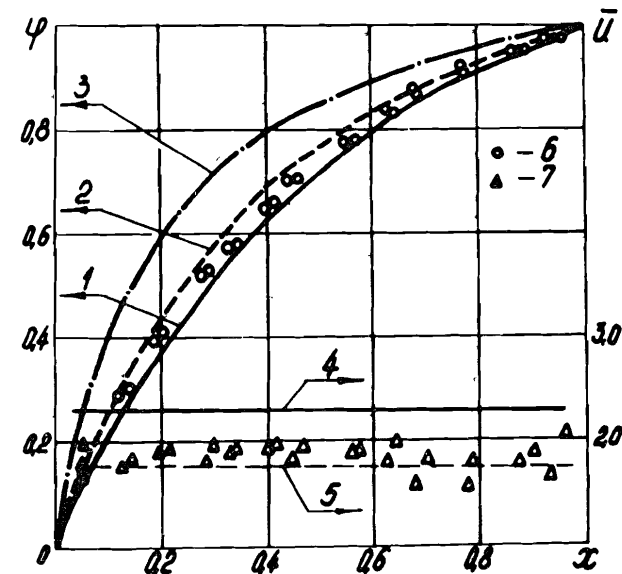


Рис. 3. Зависимости истинного объемного паросодержания φ и коэффициента скольжения фаз \bar{u} от расходного массового паросодержания x для канала кольцевого сечения $d_1 = 14,7$ мм и $d_2 = 16,0$ мм при давлении $p = 0,125$ МПа и массовой скорости $m = 35$ кгм⁻²с⁻¹. 1,2,3 - зависимости $\varphi(x)$, рассчитанные соответственно по уравнениям (20), (13) и (24) [21], а также по уравнению для однородной модели; 4,5 - коэффициенты \bar{u} , рассчитанные соответственно по соотношениям (23) и (24); 6,7 - экспериментальные точки соответственно для величин φ и \bar{u} .

$1,8 \leq \bar{u} \leq 2$. Расчетные значения, на основе формулы (23) (линия 4), составляют 2,3, а по выражению (24) (линия 5) - соответственно 1,75. Отличие экспериментальных данных от этих значений находится в пределах погрешности оценки величины \bar{u} (*). Следует отметить, что в соответствии с использованными допущениями выражения (20) и (23) справедливы для любых узких каналов, в том числе для каналов целевого сечения. Для последних были проведены расчеты по более точному,

* При массовых скоростях $m < 35$ кгм⁻²с⁻¹ может наблюдаться тенденция приближения экспериментальных точек к зависимостям 1 и 4.

чем (20), уравнению (12), что дало расхождение с оценкой на основе соотношения (20) не более 2% при размерах канала $h \times \Delta = 30 \times 1$ мм.

Исследование гидравлических сопротивлений проводилось для каналов со следующими геометрическими характеристиками. Канал кольцевого сечения - $d_1 = 11,1$ мм, $d_2 = 13$ мм, общая длина 800 мм, из которой по 100 мм приходилось на участки гидродинамической стабилизации, выполненные до и после измерительного участка длиной 600 мм. Канал щелевого сечения - $h = 30$ мм, $\Delta = 1$ мм, общая длина 600 мм, из которой длина измерительного участка составляла 400 мм и по 100 мм приходилось на участки гидродинамической стабилизации. Экспериментальный стенд и методика проведения экспериментов подробно описаны в [13, 23]. Условия были близки к адиабатным. В качестве измерительных приборов использовались преобразователи давления дифференциального типа "Сапфир 22" [22] с пределами 0+0,25 кПа, 0+1,6 кПа и 0+10,0 кПа. Максимальные погрешности в определении величин $\Delta P_{\text{дл}}$, $\Delta P'_L$, $\Delta P'_S$ и χ составляли соответственно 2 и 5%.

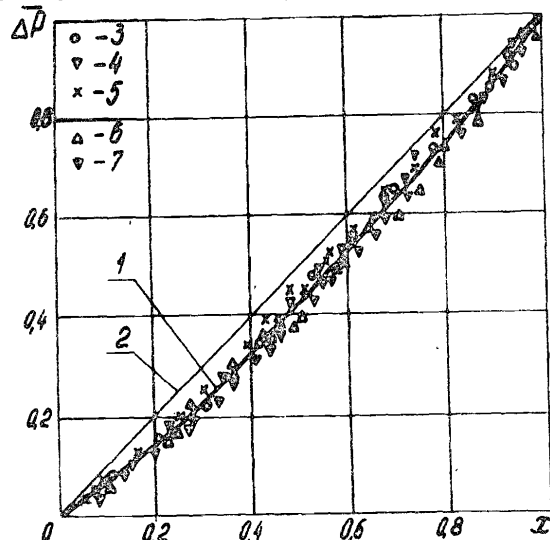


Рис. 4. Зависимости относительного перепада давления ΔP от расходного массового паросодержания χ для каналов кольцевого и щелевого сечений при $\rho = 0,125 \pm 0,130$ МПа.

1, 2 - зависимости, рассчитанные соответственно по уравнениям (22) и $\Delta P = \chi$; 3, 4, 5 - экспериментальные данные для канала кольцевого сечения соответственно при $m = 26, 38$ и 53 $\text{кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$;

6, 7 - экспериментальные данные для канала щелевого сечения соответственно при $m = 32$ и 48 $\text{кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 4, где также нанесена зависимость, рассчитанная с помощью соотношения (22). Приведенные результаты свидетельствуют о хорошем согласовании - максимальное расхождение экспериментальных точек и расчетов (кривая 1) не превышает 10+15%. При этом полученные данные располагаются ниже зависимости 2, рассчитанной по уравнению $\Delta P = \chi$. Следует отметить, что с кривой 1, полученной на основе формулы (22), практически совпадают результаты расчетов с помощью более точного уравнения (16) при значении $K = 0,75 \pm 1,25$. Это не противоречит принятому допущению $f_i \approx f_g$.

Результаты для каналов круглого сечения. По сравнению с каналами кольцевого и щелевого сечений особенность каналов круглого сечения состоит в том, что для них пренебрежение силовым взаимодействием фаз на межфазной границе может привести к искажению результатов. Так, из рис. 2 видно, что для каналов круглого сечения второй член в уравнении (6) изменяется от 0,25 до 1,15 в диапазоне $0,1 < \varphi < 0,9$ при $\bar{u} = 2$, тогда как для канала щелевого сечения он не превышает значения 0,045. В свою очередь, отношения τ_L/τ_g в том же диапазоне φ изменяются от 3,8 до 0,46 и от 1,18 до 0,91 соответственно для каналов круглого и щелевого сечений. При увеличении скольжения до $\bar{u} = 3$ рассматриваемые величины приобретают более высокие значения по сравнению со случаем, когда $\bar{u} = 2$. В связи с этим нахождение зависимости $\chi(\varphi)$ для каналов круглого сечения осуществлялось путем решения уравнения (12) на ЭВМ итерационным методом. Величина параметра $K = f_i/f_g$ при этом задавалась в пределах от 0,75 до 1,25 с шагом 0,25.

Результаты расчетов истинных объемных паросодержаний φ и коэффициентов скольжения фаз \bar{u} представлены в таблице, из которой видно, что при $\chi < 0,5$ величина φ для каналов круглого сечения выше, чем для каналов щелевого (кольцевого) сечения, а величина скольжения фаз \bar{u} соответственно ниже. Так, при $\chi = 0,1$ отношение $\bar{u}_k/\bar{u}_g \approx 1,5$. Однако при $\chi > 0,5$ наблюдается противоположная тенденция - $\varphi_k > \varphi_g$, а $\bar{u}_k > \bar{u}_g$. В частности, при $\chi = 0,9$ отношение $\bar{u}_k/\bar{u}_g \approx 1,35$.

Расчет гидравлических сопротивлений для каналов круглого сечения проводился с помощью зависимости (16), учитывающей взаимодействие на границе раздела фаз. Необходимые для этого соотношения A_g , A_L , S_g , S_L , S_i зависят от уровня жидкости h_L или истинного объемного паросодержания φ и приведены в [17].

Экспериментальное определение величины $\Delta P_{\text{дл}}$ осуществлялось для трубы из нержавеющей стали $\phi 5 \times 0,2$ мм длиной 2500 мм. При этом 2000 мм приходилось на измерительный участок и по 250 мм на участки

Таблица. Зависимости истинного объемного паросодержания φ и коэффициента скольжения фаз \bar{U} от расходного массового паросодержания x , полученные на основе (12)*) и (13) для каналов круглого (к) и щелевого (щ) сечений при $p = 0,13$ МПа.

| x | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| φ_k | 0,29 | 0,44 | 0,54 | 0,63 | 0,70 | 0,76 | 0,82 | 0,87 | 0,93 |
| $\varphi_{щ}$ | 0,21 | 0,38 | 0,50 | 0,61 | 0,70 | 0,78 | 0,85 | 0,91 | 0,96 |
| \bar{U}_k | 1,45 | 1,75 | 1,96 | 2,13 | 2,31 | 2,48 | 2,66 | 2,95 | 3,30 |
| $\bar{U}_{щ}$ | 2,15 | 2,22 | 2,26 | 2,29 | 2,31 | 2,33 | 2,36 | 2,41 | 2,43 |

гидродинамической стабилизации. Методика, экспериментальный стенд, измерительные приборы и погрешности измерений были те же, что и для каналов кольцевого и щелевого сечений.

Результаты экспериментов и расчетов представлены на рис.5, который показывает, что максимальное расхождение расчетов для трубы и для кольцевых каналов незначительно и составляет 10% при значении $x = 0,5$. Вместе с тем соответствующие различия в коэффициентах скольжения фаз и истинных объемных паросодержаниях достигают 50% и 40%, что отмечено выше. Практически такие же результаты получаются для канала квадратного сечения с отношением $h/\Delta = 1$. Из рис.5 также видно, что экспериментальные данные располагаются ниже кривой 2 на величину 20+30%. В связи с этим было найдено эмпирическое соотношение для расчета зависимости $\Delta\bar{p}(x)$ для каналов круглого сечения (кривая 1):

$$\Delta\bar{p} = 9,5 \cdot 10^{-2} [(1 + 3,05x)^{3/4} - 1]. \quad (25)$$

Максимальное расхождение результатов расчета по соотношению (25) с экспериментальными данными не превышает 15% во всем диапазоне расходных массовых паросодержаний x .

Для сравнения на рис.5 приведена расчетная зависимость 3 из [5], полученная на основе экспериментальных данных для гелия и той же трубы $\phi 5 \times 0,2$ мм длиной 2500 мм при давлении около 0,135 МПа и $m > 200$ кгм⁻²с⁻¹. При таких массовых скоростях режимы течения двухфазного гелия должны быть не расслоенными, а прерывистыми [13]. Из рис.5 видно, что сравниваемые соотношения (25) (кривая 1) и из [5] (кривая 3) существенно отличаются друг от друга. Так, при $x \approx 0,2$ величины $\Delta\bar{p}$ для прерывистых режимов примерно на 100% выше, чем для расслоенных, а при $x \approx 0,6+0,7$ соответственно на 25+30% ниже.

*) Результаты расчетов зависимости $\varphi(x)$ в диапазоне $0,05 < x < 0,85$ различаются на 2+4% при изменении отношения f_1/f_0 от 0,75 до 1,25.

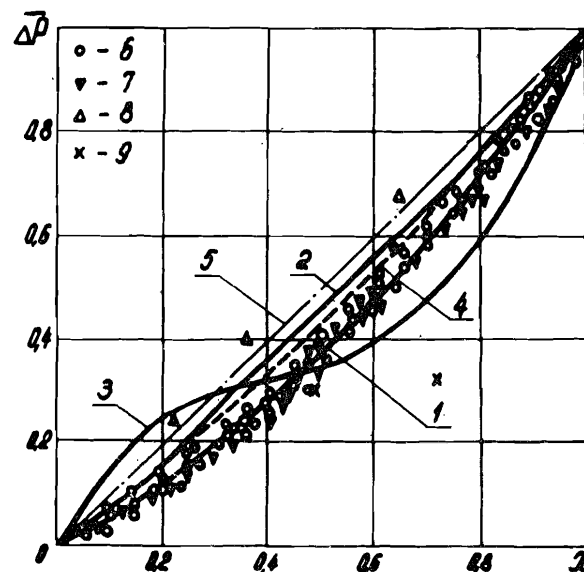


Рис. 5. Сопоставление зависимостей относительного перепада давления $\Delta\bar{p}$ от расходного массового паросодержания x .

1,2,3 - зависимости для каналов круглого сечения, рассчитанные соответственно по уравнениям (25), (16) и из [5] при прерывистых режимах течения ($m > 200$ кгм⁻²с⁻¹); 4 - для каналов щелевого и кольцевого сечений по уравнению (22); 5 - по уравнению $\Delta\bar{p} = x$; 6,7 - полученные нами данные для канала круглого сечения соответственно при $m = 52$ и 65 кгм⁻²с⁻¹; 8 - данные из [6] при $m = 24+50$ кгм⁻²с⁻¹ и $p \approx 0,12$ МПа; 9 - данные из [7] при 70 кгм⁻²с⁻¹ и $p = 0,12+0,13$ МПа.

На рис.5 представлено также сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными других авторов, исследовавших гидравлические сопротивления горизонтальных труб при движении в них двухфазного гелия. Так, из [6] можно выделить три экспериментальные точки, которые с помощью карты режимов течения двухфазного гелия в горизонтальной трубе [13] можно идентифицировать как относящиеся к расслоенным режимам. Эти данные, полученные при давлении около 0,12 МПа, массовых скоростях $24+50$ кгм⁻²с⁻¹ для трубы диаметром 18,4 мм и длиной 6000 мм, располагаются выше как наших экспериментальных точек, так и зависимости $\Delta\bar{p} = x$. Из работы [7] к рассло-

енным режимам течения можно отнести две точки. Эти данные получены при давлении 0,12+0,13 МПа, массовой скорости около $70 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$ для трубы диаметром 6х0,4 мм и длиной 1200 мм. Они были приведены к координатам $\Delta P - x$ с использованием соотношения (15) и формулы Кольбука и Уайта [19] (при эквивалентной шероховатости около 1 мкм), которая рекомендована авторами [5,6,10] для определения коэффициента гидравлического сопротивления при течении однофазного гелия в трубах при $Re > 10^4$. Одна из этих точек ($\Delta P = 0,3$; $x = 0,49$) удовлетворительно согласуется с полученными нами данными, а другая ($\Delta P = 0,32$; $x = 0,72$) располагается существенно ниже. Ниже зависимости, построенной по уравнению $\Delta P = x$, располагаются также экспериментальные данные из [4], которые удовлетворительно согласуются с полученными нами результатами, хотя по величине массовой скорости их нельзя отнести к расслоенным режимам. Данные [4] получены для четырех параллельных труб диаметром 6х0,5 мм и длиной $13 \cdot 10^3$ мм при давлении 0,15 МПа и $m = 140 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$ (на рис.5 они не показаны, чтобы его не загромождать).

Выводы. Гидравлическое сопротивление двухфазному потоку, истинное объемное паросодержание и скольжение фаз для горизонтальных каналов кольцевого и щелевого сечений с относительно малым зазором $4/h$ ($4/d_1$) $\approx 0,03+0,1$ практически одинаковы. При расслоенных режимах течения двухфазного потока гелия, т.е. при $m \leq 50+60 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$ и давлениях $p \approx 0,12+0,13$ МПа, гидравлическое сопротивление этих каналов может рассчитываться с помощью соотношения (22), коэффициенты скольжения - на основе формул (23) или (24), а истинное объемное паросодержание - по зависимости (20) или по соотношениям (13) и (24).

Рассматриваемые характеристики для горизонтальных каналов круглого сечения отличаются от таковых для каналов кольцевого и щелевого сечений с относительно малым зазором. При расслоенных режимах течения двухфазного потока гелия в трубах, т.е. при $m \leq 70+80 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$ и давлениях $p \approx 0,12+0,13$ МПа, их гидравлическое сопротивление может рассчитываться на основе соотношения (25), а оценка истинных объемных паросодержаний и коэффициентов скольжения фаз может производиться с помощью таблицы.

Имеющиеся в литературе немногочисленные данные по гидравлическому сопротивлению горизонтальных труб при движении в них двухфазного потока гелия довольно противоречивы и не систематизированы, в связи с чем целесообразно проведение дополнительных исследований.

В заключение авторы выражают благодарность Сон Зун Гану за полезные замечания и обсуждение результатов.

Обозначения

A_L, A_G - сечения, занятые соответственно жидкостью и газом (паром), м^2 ; $A = A_G + A_L$ - полное сечение канала, м^2 ; S - смоченный периметр канала, м; $D = \frac{4A}{S}$ - эквивалентный диаметр канала, м; D_L, D_G - эквивалентные диаметры соответственно для жидкой и газовой фаз, м; U - скорость, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; $\bar{U} = \frac{U_G}{U_L}$ - коэффициент скольжения фаз; p - давление, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$ (Па); Δp - перепад давления, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$ (Па); $\Delta \bar{p}$ - относительный перепад давления; x - координата вдоль оси канала, м; τ - касательное напряжение, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$; f - коэффициент трения; ρ - плотность, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; d - диаметр трубы, м; Δ - зазор, м; ν - кинематическая вязкость, $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$; x - расходное массовое паросодержание; φ - истинное объемное паросодержание; G - массовый расход, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; m - массовая скорость, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$; l - длина канала, м; h - высота канала, м; Re - число Рейнольдса; C, K - численные коэффициенты. Индексы: G - газ (пар), L - жидкость, l - межфазная граница, m и n - показатели степени, 1 и 2 - внутренний и внешний диаметры.

Литература

1. SSC Reference Designs Study Group, Draft II, May 8, 1984.
2. Studygroup Superconducting Magnets for HERA, DESY-HERA 81/12.
3. Андреев Н.И. и др. Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 1985, т.П, с.343-346.
4. Агеев А.И. и др. Сообщение ОИЯИ, 8-80-586, Дубна, 1980.
5. Сон Зун Ган, Филиппов Ю.П. Теплоэнергетика, 1984, № 3, с.19-23.
6. Nakagawa S. et al. ICES X, Helsinki, 1984, p.570-573.
7. Вишнев И.П., Мигалинская Л.Н., Лебедева И.Б. ИЖ, 1982, т.43, № 2, с.195-201.
8. Данилов В.В. и др. Краткие сообщения ОИЯИ, Дубна, 1986, № 15-86, с. 42.
9. Петухов Б.С., Жуков В.М., Шильдикрет В.М. ТВТ, 1980, т.18, с.1040-1045.
10. Архипов В.В., Деев В.И., Солодовников В.В. Теплоэнергетика, 1983, № 3, с.5-7.
11. Subbotin V.I., Deev V.I. et al. Cryogenics, 1985, vol. 25, May, p.261-265.
12. Khalil A., McIntosh G. Cryogenics, July 1981, vol. 21, p.411-414.
13. Мамодов И.С., Салимов С.Б., Филиппов Ю.П. Сообщение ОИЯИ, Р8-84-156, Дубна, 1984.
14. Батторпоро Д., Хьюитт Г. - Ред. Теплопередача в двухфазном потоке. М., "Моргил", 1980, 326 с.

15. Делайе Дж., Гю М., Ритмоллер М. Теплообмен и гидродинамика в атомной и тепловой энергетике. М., Энергоатомиздат, 1984, 422 с.
16. Govier G.W. and Aziz K. Van Nostrand-Reinhold CO., New York, 1972.
17. Agraval S.S., Gregory G.A. and Govier G.W. Journal of Chemical Engineering, 1973, June, vol.51, p.280-286.
18. Taitel Y. and Dukler A.E. Int.Journ.Multiphase Flow, vol.2, p.591-595. Pergamon/Elsevier, 1976.
19. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., "Машиностроение", 1975, с.560.
20. Borishansky V.M., Paleev I.I., Agafonova F.A. et al. Int.Journ. of Heat and Mass Transfer, 1973, vol.16, p.1073-1085.
21. Zivi S.M. Journ. of Heat Transfer, Trans. of ASME, 1964, vol.86, p.247-252.
22. Иордан Г.Г., Юровский А.Я. Сборник научных трудов. М., ВНИИТеплоприбор, 1983, с.3-24.
23. Мамедов И.С. и др. ИЖ, 1983, т. XL IV, № 5, с.725-729.
24. Сон Зун Ган, Филиппов Ю.П., Зинченко С.И. Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т. II, с.350-359.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 апреля 1986 года.

Мамедов И.С., Селюнин С.Ю., Филиппов Ю.П. P8-86-208
Характеристики расслоенных двухфазных потоков гелия

Представлены результаты исследования гидравлических сопротивлений, истинных объемных паросодержаний и скольжений фаз при расслоенных режимах течения двухфазных потоков гелия в горизонтальных каналах кольцевого, шелевого и круглого сечений при давлении $P = 0,12 \pm 0,13$ МПа, расходных массовых паросодержаниях $x = 0 \pm 1$, массовых скоростях $m = 25 \pm 70 \text{ кгм}^{-2} \text{с}^{-1}$ и адиабатных условиях. Для этих характеристик приведены расчетные соотношения, которые хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными. Дано сравнение с имеющимися аналогичными данными других авторов.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Принт Обьединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перелод О.С.Виноградовой

Mamedov I.S., Selunin S.Yu., Filippov Yu.P. P8-86-208
Characteristics of Stratified Helium
Two-Phase Flows

The investigation results on the hydraulic resistances, void fractions and slip ratio at stratified motion regimes of two phase helium flows in horizontal channels of annular gap and circular cross sections with a pressure $P = 0,12 \pm 0,13$ MPa, vapour qualities $x = 0 \pm 1$, mass velocities $m = 25 \pm 70 \text{ kgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and adiabatic conditions are presented. The calculation correlations being in agreement with the obtained experimental data are given for these characteristics. The comparison with analogous data of other authors is presented.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986