

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P8-87-446**

**Сон Зун Ган, С.Ю.Селонин, Ю.П.Филиппов**

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ГЕЛИЯ  
ПРИ ОТНОСИТЕЛЬНО ВЫСОКИХ  
МАССОВЫХ СКОРОСТЯХ**

**Направлено в журнал "Теплоэнергетика"**

**1987**

В последнее время получен довольно обширный экспериментальный материал по гидравлическому сопротивлению  $\Delta P_{\text{гг}}$  вертикальных<sup>/1,2,3/</sup> и горизонтальных<sup>/4,5,6,7,8/</sup> каналов при движении потоков двухфазного гелия. На основе этих данных предложены эмпирические расчетные методики<sup>/1,7/</sup>, отражающие влияние ориентации канала. Для горизонтальных двухфазных потоков гелия с относительно низкими массовыми скоростями -  $m \leq 50 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , то есть при расслоенных режимах течения<sup>/10/</sup>, получены соотношения<sup>/6/</sup> для определения  $\Delta P_{\text{гг}}$ , дающие удовлетворительное согласие с экспериментальными данными. Эти соотношения получены путем решения уравнений сохранения импульса для каждой фазы. Что касается двухфазных потоков гелия с относительно высокими массовыми скоростями -  $m > 150+200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , отличающихся существенно большей сложностью протекающих процессов, то попытки моделирования, видимо, не предпринимались, а использование применительно к гелию тех или иных данных для пароводяных потоков при высоких давлениях -  $P \geq 10 \text{ МПа}$  - нуждается в обосновании.

При величинах  $m > 150+200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  преимущественные режимы течения двухфазных потоков гелия в горизонтальных и вертикальных каналах могут быть идентифицированы как дисперсно-кольцевые<sup>/10/</sup>, причем их относительные гидравлические сопротивления примерно одинаковы во всем диапазоне расходных массовых паросодержаний  $x$ <sup>/3,9/</sup>. Исследованию таких режимов течения для вертикальных пароводяных потоков при давлениях до 10 МПа посвящена работа<sup>/11/</sup>. На основе рекомендаций и с использованием соотношений из<sup>/11/</sup> нами были получены выражения для расчета гидравлического сопротивления труб за счет трения при дисперсно-кольцевом режиме течения и проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными для гелия. При этом величина  $\Delta P_{\text{гг}}$  определяется из соотношения

$$\frac{\Delta P_{\text{гг}}}{\Delta P'} = \frac{C_{12}}{f'} 4x_2^2 (K-1)^2 / \left( \frac{2\delta_{\text{CT}}}{R} - \frac{\delta_{\text{CT}}^2}{R^2} \right) \left( 1 - \frac{\delta_{\text{CT}}}{R} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\text{гг}}$  и  $\Delta P'$  - соответственно гидравлические сопротивления при движении двухфазной смеси и жидкости при полном массовом расходе,  $f'$  - коэффициент трения для жидкости,  $K$  - коэффициент скольжения фаз,  $R$  - радиус трубы,  $\delta_{\text{CT}}$  - среднерасходная толщина пленки жидкости на стенке<sup>/11/</sup>,  $x_2$  - доля жидкости в пленке по отношению к общему расходу смеси<sup>/11/</sup>,  $C_{12}$  - коэффициент трения на границе раздела: пристенная пленка жидкости - пар, определяемый выражением<sup>/11/</sup>

$$C_{12} = 0,008 \left[ 1 + 210 \left( \frac{\delta_{\text{CT}}}{R} \right)^{1,3} \right]. \quad (2)$$

Сопоставление результатов расчета, полученных на основе (1) и (2), с экспериментальными данными для гелия при  $x = 0, 1, 0, 6$ ,  $m \approx 200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $\rho = 0, 13 \text{ МПа}^{3, 9/}$ , свидетельствует о существенных различиях как качественного, так и количественного характера. Скорректировав коэффициенты в выражении (2) (вместо 0,008 и 1,3 введены соответственно 0,0063 и 1,8), можно добиться хорошего совпадения результатов для  $m = 200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Однако, например, для величин 250 и 150  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $\rho = 0, 13 \text{ МПа}$  соответствующие расхождения расчетов с экспериментальными данными могут превышать 50 и 30%, что нельзя признать удовлетворительным. Это может быть связано с тем, что для двухфазного гелия структура потока и процессы в нем более сложны по сравнению с рассмотренной выше двухслойной моделью дисперсно-кольцевого режима течения<sup>/11/</sup>.

Предлагаемая модель построена в предположении следующей трехслойной структуры двухфазного потока. На стенке трубы имеется жидкий вязкий подслой (ВП) толщиной  $\delta_{вп}$ , внутри которого происходит интенсивное гашение турбулентных пульсаций механизмом молекулярного трения<sup>/12/</sup>. По границе вязкого подслоя движется двухфазный поток, который состоит из жидкого пристенного слоя и парожидкостного ядра, занимающего основную часть сечения. Для этой модели необходимые уравнения сохранения импульса записываются в виде<sup>/13/</sup>

$$A \left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{\partial \delta} = S \tau_{\partial \delta} = S \zeta' \frac{dU}{dy} \Big|_{y=0}, \quad (3)$$

$$\left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{\partial \delta} = \frac{S_i}{A_i} \tau_i \approx \frac{4 \tau_i}{D}, \quad (4)$$

где  $A$ ,  $S$  и  $D$  - площадь сечения, периметр и диаметр трубы,  $L$  - длина,  $\tau_{\partial \delta}$  - касательное напряжение,  $\zeta'$  - динамическая вязкость жидкости,  $U$  и  $y$  - скорость и расстояние от стенки в вязком подслое, индекс  $i$  относится к границе между ВП и пристенным слоем смешанной двухфазной области. Касательное напряжение  $\tau_i$  определяется как

$$\tau_i = f_i \frac{\bar{\rho}(\bar{U} - \bar{U}_{вп})^2}{2} = f_i \frac{\bar{\rho} \bar{U}^2}{2} \left( 1 - \frac{\bar{U}_{вп}}{\bar{U}} \right)^2, \quad (5)$$

\* Толщина ВП пренебрежимо мала по сравнению с диаметром трубы<sup>/12/</sup>.

где  $\bar{\rho}$  и  $\bar{U}$  - средние плотность и скорость в смешанной области,  $\bar{U}_{вп}$  - средняя скорость в ВП. При условиях, что истинное объемное паросодержание смеси  $\varphi_{см}$  в полном сечении трубы определяется соотношением

$$\varphi_{см} = \varphi = \left[ 1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho''}{\rho'} K \right]^{-1}, \quad (6)$$

массовая скорость - выражением

$$m = U_0 \rho' = \bar{U} \bar{\rho}, \quad (7)$$

а величина  $\bar{\rho}$  - соотношением

$$\bar{\rho} = \varphi \rho'' + (1-\varphi) \rho', \quad (8)$$

средняя скорость в смешанной области запишется в виде

$$\bar{U} = U_0 \frac{(1-x)}{(1-\varphi) \left[ 1 - x \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \right]}, \quad (9)$$

где индексы '' и ' относятся к насыщенному пару и жидкости соответственно,  $K = \frac{\mu''}{\mu'}$  - коэффициент скольжения фаз в смешанной области,  $U_0$  - средняя скорость жидкости при общем расходе. Перепад давления за счет трения с учетом приведенных соотношений определяется как

$$\Delta P_{\partial \delta} = \frac{4}{D} f_i \frac{m^2}{2 \rho'} \frac{(1-x)}{(1-\varphi) \left[ 1 - x \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \right]} \left( 1 - \frac{\bar{U}_{вп}}{\bar{U}} \right)^2. \quad (10)$$

Приводя величину перепада давления к безразмерному виду, в котором представлены экспериментальные данные<sup>/1, 5, 9/</sup>, получим

$$\Delta \bar{P} = \frac{\Delta P_{\partial \delta} - \Delta P'}{\Delta P'' - \Delta P'} = F \left[ \frac{f_i}{f'} \frac{(1-x)}{(1-\varphi) \left[ 1 - x \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \right]} \left( 1 - \frac{\bar{U}_{вп}}{\bar{U}} \right) - 1 \right], \quad (11)$$

где

$$F = \left( \frac{\Delta P''}{\Delta P'} - 1 \right)^{-1} = \left[ \left( \frac{\zeta''}{\zeta'} \right)^{0,25} \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right]^{-1}, \quad f' = 0,3164 / Re^{0,25},$$

$Re$  - число Рейнольдса.

Как видно из (11), для нахождения величины  $\Delta \bar{P}$  необходимо определить соотношения  $\bar{U}_{вп}/\bar{U}$ ,  $f_i/f'$  и коэффициент скольжения  $K$ . Ниже приводится методика отыскания этих величин.

В<sup>14/</sup> показано, что, по крайней мере, для газо-жидкостного рас- слоенного течения закон распределения скорости в ВП такой же, как для течения жидкости. Предположив, что закон распределения скорости в ВП при дисперсно-кольцевом режиме такой же, как для однофазного потока, получим соотношение для средней скорости в вязком подслое

$$\bar{u}_{вп} = \frac{1}{2} u_{вп} \Big|_{y=\delta_{вп}} = 5,8 \sqrt{\frac{\tau_{ст}}{\rho'}} \quad (12)$$

При этом учтено, что распределение скорости в вязком подслое линейно<sup>12/</sup>

$$u_{вп} = \frac{y}{z'} \tau_{ст} \quad (13)$$

а безразмерная толщина ВП определяется соотношением<sup>12/</sup>

$$\bar{\delta}_{вп} = \frac{y \sqrt{\rho' \tau_{ст}}}{z'} = 11,6 \quad (14)$$

Подставив выражение для  $\tau_{ст}$  из (3) в (12), получим

$$\bar{u}_{вп} = 2,9 \sqrt{\frac{\Delta P_{об} \cdot D}{\rho'}} \quad (15)$$

В свою очередь подставив в (15) вместо  $\Delta P_{об}$  соответствующее выра- жение из (II) и разделив на (9), окончательно получим

$$\frac{\bar{u}_{вп}}{\bar{u}} = 2,9 \frac{1-\varphi}{1-x} \left[ 1-x \left( 1-\frac{1}{K} \right) \right] \sqrt{\frac{f'}{2} \left( 1 + \frac{\Delta P}{F} \right)} \quad (16)$$

Решая совместно уравнения (II) и (16) итерационным методом, можно найти искомое соотношение  $\bar{u}_{вп}/\bar{u}$ . Для этого необходимо прежде всего определить соотношение для коэффициента трения на границе меж- ду вязким подслоем и пристенным слоем двухфазного потока  $f_i$ .

В рамках предлагаемой трехслойной модели величина  $f_i$  может зависеть прежде всего от среднерасходной толщины пленки жидкости на стенке  $\delta_{ст}$ , которая использована авторами работы<sup>11/</sup>. Кроме то- го, на коэффициент трения  $f_i$  должны влиять характеристики паро- жидкостного ядра, поскольку известно, что мелкие капли в потоке пара затрудняют распространение турбулентных вихрей и тем самым ослабляют обмен количеством движения между слоями<sup>15/</sup>. В принципе в качестве фактора, учитывающего долю жидкости  $x_3$  в парожидкостном ядре и влияющего на  $f_i$ , может использоваться величина  $\varphi' = \varphi(\varphi, \kappa, x_3)$ . Однако определение соответствующего достоверного соотношения пред- ставляет собой довольно сложную задачу и, кроме того, приводит к

довольно громоздким соотношениям. С учетом изложенного было сделано предположение, что отношение  $f_i/f'$ , входящее в выражение (II), зависит от величины  $\delta_{ст}$  и от общей доли жидкости в двухфазном потоке, связанной с  $x_3$ . Общую долю жидкости можно выразить через приведенную толщину слоя жидкости  $\delta_{ж}$  и соответственно через истинное объемное паросодержание  $\varphi$

$$\frac{\delta_{ж}}{R} = 1 - \sqrt{\varphi} \quad (17)$$

Окончательно искомое соотношение можно представить в виде

$$\frac{f_i}{f'} = a + b(1 - \sqrt{\varphi})^n + c \left( \frac{\delta_{ст}}{R} \right)^m \quad (18)$$

Коэффициенты в соотношении (18) можно определить, минимизируя соот- ветствующий функционал относительно хорошо известных эксперименталь- ных данных по гидравлическому сопротивлению труб, например<sup>11/</sup> или<sup>9/</sup>.

В соотношение (18) входит неизвестная величина  $\delta_{ст}$ , связан- ная с относительным расходом жидкости в пленке  $x_2$ . Полагая, что пленка жидкости представляет собой пристенную область однофазно- го установившегося потока, занимающего все сечение канала<sup>11/</sup>, оп- ределим взаимосвязь  $x_2 = x_2(\delta_{ст})$ . Для турбулентного режима тече- ния пленки профиль скорости  $u_1(z)$  эквивалентного однофазного потока можно представить в виде степеней зависимости с показателем  $n = \frac{1}{7}$ <sup>12/</sup>. Усредняя скорость  $u_1$  и определив расход жидкости в пленке  $G_{ст}$ , получим

$$x_2 = \frac{G_{ст}}{G_{об}} = \frac{\bar{u}_1}{u_0} \left( \frac{\delta_{ст}}{R} \right)^{15/7} \quad (19)$$

Учитывая, что  $\frac{\bar{u}_1}{u_0} = \sqrt{\frac{f'}{f_i} \left( 1 + \frac{\Delta P}{F} \right)}$  и  $\left( \frac{f'}{f_i} \right)^{7/30} \approx 1$ <sup>ж)</sup>, из (19) найдем искомую величину

$$\frac{\delta_{ст}}{R} \approx x_2^{7/15} / \left( 1 + \frac{\Delta P}{F} \right)^{7/30} \quad (20)$$

Экспериментальных данных о величине  $x_2$  для гелия в литерату- ре нет. Поэтому для расчетов нами использовалось соотношение для пароводяных потоков<sup>11/</sup>, полученное для  $p \leq 10$  МПа,  $m = 500+$  4000 кг·м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> и  $x = 0,1+0,9$ :

ж)  $f_i$  - коэффициент трения однофазного потока, движущегося со скоростью  $u_1$ .

$$x_2 = 0,235 \left( \frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,12} \cdot x^n, \quad (21)$$

где  $x = 10^{-2} \cdot \frac{\sigma}{V \cdot z''}$ ,  $n = 2,1$  при  $x < 1$ ,  $n = 0,67$  при  $x > 1$ ,  $V = \pi x / \sqrt{\rho''} \cdot \varphi_{\text{гом}}$ ,  $\varphi_{\text{гом}} = \left( 1 - \frac{1-x}{x} \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{-1}$ ,  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения. Такой подход, видимо, оправдан, т.к. сравнение экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению для гелия и пароводяных потоков при относительно высоких давлениях свидетельствует об удовлетворительном качественном и количественном согласии результатов<sup>/9/</sup>. Соотношения для величин массовых скоростей гелия и пароводяной смеси, при которых наблюдается отмеченное согласие, можно получить, сопоставляя соответствующие комплексы  $\left( \frac{\mu'}{\sigma \rho''} \right)^2 \frac{\rho''}{\rho'} m^2$ . При  $(\rho''/\rho')_{\text{H}_2\text{O}} \approx (\rho''/\rho')_{\text{He}}$  и  $100 \cdot \rho_{\text{He}} \approx \rho_{\text{H}_2\text{O}}$  такое сопоставление дает соотношение  $m_{\text{H}_2\text{O}} \approx 10 m_{\text{He}}$ , что подтверждается данными<sup>/9/</sup>, то есть выражение (21) может быть справедливо для гелия при  $m \approx 50 \div 400 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

В основные соотношения (II), (I6) и (I8) входят величины истинного объемного паросодержания  $\varphi$  и коэффициента скольжения фаз  $K$ . Число экспериментальных данных о величинах  $\varphi$  и  $K$  для гелия весьма ограничено, причем большинство данных получено для каналов кольцевого сечения<sup>/16,17/</sup>. Однако соответствующие данные<sup>/18/</sup> для кольцевых каналов и труб при течении пароводяных потоков с относительно высокими давлениями довольно хорошо согласуются с данными<sup>/16,17/</sup> для двухфазного потока гелия при  $m \geq 100 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $p \approx 0,12 \div 0,13 \text{ МПа}$ . На основе анализа данных<sup>/16,17,18/</sup> нами получены соотношения для коэффициента скольжения фаз

$$K = \begin{cases} 1 - 4(1 - K_0)(x - x^2) & \text{при } 0 \leq x < 0,5 \\ K_0 & \text{при } 0,5 \leq x < 0,7 \\ 1 + (1 - K_0)(3,6 - 12x + 9,1x^2) & \text{при } 0,7 < x \leq 1,0 \end{cases} \quad (22)$$

где величина  $K_0$  определяется как<sup>/18/</sup>

$$K_0 = 1 + \frac{13,7 (1 - \rho/\rho_{\text{кр}})}{F_{z_0}^{5/12} Re_0^{1/3}} \quad (23)$$

при  $F_{z_0} = \frac{g D \rho'}{m^2}$  и  $Re_0 = m D / \mu'$  (здесь  $g$  - ускорение свободного падения). В частности, величины  $K$ , рассчитанные с помощью (22), согласуются с данными<sup>/17/</sup> с максимальным отклонением, не превышающим 3%. Соответственно величины  $\varphi$ , рассчитанные с помощью

соотношений (6) и (22), отличаются от экспериментальных данных<sup>/16,17/</sup> не более, чем на 4+5%.

С использованием выражений (20)+(23) и экспериментальных данных по  $\Delta P$ , например, при  $m = 240 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $p = 0,135 \text{ МПа}$ ,  $d = 4,61 \text{ мм}$  и  $0,2 < x \leq 0,6$ <sup>/9/</sup>, были определены коэффициенты в соотношении (I8):  $a = 0,48$ ;  $b = 3,4$ ;  $c = 26$ ;  $n = 1$ ;  $m = 1,8$ .

Таким образом, методика определения относительного гидравлического сопротивления на основе предложенной модели сводится к следующему. Исходными данными служат величины  $m$ ,  $\rho$ ,  $D$  и  $x$ , с помощью которых рассчитываются соотношения (22), (6), (21). Используя для первого приближения значение  $\Delta P_1 = x$ , получим соответствующие значения для выражений (I6), (20), (I8) и (II). После этого величина  $\Delta P_2 = \Delta P(\Delta P_1)$  сравнивается с  $\Delta P_1$ . Если  $|\Delta P_2 - \Delta P_1| / \Delta P_2 > 10^{-3}$ , делается третье приближение  $\Delta P_3 = \Delta P(\Delta P_2)$  и т.д. до тех пор, пока не получится заданная точность расчета  $10^{-3} = |\Delta P_{i+1} - \Delta P_i| / \Delta P_{i+1}$ . Предложенная модель и методика расчета применены для диапазона  $0,2 \leq x \leq 0,6$ .

Что касается других диапазонов  $x$ , то соответствующие гидравлические сопротивления могут рассчитываться следующим образом.

При относительно низких расходных паросодержаниях  $x \leq 0,1$ , т.е. при режимах течения, близких к пузырьковым<sup>/10/</sup>, в первом приближении можно воспользоваться соотношением для гомогенной модели<sup>/15/</sup>, в которой при определении коэффициента трения в качестве вязкости смеси используется величина  $\bar{\nu}_{\text{см}} = \left( \frac{x}{2} + \frac{1-x}{2} \right)^{-1}$ . Как известно, полученные величины  $\Delta P_{\text{гом}}$  располагаются несколько выше зависимости  $\Delta P = x$ .

Для диапазона  $0,6 \leq x \leq 0,9$  по мере роста паросодержания характерно постепенное исчезновение волнового течения жидкости в пленке с переходом в гладкое течение (рис.1), когда, видимо, существует только вязкий подслои и турбулентный слой жидкости. В этом случае коэффициент трения  $f_i$  можно определить таким же образом, как для гладкого кольцевого течения

$$f_{i2} = c \left[ \left( \frac{m D}{\bar{\nu}} \right) \left( 1 - \frac{\bar{\nu}_{\text{сл}}}{\bar{\nu}} \right) \right]^{-0,25}, \quad (24)$$

где  $c = 0,3164$ ,  $\bar{\nu} = \varphi \bar{\nu}'' + (1-\varphi) \bar{\nu}'$ . Сопоставление расчетов по (24) с эмпирическими зависимостями из<sup>/3,9/</sup> показывает, что при  $x = 0,8$  совпадение результатов хорошее (расхождение не превышает 7% как для вертикальных, так и для горизонтальных труб). Однако при

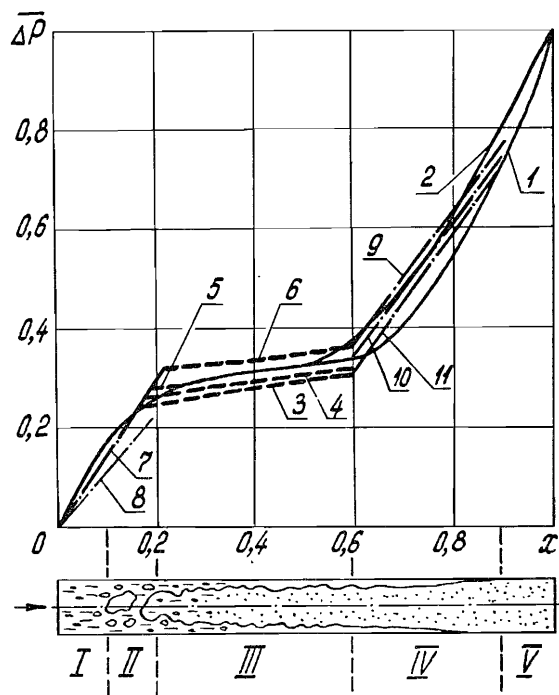


Рис.1. Зависимости относительного перепада давления  $\overline{\Delta P}$  и структуры двухфазного потока гелия от расходного массового паросодержания  $x$ . 1,2 - обобщающие расчетные зависимости для вертикальных<sup>13/</sup> и горизонтальных<sup>17/</sup> труб; 3+6 - расчет по предложенной методике соответственно для  $m = 300, 250, 200$  и  $150 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $p = 0,13 \text{ МПа}$ ,  $D = 4,6 \text{ мм}$ ; 7 - по соотношению  $\overline{\Delta P} = 1,5 \cdot x$ ; 8 - по гомогенной модели; 9+11 - на основе выражения (25) соответственно при  $m = 150, 200$  и  $300 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ; I+V - соответственно диапазоны пузырькового, переходного, дисперсно-кольцевого с волновой границей, дисперсно-кольцевого с гладкой границей раздела фаз и эмульсионного режима течения.

$x = 0,7$  результаты расчета лучше согласуются с данными для горизонтальных каналов, а при  $x = 0,9$  соответственно с данными для вертикальных каналов. В целом в диапазоне  $0,6 \leq x \leq 0,9$  наиболее

приемлемые результаты получаются, если коэффициенты трения рассчитывать путем линейной интерполяции с помощью соотношений (18) и (24)

$$f_{i1-2} = f_{i1}^{x=0,6} + \frac{1}{0,2} (f_{i2}^{x=0,8} - f_{i1}^{x=0,6}) (x - 0,6). \quad (25)$$

На рис.1. представлены зависимости  $\overline{\Delta P}(x)_m$ , рассчитанные в соответствии с изложенной методикой. На этом же рисунке для сравнения нанесены эмпирические расчетные зависимости из<sup>13,7/</sup>, полученные путем обработки экспериментальных данных. Рис.1 показывает, что в диапазоне  $0,2 \leq x \leq 0,6$  результаты расчета (линии 3+6) хорошо согласуются как с зависимостью 1 для вертикальных<sup>13/</sup>, так и с зависимостью 2 для горизонтальных<sup>17/</sup> каналов - максимальные отклонения не превышают +10% при изменении массовой скорости от 150 до  $300 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Следует отметить, что увеличение массовой скорости свыше значения  $250 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  практически не влияет на относительный перепад давления во всем отмеченном диапазоне  $x$  - линии 3 и 4 практически совпадают.

В интервале  $0 < x \lesssim 0,1$  расхождение результатов расчета по гомогенной модели (линии 8) с эмпирическими зависимостями 1, 2 достигает 40%. В связи с этим здесь лучше пользоваться простым соотношением  $\overline{\Delta P} = 1,5 \cdot x$ \*) - прямая 7.

В диапазоне  $0,6 \leq x \leq 0,9$  расчетные зависимости на основе соотношения (25) (прямые 9+11) хорошо согласуются с эмпирической зависимостью для горизонтальных каналов и несколько хуже с зависимостью для вертикальных каналов. Так, для линии 10 расхождение с кривой 1 составляет около 15% при  $x = 0,7+0,8$ .

Таким образом, полученные на основе расчета линии 7, 3+6 и 9+11 отражают изменение характера экспериментальных данных  $\overline{\Delta P}(x)_m$  в зависимости от режимов течения двухфазных потоков гелия при  $m = 150+300 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $x = 0+0,9$ ,  $p = 0,13 \text{ МПа}$ .

Влияние давления на величину  $\overline{\Delta P}$  иллюстрирует рис.2. Из этого рисунка видно, что при  $x \approx 0,3$  относительное гидравлическое сопротивление практически остается постоянным при изменении давления от 0,12 до 0,18 МПа. Однако в диапазоне  $0,3 < x < 0,6$  наблюдается снижение величины  $\overline{\Delta P}$  по мере увеличения давления. Причем для давления 0,18 МПа характерен гидравлический кризис, выражающийся в заметном уменьшении гидравлического сопротивления с ростом паросодержания  $x$ .

\*) В работе<sup>17/</sup> для этого диапазона предложена зависимость  $\overline{\Delta P} = 2x$ .

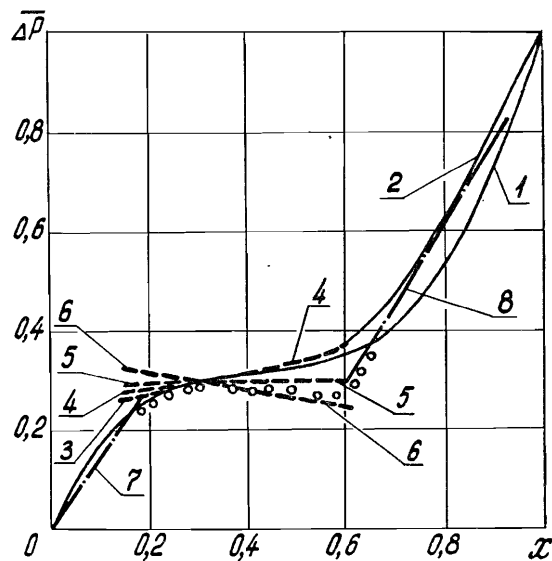


Рис. 2. Влияние давления на зависимость  $\overline{\Delta P}(x)$  при движении двухфазного гелия с  $m=200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  в трубе диаметром 4,6 мм. 1,2 - то же, что на рис.1; 3+6 - расчет по предложенной методике соответственно для  $P=0,12, 0,14, 0,16$  и  $0,18 \text{ МПа}$ ; 7 - по соотношению  $\overline{\Delta P}=1,5x$ ; 8 - на основе выражения (25).

Для проверки этой характеристики нами были проведены эксперименты на горизонтальной трубе из стали 12Х18Н10Т  $\phi 5 \times 0,2$  мм длиной 2 м  $\text{м}^3/\text{с}$ . Полученные экспериментальные точки для массовой скорости  $\sim 200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  и давления 0,17 МПа нанесены на рис.2 и свидетельствуют о качественном и количественном соответствии результатов. Таким образом, предлагаемая модель позволяет предсказать область существования гидравлического кризиса для двухфазных потоков гелия.

С целью определения влияния диаметра труб на гидравлическое сопротивление были проведены расчеты в диапазоне  $D = 1,6+7$  мм (при других одинаковых условиях). Так, относительно линии 5, показанной на рис.1 для  $D = 4,6$  мм и  $m = 200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ , результаты для  $D = 1,6$  мм располагаются на 8% ниже, а для  $D = 7$  мм соответственно на 3% выше. Качественно такая тенденция подтверждается, например, сравнением экспериментальных данных для горизонтальных труб при  $D = 4,61 \text{ мм}$   $\text{м}^3/\text{с}$  и  $D = 11,4+18,4 \text{ мм}$   $\text{м}^3/\text{с}$ , а также сопоставлением результатов для вертикальных труб при  $D = 1,6 \text{ мм}$   $\text{м}^3/\text{с}$  и  $D = 0,8 \text{ мм}$   $\text{м}^3/\text{с}$ .

Наконец, были проведены расчеты для пароводяных потоков при давлениях 14+17 МПа. На рис.3 приведены результаты расчетов при  $P = 15 \text{ МПа}$ ,  $x \approx 0,1+0,9$  и  $D = 13,3$  мм для различных массовых скоростей. Из этого рисунка видно, что результаты расчета по предлагаемой модели хорошо согласуются с кривыми, построенными на основе ши-

роко известной методики  $\text{[21]}$ . Так же, как и для гелия, изменение диаметра слабо отражается на величинах  $\overline{\Delta P}$  для пароводяной смеси, хотя можно отметить тенденцию к повышению относительного гидравлического сопротивления по мере увеличения диаметра трубы. При  $D = 20$  мм,  $P = 14+17 \text{ МПа}$  и  $m = 1500+2500 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  результаты расчетов и экспериментов  $\text{[19]}$  различаются не более чем на 10%. Однако при  $D = 8$  мм удовлетворительное согласие с экспериментом  $\text{[20]}$  наблюдается лишь для  $P \leq 17 \text{ МПа}$  и  $m \approx 1500+3000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . При  $P \geq 17 \text{ МПа}$  и  $m \geq 3000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  расхождения результатов расчета по предлагаемой методике по сравнению с экспериментальными данными  $\text{[19,20]}$  могут превышать 25% и более. Это может быть связано с определением истинного объемного паросодержания по соотношению (23), которое справедливо при  $P \leq 18 \text{ МПа}$ , а также с расчетом относительного расхода жидкости в пленке на основе выражения (21), полученного для интервала  $P \leq 10 \text{ МПа}$ .

Таким образом, в диапазонах рассмотренных давлений и массовых скоростей гидродинамические характеристики двухфазных потоков гелия и пароводяных потоков имеют довольно общий характер и могут быть определены на основе предложенной модели. Имеющиеся особенности для двухфазного гелия - выраженный гидравлический кризис в диапазоне  $0,16 \text{ МПа} < P < P_{кр}$ ,  $x = 0,2+0,6$  и различие в наклонах кривых  $\overline{\Delta P}(x)$  - связаны с отличием теплофизических свойств гелия и воды.

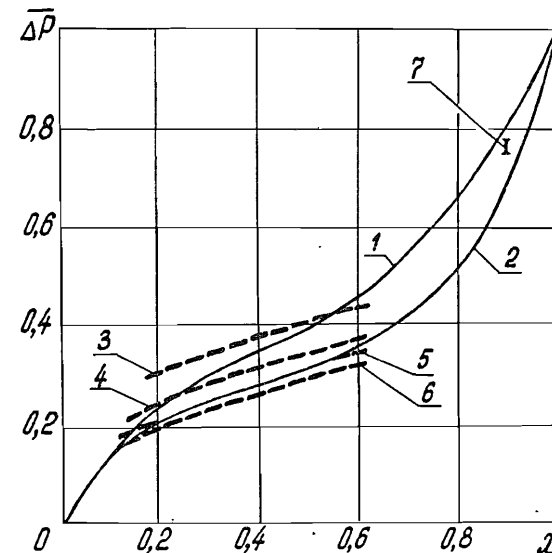


Рис. 3. Зависимости  $\overline{\Delta P}(x)$  для пароводяного потока при  $P=15 \text{ МПа}$  и  $D=13,3$  мм. 1, 2 - расчет по методике  $\text{[21]}$  соответственно для  $m=1470$  и  $2000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ; 3+6 - расчет по предложенной методике соответственно для  $m=1500, 2000, 2500, 3000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ; 7 - расчет по соотношению (24) при  $m=1500+3000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

Литература

1. Архипов В. В., Деев В. И., Солодовников В. В. Теплоэнергетика, 1983, № 3, с. 5+7.
2. Петухов В. С., Жуков В. М., Шильдкрет В. М. Теплофизика высоких температур, 1980, т. 18, № 5, с. 1040+1045.
3. Subbotin V. I., Deev V. I. et al. Cryogenics, 1985, vol. 25, p. 261+265.
4. Вишнев И. П., Мигалинская Л. Н., Лебедева И. Б. Инженерно-физический журнал, 1982, т. 43, № 2, с. 195+201.
5. Мамедов И. С. и др. Инженерно-физический журнал, 1983, т. 44, № 5, с. 725+729.
6. Мамедов И. С., Селюнин С. Ю., Филиппов Ю. П. Инженерно-физический журнал, 1987, т. 52, № 1, с. 154+155.
7. Селюнин С. Ю., Филиппов Ю. П. Препринт ОИЯИ, P8-86-489, Дубна, 1986.
8. Nakagawa S. et al. ICSC, X, 1984, Helsinki, p. 570+573.
9. Сон Зун Ган, Филиппов Ю. П. Теплоэнергетика, 1984, № 3, с. 19+23.
10. Мамедов И. С., Салимов С. Е., Филиппов Ю. П. Сообщение ОИЯИ P8-84-156, Дубна, 1984.
11. Нигматулин Б. И., Милашенко В. И., Николаев В. Е. Теплофизика высоких температур, 1978, т. 16, № 6, с. 1258+1263.
12. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Тепло-массообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972, 342 с.
13. Делайе Дж., Гюи М., Ритмоллер М. Теплообмен и гидродинамика в атомной и тепловой энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1984, 422 с.
14. Хау, Чамберс и др. Теплопередача, 1982, т. 104, № 1, с. 38+43.
15. Петухов В. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 1986, 470 с.
16. Khalil A., McIntosh G., Boon R. W. Cryogenics, 1981, vol. 21, p. 411+414.
17. Данилов В. В. и др. Краткие сообщения ОИЯИ, № 15-86, Дубна: ОИЯИ, 1986, с. 42+50.
18. Миропольский З. Л., Шнеерова Р. И., Карамышева А. И. Теплоэнергетика, 1971, № 5, с. 60+63.
19. Красякова Л. Ю. - В кн.: Котлотурбиностроение. - Л.: Тр. ЦКТИ, 1965, вып. 59, с. 12+26.
20. Тарасова Н. В. - В кн.: Котлотурбиностроение. - Л.: Тр. ЦКТИ, 1965, вып. 59, с. 47+58.
21. Балдина О. М., Локшин В. А., Петерсон Д. Ф. и др. Гидравлический расчет котельных агрегатов (нормативный метод). М.: Энергия, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 июня 1987 года.

Сон Зун Ган, Селюнин С. Ю., Филиппов Ю. П. P8-87-446  
Гидродинамические характеристики двухфазных потоков гелия при относительно высоких массовых скоростях

Предложена физико-математическая модель для определения гидравлического сопротивления каналов при движении в них двухфазных потоков гелия с относительно высокими массовыми скоростями. На основе этой модели предсказана область существования гидравлического кризиса. Представлены результаты экспериментов, подтверждающие полученные теоретические результаты. Показано, что при определенных условиях гидродинамические характеристики двухфазных потоков гелия и пароводяных потоков довольно похожи, а имеющиеся особенности связаны с различием теплофизических свойств гелия и воды. Дано сравнение полученных результатов с соответствующими литературными данными.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О. С. Виноградовой

Kon Zun Gan, Selyunin S. Yu., Filippov Yu. P. P8-87-446  
Hydrodynamical Characteristics of Helium Two-Phase Flows at Relatively High Mass Rates

Theoretical model is proposed for the pressure drop of channels through which the two-phase flow of helium with relatively high mass flow rates moves. With the help of this model the region of hydraulic crisis is predicted. Experimental results which are consistent with the theoretical model predictions are presented. It is shown that under certain conditions the hydrodynamical characteristics of helium two-phase flows and of steam-water ones are analogous, as well as that the existence of some distinctions are caused by the difference in thermophysical properties of helium and water. The data obtained are compared with the results available in literature.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987