

C 3938

C-62

83-164



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

3417/83

8-83-164

Сон Зун Ган, Ю.П.Филиппов

РАСЧЕТ  
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КАНАЛОВ  
ПРИ ДВИЖЕНИИ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ГЕЛИЯ

Направлено в журнал "Теплоэнергетика"

1983



В связи с созданием сверхпроводящих систем<sup>/1-3/</sup>, криостатируемых с применением вынужденных потоков двухфазного гелия, все возрастающее внимание уделяется исследованию гидродинамических характеристик каналов различных геометрий и ориентаций. Экспериментальные данные в подавляющем большинстве получены для вертикальных<sup>/4-7/</sup> и змеевиковых<sup>/8,9/</sup> каналов, как обогреваемых, так и необогреваемых. Сравнительный анализ этих результатов приведен в<sup>/5/</sup> и<sup>/8/</sup>. Меньшее число работ<sup>/10,11,20/</sup> посвящено исследованию гидравлического сопротивления горизонтальных каналов, которые преобладают в конструкциях протяженных систем, например систем с дипольными сверхпроводящими магнитами<sup>/1,2/</sup>.

Следует отметить, что данных о гидравлическом сопротивлении при течении двухфазного гелия пока не много, а известные результаты плохо систематизированы, обработаны по различным методикам, что затрудняет их применение при инженерных расчетах. Вместе с тем предварительный анализ данных для каналов различной ориентации свидетельствует об относительном сходстве их характеристик. В связи с этим в работе сделана попытка создания инженерной методики расчета перепадов давления при движении двухфазного потока гелия.

Типичные гидродинамические характеристики, например, горизонтального канала кругового сечения представлены в<sup>/11/</sup>, где подробно описана схема экспериментального стенда. Экспериментальный участок включал трубу из стали 12X18H10T  $\varnothing$  5,03 x 0,21 мм и длиной 2,5 м, причем 2 м приходилось на обогреваемый участок и по 0,25 м - на участки гидродинамической стабилизации. На обогреваемой части трубы были установлены три камеры для отбора давления на расстоянии 1 м друг от друга. К двум крайним камерам подводились провода для обогрева электрическим током. Труба для подачи гелия, обмотанная десятью слоями металлизированного лавсана, была окружена экраном, который охлаждался жидким азотом, и помещена в вакуумный корпус. Циркуляция гелия через экспериментальный участок осуществлялась посредством установки ХГУ-250/4,5<sup>/12/</sup>. Давление на входе определялось по показаниям образцового манометра. Перепады давления измерялись оптическими дифференциальными манометрами ОМ-2 со шкалами 0 ÷ 10, 0 ÷ 20, 0 ÷ 50 и 0 ÷ 100 мм рт.ст. Расход гелия определялся с помощью проградуированных диафрагм с пределами соответственно 0,65 ÷ 4,2 · 10<sup>-3</sup> и 3,5 ÷ 22 · 10<sup>-3</sup> кг/с. Гелий на диафрагмы подавался в состоянии недогретой до насыщения жидкости. Измерение температуры гелия перед диафрагмами осуществлялось посредством углеродного резистора фирмы "Allen-Bradley", а на входе и выходе экспериментального участка - с помощью германиевых термометров сопротивления<sup>13/</sup>



Параметры гелия перед экспериментальным участком изменялись специальным нагревателем с относительно большой поверхностью. Его питание осуществлялось от стабилизированного источника постоянного тока.

Каждая серия экспериментов по определению гидравлических сопротивлений канала проводилась при фиксированных тепловой нагрузке, расходе гелия, давлении на выходе трубы и изменяющейся величине входной энтальпии. Последняя величина рассчитывалась на основе уравнения теплового баланса в предположении термодинамического равновесия между паровой и жидкостной фазами. Полученные результаты представлялись в виде зависимостей относительно-

го перепада давления  $\Delta P = \frac{\Delta P_{дф.} - \Delta P'}{\Delta P'' - \Delta P'}$  от средней относительной

энтальпии двухфазного потока  $x = \frac{i_{дф.} - i'}{i'' - i'}$ , где  $\Delta P_{дф.}$ ,  $\Delta P''$ ,  $\Delta P'$

и  $i_{дф.}$ ,  $i''$ ,  $i'$  - соответственно перепады давления и энтальпии, относящиеся к двухфазному потоку, насыщенным паром и жидкостью. В связи с тем, что экспериментальные данные о величине истинного объемного паросодержания для двухфазного гелия малочисленны<sup>17/</sup>, попытки традиционно выделить составляющие полного перепада давления  $\Delta P_{дф.}$  за счет трения  $\Delta P_{тр.}$  и ускорения  $\Delta P_{уск.}$  не предпринимались. Эксперименты показали, что коэффициенты гидравлического сопротивления  $\xi'$  для жидкости могут рассчитываться по приведенной в<sup>14/</sup> формуле Кольбрука и Уайта при эквивалентной шероховатости  $\Delta = 1,0$  мкм:

$$\frac{1}{\sqrt{\xi'}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta}{3,7d} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\xi'}} \right). \quad //1/$$

При этом для диапазона  $10^4 < Re < 5 \cdot 10^5$  величины максимальных расхождений между опытными данными и расчетом составляли около 10%. Средняя относительная энтальпия вычислялась как полусумма значений для входа и выхода экспериментального участка  $x = (x_{вх.} + x_{вых.})/2$ , причем данные для дальнейшей обработки отбирались при выполнении условия  $0 \leq x_{вх.} \leq x_{вых.} \leq 0,95$ . Последнее обусловлено тем, что при  $x \geq 0,95$  в прозрачном элементе<sup>15/</sup>, установленном перед экспериментальным участком, наблюдалась чередующаяся /с низкой частотой/ структура потока из двухфазной смеси и газа.

В настоящей работе значения экспериментальных точек из<sup>11/</sup> были пересчитаны с учетом коэффициентов гидравлического сопротивления  $\xi''$  для насыщенного пара, которые также определялись с помощью формулы //1/, а в<sup>11/</sup> величины  $\Delta P''$  вычислялись при условии  $\xi' = \xi''$ . Анализ пересчитанных таким образом экспериментальных

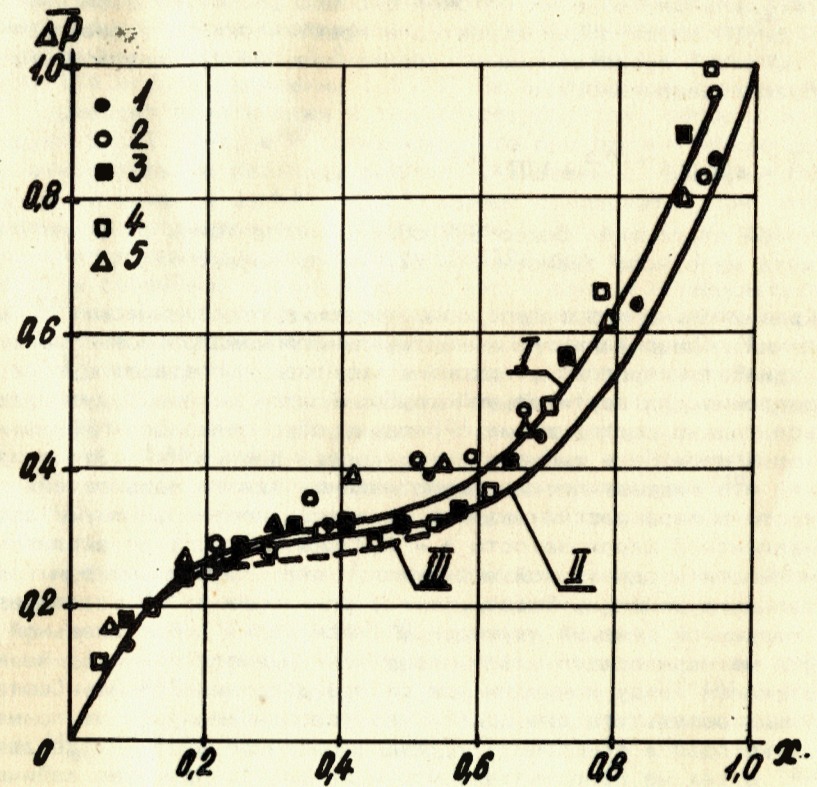


Рис.1. Сопоставление зависимостей относительного перепада давления  $\Delta P$  от относительной энтальпии  $x$  для гелия: 1 - данные<sup>11/</sup> для горизонтальной трубы / $m = 125$  кг/м<sup>2</sup>с,  $q = 0$ ,  $P = 1,31 \div 1,33 \cdot 10^5$  Па; 2 -  $m = 125$  кг/м<sup>2</sup>с,  $q = 360$  Вт/м<sup>2</sup>,  $P = 1,29 \div 1,32 \cdot 10^5$  Па; 3 -  $m = 240$  кг/м<sup>2</sup>с,  $q = 0$ ,  $P = 1,34 \div 1,41 \cdot 10^5$  Па; 4 -  $m = 240$  кг/м<sup>2</sup>с,  $q = 360$  Вт/м<sup>2</sup>,  $P = 1,35 \div 1,43 \cdot 10^5$  Па; 5 -  $m = 157$  кг/м<sup>2</sup>с,  $q = 0$ ,  $P = 1,31 \div 1,35 \cdot 10^5$  Па; II - обобщающая зависимость из<sup>4,5/</sup> для вертикальной трубы / $m = 100 \div 400$  кг/м<sup>2</sup>с,  $q = 0$ ,  $P = 1,0 \div 1,8 \cdot 10^5$  Па; III - зависимость из<sup>6/</sup> для вертикальной трубы / $m = 170$  кг/м<sup>2</sup>с,  $q \neq 0$ ,  $P = 1,0 \cdot 10^5$  Па/.

результатов<sup>11/</sup> для массовых скоростей  $m = 120 \div 240$  кг/м<sup>2</sup>с, давлений  $P = 1,3 \div 1,4 \cdot 10^5$  Па и относительных энтальпий  $0 < x < 0,95$  показывает, что как для адиабатных условий, так

\*Эти данные относятся к первой части экспериментального участка длиной 1 м<sup>11/</sup>.



и для удельных тепловых потоков  $q$  около  $360 \text{ Вт/м}^2$  зависимости  $\overline{\Delta P} = \Delta P(x)$  носят общий характер и практически не зависят от  $m$  и  $q$ . На рис.1 представлены экспериментальные данные, которые обобщаются зависимостью

$$\overline{\Delta P} = x(2,58 e^{-x/0,8} + 1,07 x^{2,5}) \quad /2/$$

При этом отклонение более 90% общего числа точек от результатов расчета на основе зависимости /2/ не превышает +15%.

Сравнительно корректное сопоставление гидравлических сопротивлений горизонтального и вертикального каналов можно выполнить для адиабатных условий, исключив нивелирную составляющую перепада давления для вертикальной трубы. В этом случае будут сравниваться только составляющие перепада, обусловленные трением. Для этой цели были выбраны прежде всего данные <sup>/4,5/</sup>. Это связано с тем, что гидравлические сопротивления для случаев течения жидкости и пара рассчитывались на основе соотношения /1/ при эквивалентной шероховатости  $\Delta = 1,0 \text{ мкм}$ , то есть по аналогичной зависимости и одинаковой величине  $\Delta$  для вертикального и горизонтального каналов. Эксперименты, описанные в <sup>/4,5/</sup>, проводились при подъемном течении двухфазной смеси гелия в вертикальной трубке из нержавеющей стали с внутренним диаметром  $1,63 \text{ мм}$  и расстоянием между камерами для отбора давления  $259 \text{ мм}$ . Соответствующие результаты для адиабатных условий, полученные по методике, которая в основном подобна описанной выше, представлены в <sup>/4,5/</sup> в тех же координатах, что и на рис.1. При этом величина относительного перепада давления  $\overline{\Delta P}$  учитывает только составляющую перепада, связанную с трением. Нивелирная составляющая определялась в предположении, что коэффициент скольжения фаз равен единице.

На рис.1 сопоставляются зависимости  $\overline{\Delta P}(x)$  для горизонтального и вертикального каналов. Здесь соответствующая кривая для вертикальной трубы обобщает экспериментальные данные для массовых скоростей  $m = 100 \div 400 \text{ кг/м}^2\text{с}$  и давлений  $P = 1,0 \div 1,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$  с отклонением, не превышающим +15%<sup>/5/</sup>. Из рисунка видно, что в диапазоне  $0 < x < 0,5$  сравниваемые зависимости различаются менее чем на 10%, а при  $0,5 < x < 0,95$  расхождение не превышает 15%.

Для расчета зависимости  $\overline{\Delta P}(x)$  для вертикальной трубы можно предложить уравнение

$$\overline{\Delta P} = x(2,36 e^{-x/0,8} + 0,93 x^{2,5}) \quad /3/$$

При этом в диапазоне  $0 < x < 0,95$  максимальное расхождение между результатами расчета  $\overline{\Delta P}$  по формуле /3/ и приведенной на рис.1 зависимостью из <sup>/5/</sup> составляет около +5%.

Рассмотрение данных других авторов <sup>/6/</sup>, исследовавших гидравлическое сопротивление вертикального канала из нержавеющей стали с внутренним диаметром  $0,8 \text{ мм}$  и длиной  $181 \text{ мм}$  при массовой скорости  $170 \text{ кг/м}^2\text{с}$ , давлении  $1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и подъемном движении гелия\*, приводит практически к тем же результатам, которые иллюстрирует рис.1. Так, в <sup>/6/</sup> отмечено, что при прочих равных условиях относительные перепады давления, вызванные трением, для вертикальных каналов из <sup>/4,5/</sup> и <sup>/6/\*\*</sup> хорошо согласуются. При этом расхождения наблюдаются лишь в интервале  $0,2 < x < 0,6$ , причем максимальная величина составляет около 10% для  $x \approx 0,4$ .

Провести сравнение приведенных на рис.1 данных с результатами работы <sup>/10/</sup> не представляется возможным, так как это связано со сложностью выбора относительно одинаковых условий для сопоставления. В <sup>/10/</sup> определялось гидравлическое сопротивление четырех параллельно включенных горизонтальных труб  $\varnothing 6 \times 0,5 \text{ мм}$  и длиной около  $13 \text{ м}$ . Анализ этих данных <sup>/10/</sup> с помощью результатов исследования режимов течения двухфазного гелия в горизонтальном канале <sup>/15/</sup> показал, что заполнение параллельных каналов <sup>/10/</sup> может быть различным, а именно: часть их заполнена только паром, а другая часть - двухфазной смесью.

Практический интерес представляет сопоставление данных для двухфазного гелия с результатами экспериментов для пароводяной смеси при давлениях  $P > 140 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , то есть близких к критическим. Необходимая информация о гидравлическом сопротивлении вертикальных необогреваемых труб была заимствована из <sup>/16-18/</sup>. В связи с тем, что в отмеченной литературе данные представлены в координатах  $\Delta P_{\text{дф}}/\Delta P' - x$ , был произведен их пересчет в координатах  $\overline{\Delta P} - x$ . Поскольку

$$\overline{\Delta P} = \left( \frac{\Delta P_{\text{дф}}}{\Delta P'} - 1 \right) / \left( \frac{\xi''}{\xi'} \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right),$$

то при пересчете величина  $\Delta P_{\text{дф}}/\Delta P'$  бралась из <sup>/16-18/</sup>, а соотношение  $\xi''/\xi'$  определялось на основе формулы /1/ /здесь  $\rho'$  и  $\rho''$  - плотности насыщенных жидкости и пара/. Соответствующие результаты представлены на рис.2, где для сравнения нанесены обобщающие зависимости /2/ и /3/. Обработка экспериментально полученных точек для пароводяной смеси показала, что эти данные можно обобщить зависимостью

$$\overline{\Delta P} = x(1,85 e^{-x/0,4} + 0,905 x^{2,5}) \quad /4/$$

\* Конкретное значение  $q \neq 0$  для этого случая в <sup>/6/</sup> не указано.  
\*\* В <sup>/6/</sup> гидравлические сопротивления для случаев течения пара и жидкости определялись на основе соотношений Пуазейля и Блазиуса.



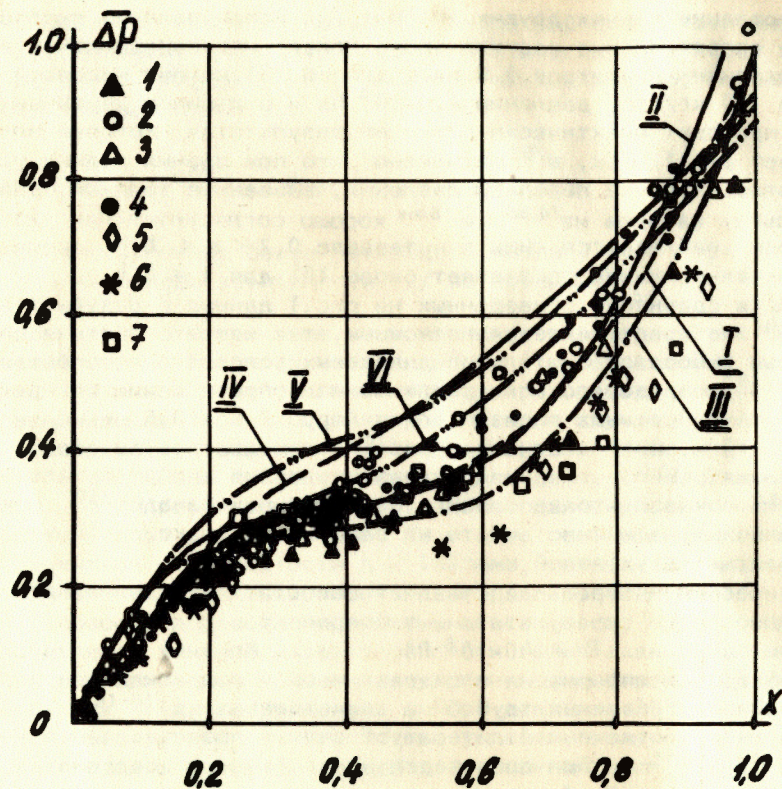


Рис.2. Сопоставление зависимостей относительного перепада давления  $\Delta P$  от относительной энтальпии  $x$  для пароводяной смеси и двухфазного гелия: 1 - обобщающая зависимость, полученная на основе /4/ для пароводяной смеси в адиабатных условиях /1 -  $m = 2770 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P = 137 \cdot 10^5 \text{ Па}$  /<sup>18/</sup>; 2 -  $m = 1500 \div 2500 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P = 141 \cdot 10^5 \text{ Па}$  /<sup>18/</sup>; 3 -  $m = 2000 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P = 147 \cdot 10^5 \text{ Па}$  /<sup>17/</sup>; 4 -  $m = 1600 \div 3880 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P = 137 \cdot 10^5 \text{ Па}$  /<sup>18/</sup>; 5 -  $m = 2770 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P = 167 \cdot 10^5 \text{ Па}$  /<sup>18/</sup>; 6 -  $m = 2000 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P = 196 \cdot 10^5 \text{ Па}$  /<sup>17/</sup>; 7 -  $m = 2770 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P = 196 \cdot 10^5 \text{ Па}$  /<sup>18/</sup>; II - обобщающая зависимость по уравнению /2/ для горизонтальной трубы /<sup>11/</sup> при течении двухфазного гелия; III - обобщающая зависимость по уравнению /3/ для вертикальной трубы /<sup>4,5/</sup> при течении двухфазного гелия; IV - зависимость для пароводяной смеси с учетом /5/ при  $P = 147 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и  $m = 2500 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ; V и VI - зависимости для двухфазного гелия с учетом /5/ при  $P = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и массовых скоростях соответственно 120 и 240  $\text{кг/м}^2\text{с}$ .

для  $0 < x < 0,95$ . При этом отклонения 79%, 10% и 4% общего числа точек от расчета по уравнению /4/ не превышают соответственно +20%, +30% и +40%, что иллюстрирует рис.3. Существенно худшее согласование рассмотренных данных наблюдается при их сравнении, например, с расчетной зависимостью из /<sup>14/</sup>, в которой потери давления, обусловленные трением, оцениваются на основе гомогенной модели с учетом /в качестве множителя/ поправочного коэффициента  $\psi$  на негомогенность течения. Этот коэффициент может быть рассчитан по эмпирической формуле

$$\psi = [1 + x(\frac{\mu'}{\mu''} - 1)]^{-0,2x} \{1 + 0,57x^{0,125}(1-x)^2[(0,2 + \frac{\rho'}{\rho''}\sqrt{Fr})^{-1} - 5,2^2]\}, \quad /5/$$

где  $\mu'$  и  $\mu''$  - динамические вязкости насыщенной жидкости и пара, а  $Fr$  - число Фруда.

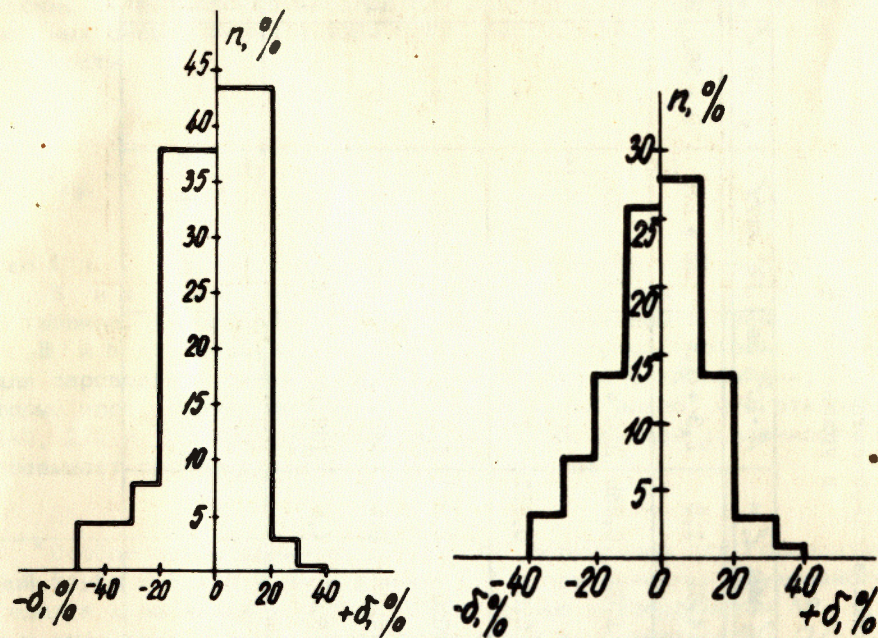


Рис.3. Гистограмма, характеризующая отклонение  $\delta$  доли общего числа  $n$  экспериментальных данных от обобщающей зависимости для данных от обобщающей зависимости для пароводяной смеси.

Рис.4. Гистограмма отклонения  $\delta$  доли общего числа  $n$  экспериментальных данных от обобщающей зависимости для двухфазных парожидкостных смесей гелия и воды.

Учитывающая выражение /5/ зависимость  $\overline{\Delta P}(x)$  для пароводяной смеси при давлении  $147 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и массовой скорости  $m = 2500 \text{ кг/м}^2\text{с}$



Вещество	Ориентация	$d$ , мм	$l$ , м	$\rho \cdot 10^5$ , Па	$\tau$ , кг/м <sup>2</sup> с	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	$A$	$a$	$B$	$b$	$\sigma$ , %	Источник
гелий	горизонтальная	4,61	1,0	1,3 + 1,4	120 + 240	0 + 360	2,58	0,3	1,07	2,5	$\pm 15$	[11]
		1,63	0,259	1,0 + 1,8	100 + 400	0	2,36	0,3	0,93	2,5	$\pm 15$	[5]
		0,8	0,181	1,0	170	-	-	-	-	-	-10	[6]
вода	вертикальная	20,0	2,0	141	1500+2500	0	-	-	-	-	-	[16]
		8,0	0,6	147,196	2000	0	1,85	0,4	0,91	2,5	$\pm 20$	[17]
		8,0	1,0	137,167, 196	1600+3880	0	-	-	-	-	-	[18]
гелий вода	горизонтальная вертикальная	-	-	-	-	-	2,16	0,33	0,90	2,2	$\pm 20$	[5, 6, 11, 16, 17, 18]

показана на рис.2, из которого видно, что в целом она располагается значительно выше соответствующих экспериментальных данных.

Мало подходит зависимость /5/ и для расчета гидравлического сопротивления при движении двухфазного потока гелия, что также иллюстрирует рис.2, где приведены кривые с учетом /5/ при  $\mu = 120$  кг/м<sup>2</sup>с,  $\mu = 240$  кг/м<sup>2</sup>с и давлении  $1,3 \cdot 10^5$  Па. Вместе с тем на рис.2 показано, что зависимости /4/ для пароводяной смеси и, например, зависимости для гелия /2/, /3/ удовлетворительно согласуются, различаясь не более чем на  $10 \div 12\%$ . Это может быть связано с некоторой общностью режимов течения двухфазных потоков в указанных интервалах параметров.

Из определения величины  $\Delta P$ , вида зависимостей /2/  $\div$  /4/ и формулы Дарси /19/ следует, что для рассмотренных условий гидравлические сопротивления каналов при движении двухфазных парожидкостных смесей гелия и воды могут рассчитываться с помощью зависимости

$$\Delta P_{\text{дф.}} = \xi' \frac{m^2 l}{2\rho' d} [1 + x(Ae^{-x/a} + Bx^b) (\frac{\xi'' \rho'}{\xi' \rho''} - 1)], \quad /6/$$

где  $d$  и  $l$  - диаметр и длина канала. Значения коэффициентов  $A$ ,  $a$ ,  $B$  и  $b$  в зависимости от режимных параметров представлены в таблице. В последней строке таблицы приведены значения  $A$ ,  $a$ ,  $B$  и  $b$  для формулы, которая обобщает все рассмотренные данные для пароводяной смеси и двухфазного гелия с отклонениями, которые иллюстрирует рис.4. Из этого рисунка видно, что отклонения 54%, 27% и 10% общего числа данных от обобщающей зависимости не превышает соответственно  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  и  $\pm 30\%$ .\*

\* Особое место занимают данные /20/, полученные для горизонтальной трубы  $\varnothing 6 \times 0,4$  мм и длиной 1,2 м при движении двухфазного гелия в адиабатных условиях. Приведенные к координатам  $\Delta P - x$ , они хуже других подчиняются отмеченным закономерностям /2/-/5/. Так, при  $0 < x < 0,3$  экспериментальные точки из /20/ располагаются между расчетной зависимостью для гомогенной модели и кривой III на рис.2. В диапазоне  $0,3 < x < 0,5$  данные /20/ занимают место между кривыми IV и VI. Наконец, в интервале  $0,5 < x < 0,95$  точки преимущественно располагаются между кривыми VI и III. В связи с этим отклонение данных /20/ от обобщающей зависимости, коэффициенты которой приведены в последней строке таблицы, достигает  $\pm 30\%$  и более. Следует отметить, что результаты /20/ характеризуются самым большим разбросом из всех рассмотренных данных /5, 6, 11, 16-18/. Так, при одинаковых  $x$  величины  $\Delta P$  при прочих равных условиях различаются на 30% и более.



**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Сон Зун Ган, Филиппов Ю.П. 8-83-164  
Расчет гидравлического сопротивления каналов при движении двухфазного потока гелия

На основе обработки экспериментальных данных, приведенных в литературе, предложена инженерная методика расчета гидравлического сопротивления каналов кругового сечения при движении в них двухфазного гелия и пароводяной смеси. При этом максимальное отклонение подавляющего большинства экспериментальных данных от результатов расчета не превышает +20%.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Son Zun Gan, Filippov Yu.P. 8-83-164  
Calculation of the Hydraulic Resistance of Channels under the Motion of Two-Phase Helium Flow

On the basis of the analysis of available experimental data, engineering technique for calculating the hydraulic resistance in circular cross section channels at the motion of two-phase helium and vapour-water mixture in them is suggested. The maximum deflection from the calculation results of the overwhelming majority of the experimental data does not exceed +20%.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.