

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

Р8-86-489

С.Ю.Селюнин, Ю.П.Филиппов

ВЛИЯНИЕ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА  
ДВУХФАЗНОГО ГЕЛИЯ  
НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ  
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ

Направлено в журнал "Теплоэнергетика"

1986

Гидравлическое сопротивление горизонтальных каналов при движении в них криостатирующего двухфазного потока гелия оказывает существенное влияние на тепловые режимы протяженных сверхпроводящих магнитных систем [1]. Информация об экспериментальных данных и расчетных соотношениях для горизонтальных труб при различных размерах и режимных параметрах двухфазного потока гелия представлена в [2,3,4,5].

Следует отметить, что по ряду причин эти данные не удовлетворительно согласуются между собой. Так, при прочих равных условиях гидравлические сопротивления из [2] и [3] различаются на величину около 50%, что может быть связано с разными массовыми скоростями и, следовательно, с разными структурами двухфазных потоков, при которых получены соответствующие результаты. Кроме того, [5] косвенно отрицается влияние массовой скорости на гидравлическое сопротивление горизонтальных труб при течении двухфазного гелия, хотя для вертикальных каналов при подобных условиях [2,3] перепад давления за счет трения существенно зависит от массовой скорости.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании влияния массовой скорости потока двухфазного гелия на гидравлическое сопротивление горизонтальных труб, в сопоставлении полученных данных с имеющимися результатами других авторов и разработке расчетных соотношений.

Экспериментальный канал представлял собой трубу из стали 12Х18Н10Т  $\varnothing$  5,03x0,21 мм длиной 2500 мм, из которой 2000 мм приходилось на измерительный участок и по 250 мм на участки гидродинамической стабилизации, выполненные до и после измерительного участка. Экспериментальный стенд и методика проведения экспериментов описаны в [2,6]. Тепловой режим и давление  $P$  выбирались типичными для протяженных сверхпроводящих магнитных систем [1], т.е. удельный тепловой поток  $q \approx 0$ , а величина  $P \approx 1,3 \cdot 10^5$  Па. В качестве измерительных приборов использовались преобразователи давления дифференциального типа "Сапфир-22" [9] с пределами  $0 \pm 0,25$  кПа,  $0 \pm 1,5$  кПа и  $0 \pm 10,0$  кПа. Максимальные погрешности в определении величин гидравлического сопротивления  $\Delta P$  и расходного массового паросодержания (относительной энтальпии)  $x$  составляли соответственно 2 и 5%. Значения массовой скорости изменялись в пределах  $40 \pm 300$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Полученные результаты обраба-

тывались по методике [10] в виде зависимостей относительного перепада давления  $\Delta \bar{P} = (\Delta P_{гф} - \Delta P') / (\Delta P'' - \Delta P')$  от средней относительной энтальпии двухфазного потока  $x = (i_{гф} - i') / (i'' - i')$ , где  $\Delta P_{гф}$ ,  $\Delta P''$ ,  $\Delta P'$  и  $i_{гф}$ ,  $i''$ ,  $i'$  - соответственно перепады давления и энтальпии, относящиеся к двухфазному потоку, насыщенным паром и жидкостью.

Эксперименты проводились при массовых скоростях  $m = 44, 52, 63, 83, 92, 114, 126, 148, 192, 245$  и  $300$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Для каждой зависимости  $\Delta \bar{P}(x)$  при  $m = const$  было получено не менее 60-70 экспериментальных значений. Таким образом, всего было получено около 700 экспериментальных точек.

На рис.1 приведены полученные на основе экспериментов аппроксимирующие зависимости  $\Delta \bar{P}(x)$  для трех характерных массовых скоростей -  $50 \pm 2, 90 \pm 2$  и  $190 \pm 2$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, которые делят поле этого рисунка на четыре диапазона. Так, при  $m \leq 50$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> и  $m \geq 190$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> изменение массовой скорости не влияет на вид зависимостей  $\Delta \bar{P}(x, m)$ , хотя рассматриваемые характеристики  $\Delta \bar{P}(x, m = 50)$  и  $\Delta \bar{P}(x, m = 190)$  существенно отличаются друг от друга и зависят от величины  $m$ . В диапазонах  $50 \leq m \leq 90$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> и  $90 \leq m \leq 190$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> варьирование массовой скоростью приводит к изменению вида зависимостей  $\Delta \bar{P}(x)$ , которые принимают промежуточную форму между характерными кривыми  $\Delta \bar{P}(x, m = 50)$ ,  $\Delta \bar{P}(x, m = 90)$  и  $\Delta \bar{P}(x, m = 190)$ . В частности, повышение массовой скорости от 50 до 90 кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> приводит к некоторому росту гидравлического сопротивления в диапазоне  $0,1 < x < 0,5$ . Однако в диапазоне  $0,5 < x < 1$  заметно снижение относительного перепада давления  $\Delta \bar{P}$  с увеличением величины  $m$  в тех же пределах. Дальнейший рост массовой скорости от 90 до 190 кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> приводит к существенному повышению  $\Delta \bar{P}$  в диапазоне  $0 < x < 0,4$  и соответствующему заметному снижению величины  $\Delta \bar{P}$  в интервале  $0,4 < x < 0,9$ .

Существование четырех диапазонов по массовым скоростям связано перестройкой структуры двухфазного потока гелия при изменении величины  $m$ . Это иллюстрирует рис.2, на котором приведена карта режимов течения двухфазного гелия для горизонтального канала диаметром 5,76 мм [6]. На этом рисунке пунктирными линиями показаны процессы увеличения величины  $x$  при отмеченных выше постоянных массовых скоростях 50, 90 и 190 кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Так, при  $m \leq 50$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> и  $0 < x < 1$  структура потока практически не меняется и остается близкой к расслоенному гладкому режиму те-

Эти зависимости построены на основе соотношения (2), которое комментируется ниже; экспериментальные точки не показаны, чтобы не порогрывать рисунок.

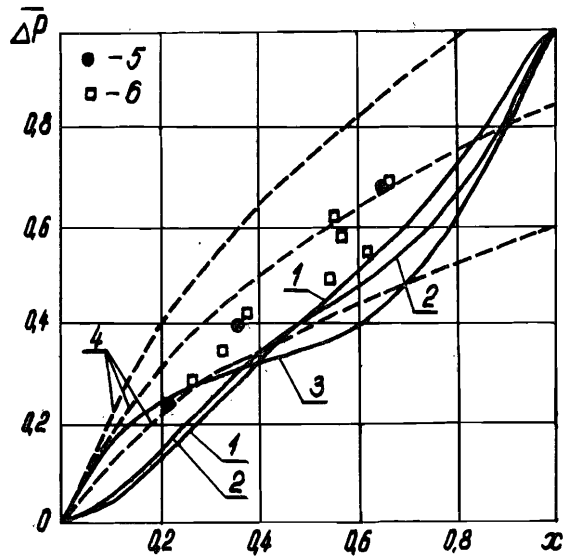


Рис. 1. Зависимости относительного перепада давления  $\overline{\Delta P}$  от относительной энтальпии  $x$  при различных массовых скоростях  $m$ . 1 -  $m \leq 50 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\rho = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 2 -  $m = 90 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\rho = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 3 -  $m > 190 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\rho = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 4 - по уравнению (4) из [5] с отклонением  $\pm 30\%$  при  $\rho = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 5 - данные [3],  $m = 24+50 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\rho = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 6 данные [3],  $m = 65+130 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\rho = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

чения. Анализ таких режимов на основе уравнений импульса для каждой фазы приведен в [11], где для расчета гидравлического сопротивления труб при  $\rho = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$  получено соотношение

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

хорошо согласующееся с экспериментальными данными для гелия при массовых скоростях около  $50 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Увеличение массовой скорости в диапазоне  $50 < m < 90 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  приводит при  $0,05 \leq x \leq 0,8$  к возникновению развитого волнового расслоенного режима течения, переходящего в прерывистый при величинах  $m$  около  $90 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Дальнейшему увеличению массовой скорости в диапазоне  $90 < m < 190 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $0,05 \leq x \leq 0,8$  соответствует преобладающая прерывистая структура двухфазного потока. Такая перестройка структуры двухфазного потока гелия приводит к соответствующему изменению вида зависимости  $\overline{\Delta P}(x)$  на рис. 1 для отмеченных диапазонов массовых скоростей  $m$ .

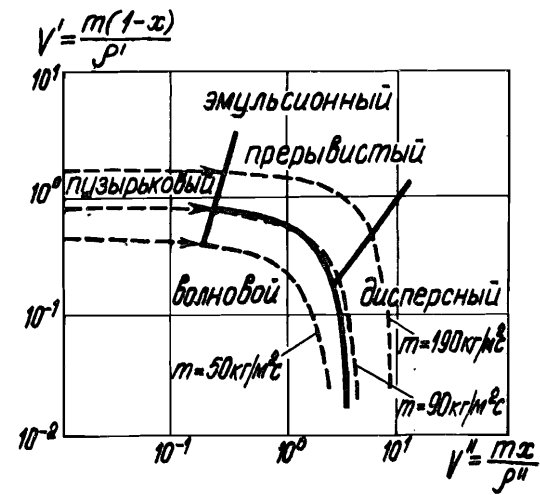


Рис. 2. Карта режимов течения двухфазного гелия в горизонтальной трубе [8] при  $\rho \approx 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .  $V'$  и  $V''$  - приведенные скорости соответственно жидкости и пара, штриховыми обозначены линии изменения относительной энтальпии при  $m = 50, 90$  и  $190 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Наконец, при  $m > 190 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  структура потока становится близкой к эмульсионной и практически не изменяется при увеличении массовой скорости, что сопровождается сохранением вида зависимости  $\overline{\Delta P}(x)$ .

Для получения расчетных соотношений гидравлических сопротивлений при характерных режимах течения двухфазного потока в принципе можно воспользоваться уравнениями импульса для каждой из фаз. Однако, как показано в [11], даже для сравнительно простого случая гладкого расслоенного режима течения необходимо применять численные методы. В связи с этим расчетные соотношения для исследованного диапазона режимных параметров потоков гелия были получены эмпирическим путем.

За основу было принято предложенное в [2] уравнение

$$\overline{\Delta P} = A x^a e^{cx} + B x^b, \quad (2)$$

где  $A, B, a, b$  и  $c$  - коэффициенты, зависящие от модифицированного числа Фруда  $Fr_* = \frac{m}{\rho'} \sqrt{\frac{\rho' - \rho''}{g\sigma}}$  или массовой скорости  $m$ . Здесь  $\rho'$  и  $\rho''$  - плотности насыщенных жидкости и пара,  $g$  - ускорение свободного падения,  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения. Коэффициенты в уравнении (2) были определены методом наименьших квадратов при обра-

ботке полученных экспериментальных данных для  $m = 44, 52, 63, 83, 92, 114, 126, 148, 192, 245, 300 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

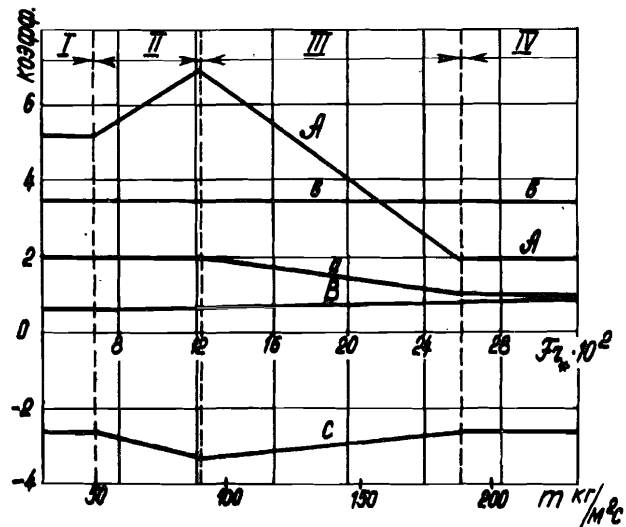


Рис. 3. Зависимости коэффициентов  $A, B, a, b$  и  $c$  в уравнении (2) от модифицированного числа Фруда  $Fr_* = \frac{m}{\rho'} \sqrt{\frac{J \cdot \rho'}{g \sigma}}$  (или массовой скорости  $m$ ). Зоны I, II, III и IV соответствуют расслоенному режиму течения, близкому к гладкому; расслоенному волновому; прерывистому, прерывистому, близкому к эмульсионному режиму течения.

На рис.3 представлена зависимость коэффициентов в уравнении (2) от числа Фруда. На этом рисунке, так же, как и на рис.1 и 2, выделены четыре зоны, границы которых связаны с существованием характерных структур двухфазных потоков гелия. В частности, величина  $Fr_* \approx 0,123$  ( $m \approx 90 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) хорошо согласуется с положением границы раздела между волновыми и прерывистыми режимами на карте режимов течения, показанной на рис.2.

Для удобства расчетов соотношения для коэффициентов уравнения (2) в зависимости от числа  $Fr_*$  представлены в таблице. При этих значениях коэффициентов величины  $\Delta \bar{P} (x = 1)$  отличаются от единицы на величину, не превышающую  $\pm 0,02$ .

Величина гидравлического сопротивления труб при движении двухфазного потока может рассчитываться с помощью соотношения

$$\Delta P_{ггф} = \xi \frac{1}{2} \rho' v^2 \left[ 1 + \Delta \bar{P} \left( \frac{\rho' \rho}{\rho' \rho} - 1 \right) \right], \quad (3)$$

Таблица. Зависимость коэффициентов уравнения (2)  $\Delta \bar{P} = Ax^2e^x + Bx^b$  от модифицированного числа Фруда  $Fr_* = \frac{m}{\rho'} \sqrt{\frac{J \cdot \rho'}{g \sigma}}$  (или массовой скорости  $m$ ).

Коэффициенты Число Фруда (массовая скорость)	A	a	c	B	b
$Fr_* \leq 6,85 \cdot 10^{-2}$ ( $m \leq 50,0$ )	5,2	2,0	-2,6	0,67	3,5
$6,85 \cdot 10^{-2} < Fr_* \leq 12,34 \cdot 10^{-2}$ ( $50,0 < m \leq 90,0$ )	$32,82 Fr_* + 2,95$ ( $4,5 \cdot 10^{-2} m + 2,95$ )	2,0	$-12,77 Fr_* - 1,725$ ( $-1,75 \cdot 10^{-2} m - 1,725$ )		3,5
$12,34 \cdot 10^{-2} < Fr_* \leq 26 \cdot 10^{-2}$ ( $90,0 < m \leq 190,0$ )	$-36,47 Fr_* + 11,5$ ( $-5,0 \cdot 10^{-2} m + 11,5$ )	$-7,294 Fr_* + 2,9$ ( $-1,0 \cdot 10^{-2} m + 2,9$ )	$5,106 Fr_* - 3,93$ ( $7,0 \cdot 10^{-3} m - 3,93$ )	$(93,78 Fr_* + 60,57) 10^{-2}$ ( $12,86 m + 60,57$ ) $10^{-4}$	3,5
$Fr_* > 26 \cdot 10^{-2}$ ( $m > 190,0$ )	2,0	1,0	-2,6	0,65	3,5

где  $d$  и  $l$  - диаметр и длина трубы,  $f'$  и  $f''$  - коэффициенты гидравлического сопротивления канала при течении в нем жидкости или пара с массовой скоростью смеси  $m$ . По данным [2,3,12] величины  $f'$  и  $f''$  рекомендуется рассчитывать по формуле Кольбука и Уайта, приведенной, например, в [2,3].

Сравнение результатов расчета величины  $\overline{\Delta P}$  по уравнению (2) с полученными экспериментальными данными свидетельствует о том, что максимальное отклонение большинства (80-90%) экспериментальных точек от соответствующих зависимостей не превышает  $\pm 10+15\%$ . Это также относится и к другим массовым скоростям, которые упомянуты выше, но не нанесены на рис.1, чтобы его не загромождать. В пределах 10% находится разница в расчетах по уравнениям (1) из [11] и (2) из данной работы для массовой скорости  $m = 50 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . При этом в диапазоне  $0 < x < 0,2$  результаты расчетов по уравнению (2) несколько ниже, чем по уравнению (1), а в диапазоне  $0,2 < x < 0,6$  соответственно несколько выше. Здесь также можно отметить, что расчетная зависимость (2) при массовой скорости  $m > 190 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  хорошо согласуется с аналогичными данными для гелия и обобщающей зависимостью для пароводяной смеси при давлениях  $(141-196)\cdot 10^5 \text{ Па}$ , которые приведены в [2].

Из имеющихся немногочисленных литературных данных, связанных с исследованием гидравлического сопротивления горизонтальных труб при движении в них двухфазного гелия, проведем сопоставление полученных результатов с данными [3,4,5].

Так, в [5] приведена расчетная зависимость

$$\frac{\Delta P_{ггф}}{\Delta P'} = 1,5 \frac{\rho_{кр}^{1,7}}{\rho} x^{0,8} (1 - \rho/\rho_{кр})^{0,8}, \quad (4)$$

которая, по мнению авторов, описывает все имеющиеся экспериментальные точки, относящиеся к гидравлическому сопротивлению труб при движении двухфазного потока гелия, с отклонением  $\pm 30\%$  независимо от ориентации канала. Из соотношения (4) следует, что величина  $\Delta P_{ггф}$  зависит только от паросодержания  $x$  и давления и не зависит от массовой скорости  $m$ . Однако это противоречит как полученным нами данным для горизонтальных труб, так и результатам работ [6,7] для вертикальных труб. В частности, в [6] указывается на заметное влияние массовой скорости двухфазного гелия на величину  $\Delta P_{ггф}$ . Следует отметить, что характер этого влияния заметно зависит от ориентации исследуемого канала. Так, для горизонтальных каналов снижение массовой скорости может сопровождаться как повышением относительного гидравлического сопротивления  $\overline{\Delta P}$ , так и уменьшением величины  $\Delta P$ , что зависит от диапазона относительной энтальпии и было прокомментировано выше. Вместе с тем для вертикальных каналов аналогичная процедура приводит к возрастанию величины  $\overline{\Delta P}$  [6] во всем диапазоне  $x$ .

Кроме того, например, в диапазонах  $0,3 \leq x \leq 0,7$  и  $0 < x \leq 0,5$  при массовых скоростях соответственно  $m > 190 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  и  $m < 50 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  расхождение полученных нами данных с расчетами на основе зависимости (4) превышает указанную авторами [5] величину  $\pm 30\%$  и может достигать 50% и более. Это иллюстрирует рис.1, на котором нанесены зависимость (4), приведенная к координатам  $\overline{\Delta P} - x$ , и кривые, характеризующие отклонение от этой зависимости на  $\pm 30\%$ . То же самое можно сказать, сопоставив с расчетами по уравнению (4) экспериментальные данные для вертикальных труб [12] при давлениях  $(1+1,8)\cdot 10^5 \text{ Па}$  и массовых скоростях  $100+400 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

Из работы [3] можно выделить три экспериментальные точки, которые с помощью карты режимов течения [8] можно отнести к расслоенным режимам. Эти данные, полученные при давлении около  $1,2\cdot 10^5 \text{ Па}$ , массовых скоростях  $24+50 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  для трубы диаметром 18,4 мм и длиной 6000 мм, располагаются выше наших экспериментальных точек на 30+40%. Вместе с тем другие данные, полученные при массовых скоростях  $65+130 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  для трубы диаметром 11,4 мм и длиной 3800 мм при том же давлении, удовлетворительно согласуются с результатами расчета на основе уравнения (2) для величины  $m \approx 130 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Таким массовым скоростям и давлениям может соответствовать прерывистый режим течения. К сожалению, более детального анализа данных работы [3] провести не удастся, т.к. по массовым скоростям экспериментальные точки не выделены.

Таким образом, массовая скорость двухфазного потока гелия оказывает существенное влияние на гидравлическое сопротивление  $\Delta P_{ггф}$  горизонтальных труб, что связано с соответствующим изменением структуры и профилей скоростей потока. При условиях, близких к адиабатным, давлении около  $1,3\cdot 10^5 \text{ Па}$ , массовых расходных паросодержаниях  $0 \leq x \leq 1$  и массовых скоростях  $40 < m < 300 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  величины  $\Delta P_{ггф}$  могут рассчитываться с помощью соотношений (2), (3) и таблицы.

#### Литература

1. Сон Зун Ган, Филиппов Ю.П., Зинченко С.И. Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т.П, с.350-359.
2. Сон Зун Ган, Филиппов Ю.П. Теплоэнергетика, 1984, № 3, с.19-23.
3. Nakagawa S., et al. ICES, X, 1984, Helsinki, p.570-573.
4. Вишнев И.П., Мигалинская Л.Н., Лебедева И.Б. ИЖ, 1982, т.43, № 2, с.195-201.
5. Вишнев И.П., Лебедева И.П., Мигалинская Л.Н. Тезисы докладов Советско-Западногерманского симпозиума "Теплообмен в криогенных системах". 1985, ФТИН АН УССР, Харьков, с.44-45.

6. Архипов В.В., Деев В.И., Солодовников В.В. Теплоэнергетика, 1983, № 3, с.5-7.
7. Subbotin V.I. et al. Cryogenics, 1985, v.25, p.261.
8. Мамедов И.С., Салимов С.Е., Филиппов Ю.П. Сообщение ОИЯИ, P8-84-156, 1984, Дубна,
9. Иордан Т.Т., Юровский А.Я. Некоторые вопросы создания комплекса высокоточных тензорезисторных измерительных преобразователей теплоэнергетических параметров. Сборник научных трудов. М. ВНИИТеплоприбор, 1983, с.3-24.
10. Borishansky V.M. et al. Int. J. of Heat and Mass Transfer, 1973, v.16, p.1073-1085.
11. Мамедов И.С., Селюнин С.Ю., Филиппов Ю.П. Препринт ОИЯИ, P8-86-208, 1986, Дубна.
12. Деев В.И., Гордеев Ю.В., Приданцев А.И. и др. Атомная энергия, 1977, т.42, № 4, с.339-340.
13. SSC Reference Designs Study Group. Druft II, May 8, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 июля 1986 года.

Селюнин С.Ю., Филиппов Ю.П. P8-86-489  
Влияние массовой скорости потока двухфазного гелия на гидравлическое сопротивление горизонтальных труб

На основе экспериментальных исследований показано влияние массовой скорости на гидравлическое сопротивление горизонтальных труб при движении в них двухфазного потока гелия. Для расчета гидравлического сопротивления предложено расчетное соотношение для давлений около  $1,3 \cdot 10^5$  Па, массовых расходов паросодержаний  $0 \div 1$ , массовых скоростей  $40 \div 300$   $\text{кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$  и условий, близких к адиабатным. Дано сопоставление полученных данных с результатами других авторов.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод А.В.Дмитренко

Selyunin S.Yu., Filippov Yu.P. P8-86-489  
The Mass Velocity Influence on the Hydraulic Resistance of Horizontal Tubes with Two Phase Helium Flow

Basing on the experimental results, the mass velocity influence on the hydraulic resistance of horizontal tubes with two phase helium flow moving into them is shown. To calculate the hydraulic resistance it is proposed to correlate the pressures about  $1,3 \cdot 10^5$  Pa, vapour quality  $0-1$ , mass velocities  $40-300$   $\text{кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$  and conditions near the adiabatic. The received data comparison is given with already experimental data.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986