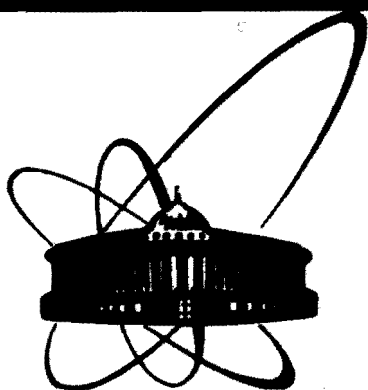


87-505



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P8-87-505**

**Ко Гым Сек, И.С.Мамедов, Ю.П.Филиппов**

**ВЛИЯНИЕ МАССОВОЙ СКОРОСТИ  
НА ИСТИННОЕ ОБЪЕМНОЕ ПАРСОДЕРЖАНИЕ  
ПОТОКА ДВУХФАЗНОГО ГЕЛИЯ**

**1987**

Исследованию одной из основных характеристик потоков двухфазного гелия /ДФГ/ - истинного объемного паросодержания /ИОП/ посвящены всего три работы <sup>/1-3/</sup>, результаты которых получены для кольцевых каналов вертикальной <sup>/1/</sup> и горизонтальной <sup>/2/</sup> ориентаций, а также для вертикальной трубы <sup>/3/</sup>. Эти работы содержат в основном информацию экспериментального характера, которая сопоставлялась с некоторыми известными расчетными зависимостями для частных случаев течения двухфазного потока. Однако попытки систематизировать имеющиеся данные, связанные с ИОП потоков ДФГ, видимо, не предпринимались.

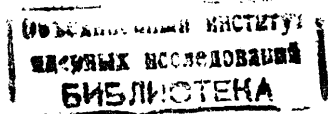
Для анализа процессов в двухфазном потоке может использоваться предложенный в <sup>/4/</sup> принцип минимального прироста энтропии. Этот метод уже применялся в работе <sup>/6/</sup>, в которой для кольцевого режима течения без учета трения получено широко известное соотношение для определения величины  $\phi^*$ :

$$\phi = \left[ 1 + \frac{1-x_1}{x_1} (\rho''/\rho')^{2/3} \right]^{-1} \quad /1/$$

Как показано в <sup>/2,3/</sup>, расчеты по соотношению /1/ хорошо согласуются с экспериментальными данными при сравнительно малой массовой скорости  $w = 10 \div 40$  /кг/м<sup>2</sup>·с потока двухфазного гелия. Однако при относительно больших скоростях  $w \geq 100$  /кг/м<sup>2</sup>·с/ расчеты по /1/ дают в сравнении с экспериментальными значениями  $\phi$  существенно заниженные результаты. Причиной этого может служить неучтенное в соотношении /1/ влияние массовой скорости на величину  $\phi$ , что отмечено в <sup>/6/</sup>. Используя результаты работы <sup>/6/</sup>, для дисперсно-кольцевого режима течения можно легко получить общее соотношение

$$\phi = \left\{ 1 + k \frac{1-x_1}{x_1} \frac{\rho''}{\rho'} + \left( 1 + \frac{3}{2} N \right)^{1/3} (1-k) \frac{1-x_1}{x_1} \left( \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{2/3} \right\} \times$$

\* Все обозначения величин приведены в конце работы.



$$\times \left[ \frac{1+k \frac{1-x_1}{x_1} \frac{\rho''}{\rho'}}{1+k \frac{1-x_1}{x_1}} \right]^{1/3} \}^{-1}, \quad /2/$$

где параметры

$$N = \frac{SLf}{A(1-\phi)} \quad \text{и} \quad k = \frac{x_3}{x_2 + x_3} \quad /3/$$

определяют соответственно эффекты трения и уноса доли жидкости в газовое ядро. В свою очередь величины  $k$  и  $N$  зависят от массовой скорости  $m$ . При  $k = N = 0$  соотношение /2/ принимает вид /1/.

В /6/ приведены графики, отражающие влияние фактора  $N$  и различных степеней захвата жидкости ядром потока на истинное объемное паросодержание. Однако из-за неопределенностей в оценках величин  $k$  и  $f$  эти графики носят иллюстративный характер и не могут быть использованы для корректного количественного анализа рассматриваемых процессов в потоках двухфазного гелия.

Цель настоящей работы, также базирующейся на принципе минимального прироста энтропии, состоит в разработке методики расчета величин  $k$  и  $N$ , корректировке обобщающего соотношения /2/ и сопоставлении полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными при адиабатических условиях. Ниже приведен анализ как для дисперсно-кольцевых режимов течения, так и для расслоенных, которые в /6/ не рассматривались. Расслоенные режимы течения ДФГ характерны, в частности, для систем криогенного обеспечения современных электрофизических установок /7,8,9/.

Перейдем теперь к изложению деталей предлагаемой методики.

Как известно, принцип минимальности прироста энтропии при минимальной кинетической энергии предполагает, что система стремится затратить наименьшую работу для ускорения пара и жидкости до скоростей, удовлетворяющих уравнению неразрывности /5/. В соответствии с этим принципом величина  $\phi$  должна соответствовать минимуму суммарной энергии, которая складывается из механической энергии диссипации  $W$  и кинетической энергии потока  $E$ .

Рассмотрим величины  $W$  и  $E$  для отмеченных режимов течения двухфазных потоков.

Для дисперсно-кольцевого режима течения механическую энергию диссипации  $W = u' \frac{SL}{A} r_w$  /6/ можно выразить через величину относительного гидравлического сопротивления  $\overline{\Delta p}$ :

$$W = N_{\text{дк}} \frac{m(u')^2}{2} (1-x_1)(1-k), \quad /4/$$

где

$$N_{\text{дк}} = \frac{Lf'}{D_3} \frac{1-\phi'}{(1-x_1)^2(1-k)^2} [1 + \overline{\Delta p} (\frac{f''\rho'}{f'\rho''} - 1)], \quad /5/$$

$$\overline{\Delta p} = [(\frac{dP}{dL})_{\text{дв}} - (\frac{dP}{dL})'] / [(\frac{dP}{dL})'' - (\frac{dP}{dL})']. \quad /6/$$

При выводе соотношения /4/ учитывалось, что

$$\frac{\tau_w S}{A} = (\frac{dP}{dL})_{\text{дв}} = f' \frac{m^2}{2\rho' D_3} [1 + \overline{\Delta p} (\frac{f''\rho'}{f'\rho''} - 1)], \quad /7/$$

а средние скорости обеих фаз определялись как /8/

$$u' = \frac{m(1-k)(1-x_1)}{\rho' [1 - \phi(1 + \frac{1-x_1}{x_1} \frac{\rho''}{\rho'} k)]} = \frac{m(1-k)(1-x_1)}{\rho'(1-\phi')}; \quad u'' = \frac{mx_1}{\rho''\phi}, \quad /8/$$

где

$$\phi' = \phi(1 + \frac{1-x_1}{x_1} \frac{\rho''}{\rho'} k).$$

Суммарная энергия определяется как

$$E + W = \frac{m}{2} [(u')^2(1-x_1)(1-k)(1+N_{\text{дк}}) + (u'')^2 x_1 (1 + \frac{1-x_1}{x_1} k)]. \quad /9/$$

Минимизируя суммарную энергию потока, т.е. приравнявая нулю производную  $\frac{\partial(E+W)}{\partial\phi}$ , определим общее скорректированное соотношение для величины  $\phi$ :

$$\phi = \left\{ 1 + k \frac{1-x_1}{x_1} \frac{\rho''}{\rho'} + (1 + \frac{1}{2} N_{\text{дк}}) \right\}^{1/3} (1-k) \frac{1-x_1}{x_1} (\frac{\rho''}{\rho'})^{2/3} \times$$

$$\times \left[ \frac{1+k \frac{1-x_1}{x_1} \frac{\rho''}{\rho'}}{1+k \frac{1-x_1}{x_1}} \right]^{1/3} \}^{-1}. \quad /10/$$

Соотношение /10/ по своей структуре такое же, как и /2/, однако первые множители третьих слагаемых в /2/ и /10/ отличаются друг от друга. Это связано с тем, что величины  $N$  и  $N_{дк}$  определены по-разному - формулы /3/ и /5/, и дифференцирование по  $\phi$  приводит к соответствующему различию\*. Полученное соотношение /10/ применимо для каналов как круглого сечения /труб/, так и кольцевого сечения, поскольку учет геометрии не оказывает влияния на вид полученных уравнений.

Сопоставляя выражения /2/ и /10/, можно получить четкое определение величины  $f$ , входящей в /3/:

$$f = \frac{f'}{8} \frac{A}{SD_9} \frac{(1-\phi')(1-\phi)}{(1-x_1)^2(1-k)^2} \left[ 1 + \Delta p \left( \frac{f''\rho'}{f'\rho''} - 1 \right) \right]. \quad /11/$$

Для расслоенных режимов течения величину  $W$  можно записать в общем виде:

$$W = L \left( u' \frac{S'}{A'} r'_w + u'' \frac{S''}{A''} r''_w \right) =$$

$$= Lu' \left[ \left( \frac{dP}{dL} \right)_{дв} \left( 1 + \frac{u''}{u'} \right) + r_1 \frac{S_1}{A_1} \left( 1 - \frac{u''}{u'} \frac{A'}{A''} \right) \right], \quad /12/$$

где /10/

$$r'_w = \left( \frac{dP}{dL} \right)_{дв} \frac{A'}{S'} + r_1 \frac{S_1}{S'}; \quad r''_w = \left( \frac{dP}{dL} \right)_{дв} \frac{A''}{S''} - r_1 \frac{S_1}{S''}.$$

Для каналов кольцевого сечения величину  $r_1 \frac{S_1}{A_1}$  можно принять равной нулю, что подтверждается выводами работы /10/. В этом случае /12/ преобразуется к виду

$$W = N_p \frac{m(u')^2}{2} (1-x_1)(1-k), \quad /13/$$

где

$$* \frac{\partial N}{\partial \phi} = \frac{N}{1-\phi}; \quad \frac{\partial N_{дк}}{\partial \phi} = - \frac{N_{дк}}{(1-\phi')} \left( 1 + \frac{1-x_1}{x_1} \frac{\rho''}{\rho'} k \right).$$

$$N_p = \frac{L f'}{D_9} \frac{1-\phi'}{(1-x_1)^2(1-k)^2} \left[ 1 + \Delta p \left( \frac{f''\rho'}{f'\rho''} - 1 \right) \right] \left[ 1 + \frac{x_1(1-\phi')\rho'}{(1-x_1)\phi(1-k)\rho''} \right].$$

Для каналов круглого сечения учет второго слагаемого в соотношении /12/, содержащего  $r_1 \frac{S_1}{A_1}$ , приводит к выражению  $N_1 =$

$= N_p + \Delta N_p$ , где величина  $\Delta N_p$  учитывает силовое взаимодействие на межфазной границе. Опуская выкладки, можно показать, что в широком диапазоне массовых скоростей, давлений и геометрических размеров отношение  $\Delta N_p/N_p$  находится в пределах  $0,07 \div 0,17$  соответственно при  $x_1 = 0,8 \div 0,2$ , а соответствующее влияние величины  $\Delta N_p$  на значения  $\phi$  не превышает 1%. Это дает основание пренебречь вторым слагаемым в /12/ и для канала круглого сечения.

Минимизируя суммарную энергию потока, получим соотношение для величины  $\phi$ , которое по своей структуре полностью соответствует выражению /10/, с той лишь разницей, что вместо величины  $N_{дк}$  в него входит величина  $N_p$ .

Таким образом, на основе предложенной методики можно рассчитать величины  $\phi = \phi(x_1, k, N)$  для дисперсно-кольцевых и расслоенных режимов течения двухфазных потоков. Для этого необходимо определить относительные гидравлические сопротивления  $\Delta \bar{p}$ , коэффициенты трения  $f', f''$  и долю жидкости в газовом ядре  $k$ .

При оценке величины  $\Delta \bar{p}$ , входящей в /5/ и /13/, нужно учитывать ориентацию канала и режимы течения двухфазного потока. Не останавливаясь подробно на всех возможных комбинациях, отметим, что для труб данные по  $\Delta \bar{p}$  и соответствующим режимам течения двухфазного гелия взяты из /10-12, 18/. Для каналов кольцевого сечения экспериментальные данные по  $\Delta \bar{p}$  получены лишь для горизонтальной ориентации при относительно низких величинах  $m = 25 \div 53 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} /10/$ , а для вертикальной ориентации этих каналов данные, видимо, отсутствуют. В связи с этим в расчетах для кольцевых каналов использовались соответствующие данные по  $\Delta \bar{p}$  для труб /11, 12/, поскольку по крайней мере при расслоенных режимах течения зависимости  $\Delta \bar{p}(x_1, m)$  для кольцевых каналов и труб довольно сходны как в качественном, так и в количественном отношении /10/.

Как показано в /11-13/, величины  $f'$  и  $f''$  рекомендуется рассчитывать по эмпирической формуле Кольбука и Уайта, приведенной, например, в /13/. Для аналитических расчетов эта формула весьма неудобна, поэтому были опробованы другие известные соотношения. Так, предварительный анализ показал, что для оп-

ределения величин  $\phi$  на основе предложенной модели можно пользоваться известной формулой Блазиуса<sup>19/</sup>. При этом расчеты  $\phi$  с помощью /10/ различаются не более чем на 1% соответственно при использовании соотношений Блазиуса и Кольбука. С учетом этого отношения  $f''/D_3$  и  $f''/f'$  в выражениях /5/ и /13/ примут вид

$$\frac{f'}{D_3} = \frac{0,3164}{D_3^{5/4}} \left(\frac{\mu'}{m}\right)^{1/4}; \quad \frac{f''}{f'} = \left(\frac{\mu''}{\mu'}\right)^{1/4} \quad /14/$$

Конкретные экспериментальные данные о величине  $k$  для двухфазных потоков гелия в литературе отсутствуют. Однако анализ экспериментальных данных для пароводяных потоков при относительно высоких давлениях  $p > 14,0$  МПа показал, что, например, их относительные гидравлические сопротивления описываются практически такими же соотношениями, как для двухфазного гелия<sup>14/</sup>. Кроме того, коэффициенты скольжения фаз ДФГ из<sup>1,2/</sup> удовлетворительно согласуются с расчетной зависимостью из<sup>15/</sup>, полученной для пароводяных потоков в вертикальных трубах при адиабатных условиях. Поэтому в первом приближении для определения величины  $k$  в уравнении /10/ нами использованы данные для пароводяных потоков<sup>16/</sup> с соответствующей коррекцией по величине массовой скорости, обсуждаемой ниже.

На основе экспериментальных данных из<sup>16/</sup> при  $p = 10$  МПа и  $m = 500 \div 4000$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> нами получена\*) зависимость доли жидкости  $x_3$  по отношению ко всей жидкости в смеси ( $x_2 + x_3$ ) от обобщенного параметра  $z$ :

$$k = \frac{x_3}{x_2 + x_3} = 1 - 0,65 z^{0,64}, \quad /15/$$

где /17/

$$z = \left(\frac{\mu' u''}{\sigma}\right)^2 \frac{\bar{\rho}}{\rho'} \cdot 10^4, \quad \bar{\rho} = \frac{x_1 + x_3}{x_1/\rho'' + x_3/\rho'}$$

Параметр  $z$  в принципе тоже является функцией  $\phi$ , и применение выражения /15/ даст в общем случае сложную неявную зависимость  $k = z(\phi) \cdot \phi(x_1, m)$ . В связи с этим для определения величины был применен метод последовательных приближений. Этот метод

\* Соотношения из<sup>16/</sup> не совсем удобны для анализа процессов в двухфазном гелии, т.к. точка их излома приходится на наиболее интересующую нас область.

показал, что если в первом приближении подставить в выражение для  $z$  величину  $\phi$ , входящую в  $u''$  и определенную по гомогенной модели, то соотношение для  $z$  можно представить в пригодном для практических расчетов виде

$$z = \frac{\rho''}{\rho'} \cdot \frac{k + x_1(1-k)}{x_1(1-k\rho''/\rho') + k\rho''/\rho'} \cdot \left(\frac{\mu'}{\sigma\rho''}\right)^2 \left[\frac{\rho''}{\rho'} + (1 - \frac{\rho''}{\rho'})x_1\right] m^2 \cdot 10^4 \quad /16/$$

Необходимую зависимость  $k$  от  $m$  и  $x_1$  можно получить, решая уравнение /15/ с учетом /16/ итерационным методом.

Здесь следует оговорить, при каких величинах  $m$  для гелия может быть справедливо соотношение /15/, полученное для пароводяной смеси.

Из соотношения /16/ можно видеть, что

$$z \sim \left(\frac{\mu'}{\sigma\rho''}\right)^2 \frac{\rho''}{\rho'} m^2 \quad /17/$$

Сравнивая множители /17/ при приблизительно одинаковых отношениях  $\rho''/\rho'$  /при 13÷14 МПа для воды и 0,1÷0,12 МПа для гелия/, можно отметить, что параметры  $z$  для двух сред будут примерно равны тогда, когда

$$m_{H_2O} \approx 10 m_{He} \quad /18/$$

Это связано с тем, что динамическая вязкость и коэффициент поверхностного натяжения гелия намного меньше, чем для воды. Следует отметить, что именно при выполнении условия /18/ наблюдается соответствующее сходство гидравлических сопротивлений гелия и пароводяной смеси, отмеченное в<sup>14/</sup>. Следовательно, выражения /15/ и /16/ могут быть справедливы для гелия при  $m \approx 50 \div 400$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> и  $p \approx 0,12 \div 0,13$  МПа. Что касается диапазона  $m < 50$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, то в первом приближении для него применялась та же зависимость /15/, которая при  $m \approx 0$  не противоречит физическому смыслу -  $k \rightarrow 0$  при  $m \rightarrow 0$ .

Следует также отметить, что методом последовательных приближений должны рассчитываться величины  $N_{дк}$  и  $N_p$ , зависящие от искомой величины  $\phi$ . При этом в качестве первого приближения использовались значения, полученные с помощью /1/, а расчеты заканчивались при достижении заданной точности  $10^{-3}$ .

Прежде чем перейти к расчету конкретных характеристик на основе предложенной методики, необходимо оценить влияние на величину  $\phi$  геометрических размеров каналов круглого и кольцевого сечений, т.е. отношения  $L/D_3^{5/4}$ , входящего в выражения /5/ и /13/. Так, для известных датчиков истинного объемного паросодержания с каналами кольцевого сечения это отношение состав-

ляло около 200 для датчика из /2/ и около 150÷450 для датчика из /1/. Используя выражения /10/, /5/ и /13/, можно показать, что изменение  $L/D_3^{5/4}$  в пределах 150÷450 может приводить к соответствующему изменению величины  $\phi$  примерно на 2%, что не противоречит экспериментальным данным /1/. Поэтому в расчеты закладывалось значение  $L/D_3^{5/4} = 200$ , характерное для обоих датчиков. При одинаковых длинах измерительных участков труб и кольцевых каналов сравниваемые отношения эквивалентных диаметров в степени  $5/4$  более чем на полпорядка больше для труб, поэтому в расчеты для труб закладывалась величина  $L/D_3^{5/4} = 50$ .

Для оценки границ применимости предложенной методики были проведены предварительные расчеты величины  $\phi$ , результаты которых сравнивались с экспериментальными данными /1-3/ при относительно высоких  $m > 100 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  и сравнительно низких  $m \approx 10\div 40 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  массовых скоростях. При  $m \geq 100 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  расчеты свидетельствуют о хорошем согласии результатов - расхождения не превышают 3%. При  $m \approx 10\div 40 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  расчеты показали, что для  $x_1 \leq 0,4$  согласие результатов тоже хорошее - максимальные расхождения не превышают 3÷6%. Вместе с тем при  $x_1 \geq 0,4$  расхождения между расчетами  $\phi$  и экспериментальными значениями могут достигать 8 и 18% соответственно для трубы и кольцевого канала, например при  $x_1 = 0,8$ . Этот факт свидетельствует о превышении рассчитанных значений коэффициентов скольжения  $\bar{u} = u''/u'$  над величинами  $\bar{u}$ , определенными на основе экспериментальных данных, что может быть связано с неточностью определения доли уноса жидкости в газовое ядро  $k$  в соответствии с /15/÷/17/, а следовательно, и средней скорости жидкости  $u'$  на основе /8/. В связи с этим для расчетов в диапазоне  $x_1 > 0,4$  величина  $u'$  была увеличена и определена как  $u' = m(1 - x_1)/\rho'(1 - \phi')$ . При этом в предлагаемой методике изменяются лишь величины  $N_{dk}$  и  $N_{p1}$ , которые принимают вид

$$N_{dk1} = \frac{L f'}{D_3} \frac{1 - \phi'}{(1 - x_1)^2} \left[ 1 + \Delta p \left( \frac{f'' \rho'}{f' \rho''} - 1 \right) \right],$$

/19/

$$N_{p1} = N_{dk1} \left[ 1 + \frac{x_1 (1 - \phi') \rho'}{(1 - x_1) \phi \rho''} \right].$$

В результате проведенной корректировки величины  $u'$  отмеченные максимальные расхождения расчетов и экспериментов, касающихся величины  $\phi$ , снизились до 3 и 6% /вместо 8 и 18%/. Это иллюстрирует рис.1, на котором в качестве примера представлены результаты расчетов величины  $\phi$  на основе /10/ с использованием

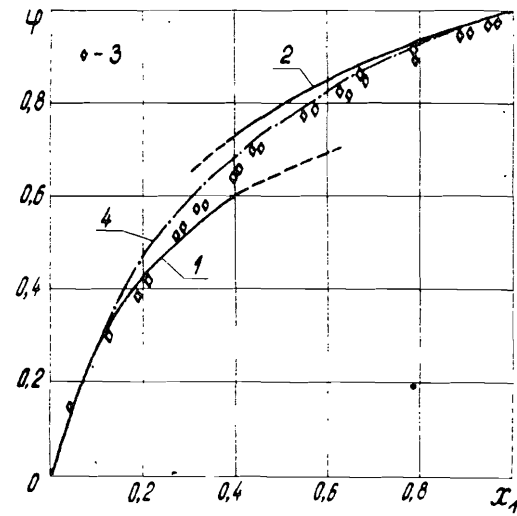


Рис.1. Зависимость истинного объемного паросодержания  $\phi$  от массового расходного паросодержания  $x_1$  при  $p = 0,12 \text{ МПа}$  и  $m = 35 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . 1 - расчет по /10/ с использованием /13/; 2 - расчет по /10/ с использованием /19/; 3 - экспериментальные данные из /10/; 4 - аппроксимирующая зависимость инженерной методики.

соотношений /5/, /13/ и /19/ соответственно для диапазонов  $0 < x_1 < 0,4$  и  $0,4 < x_1 < 1$ .

Остановимся теперь на влиянии массовой скорости как на отдельные составляющие соотношения /10/, так и на величину истинного объемного паросодержания.

Зависимости, иллюстрирующие влияние массовой скорости на величины  $k$  и  $N_{p1}$ ,  $N_{dk1}$ , представлены на рис.2. Из этого рисунка видно, что с возрастанием  $m$  доля уноса жидкости увеличивается, причем в диапазоне до  $m \approx 80 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  возрастание довольно крутое, а при  $m \geq 100 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  практически вся жидкость уносится в газовый поток. Из рис.2 также видно, что для труб влияния эффекта трения относительно мало во всем диапазоне  $m$  как

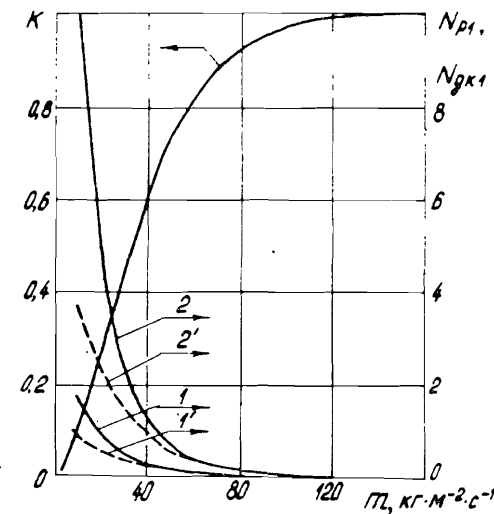


Рис.2. Зависимости доли жидкости в газовом потоке  $k$  и параметров эффекта трения  $N_{p1}$  и  $N_{dk1}$  от массовой скорости  $m$  при  $p = 0,12 \text{ МПа}$  и  $x_1 = 0,3$ . 1 - для канала круглого сечения  $L/D_3^{5/4} = 50$  горизонтальной ориентации, 1' - для канала круглого сечения вертикальной ориентации, 2 и 2' - то же, что 1 и 1' соответственно для каналов кольцевого сечения  $L/D_3^{5/4} = 200$ .

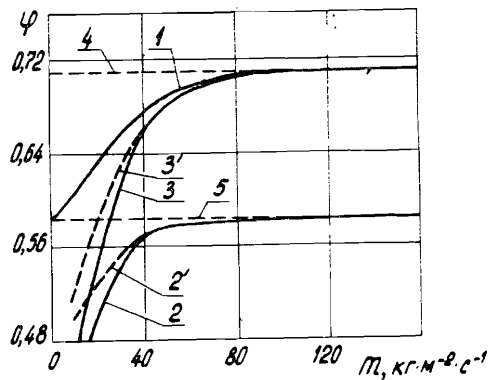


Рис.3. Зависимости истинного объемного паросодержания  $\phi$  от массовой скорости  $m$  для кольцевого канала при  $p = 0,12$  МПа и  $x_1 = 0,3$ . 1 - учитывает только эффект уноса жидкости в газовый поток, 2 - учитывает только эффект трения, 3 - учитывает совместное влияние обоих эффектов, 4 и 5 - расчеты соответственно по гомогенной модели и соотношению Зиви /1/, цифры без штриха и со штрихом относятся соответственно к горизонтальной и вертикальной ориентации.

для горизонтальной, так и для вертикальной ориентаций. Вместе с тем для каналов кольцевого сечения в интервале  $m < 40$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> эффект трения довольно значителен, что особенно характерно для горизонтально ориентированного канала. Следует отметить, что для вертикальных каналов оценки могут носить лишь качественный характер, что связано с возможной некорректностью применения выражения /13/ при  $m < 80 \div 100$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

На рис.3 в качестве примера показано, как отражается на истинном объемном паросодержании  $\phi$  изменение величин  $k$  и  $N$  в зависимости от массовой скорости  $m$ . Так, при  $k = 1$  и  $N = 0$ , когда вся жидкость уносится в газовое ядро и трением можно пренебречь, для зависимости  $\phi(x_1)_{m \geq 100}$  должна быть справедлива гомогенная модель, поскольку соотношение /10/ преобразуется

к виду  $\phi = [1 + \frac{1-x_1}{x_1} \frac{\rho''}{\rho'}]^{-1}$ . При  $k = N = 0$  и  $m \rightarrow 0$ , т.е. когда

обоими эффектами можно пренебречь, величина  $\phi$  сводится к значению, определяемому по /1/. На рис.3 эти предельные случаи и промежуточные состояния между ними отражает кривая 1.

В случае отсутствия уноса жидкости в газовое ядро / $k = 0$ / эффект трения приводит к уменьшению величины  $\phi$ , полученной по формуле /1/, что иллюстрируют кривые 2 и 2'. Так, снижение массовой скорости в диапазоне  $40 < m < 100$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> характеризуется слабым влиянием эффекта трения на величину. Однако при  $m < 40$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> это влияние проявляется уже существенно.

Общее влияние эффектов уноса жидкости и трения на величину  $\phi$  характеризуют кривые 3 и 3'.

Полученные и прокомментированные выше соотношения для определения истинного объемного паросодержания позволяют проанализировать влияние эффектов трения и уноса жидкости в газовый поток в зависимости от массовой скорости для различных диапазонов величины  $x_1$ . Однако эти соотношения не всегда удобны для практического применения. В связи с этим была разработана инженерная методика, суть которой заключается в следующем. На основе зависимостей, полученных по формуле /10/ с использованием /5/, /13/ и /19/ для диапазонов  $x_1 < 0,4$  и  $x_1 > 0,4$ ,

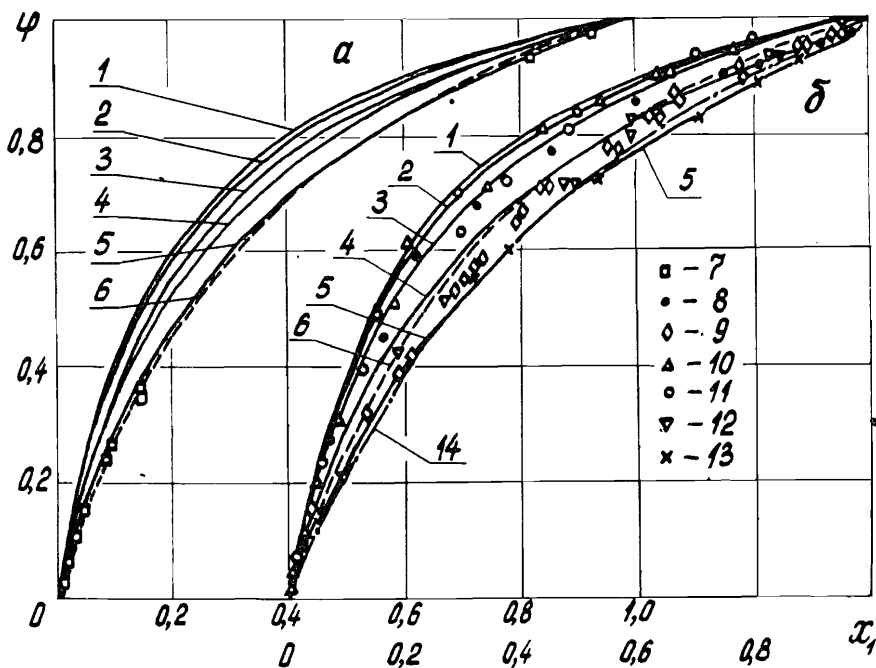


Рис.4. Зависимости величины  $\phi$  от массового расходного паросодержания  $x_1$  при  $p = 0,12$  МПа и различных массовых скоростях  $m$  для каналов круглого сечения /а/ и кольцевого сечения /б/. 1,2,3,4,5 - соответствуют  $m = 200, 100, 60, 40$  и  $20$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>; 6 - расчет по уравнению /1/; 7 - экспериментальные данные для вертикальной трубы /3/ при  $m = 6 \div 12$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>; 8 и 9 - экспериментальные данные для горизонтального канала кольцевого сечения /2/ при  $m = 109,5$  и  $35,5$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>; 10, 11 и 12 - экспериментальные данные для вертикальных каналов кольцевого сечения /1/ при  $m = 160, 100$  и  $8$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>; 13 - экспериментальные данные настоящей работы для горизонтального канала кольцевого сечения при  $m = 20,2$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>; 14 - расчет по формуле /20/.

по методу наименьших квадратов были построены общие кривые  $\phi(x_1)_m$ . В качестве примера такая кривая для  $m=35 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$

показана на рис.1 /позиция 4/.

Сопоставление результатов расчета  $\phi(x_1)_m$  на основе предлагаемой методики с экспериментальными данными представлено на рис.4. На рис.4а показаны результаты для труб в диапазоне массовых скоростей от 20 до 200  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Из этой части рисунка видно, что при изменении массовой скорости в указанных пределах расчетные зависимости располагаются между кривой для гомогенной модели и кривой, полученной по уравнению /1/. Сравнительно малочисленные экспериментальные данные из /3/ хорошо согласуются с расчетом по /1/, как при низких, так и при высоких расходных массовых паросодержаниях  $x_1$ . В пределах принятых предпосылок влияние ориентации канала практически не отражается на зависимостях  $\phi(x_1)_m$ .

Результаты расчетов для каналов кольцевого сечения в диапазоне массовых скоростей 20÷200  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  показаны на рис.4б, на котором дано также сопоставление с экспериментальными данными из /1,2/. При относительно больших массовых скоростях  $m \geq 100 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  наблюдается хорошее согласование с расчетом по гомогенной модели, как это характерно и для труб. Однако при сравнительно низких массовых скоростях  $m \approx 20 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  величины  $\phi$  заметно меньше соответствующих значений для труб, что связано с рассмотренным выше влиянием эффекта трения. В свою очередь коэффициенты скольжения фаз для кольцевых каналов заметно больше таковых для труб при прочих равных условиях. Так, при  $x_1 = 0,5$ ,  $m = 20 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  и  $p = 0,12 \text{ МПа}$  эта разница может достигать 30%. Сравнение экспериментальных данных для  $m = 35,5 \div 160 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  с расчетами свидетельствует об их хорошем согласии - максимальные расхождения не превышают величины  $\pm 5 \div 10\%$ . При массовых скоростях ниже величины  $m = 40 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  влияние ориентации кольцевых каналов может выражаться в том, что соответствующие значения для горизонтальной ориентации располагаются на 2÷4% ниже, чем для вертикальной ориентации. Причины этого рассматривались выше.

Из-за отсутствия в литературе экспериментальных данных для горизонтальных каналов кольцевого сечения при относительно низких массовых скоростях двухфазного гелия /около 20  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ / нами были проведены экспериментальные исследования с помощью высокочастотного датчика, аналогичного описанному в /2/, со следующими параметрами: длина измерительного участка 80 мм, диаметры внешнего и внутреннего электродов соответственно 13 и 11 мм, рабочая частота около 215 МГц. Экспериментальные данные для  $m = 20,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  хорошо согласуются

с расчетом для  $m = 20 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  /кривая 5/, а также с зависимостью

$$\phi = \left[ 1 + \frac{1-x_1}{x} \left( \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{4/7} \left( \frac{\eta'}{\eta''} \right)^{1/7} \right]^{-1}, \quad /20/$$

полученной в /10/ на основе уравнений сохранения импульса для каждой фазы расслоенных двухфазных потоков в кольцевых каналах.

Аппроксимирующие соотношения разработанной инженерной методики расчета зависимостей  $\phi(x_1)_m$  для гелия при  $p \approx 0,12 \div 0,13 \text{ МПа}$  имеют вид

$$\phi = \left[ 1 + \frac{1-x_1}{x_1} \left( \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{1-y} \right]^{-1}, \quad /21/$$

где  $y = 0$  при  $m \geq 200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ,

$y = 0,457 \cdot m^{-0,16}$  при  $10 \leq m \leq 200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  для каналов круглого сечения и

$$\begin{aligned} y &= 0, & m &\geq 200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1} \\ y &= 3,43 \cdot 10^6 \cdot m^{-3,82}, & 100 &\leq m \leq 200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1} \\ y &= 155,6 \cdot m^{-1,66}, & 40 &\leq m < 100 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1} \\ y &= 1,0 \cdot m^{-0,26}, & 20 &\leq m < 40 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1} \end{aligned}$$

для каналов кольцевого сечения.

Максимальные расхождения в расчете величин  $\phi$  с помощью соотношения /21/ не превышают 3% относительно вычислений на основе предложенной методики.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\phi$  - истинное объемное паросодержание;  $x_1$  - массовое расходное паросодержание;  $x_3$  - массовая доля жидкости в газовом потоке по отношению ко всей массе смеси;  $x_2 = 1 - x_1 - x_3$  - массовая

доля жидкости в потоке;  $k = \frac{x_3}{x_2 + x_3}$  - доля жидкости в газовом

потоке по отношению ко всей доле жидкости;  $\rho$  - плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\mu$  - динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения,  $\text{Н}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $m$  - массовая скорость,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $P$  - давление,  $\text{Па}$ ;  $\Delta p$  - безразмерный перепад давления;  $f$  - коэффициент трения;  $u$  - средняя скорость,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $W$  - механическая энергия диссипации /плотность потока/,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ;  $z$  - параметр Палеева-Филипповича;  $E$  - кинетическая энергия /плотность потока/,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ;  $\tau$  - касательное напря-



жение,  $N \cdot m^{-2}$ ;  $N$  - фактор трения;  $L$  - длина, м;  $S$  - смоченный периметр, м;  $A$  - площадь сечения,  $m^2$ ;  $\bar{u} = u''/u'$  - коэффициент скольжения; индексы: ' и '' - относятся к насыщенным жидкости и пару,  $дк$  - дисперсно-кольцевой,  $p$  - расслоенный,  $дв$  - двух-фазный,  $i$  - относится к межфазной границе,  $э$  - эквивалентный,  $w$  - стенка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Khalil A., McIntosh G. - Cryogenics, 1981, v.21, p.411.
2. Данилов В.В. и др. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 15-86, Дубна, 1986, с.42.
3. Zust H.K., Bald W.B. - Cryogenics, 1981, v.21, p.657.
4. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М.: ИЛ, 1960.
5. Поломик Е.Е. - Теплопередача, 1966, т.88, № 1, с.8.
6. Zivi S.M. - J. of Heat Transfer, 1964, v.86, p.247.
7. Агеев А.И. и др. Препринт ИФВЭ, ОУНК 80-138, Серпухов, 1980.
8. Hirabayashi H., Tsushiya K. - ICFA Proc.of Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics, BNL, May 12-16, 1986, p.19.
9. Studygroup Superconducting Magnets for HERA. Hamburg, June, 1981. DESY HERA 81/82.
10. Мамедов И.С., Селюнин С.Ю., Филиппов Ю.П. - Инженерно-физический журнал, 1987, т.52, № 1, с.154.
11. Селюнин С.Ю., Филиппов Ю.П. Препринт ОИЯИ P8-86-489, Дубна, 1986.
12. Sußbotin V.I., Deev V.I. et al. - Cryogenics, 1985, v.25, p.261.
13. Nakagawa S. et al. Proc. ICEC X, 1984, Helsinki. Guildford, 1984, p.570.
14. Сон Зун Ган, Филиппов Ю.П. - Теплоэнергетика, 1984, №3, с.19.
15. Миропольский З.Л., Шнеерова Р.И., Карамышева А.И. - Теплоэнергетика, 1971, № 5, с.60.
16. Нигматулин Б.И., Милашенко В.И., Шугаев Ю.З. - Теплоэнергетика, 1976, № 5, с.77.
17. Paleev I.I., Filippovich B.S. - Int.Journal of Heat and Mass Transfer, 1966, v.9, p.1089.
18. Мамедов И.С., Салимов С.Е., Филиппов Ю.П. Сообщение ОИЯИ, P8-84-156, Дубна, 1984.
19. Справочник по физико-техническим основам криогеники /под ред. М.П.Малкова/. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 июля 1987 года.

#### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги,  
если они не были заказаны ранее.

ДЗ,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р.00 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программирования и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
ДЗ,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного  
института ядерных исследований.

**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

Ко Гым Сек, Мамедов И.С., Филиппов Ю.П. P8-87-505  
Влияние массовой скорости на истинное  
объемное паросодержание потока двухфазного  
гелия

На основе принципа минимума прироста энтропии проведен анализ влияния массовой скорости на истинное объемное паросодержание /ИОП/ адиабатных двухфазных потоков. При этом показана роль эффектов трения и уноса жидкой фазы в газовое ядро потока. Представлены результаты расчетов для потоков двухфазного гелия /ДФГ/, дано сопоставление с имеющимися экспериментальными данными. Предложена инженерная методика расчета ИОП ДФГ для каналов круглого и кольцевого сечения.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.  
Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Co Gym Sek, Mamedov I.S., Filippov Yu.P. P8-87-505  
Mass Flow Rate Influence on Void Fraction  
of Two-Phase Helium Flow

Based on the minimum entropy production principle an analysis of mass flow rate influence on void fraction of two-phase adiabatic flows is made. The friction factor role and fraction of liquid entrained into vapour steam ones are demonstrated. The results of helium two-phase flow calculations as well as the comparison with analogous reference data are presented. The engineering calculation technique for void fraction of helium two-phase flows is suggested.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987