

1505/82

29/III-82



объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

P8-81-770

И.С.Мамедов, В.М.Микляев, В.И.Пряничников,  
Ю.П.Филиппов

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КАНАЛА  
ПРИ ДВИЖЕНИИ  
ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ГЕЛИЯ

Направлено в "Инженерно-физический журнал"

1981

Гидродинамические характеристики горизонтальных каналов при движении в них гелия необходимы для проектирования протяженных сверхпроводящих магнитных систем, таких, например, как УНК<sup>1/1</sup>. Однако объем такой экспериментальной информации весьма ограничен<sup>1/2</sup>. Сравнительно небольшое число близких по тематике работ<sup>1/3-8/</sup> посвящено исследованиям в иных условиях - в вертикальных каналах и змеевиках. В связи с этим нами начаты эксперименты, цель которых состоит в получении гидродинамических характеристик горизонтальных каналов в адиабатных условиях и при подводе тепла, а также в сопоставлении этих результатов с известными данными.

Схема экспериментального стенда показана на рис.1. Поток гелия из установки ХГУ-250/4,5<sup>1/7/</sup> при давлении от  $1,2 \cdot 10^5$  Па и выше проходит последовательно дроссельные вентили /1 и 2/, подающую магистраль /3/, теплообменник /4/, трехходовой вентиль /5/, одно из устройств для измерения расхода гелия - диафрагму /6/, формирователь входного паросодержания /7/, прозрачный элемент /8/ для визуального наблюдения за структурой потока<sup>1/8/</sup>, экспериментальный участок /9/, керамическую электроизолирующую вставку /10/, магистраль возврата /11/, дроссельный вентиль /12/. После этого гелий попадает в сосуд /13/ ХГУ-250/4,5, где сепарируется на пар и жидкость. Пар в качестве обратного потока поступает в ХГУ-250/4,5, а часть жидкости из сосуда /13/ через магистраль подпитки /14/ направляется в криостат /15/ с азотным экраном /16/. Криостат может быть соединен с газгольдером либо непосредственно, либо через вакуумный насос /17/. За счет разности давлений в теплообменнике /4/ и криостате /15/ поток гелия конденсируется, а затем охлаждается до состояния недогретой до насыщения жидкости.

Экспериментальный участок /9/ включает трубу из стали 12Х18Н10Т  $\phi 5,03 \times 0,21$  мм и длиной 2,5 м, причем 2 м приходится на обогреваемый участок и по 0,25 м - на "предвключенный" и "последвключенный" участки. На обогреваемой части трубы установлены на расстоянии 1 м друг от друга три камеры для отбора давления. К двум крайним камерам подведены провода для электрического обогрева. Труба для гелия окружена медным экраном, охлаждаемым жидким азотом, и помещена в вакуумный корпус.

Измерение температур гелия перед диафрагмами  $T_1$  и в криостате /15/ осуществлялось с помощью углеродных резисторов фирмы "Allen Bradley", а на входе  $T_2$  и выходе  $T_3$  эксперименталь-

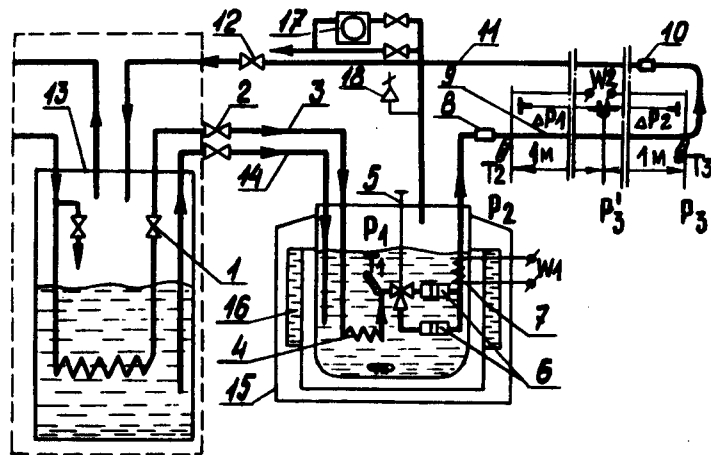


Рис.1. Схема экспериментального стенда /обозначения в тексте/.

ного участка - посредством германиевых термометров сопротивления<sup>/9/</sup>. Давление на входе определялось по показаниям образцового манометра. Перепады давления на экспериментальном участке измерялись оптическими дифференциальными манометрами типа ОМ-2. Расход гелия определялся с помощью проградуированных диафрагм, имеющих пределы соответственно  $0,65 \pm 4,2 \cdot 10^{-3}$  и  $3,5 \pm 22,0 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Параметры гелия перед экспериментальным участком изменялись посредством специального электрического нагревателя /7/, установленного в криостате /15/. Теплоприток к магистрали с экраном, охлаждаемым жидким азотом, которая соединяет криостат /15/ и экспериментальный участок /9/, находился на основе измеренных расхода, температур  $T_1, T_2$ , давлений  $P_1$  и  $P_2$  для случая течения недогретой до насыщения жидкости.

Каждая серия экспериментов по определению гидравлических сопротивлений канала проводилась при фиксированных тепловой нагрузке, расходе гелия, давлении на выходе\* и изменяющейся величине входной энтальпии потока, которая рассчитывалась на основе уравнения теплового баланса. Полученные результаты представлялись в виде зависимостей относительного гидравли-

\* При работе по приведенной схеме постоянным поддерживается давление в сосуде /13/, который соединен со всасывающей магистралью компрессора установки ХГУ-250/4,5.

ческого перепада давления  $\bar{\Delta P}_1 = \frac{\Delta P_1 - \Delta P'}{\Delta P'' - \Delta P'}$  от средней относительной энтальпии двухфазного потока  $\bar{x}_1 = \frac{i_1 - i'}{i'' - i'}$  при различных удельных тепловых потоках  $q$  и массовых скоростях  $w$ . Величина  $\Delta P'$  определялась экспериментально, а соответствующие значения  $\Delta P''$  рассчитывались по соотношению  $\Delta P'' = \Delta P' \frac{\rho}{\rho''}$ .

Экспериментально полученные коэффициенты гидравлического сопротивления трения на величину до 20% превышали соответствующие значения, найденные по формуле Никурадзе<sup>/10/</sup>, которая справедлива для гладких труб при  $10^4 < Re < 10^8$ . Сравнение опытных данных с расчетом по использованной в<sup>/6/</sup> формуле Кольбрука и Уайта для шероховатых труб показало, что эквивалентная шероховатость экспериментального участка составляет около 1 мкм, что согласуется с<sup>/6/</sup>. Соответствующие расхождения не превышают  $\pm 6\%$ . Величина  $\Delta P_1$ , измеряемая в эксперименте, складывается в основном из двух составляющих: перепадов давления за счет трения и ускорения двухфазного потока.

Погрешности определения  $\bar{x}_1$  и  $\bar{\Delta P}_1$ , обусловленные спецификой методики и используемых приборов, составляли соответственно около 11 и 5%. На рис.2 показано сопоставление полученных результатов для первого экспериментального участка с уравнением для гомогенной смеси и зависимостью, обобщающей экспериментальные данные для вертикальной трубы в адиабатных условиях<sup>/5,8/</sup>. Из этого рисунка видно, что в диапазоне  $0 < \bar{x}_1 < 0,6$  перепады давления в горизонтальном канале на 20÷30% ниже соответствующих величин для его вертикального аналога. Однако при  $0,6 < \bar{x}_1 < 1$  это различие не превышает 15%. Рис.2 также показывает, что при  $\bar{x}_1 < 0,2$  данные для горизонтального канала удовлетворительно согласуются с уравнением для гомогенной смеси, хотя в диапазоне  $0,2 < \bar{x}_1 < 1$  расхождение весьма значительно. В соответствии полученных результатов другим известным расчетным зависимостям можно судить из того, что приведенное в<sup>/6/</sup> сравнение для вертикальной трубы свидетельствует об удовлетворительном согласовании экспериментальных данных с зависимостью Мартинелли-Нельсона для воды и пара при высоком давлении / $P = 200 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>/]. Вместе с тем значения этих опытных данных существенно меньше рассчитанных по уравнению Локкарта-Мартинелли<sup>/11/</sup>.

Рис.3 иллюстрирует влияние теплового потока на гидродинамические характеристики  $\bar{\Delta P}_1(\bar{x}_1)$  при массовой скорости  $w = 120$  кг/м<sup>2</sup>с. Из этого рисунка видно, что для обогреваемого канала экспериментальные зависимости располагаются выше кривой, характеризующей течение в адиабатных условиях. При этом для  $\bar{x}_1 = idem$  с увеличением  $q$  величина  $\Delta P_1$  возрастает. Следует

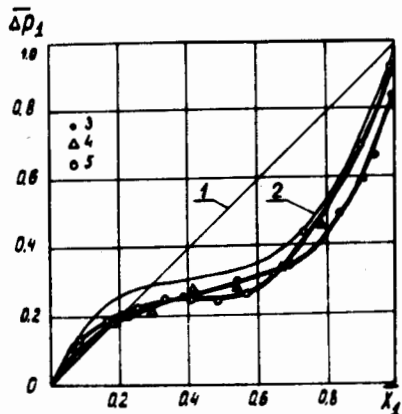


Рис.2. Сопоставление полученных результатов с данными для вертикальной трубы <sup>5,6/</sup> в адиабатных условиях: 1 - гомогенная модель; 2 - обобщающая зависимость <sup>8/</sup>; 3 -  $m=120 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P'_3 = /1,31 \div 1,33/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $\Delta P'_3 = 286 \text{ Па}$ ; 4 -  $m=150 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P'_3 = /1,31 \div 1,35/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $\Delta P'_3 = 446 \text{ Па}$ ; 5 -  $m=240 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $P'_3 = /1,34 \div 1,41/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $\Delta P'_3 = 997 \text{ Па}$ .

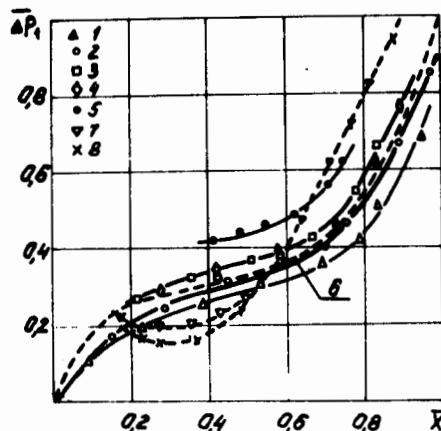
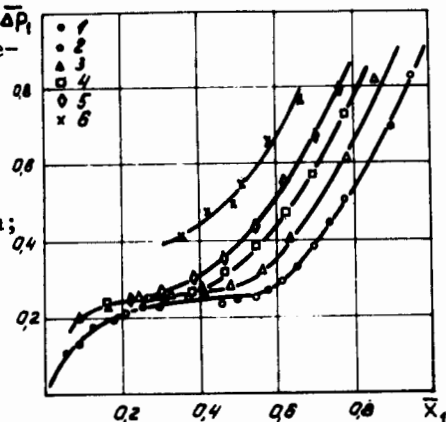


Рис.3. Сравнение полученных данных  $m=120 \text{ кг/м}^2\text{с}$  с результатами для вертикальной трубы  $m=145 \text{ кг/м}^2\text{с}$  <sup>8/</sup> при подводе тепла: 1 -  $q=0$ ,  $P'_3 = /1,31 \div 1,33/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 2 -  $q=360 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P'_3 = /1,29 \div 1,32/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 3 -  $q=720 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P'_3 = /1,31 \div 1,33/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 4 -  $q=1080 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P'_3 = /1,31 \div 1,32/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 5 -  $q=1800 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P'_3 = /1,34 \div 1,36/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 6 -  $q=0$ , данные <sup>8/</sup>; 7 -  $q=1000 \text{ Вт/м}^2$ , данные <sup>8/</sup>; 8 -  $q=2000 \text{ Вт/м}^2$ , данные <sup>8/</sup>.

отметить, что при  $q = 1860 \div 1880 \text{ Вт/м}^2$  наблюдалось колебание расхода гелия в пределах  $\pm 10\%$ , причем амплитуда колебаний возрастала по мере дальнейшего увеличения  $q$ .

На рис.3 представлено также сравнение полученных данных с подобными результатами для вертикального канала. Так, для последнего при  $m=145 \text{ кг/м}^2\text{с}$  и  $0 < \bar{x}_1 < 0,15$  влияние теплового потока мало заметно <sup>5/</sup>, тогда как для горизонтальной трубы более существенно. В диапазоне  $0,15 < \bar{x}_1 < 0,55$  для вертикального канала характерен гидравлический кризис, сопровождающийся тем большим снижением величины  $\Delta P_1$ , чем выше удельный тепловой поток. При  $\bar{x}_1 > 0,55$   $\Delta P_1$  практически не зависит от  $q$ , а соответствующие значения  $\Delta P_1$  несколько превышают перепады давления в адиабатных условиях <sup>8/</sup>.

Рис.4. Влияние тепловой нагрузки  $\bar{\Delta P}_1$  на гидродинамические характеристики горизонтальной трубы при  $m=240 \text{ кг/м}^2\text{с}$ : 1 -  $q=0$ ,  $P'_3 = /1,34 \div 1,41/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 2 -  $q=360 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P'_3 = /1,35 \div 1,43/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 3 -  $q=720 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P'_3 = /1,34 \div 1,43/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 4 -  $q=1430 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P'_3 = /1,35 \div 1,45/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 5 -  $q=2150 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P'_3 = /1,36 \div 1,46/ \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; 6 -  $q=3580 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P'_3 = /1,40 \div 1,48/ \cdot 10^5 \text{ Па}$  /большие значения  $P'_3$  соответствуют большим  $\bar{x}_1$ /.



Сравнение полученных данных с экспериментальными результатами для обогреваемого змеевика <sup>4/</sup>  $q=600 \text{ Вт/м}^2$  показывает довольно значительное их расхождение. О величине этого расхождения можно судить по тому, что данные <sup>4/</sup> удовлетворительно согласуются с расчетами по уравнению для гомогенной смеси.

Увеличение массовой скорости до  $240 \text{ кг/м}^2\text{с}$  приводит к тому, что перепады давления практически одинаковы как для адиабатного течения, так и для  $q=360 \text{ Вт/м}^2$  во всем диапазоне относительных энтальпий /рис.4/. В этом случае изменение  $\bar{x}_1$  от 0,15 до 0,55 ведет к увеличению  $\Delta P_1$  примерно на 35%, тогда как для  $m=120 \text{ кг/м}^2\text{с}$  /рис.3/ в том же интервале  $\bar{x}_1$  величина  $\Delta P_1$  возрастает почти на 90% /для адиабатных условий/. Это можно объяснить различными режимами течения двухфазного потока гелия. Так, в соответствии с <sup>8/</sup> массовой скорости  $125 \text{ кг/м}^2\text{с}$  в отмеченном диапазоне  $\bar{x}_1$  соответствует преимущественно снарядный режим течения, а при  $m \approx 220 \text{ кг/м}^2\text{с}$  наблюдаются пузырьковый и снарядный режимы.

При нагрузках  $q > 360 \text{ Вт/м}^2$  и  $\bar{x}_1 > 0,4$  характер зависимостей  $\Delta P_1(x_1)$  для  $m=240 \text{ кг/м}^2\text{с}$  качественно такой же, как для  $m=120 \text{ кг/м}^2\text{с}$ . Однако в отличие от результатов, представленных на рис.3, часть экспериментальных данных при  $\bar{x}_1 < 0,4$ ,  $m=240 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $q=720 \text{ Вт/м}^2$  и  $q=1430 \text{ Вт/м}^2$  /рис.4/ практически не отличается от аналогичных для адиабатного режима. Это можно объяснить как неодинаковостью режимов течения при разных  $m$ , так и некоторым различием давлений в каждой серии опы-

тов, когда  $m = 240 \text{ кг/м}^2\text{с}$  и  $q = \text{idem}$ . Следует также отметить, что колебаний расхода для  $m = 240 \text{ кг/м}^2\text{с}$  не наблюдалось при возрастании удельных тепловых потоков вплоть до  $5700 \text{ Вт/м}^2$ .

Таким образом, при движении двухфазного потока гелия гидродинамические характеристики горизонтального канала существенно отличаются от соответствующих характеристик вертикальных и змеевиковых каналов как в качественном, так и в количественном отношении. Причем это различие проявляется более значительно по мере увеличения тепловой нагрузки.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Обозначения, использованные в работе:

$m$  - массовая скорость;  $P_1, P_2, P_3, P_3'$  - давления соответственно перед расходомерным устройством, на входе в экспериментальный участок, в его середине и на выходе;  $\Delta P_1, \Delta P''$  и  $\Delta P'$  - перепады давления, соответствующие двухфазному потоку, насыщенному пару и жидкости;  $\overline{\Delta P}_1$  - относительный гидравлический перепад давления,  $\overline{\Delta P}_1 = \Delta P_1 - \Delta P' / \Delta P'' - \Delta P'$ ;  $i_1, i''$  и  $i'$  - энтальпии соответственно двухфазного потока, насыщенного пара и жидкости;  $\bar{x}_1$  - относительная энтальпия,  $\bar{x}_1 = i_1 - i' / i'' - i'$ ;  $i = 1, 2$  - индексы, относящиеся к первому и второму экспериментальному участкам;  $\rho'', \rho'$  - плотности насыщенного пара и жидкости;  $T_1, T_2$  и  $T_3$  - температуры потока гелия соответственно перед расходомерным устройством, на входе и выходе экспериментального участка;  $Re$  - число Рейнольдса;  $q$  - удельный тепловой поток, отнесенный к внутренней поверхности канала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А.И. и др. Препринт ИФВЭ, 80-96, ОУНК, Серпухов, 1980.
2. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 8-80-586, Дубна, 1980.
3. Keilin V.E. et al. Cryogenics, 1969, vol.9, No.1, p.36-38.
4. De La Harpe A. et al. Adv. in Cryogenic Eng., 1969, vol.14, p.170-177.
5. Деев В.И. и др. АЭ, 1977, т.42, №4, с.339-340.
6. Деев В.И. и др. Гидравлическое сопротивление при течении двухфазного потока гелия в адиабатических условиях и с подводом тепла. В кн.: Теплообмен 1978. "Наука", М., 1980, с.292-298.
7. Никиткин В.Д. и др. Холодильная гелиевая установка ХГУ-250/4,5. Информационный листок, сер.116,19М. Цинтихимнефтемаш, М., 1975.

8. Мамедов И.С., Филиппов Ю.П. ОИЯИ, Р8-81-40, Дубна, 1981.
9. Зарубин Л.И., Немиш И.Ю. ПТЭ, 1971, №4, с.260.
10. Справочник по физико-техническим основам криогеники /под ред. М.П.Малкова/, "Энергия", М., 1973, 392 с.
11. Теплопередача в двухфазном потоке /под ред. Д.Баттерворса и Г.Хьюитта/. "Энергия", М., 1980, 326 с.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 декабря 1981 года.