

4501

2-79



Объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

5/11-79

A-233

P8 - 12444

Н.Н.Агапов, А.И.Агеев, В.А.Белушкин, А.Г.Зельдович

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНЫХ НАСОСОВ
ДЛЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ГЕЛИЕВОЙ
ПАРОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ

1979

P8 - 12444

Н.Н.Агапов, А.И.Агеев, В.А.Белушкин, А.Г.Зельдович

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНЫХ НАСОСОВ
ДЛЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ГЕЛИЕВОЙ
ПАРОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ

Направлено в "Cryogenics"

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Исследование струйных насосов для циркуляции гелиевой парожидкостной смеси

Исследована работа струйного насоса на гелиевой парожидкостной смеси. Показано, что в этой области параметров соотношения, полученные из уравнения импульсов, справедливы лишь до наступления предельных режимов, когда в каком-либо из сечений камеры смешения аппарата скорость потока достигнет скорости звука. Приводится экспериментально проверенная методика расчета предельных режимов, в которой скорость звука в парожидкостном потоке определяется по термодинамической теории.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Investigation of Jet Pumps for Circulation of Helium Liquid-Vapor Mixture

The operation of a jet pump using a helium two-phase mixture has been studied. It is shown that for this two-phase region the relations obtained from the momentum equation are valid only up to the onset of limiting modes, i.e. unit the stream velocity achieves the velocity of sound in any section of the mixing chamber of the jet pump. The experimentally proved method of calculation of the limiting modes is presented in which the velocity of sound in a two-phase stream is determined by thermodynamic theory.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Ранее в^{1/} мы описали результаты исследований струйных насосов для циркуляции однофазного потока гелия при сверхкритическом давлении. В системах криостатирования сверхпроводящих устройств пока предпочтение отдают этому способу. Другой перспективный способ криостатирования - циркуляция двухфазного гелия. Этот способ обладает следующим основным преимуществом: подвод тепла от криостатируемого объекта не приводит к повышению температуры циркуляционного потока. Более того, температура двухфазной смеси на выходе из объекта ниже, чем на входе из-за гидравлического сопротивления объекта /см. рис. 1/. Высказывались опасения, что при циркуляции парожидкостной смеси возможны пульсация расхода и закупоривание паровыми пробками некоторых из параллельных каналов. По-видимому, эти трудности преувеличены, и их можно преодолеть^{2/}.

В данной работе приводятся результаты исследований циркуляционного струйного насоса для циркуляции двухфазного гелия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для испытаний струйных насосов на двухфазном потоке экспериментальный стенд, описанный в^{1/}, был дополнен измерительным сосудом IV /рис. 2/. При открытом положении крана V² уровень жидкого гелия в криостате и измерительном сосуде одинаковы. В этом положении режим настраивался таким образом, чтобы уровень оставался постоянным. Регулирование его производилось электронагревателем, а выделяемое им количество тепла Q определялось по ваттметру. Расход

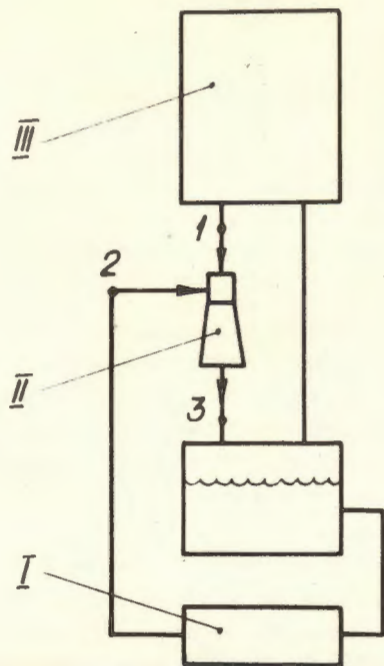


Рис.1. Схема криостатирования с циркуляцией парожидкостного потока гелия. I - криостатируемый объект, II - струйный насос, III - рефрижератор.

сжатого газа, подводимого к соплу, определяется из уравнения энергетического баланса

$$G_1 = \frac{Q}{i_0 - i_1}, \quad /1/$$

где i_0 и i_1 - энтальпии в соответствующих точках установки, определяемые по измеренным значениям давления и температуры.

После закрытия V_2 уровень жидкости в измерительном сосуде снижается, а в криостате увеличивается. В этом случае весовой расход инжектируемого потока может быть определен как

$$G_2 = \frac{\pi D^2}{4} \rho_4 \dot{H}, \quad /2/$$

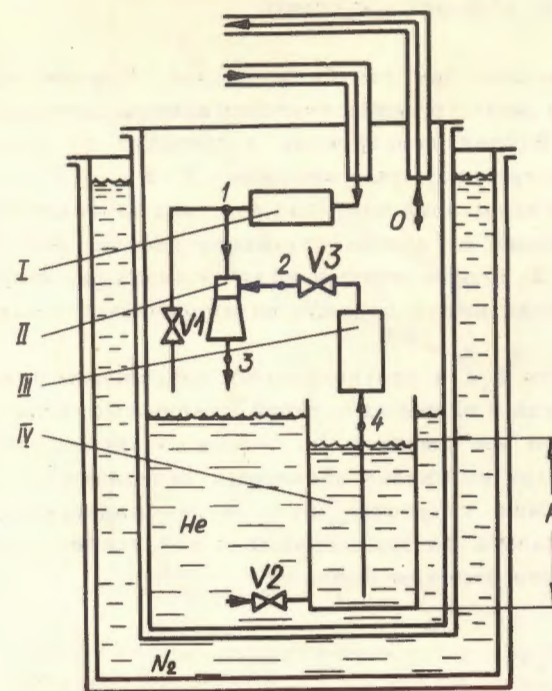


Рис.2. Схема экспериментального стенда. I - фильтр-адсорбер, II - струйный насос, III - электронагреватель, IV - измерительный сосуд.

где D - диаметр измерительного сосуда, ρ_4 - плотность жидкого гелия, \dot{H} - скорость падения уровня в измерительном сосуде. Таким образом, измерение расхода инжектируемого гелия сводится к определению величины \dot{H} .

Коэффициент инжекции определяется из соотношения

$$u = \frac{G_2}{G_1}, \quad /3/$$

напор струйного насоса

$$\Delta p = p_3 - p_2. \quad /4/$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Были испытаны два струйных насоса. Чертеж одного из них, имеющего диаметр цилиндрической камеры смещения 9,2 мм, приведен в^{1/}. Вторая конструкция отличается от первой лишь меньшим диаметром камеры смещения - 7,73 мм.

В процессе испытаний получено два типа зависимостей коэффициента инжекции от напора струйного насоса /рис. 3/. Зависимости 1 и 2 хорошо описываются формулами, полученными в^{1/} из уравнения импульсов для цилиндрической камеры смещения.

Зависимости 3 и 4 соответствуют предельным режимам^{3/} т.е. таким, когда в одном из сечений камеры смещения скорость инжектируемого или смешанного потока достигает критического значения. При получении расчетных зависимостей для предельных режимов скорость звука в парожидкостном потоке гелия определялась по термодинамической теории, основанной на использовании формулы Лапласа

$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} \quad /5/$$

где a - скорость звука, p - давление, ρ - плотность, s - энтропия.

При расчете предельных режимов исходными данными являются площадь сечения f_{3c} цилиндрической камеры смещения, расход G_1 , а также параметры торможения рабочего, инжектируемого и смешанного потоков.

Один из предельных режимов достигается, когда в каком-либо сечении "z" цилиндрической камеры смещения скорость инжектируемого потока сравнивается с местной скоростью звука. Соответствующий этому случаю расход инжектируемого потока G_2^* определяется методом последовательных приближений. При расчете задаются различными значениями давления $p_{2z} < p_2$ инжектируемого потока*. При $s_{2z} = s_2$ находят па-

* Здесь и далее так же, как и в^{1/}, переменные с простыми цифровыми индексами обозначают параметры торможения, причем индекс 1 относится к рабочему потоку перед соплом, 2 - к инжектируемому потоку, 3 - к смешанному. В сложных индексах цифра обозначает поток, а буква - сечение струйного аппарата.

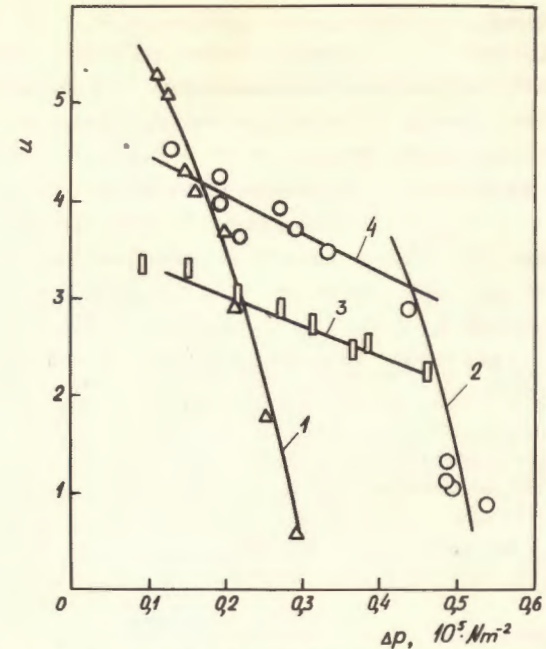


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристик струйных насосов, 1,2 - расчет по уравнению импульсов; 3,4 - предельные режимы.

$$o - p_1 = 18,1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; T_1 = 5,95 \text{ К}; G_1 = 28,5 \text{ г.с}^{-1};$$

$$p_3 = 1,43 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; \text{ диаметр камеры смещения}$$

$$d_{3c} = 9,2 \text{ мм.}$$

$$\square - p_1 = 17,3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; T_1 = 5,85 \text{ К}; G_1 = 25,6 \text{ г.с}^{-1};$$

$$p_3 = 1,42 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; d_{3c} = 7,73 \text{ мм.}$$

$$\Delta - p_1 = 7,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; T_1 = 6,25 \text{ К}; G_1 = 14,3 \text{ г.с}^{-1};$$

$$p_3 = 1,32 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; d_{3c} = 7,73 \text{ мм.}$$

аметры инжектируемого потока i_{2z} и ρ_{2z} . Затем, определив скорость из соотношения

$$w_{2z} = \sqrt{2(i_2 - i_{2z})} \quad /6/$$

находят массовую плотность потока $\rho_{2z} w_{2z}$. Перебрав несколько значений p_{2z} , находят такое давление, при котором массовая плотность потока максимальна. Максимальной массовой плотности потока соответствует критическое значение скорости инжектируемого потока.

Далее по давлению p_{2z} , соответствующему максимальной величине $(\rho_{2z} w_{2z})_{\max}$, определяют параметры рабочего потока в сечении "z" цилиндрической камеры смешения. При $p_{1z} = p_{2z}$ и $s_{1z} = s_1$ находят ρ_{1z} и w_{1z} , а по изэнтропному перепаду энтальпий $(i_1 - i_{1z})$ - скорость w_{1z} .

Используя уравнения неразрывности для инжектируемого и смешанного потоков

$$G_2^* = f_{2z} (\rho_{2z} w_{2z})_{\max} \quad /7/$$

и

$$G_1 = f_{1z} \rho_{1z} w_{1z} \quad /8/$$

а также учитывая, что

$$f_{3c} = f_{1z} + f_{2z} \quad /9/$$

имеем

$$G_2^* = (f_{3c} - \frac{G_1}{\rho_{1z} w_{1z}}) (\rho_{2z} w_{2z})_{\max} \quad /10/$$

Другой тип предельного режима может быть достигнут тогда, когда в сечении "С" на выходе из цилиндрической камеры смешения скорость смешанного потока сравнивается с местной скоростью звука. Расход инжектируемого потока, соответствующий этому предельному режиму, рассчитывается по формуле

$$G_2^{**} = f_{3c} (\rho_{3c} w_{3c})_{\max} - G_1 \quad /11/$$

полученной из тех же соображений, что и /10/.

Возможен и другой способ расчета величин G_2^* и G_2^{**} , при котором скорость звука в парожидкостном потоке определяется непосредственно из формулы Лапласа /5/. При этом дифференциалы заменяются конечными разностями $(\Delta p)_s$ и $(\Delta \rho)_s$. Естест-

венно, что оба способа дают одинаковые результаты, однако первый проще.

Расчеты показали, что во всех исследованных нами режимах $G_2^* \cdot G_2^{**}$, т.е. второй из описанных случаев реализован не был. Кривые 3 и 4 на рис. 3, соответствующие расходам инжектируемого потока G_2^* , хорошо согласуются с экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, работа циркуляционного струйного насоса в парожидкостной области может быть описана уравнениями, полученными в /1/. Однако эти уравнения справедливы лишь при таких величинах расхода инжектируемого потока, при которых ни в одном из сечений камеры смешения аппарата скорость потока не достигает скорости звука. При расчете этого предельного режима для определения скорости звука в парожидкостном потоке гелия можно использовать термодинамическую теорию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Agapov N.N. et al. *Gryogenics*, 1978, 18, p. 491.
2. Keilin V.E. et al. *Gryogenics*, 1970, 10, p. 224.
3. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. *Струйные аппараты*. "Энергия", М., 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июля 1979 года.