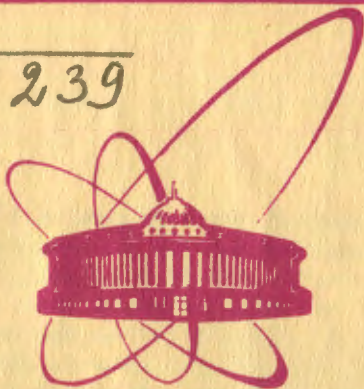


A-239



+

объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

3507/2-81

13/11-81

8-81-254

• А.И.Агеев, В.Ф.Буринов, С.И.Зинченко,
Ю.П.Филиппов

О НЕОДНОЗНАЧНОСТИ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК (ГДХ)
ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ КАНАЛОВ
КРИОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Направлено в "Инженерно-физический журнал"

1981

В последнее время получают распространение системы криостатирования, в которых двухфазный поток криоагента принудительно циркулирует в каналах объекта, отводя тепло /1,2/. В подобных системах возможны различного типа нестабильности, характеризующиеся непостоянством расхода, давления и других параметров. В тех случаях, когда в каналах происходит изменение агрегатного состояния, одной из причин нестабильности служит неоднозначность гидродинамической характеристики /ГДХ/ канала *. В^{3,4/} получено аналитическое выражение для ГДХ парогенерирующего канала в виде полинома третьей степени относительно расхода, с помощью которого показано, что при определенных условиях ГДХ может быть неоднозначной. Это иллюстрирует рис. 1, где величине ΔP_1 удовлетворяют три значения расхода - G_1 , G_2 , G_3 . Для прямого канала без местных сопротивлений с равномерным по длине подводом тепла и при постоянных параметрах на входе в канал авторами^{3,4/} получено следующее условие однозначности /стабильности/

$$\Delta i_{\text{вх}} \leq 7,46 \cdot \frac{\Gamma}{(\rho' / \rho'' - 1)} \quad \text{или} \quad Ja \leq 7,46. \quad /1/$$

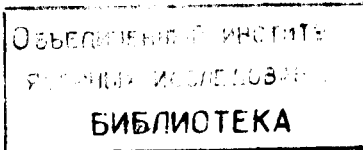
На практике в каналах всегда присутствуют местные сопротивления, поэтому проведем анализ ГДХ парогенерирующего канала с местными сопротивлениями на входе и выходе /рис. 2/. В такой канал поток входит в виде недогретой до состояния насыщения жидкости и под действием тепловой нагрузки Q переходит в двухфазное состояние. Сечение, где поток достигает состояния насыщения, расположено от входа на расстоянии

$$L_s = \frac{G \cdot \Delta i_{\text{вх}}}{Q} \cdot L. \quad /2/$$

Гидравлическое сопротивление канала запишется в виде

$$\Delta P = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{оф}} + \Delta P_{\text{дв}} + \Delta P_{\text{вых}}. \quad /3/$$

*Под ГДХ парогенерирующего канала понимается зависимость гидравлического сопротивления ΔP от расхода G рабочего вещества.



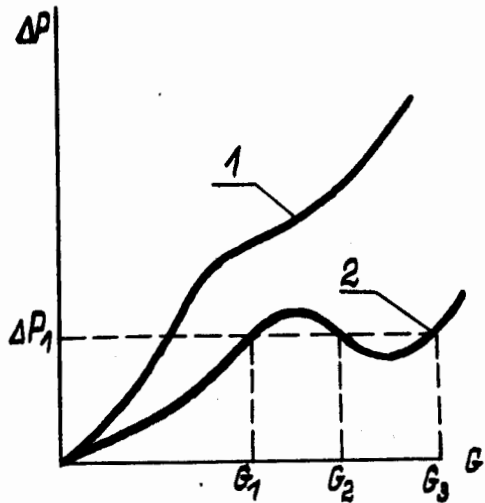


Рис.1. Примеры возможных гидродинамических характеристик парогенерирующего канала: 1 - однозначная, 2 - неоднозначная.

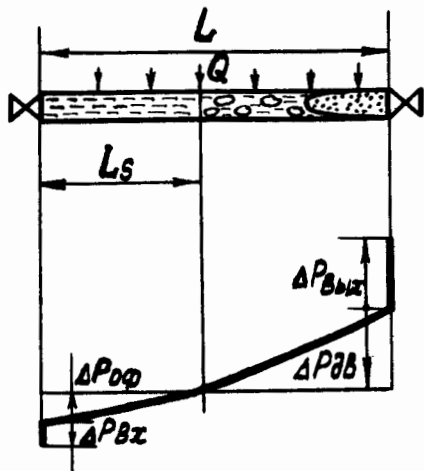


Рис.2. Схема парогенерирующего канала и распределение в нем перепада давления.

Для выявления условий неоднозначности ГДХ примем следующие допущения:

- поток - одномерный, равновесный и гомогенный;
- свойства потока /среды/ не зависят от температуры и давления;
- эффекты ускорения потока незначительны и ими пренебрегаем;
- коэффициент сопротивления трения неизменен и одинаков для однофазного и двухфазного потоков;
- поток на выходе всегда двухфазный, $0 \leq x_{\text{ВЫХ}} \leq 1$;
- тепловой поток равномерен по длине канала;
- входные параметры потока постоянны и не зависят от расхода.

С учетом принятых допущений уравнение /3/ примет вид

$$\Delta P = \xi_{\text{ВХ}} \cdot \frac{G^2}{2\rho' \cdot F^2} + \lambda \frac{L_s}{d} \cdot \frac{G^2}{2\rho' \cdot F^2} + \lambda \frac{(L-L_s)}{d} \cdot \frac{G^2}{2\rho' \cdot F^2} \left[1 + \frac{x_{\text{ВЫХ}}}{2} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] + \xi_{\text{ВЫХ}} \cdot \frac{G^2}{2\rho' \cdot F^2} \cdot \left[1 + x_{\text{ВЫХ}} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right]. \quad /4/$$

Подставив в /4/ выражение /2/ и введя масштабы физических величин, получим ГДХ канала в виде полинома третьей степени относительно расхода

$$\Delta \pi = \frac{1}{2} Ja^2 \cdot M^3 + [(1 + K_{\text{ВЫХ}})(1 - Ja) + K_{\text{ВХ}}] \cdot M^2 + \left(\frac{1}{2} + K_{\text{ВЫХ}} \right) \cdot M, \quad /5/$$

Из рис. 1 следует, что при неоднозначности ГДХ канала производная $\frac{\partial(\Delta \pi)}{\partial M}$ должна иметь и отрицательные значения, т.е.

$$\frac{\partial(\Delta \pi)}{\partial M} = \frac{3}{2} Ja^2 \cdot M^2 + 2[(1 + K_{\text{ВЫХ}})(1 - Ja) + K_{\text{ВХ}}] \cdot M + \left(\frac{1}{2} + K_{\text{ВЫХ}} \right) < 0. \quad /6/$$

Принятое ранее допущение $0 \leq x_{\text{ВЫХ}} \leq 1$ можно записать как

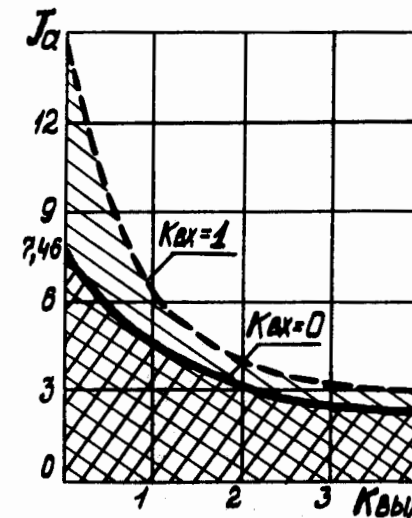
$$\frac{1}{Ja + (\rho' / \rho'' - 1)} < M \leq \frac{1}{Ja}. \quad /7/$$

Решая неравенства /6/ и /7/, получим следующие необходимые условия существования неоднозначности ГДХ парогенерирующего канала

$$Ja \geq \left(1 + \frac{K_{\text{ВХ}}}{1 + K_{\text{ВЫХ}}} \right) \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{3}{4} \frac{(1 + 2 \cdot K_{\text{ВЫХ}})}{(1 + K_{\text{ВЫХ}})^2}}} \quad \text{при } K_{\text{ВЫХ}} < 1, \quad /8/$$

$$Ja \geq 2 \cdot \frac{(1 + K_{\text{ВЫХ}} + K_{\text{ВХ}})}{K_{\text{ВЫХ}}} \quad \text{при } K_{\text{ВЫХ}} > 1.$$

Из неравенств /8/ следует, что местные сопротивления на входе ($K_{\text{ВХ}} > 0$) уменьшают область существования неоднозначности, а сопротивления на выходе ($K_{\text{ВЫХ}} > 0$) расширяют ее.



На рис.3 условия /8/ показаны графически. Область ниже кривой характеризуется однозначными ГДХ, а выше - неоднозначными. В случае отсутствия местных сопротивлений $K_{\text{ВХ}} = K_{\text{ВЫХ}} = 0$ условия /8/ переходят в критерий стабильности Лединегга-Петрова /1/, которому на рисунке соответствует точка пересечения кривой при $K_{\text{ВХ}} = 0$ с осью ординат.

Рис.3. Области однозначных /заштрихованная/ и неоднозначных /незаштрихованная/ гидродинамических характеристик парогенерирующего канала. Значение $Ja = 7,46$ соответствует критерию Лединегга-Петрова.

При $K_{\text{ВЫХ}} \rightarrow \infty$ граница стабильности асимптотически приближается к $Ja = 2$. Это означает, что в любом случае неоднозначность ГДХ канала возможна только при $Ja \geq 2$. Исходя из этого, определим возможность появления неоднозначности ГДХ парогенерирующих каналов применительно к некоторым рабочим телам, для которых результаты соответствующих расчетов представлены в таблице.

Таблица

Характерные значения чисел Якоба для различных веществ в зависимости от входной температуры и давления

$P_{\text{ВХ}}, \text{бар}$	$T_{\text{ВХ}}, \text{К}$	Ja	$P_{\text{ВХ}}, \text{бар}$	$T_{\text{ВХ}}, \text{К}$	
Г Е Л И Й			В О Д О Р О Д		
0,2	2,5	1,28	1,0	14,0	5,96
0,4	2,5	1,69	1,0	16,0	4,21
0,5	2,5	1,71	2,0	16,0	3,85
0,6	2,5	1,70	4,0	16,0	3,15
0,8	2,5	1,66	6,0	16,0	2,72
1,0	2,5	1,61	8,0	16,0	2,42
1,4	2,5	1,51	10,0	16,0	2,15
1,8	2,5	1,40	12,0	16,0	1,88
2,2	2,5	1,26	В О Д А		
А З О Т			1,0	273,15	300,02
1,0	70,0	12,84	20,0	313,15	32,72
6,0	70,0	9,34	40,0	313,15	20,73
14,0	70,0	5,81	90,0	313,15	11,59
20,0	70,0	4,64	130,0	313,15	8,57
30,0	70,0	3,38	180,0	313,15	6,15

Для гелия входная температура потока принята 2,5К, что равно минимальной величине, для которой существуют необходимые справочные данные ⁶. Повышение $T_{\text{ВХ}}$ снижает значение числа Ja в соответствии с его определением, а уменьшение $T_{\text{ВХ}}$ ниже 2,18 К неприемлемо для рассматриваемой модели, т.к. в этой области гелий становится сверхтекучим. В связи с этим в таблице представлены значения чисел Ja , близкие к наибольшему*. Из таблицы видно, что числа Ja никогда не достигают 2. Это означает, что неоднозначность ГДХ парогенерирующих каналов в случае применения гелия не реализуется даже при снижении $T_{\text{ВХ}}$ вплоть до температуры перехода He-I в He-II.

Для водорода и азота неоднозначность ГДХ парогенерирующих каналов возможна. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работе ⁵, в которой отмечены резкие изменения расхода азота через обогреваемый канал при $Ja = 6$ и $K_{\text{ВЫХ}} \approx 1000$. Вместе с тем, при давлениях, близких к критическим, ГДХ каналов с водородом может быть однозначной. Так, при $P_{\text{ВХ}} = 12,0 \cdot 10^5$ Па, $T_{\text{ВХ}} = 16,0$ К $Ja = 1,88$.

Приведенные для сравнения данные для воды показывают, что ее поведение характеризуют сравнительно высокие значения чисел Ja . Нестабильность ГДХ водяных парогенерирующих каналов известна и учитывается в практике парогенераторостроения.

Таким образом, при создании некоторых криогенных объектов необходимо учитывать возможность появления неоднозначности гидродинамических характеристик парогенерирующих каналов. Оценка условий неоднозначности соответствующих ГДХ может осуществляться на основе приведенных выше соотношений.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Принятые обозначения

- d - эквивалентный диаметр канала;
- $i_{\text{ВХ}}, i'$ - соответственно энтальпии среды на входе в канал и в состоянии насыщения, $\Delta i_{\text{ВХ}} = i' - i_{\text{ВХ}}$;
- $P_{\text{ВХ}}$ - давление среды на входе в канал;
- g - удельная теплота парообразования;
- $x_{\text{ВЫХ}}$ - массовое паросодержание потока на выходе из канала;
- F - площадь поперечного сечения канала;
- G - массовый расход среды;
- G_0 - масштаб расхода, $G_0 = \frac{Q}{g} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)$;
- Q - подводимая к каналу тепловая нагрузка;

* При $T_{\text{ВХ}}$ ниже 2,5 К теплоемкость гелия относительно невелика $/ \approx 2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} /$.

- ρ' - плотность насыщенной жидкости;
 ρ'' - плотность насыщенного пара;
 $K_{\text{ВЫХ}}$ - приведенный коэффициент местного сопротивления на выходе из канала $K_{\text{ВЫХ}} = \frac{\xi_{\text{ВЫХ}}}{\lambda} \cdot \frac{d}{L}$;
 $K_{\text{ВХ}}$ - приведенный коэффициент местного сопротивления на входе в канал, $K_{\text{ВХ}} = \frac{\xi_{\text{ВХ}}}{\lambda} \cdot \frac{d}{L}$;
 L - длина канала;
 λ - коэффициент сопротивления канала;
 M - безразмерный расход $M = \frac{G}{G_0}$;
 Ja - модифицированное число Якоба, $Ja = \frac{\Delta t_{\text{ВХ}}}{r} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)$;
 $T_{\text{ВХ}}$ - температура среды на входе в канал;
 ΔP - суммарное гидравлическое сопротивление канала;
 ΔP_0 - масштаб давления, $\Delta P_0 = \lambda \frac{L}{d} \frac{G_0^2}{2\rho' F^2}$;
 $\Delta P_{\text{ВХ}}$ - местное гидравлическое сопротивление на входе в канал;
 $\Delta P_{\text{ВЫХ}}$ - местное гидравлическое сопротивление на выходе из канала;
 $\Delta P_{\text{ВХ}}$ - гидравлическое сопротивление двухфазного участка канала;
 $\Delta P_{\text{ОФ}}$ - гидравлическое сопротивление однофазного участка канала;
 $\Delta \pi$ - безразмерное гидравлическое сопротивление, $\Delta \pi = \frac{\Delta P}{\Delta P_0}$;
 $\xi_{\text{ВХ}}, \xi_{\text{ВЫХ}}$ - коэффициенты местных сопротивлений входа и выхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Morpurgo M. "Cryogenics", 1979, No. 7, pp. 411-414.
2. Ivanov D.P. et al. "Some Results from T-7 Tokamak Superconducting Magnet Test Program", IEEE Trans on Magn., V. MAG-15, 1978, No. 1, pp. 550-553.
3. Ledinegg M. "Die Wärme", 1938, 8, p. 61.
4. Петров П.А. "Советское Котлотурбостроение", 1939, №10-11, с. 381-385.
5. John C. Friedly et al. "AJCHE Symp. Ser.", 1979, v.75, No.189, pp. 204-217.
6. McCarty R.D. J. Phys. Chem. Ref. Data, 1973, v. 2, No. 4.

Рукопись поступила в издательский отдел
 15 апреля 1981 года.