сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

8-80-789

Ю.С.Дерендяев, А.Б.Кузнецов

О ТЕЧЕНИИ ПАРОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ ГЕЛИЯ В ТРУБЕ С ВНЕШНИМ ТЕПЛОПРИТОКОМ

1980

В последнее время широкое применение находят магнитные системы со сверхпроводящими обмотками. В таких системах оказывается целесообразным осуществлять охлаждение не путем погружения сверхпроводящих обмоток в ванну с кипящим гелием, а в результате его прокачки по каналам, проходящим через охлаждаемый элемент. Так, например, предполагается охлаждать магниты ускорительно-накопительного комплекса /1/.

Предлагаемая работа посвящена исследованию течения парожидкостной смеси гелия в круговом канале постоянного радиуса, стенки которого равномерно нагреваются. В цилиндрической системе координат, ось z которой совпадает с осью канала, рассматривается стационарное, азимутально-однородное течение смеси. Скорость потока $\vec{v}$ имеет только z-составляющую. Предполагается, что тепловая энергия, поступающая от стенки трубы, выделяется однородно во всем объеме канала с постоянной мощностью на единицу объема $\dot{Q}$ и расходуется только на изменение агрегатного состояния гелия и его кинетической энергии, поэтому температура считается постоянной, равной температуре насыщения. Силой трения и диссипацией энергии на концах канала пренебрегается, так как радиус канала /трубы/ R много меньше его длины L.

Тогда основные уравнения /баланса массы, сил и энергии для средних по времени и по сечению канала величин/ могут быть записаны в виде /2/

$$\rho v = G = \dot{M}/\pi R^2 = \mathrm{const}, \qquad /1/$$

$$G\frac{dv}{dz} + \tau\cdot\frac{2}{R} + \frac{dP}{dz} = 0, \qquad /2/$$

$$G\frac{dh}{dz} + Gv\frac{dv}{dz} = \dot{Q}. \qquad /3/$$

Здесь ρ - плотность; $\dot{M}$ - полный массовый расход; P - давление; h - энтальпия единицы массы смеси; τ - касательное напряжение у стенки трубы.

Для парожидкостной смеси, фазы которой находятся в термодинамическом равновесии, ρ и h связаны с величиной паросодержания смеси x формулами

$$\rho = \frac{\rho''}{1 + (\bar{\rho} - 1)x}, \qquad /4/$$

$$h = h'' + \Delta h\, x, \qquad /5/$$

где $\bar\rho = \rho''/\rho'$; $\Delta h = h' - h''$; $0 \le x \le 1$. Далее, как и в формулах /4/,/5/, величины, относящиеся к паровой фазе, будем отмечать штрихом, к жидкой фазе - двумя штрихами, к смеси - без штрихов.

Из /4/ и /1/ следует

$$v = \frac{G}{\rho''}[1 + (\bar\rho - 1)\, x]. \qquad /6/$$

Интегрируя /3/ и используя /5/ и /6/, получим выражение, описывающее связь между величиной паросодержания и координатой:

$$\left[1 + \frac{(\bar\rho - 1) G^2}{\rho''^2 \Delta h}\right](x - x_0) + \frac{(\bar\rho - 1)^2 G^2}{2\rho''^2 \Delta h}(x^2 - x_0^2) = \frac{\dot Q}{\Delta h G}(z - z_0). \qquad /7/$$

В случае, когда

$$\frac{(\bar\rho - 1) G^2}{\rho''^2 \Delta h} \quad \text{и} \quad \frac{(\bar\rho - 1)^2 G^2}{2\rho''^2 \Delta h} \ll 1,$$

что имеет место при скоростях потока, много меньших скорости звука, получаем линейную связь:

$$x - x_0 = \frac{\dot Q}{\Delta h G}(z - z_0). \qquad /8/$$

Напряжение на стенке трубы связано с числом Рейнольдса Re, плотностью потока массы, протекающего через сечение канала /массовой скоростью/ G и плотностью ρ формулами [3]

$$\tau = \frac{c}{\sqrt[n]{Re}} \frac{G^2}{\rho}, \qquad Re = \frac{2RG}{\mu}, \qquad /9/$$

где μ - коэффициент вязкости, а c и n - константы, зависящие от области значений Re, например:

$c = 0{,}023$; $n = 5$, если $3\cdot 10^4 < Re < 10^6$;

$c = 0{,}038$; $n = 4$, если $5\cdot 10^3 < Re < 3\cdot 10^4$.

Интегрируя /2/ с учетом /6/ и /9/, получим

$$\Delta P = P_0 - P = \frac{(\bar\rho - 1) G^2}{\rho''}(x - x_0) + \frac{2cG^2}{\rho'' R \sqrt[n]{2RG}} \int_{z_0}^{z} \sqrt[n]{\mu}\,[1 + (\bar\rho - 1)x]\,dz. \qquad /10/$$

Таким образом, зная зависимость $\mu(x)$, например, согласно [4,5] для гомогенной смеси

$$\mu(x) = \mu''[1 + (\tilde\mu - 1)\, x], \quad \text{где} \quad \tilde\mu = \frac{\mu'}{\mu''}, \qquad /11/$$

по формулам /7/, /4/, /6/, /10/ можно вычислить x, ρ, v и P в любой точке канала при известных их начальных значениях.

Согласование экспериментальных данных о потерях давления с вычисленными по формуле /10/ с учетом /11/ не очень хорошее [3].

Здесь нужно отметить, что представление реального парожидкостного потока с нерасслаивающимися фазами в виде гомогенной смеси достаточно хорошо описывает объемные характеристики ρ, h, но реальная характеристика μ у поверхности может существенно отличаться от /11/. Так, можно считать, что поверхностный слой смеси при малых значениях x содержит очень мало пузырьков пара, а при больших - очень мало капелек жидкости, то есть

$0 \lesssim x_{пов} < x < x^*$,

$x^* < x < x_{пов} \lesssim 1$,

где $x_{пов}$ - паросодержание в поверхностном слое; x^* - некоторое значение паросодержания, разграничивающее состояние: пар в жидкости и жидкость в паре.

В этом случае поверхностно-негомогенной смеси для μ более подходит формула

$$\mu = \begin{cases} \mu'', & \text{если } 0 < x < x^*, \\ \mu', & \text{если } x^* < x < 1. \end{cases} \qquad /12/$$

Применим полученные формулы для анализа ожидаемых результатов на криогенном стенде ОНМУ [6] или других подобных системах [1].

В условиях работы криогенного стенда ОНМУ уравнение /8/ хорошо выполняется, а первый член в правой части уравнения /10/ приблизительно в 20 раз меньше второго.

Рассмотрим на основании /10/ выражение $\Delta P/\Delta P''$, где

$$\Delta P'' = \frac{2cG^2}{\rho'' R \sqrt[n]{Re''}}(z - z_0) \qquad /13/$$

- перепад давления при течении по каналу чистой жидкости. Тогда при μ, определяемом из /11/,

$$\frac{\Delta P}{\Delta P''} = A + \frac{1}{x - x_0} \int_{x_0}^{x} \sqrt[n]{1 + (\tilde\mu - 1)\, x}\,[1 + (\bar\rho - 1)x]\,dx, \qquad /14/$$

а при μ, определяемом из /12/,

$$\frac{\Delta P}{\Delta P''} = \begin{cases} 1 + 0{,}5(\bar\rho - 1)(x + x_0), & \text{если } 0 \le x < x^*, \\ \dfrac{x^* - x_0}{x - x_0}\,[1 + 0{,}5(\bar\rho - 1)(x^* + x_0)] + \dfrac{x - x^*}{x - x_0}\sqrt[n]{\bar\mu}\,[1 + 0{,}5(\bar\rho - 1)(x + x^*)], & \\ & \text{если } x_0 < x^*, \text{ а } x > x^*, \\ \sqrt[n]{\bar\mu}\,[1 + 0{,}5(\bar\rho - 1)(x + x_0)], & \text{если } x^* < x_0, \end{cases} \qquad /15/$$

где $A = (\bar\rho - 1)R\sqrt[n]{Re''}\dot Q/2cG\Delta h$ - малая величина, не зависящая от величины паросодержания на входе x_0.

В отсутствие теплопритока в канале, когда $x = x_0$, имеем

$$\frac{\Delta P}{\Delta P''} = \sqrt[n]{1 + (\bar\mu - 1)x_0}\,[1 + (\bar\rho - 1)x_0], \qquad /14'/$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta P''} = \begin{cases} 1 + (\bar\rho - 1)x_0, & \text{если } x_0 < x^*, \\ \sqrt[n]{\bar\mu}\,[1 + (\bar\rho - 1)x_0], & \text{если } x_0 > x^*. \end{cases} \qquad /15'/$$

Из формул /15'/ и /15/ видно, что в "поверхностно-негомогенной" модели парожидкостной смеси /модели, когда при малых величинах паросодержания x определяется жидкой фазой, а при больших - паровой фазой/, если теплоприток в канале настолько мал, что

$$\Delta x = x - x_0 < \frac{(\sqrt[n]{\bar\mu} - 1)\,(1 + (\bar\rho - 1)x^*)}{\bar\rho - 1}, \qquad /16/$$

для криогенного стенда ОНМУ $\Delta x < 0{,}1$, в окрестности x^* возможен большой перепад давления при меньшей величине паросодержания смеси. Реальную зависимость перепада давления от паросодержания, а вместе с тем и вязкости, у поверхности канала можно получить на опыте.

Представляется интересным найти связь между геометрическими характеристиками системы теплосъема /длиной L, диаметром каналов D, числом каналов m / и ее параметрами / ΔP и мощностью, получаемой системой на единице длины $\dot Q_\ell = m\pi R^2 \dot Q$ /. Запишем /10/ в приближенном виде /пренебрегая первым членом в правой части /10/ и зависимостью μ от x под интегралом/:

$$\Delta P = \frac{2cG^2L}{\rho'' R\sqrt[n]{Re}}\,[1 + 0{,}5(\bar\rho - 1)x]. \qquad /17/$$

Здесь и далее предполагается, что $x_0 = 0$. Заменяя G согласно /8/, получим

$$\Delta P = \frac{64c\dot Q_\ell^2 L^3}{\pi^2\rho''\Delta h^2\sqrt[n]{Re}\,m^2 D^5 x^2}\,[1 + (\bar\rho - 1)x]. \qquad /18/$$

Полагая допустимым изменение величины паросодержания в системе до 1, получим следующее выражение, определяющее допустимую длину системы:

$$L = \left(\frac{\pi^2}{32}\,\frac{\rho''}{(\bar\rho + 1)}\,\frac{\sqrt[n]{Re}}{c}\,\frac{\Delta h^2}{\dot Q_\ell^2}\,\Delta P\cdot m^2\cdot D^5\right)^{1/3}. \qquad /19/$$

Эта формула может быть полезной при проектировании системы.

При $Re = 10^5$; $\dot Q_\ell = 4$ Вт/м; $\Delta P = 10^5$ Па численная зависимость L от m и D приведена в таблице, где L и D выражены в метрах; подчеркнутые цифры равны L при соответствующих m и D.

Таблица

m \ D	0,003	0,005	0,01
10	50	120	380
20	80	190	600
50	150	350	1100

Авторы пользуются случаем выразить благодарность за обсуждения и помощь в данной работе А.И.Агееву, В.Ф.Буринову, В.И.Пряничникову и другим сотрудникам криогенной группы ОНМУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балбеков В.И. и др. Ускорительно-накопительный комплекс ИФВЭ. X Международная конференция по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. ИФВЭ, Серпухов, 1977, т.1, с.127-141.
2. Слеттери Дж. Теория переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах. "Энергия", М., 1978.
3. Кэйс В.М. Конвективный тепло- и массообмен. "Энергия", М., 1972.
4. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. "Энергия", М., 1974.
5. Теплопередача при низких температурах /под ред.У. Фроста/. "Мир", М., 1977.
6. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 13-12162, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 декабря 1980 года.