

УДК 532.552

В.Ф. Худяков

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.ua

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ ПРИ АДИАБАТИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ В ЗМЕЕВИКАХ

Исследовано гидравлическое сопротивление трения при адиабатическом течении пароводяной смеси в змеевиковых трубах и предложены зависимости для расчёта.

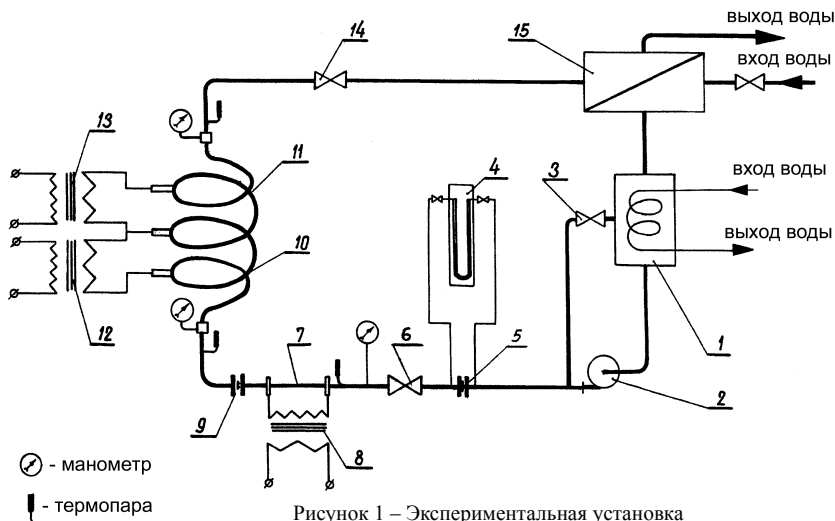
Исследованию гидравлического сопротивления трения парожидкостных потоков в прямых и змеевиковых трубах посвящено значительное количество работ как теоретических, так и практических. Однако диапазон исследованных геометрических и режимных параметров недостаточен, а рекомендованные для расчёта зависимости неудовлетворительно согласуются между собой. Таким образом, чтобы отдать предпочтение той или иной зависимости необходима дополнительная экспериментальная проверка.

Исследование проводилось с дистиллированной водой с солесодержанием 8-15 мг/дм³ при давлении $(1,5 \dots 5,5) \cdot 10^5$ Н/м².

Вода позволила провести большой объём исследований на змеевиках различной геометрии и сравнительно простом оборудовании, что существенно сократило сроки проведения опытов и затраты на них, а выбранный диапазон давлений обеспечивает возможность перенесения результатов на другие рабочие тела и такие, как жидкие металлы.

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на рисунке 1. Сборный бак 1 имеет встроенный змеевиковый холодильник для поддержания постоянной температуры воды в баке (30...40°C), что тре-

бывалось для устойчивой работы питательного насоса и для уменьшения погрешностей измерения расхода с помощью шайбы. Питательный насос 2 шестерённого типа направлял воду в рабочий участок 10. Расход воды регулировался вентилями 3 и 6. Излишки жидкости направлялись по рецир-



Давление воды и пароводяной смеси измерялось образцовыми манометрами класса 0,3 (на 1 МПа – на входе в рабочий участок и на 0,4 МПа – на выходе из рабочего участка).

Температура рабочей среды на входе и выходе из рабочего участка измерялась хромель–копелевыми термопарами диаметром 0,2 мм, установленными в гильзах. Обе эти термопары, как и термопара, служащая для замера температуры воды на входе во вспомогательный подогреватель, подключались через многопозиционный переключатель к электронному потенциометру типа ЭПВ-2 МА класса 0,5. Все термопары, применявшиеся при проведении опытов, были предварительно протарированы.

Змеевики (рисунок 2) присоединялись к контуру с помощью штуцеров 2. Для отбора давления в стенке трубы на входе и на выходе просверливались по 4 отверстия диаметром 1 мм. С внутренней стороны трубы края отверстий тщательно зачищались. В местах отбора давления приваривались специальные камеры 4 для выравнивания давления по периметру трубки. К камерам приваривались трубки 3 со штуцерами для подсоединения к манометрам. На соединительных трубках, идущих к манометрам, устанавливались дросселирующие вентили. В опытах

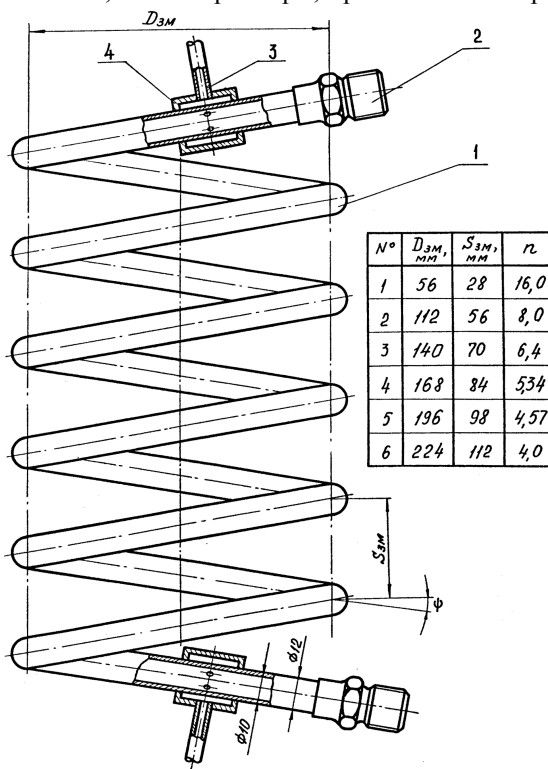


Рисунок 2 – Экспериментальный участок

максимальная относительная погрешность измеряемых величин могла составлять: массовая скорость W_p – 5,2%; массовое паросодержание x – 9%; давление на входе $P_{вх}$ – 1%; давление на выходе $P_{вых}$ – 0,6%.

Режимные параметры в опытах изменялись в следующих пределах:

$$W_p = 100 \div 500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}; P = (1,5 \div 5,5) \cdot 10^5 \text{ н/м}^2; x = 0,03 \div 0,98.$$

Было проведено более 1000 опытов. Результаты экспериментов обработаны в координатах [1]:

$$\Phi'_{tt} - X_{tt} \quad \text{и} \quad \Delta P_{mp}^{6,0} / \Delta P_{w'_o} - (1 - \varphi).$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\Phi'_{tt} = \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P_{w'_o}}} - \text{параметр Локарта}; \quad (1)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu'}{\mu''} \right)^{0,1} - \text{параметр Локарта-Мартинелли}. \quad (2)$$

В этих формулах принято: ΔP – гидравлическое сопротивление трения при течении пароводяной смеси; $\Delta P_{w'_o}$ – гидравлическое сопротивление, подсчитанное по приведённой скорости жидкости; $w'_o = w_o \cdot (1-x)$ – приведенная скорость жидкости; w_o – скорость циркуляции, м/с; x – массовое паросодержание; ρ'' – массовая плотность пара, кг/м³; ρ' – массовая плотность жидкости, кг/м³; μ'' – динамическая вязкость пара, Н/м·с; μ' – динамическая вязкость жидкости, Н/м·с.

Обработка опытных данных проводилась на электронно-вычислительной машине по средним параметрам с учётом гидростатических потерь напора $\Delta P_{c.c}$ и потерь на ускорение $\Delta P_{уск}$, которые рассчитывались по формулам (3) и (4) соответственно.

$$\Delta P_{c.c} = g \cdot \ell \cdot [(1-\varphi) \cdot \rho' + \varphi \cdot \rho''] \cdot \cos \psi, \quad (3)$$

$$\Delta P_{уск} = \frac{G_o^2}{f_o^2 \cdot \rho'} \cdot \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{1-\varphi} + \frac{x^2}{\varphi} \cdot \frac{\rho'}{\rho''} \right]_{вх} - \left[\frac{(1-x)^2}{1-\varphi} + \frac{x^2}{\varphi} \cdot \frac{\rho'}{\rho''} \right]_{вх} \right\}, \quad (4)$$

где $g=9,8065$ м/с² – ускорение земного притяжения; $\ell=3,0$ м – длина змеевика; φ – истинное объёмное паросодержание; $f_o=7,85 \cdot 10^{-3}$ м² – площадь проходного сечения трубы змеевика.

Для определения φ использовалась зависимость Арманда [2]

$$1-\varphi = \frac{4 + \frac{8}{7} \cdot m}{5 + m \cdot \left(\frac{\beta}{1-\beta} + \frac{8}{7} \right)} : (\beta > 0,9), \quad (5)$$

$$\text{где} \quad m = \frac{2,26}{\sqrt{\xi_{зм}}} \cdot a \cdot \sqrt{\frac{\rho''}{\rho'}} \quad a = 0,69 + (1-\beta) \cdot (4 + 21,9 \cdot \sqrt{F'_{r_o}}); \quad F'_{r_o} = \frac{w_o'^2}{g \cdot d_g} -$$

критерий Фруда, рассчитанный по приведенной скорости жидкости.

В этой формуле значения $\xi_{зм}$, рассчитывались для ламинарного и турбулентного режимов течения по зависимостям, приведенным в работе [3]:

$$\zeta_{3M_i} = \zeta_{np} (1 + 0,044 \cdot D_e^{0,6}); \quad (6)$$

$$\zeta_{3M_m} = \zeta_{np} \left(1 + 0,1 \cdot R_e^{0,25} \cdot \sqrt{\frac{d_{вн}}{D_{3м}}} \right). \quad (7)$$

Граница перехода от ламинарного режима течения в турбулентный рассчитывалось по формуле [3]:

$$R_{e_{кр}} = 2300 \cdot \left(1 + 10 \cdot \sqrt{\frac{d_{вн}}{D_{3м}}} \right). \quad (8)$$

Как показал анализ результатов исследований, обработка опытных данных в координатах $\Phi'_n - X_n$ даёт разброс экспериментальных данных $\pm 30\%$, что соответствует разбросу $\pm 70\%$ в координатах $\Delta P_{mp}^{\beta,o} / \Delta P_{w'o} - X_n$.

Кроме того, наблюдается чёткое расслоение экспериментальных данных по массовым скоростям Wp , а именно: с увеличением Wp для одного и того же значения параметра X_n растёт Φ'_n .

Объяснение такого сильного расслоения экспериментальных данных, очевидно, заключается в том, что при течении двухфазных потоков в змеевиках в зависимости от Wp и X существуют разные режимы течения, которые дают различный характер гидравлического сопротивления. Поэтому, по-видимому, правильнее описывать гидравлическое сопротивление в змеевиках при истечении двухфазной смеси зависимостью, аналогичной предложенной Армандом [2].

Обработка экспериментальных данных в координатах $\Delta P_{mp}^{\beta,o} / \Delta P_{w'o} - (1 - \phi)$ даёт малую дисперсию экспериментальных данных.

В этом случае результаты опытов с разбросом, не превышающим $\pm 12\%$, описываются следующими зависимостями:

$$\frac{\Delta P_{mp}^{\beta,o}}{\Delta P_{w'o}} = \frac{2,96}{(1 - \phi)^{1,62}}; \quad (1 - \phi = 0,01 \dots 0,001); \quad (9)$$

$$\frac{\Delta P_{mp}^{\beta,o}}{\Delta P_{w'o}} = \frac{0,65}{(1 - \phi)^{1,95}}; \quad (1 - \phi = 0,01 \dots 0,1); \quad (10)$$

$$\frac{\Delta P_{mp}^{\beta,o}}{\Delta P_{w'o}} = \frac{0,82 \cdot 10^{-4}}{(1 - \phi)^{5,85}}; \quad (1 - \phi = 0,01 \dots 0,17). \quad (11)$$

Для исследования влияния Wp на характер дисперсии экспериментальных данных было проведено исследование на змеевике с диаметром $D_{3м} = 200$ мм, шагом $S_{3м} = 40$, длиной $\ell = 3$ мм и массовыми скоростями: $Wp = 100, 150, 200; 250, 300, 400, 500$ кг/м²с. Результаты опытов обработаны в

тех же координатах, что и основная масса экспериментов, которые представлены на рисунке 3.

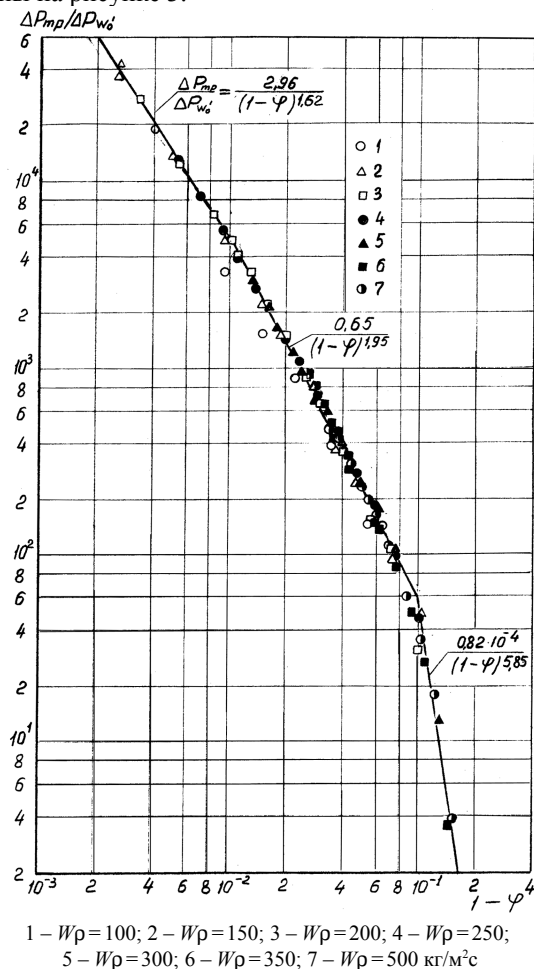


Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных данных с полученными зависимостями

Как видно из графика, предложенные зависимости расчёта гидравлического сопротивления трения при адиабатическом течении пароводяной смеси в змеевиках не дают расхождения по массовым скоростям.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1.

Зависимости гидравлического сопротивления трения и истинного объёмного паросодержания при адиабатическом течении пароводяной смеси в змеевиковых трубах качественно те же, что и для прямых труб, предложенных Армандом. Количественные зависимости для $\Delta P_{тр}^{б.о}$ иные, а для φ – та же.

2. Получены формулы для определения гидравлического сопротивления трения при адиабатическом течении пароводяной смеси $\Delta P_{тр}^{б.о}$ в змеевиковых трубах (9)-(11).

3. Для проверки возможности использования полученных зависимостей (9)-(11) при расчете парогенераторов необходимо исследовать гидравлическое сопротивление трения при течении пароводяной смеси в змеевиковых трубах с подводом тепла.

Библиографический список

1. Чисхолн Д. Теоретические обоснования эмпирической зависимости Локкарта-Мартинелли для расчёта сопротивления в двухфазном потоке / Д. Чисхолн // Достижения в области теплообмена: Сб.ст. / Пер.с англ. В.М. Боришанского. — М., 1970. — С. 128–146.

2. Арманд А.А. Сопротивление при движении двухфазной системы по горизонтальным трубкам / А.А. Арманд // Изв. ВТИ. — 1946. — № 1. — С. 5–10.

3. Худяков В.Ф. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления трения при изотермическом течении воды в змеевиковых трубах / В.Ф. Худяков // Вестн. СевГТУ: Сб. науч. тр. — Севастополь, 1997. — Вып. 6. — С. 68–71.

Поступила в редакцию 18.06.2002 г.