

УДК 536.24

В. Г. Пономаренко ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ
 А. А. Житиякин ТЕЧЕНИИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЬЮТОНСКОЙ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОМ
 Г. Ф. Потебня ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ
 Л. М. Ульев

В работе [1] рассмотрены особенности теплообмена и полей скорости при течении высоковязкой жидкости в каналах. Эти особенности связаны с влиянием диссипативных потерь на распределение температуры жидкости и других параметров, зависящих от температуры. В настоящей работе исследуется влияние диссипативных потерь на гидравлическое сопротивление при течении высоковязких жидкостей в канале.

Математическая постановка задачи и метод решения подробно описаны в работе [1]. На практике перед цилиндрическим участком канала обычно устанавливается переходное устройство, например конфузор, в котором формируется поле скоростей и температур на входе в цилиндрический участок.

В дальнейшем будем считать, что распределение температуры на входе в цилиндрический канал можно описать степенной функцией

$$\theta = a\xi^n, \quad (1)$$

где $\theta = (T - T_0)/T_0$ — безразмерная температура; $\xi = r/r_0$ — безразмерный радиус; T_0 — температура жидкости во входном сечении оси канала; r_0 — радиус канала.

В работе [1] показано, что наибольшие градиенты скорости и температуры возникают вблизи стенок канала. Поэтому разбиение канала на концентрические слои, используемое в методе послойного усреднения, целесообразно проводить не равномерно расположенными поверхностями [1], а со сгущением в периферийной области.

При произвольном разбиении определение поля температур и давлений сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\theta_i}{d\chi} = \frac{2}{\Lambda \bar{\omega}_i} \left\{ 4Bm_i \bar{\omega}_i + \frac{\xi_i (u_i + St_i) (\theta_i - \theta_{i+1})}{\xi_i^2 - \xi_{i-1}^2} - \frac{\xi_{i-1} (u_{i-1} + St_{i-1}) (\theta_i - \theta_{i-1})}{\xi_i^2 - \xi_{i-1}^2} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

$$\frac{d\Pi}{d\chi} = -\frac{8}{\Lambda s}. \quad (3)$$

Здесь

$$\theta_i = \frac{\bar{T}_i - T_0}{T_0}; \quad \xi_i = \frac{r_i}{r_0}; \quad \chi = \frac{z}{L}; \quad \Pi = \frac{(P - P_0) r_0}{\mu(T_0) V_0};$$

$$\bar{\omega}_i(\chi) = \frac{\bar{v}_{zi}}{V_0}; \quad u_i(\chi) = \frac{v_{ri}}{V_0}; \quad \Lambda = \frac{r_0}{L}; \quad St_i = \frac{\alpha_i}{c\rho V_0};$$

$$m_i = \frac{\mu(\bar{T}_i)}{\mu(T_0)}; \quad B = \frac{\mu(T_0) V_0}{c\rho T_0 r_0};$$

V_0 — среднерасходная скорость; \bar{T}_i , \bar{v}_{zi} — средняя температура и продольная скорость в i -м слое; v_{ri} — поперечная скорость на границе i -го и $i+1$ -го слоев; L — длина канала; P_0 — давление на входе в канал; $\mu(T) = \mu_0 \exp(E/RT)$ — динамический коэффициент вязкости; E — энергия активации текучести; R — универсальная газовая постоянная; c , ρ —

теплоемкость и плотность жидкости; r_i, α_i — координата границы и коэффициент теплоотдачи между i -м и $i+1$ -м слоями;

$$\bar{\omega}_i = \frac{\xi_i^2 - \xi_{i-1}^2}{m_i^2 s^2}; \quad \bar{\omega}_i = \frac{s_i}{s}; \quad s = \sum_{i=1}^N (\xi_i^2 - \xi_{i-1}^2) s_i;$$

$$S_i = \frac{\xi_i^2 - \xi_{i-1}^2}{m_i} + 2 \sum_{k=1}^{N-i} \frac{\xi_{i+k}^2 - \xi_{i+k-1}^2}{m_{i+k}};$$

$$u_i = -\frac{\Lambda K_E}{2s_i s} \sum_{j=1}^i (\xi_j^2 - \xi_{j-1}^2) (\sigma_j - \bar{\omega}_j \sigma);$$

$$\sigma_i = \frac{\xi_i^2 - \xi_{i-1}^2}{m_i (1 + \theta_i)^2} \frac{d\theta_i}{d\chi} + 2 \sum_{k=1}^{N-1} \frac{\xi_{i+k}^2 - \xi_{i+k-1}^2}{m_{i+k} (1 + \theta_{i+k})^2} \frac{d\theta_{i+k}}{d\chi};$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^N (\xi_i^2 - \xi_{i-1}^2) \sigma_i; \quad K_E = \frac{E}{RT_0}.$$

Распределение продольной скорости в i -м слое описывается функцией

$$\omega_i(\xi) = \frac{2}{s} \left(\frac{\xi_i^2 - \xi^2}{m_i} + \sum_{k=1}^{N-1} \frac{\xi_{i+k}^2 - \xi_{i+k-1}^2}{m_{i+k}} \right), \quad \xi_{i-1} \leq \xi \leq \xi_i.$$

При выбранном способе разбиения канала на слои толщина центральных слоев может быть сравнима с радиусом границы слоя и даже превышать его. Поэтому слои нельзя приближенно считать плоскими, как в работе [1], и определять коэффициенты теплоотдачи между слоями как между пластинами. Более точно эти коэффициенты можно определить, рассмотрев стационарную задачу теплообмена между тремя соседними цилиндрическими слоями. В этом случае получаем

$$\alpha_1 = \frac{\lambda}{r_0 \xi_1} \left(\frac{\xi_2^2}{\xi_2^2 - \xi_1^2} \ln \frac{\xi_2}{\xi_1} - 1 \right)^{-1};$$

$$\alpha_i = \frac{\lambda}{r_0 \xi_i} \left(\frac{\xi_{i+1}^2}{\xi_{i+1}^2 - \xi_i^2} \ln \frac{\xi_{i+1}}{\xi_i} - \frac{\xi_{i-1}^2}{\xi_i^2 - \xi_{i-1}^2} \ln \frac{\xi_i}{\xi_{i-1}} \right)^{-1}; \quad i=2, 3, \dots, N-1;$$

$$\alpha_N = \frac{\lambda}{r_0} \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda}{\alpha_c r_0} + \frac{\xi_{N-1}^2}{1 - \xi_{N-1}^2} \ln \xi_{N-1} \right)^{-1},$$

где λ — коэффициент теплопроводности жидкости; α_c — коэффициент теплоотдачи на границе с окружающей средой.

Система уравнений (2), (3) интегрировалась методом Рунге — Кутты с автоматическим выбором шага при выполнении условия устойчивости

$$\Delta\chi \leq \min \left[\frac{\bar{\omega}_i \Lambda (\xi_i - \xi_{i-1})^2}{5,25 St_i} \right], \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

В качестве примера рассмотрено адиабатическое течение $\alpha_c=0$; $T_0=463$ К; $\mu(T_0)=3900$ Па·с; $E=268$ кДж/моль; $\lambda=0,2$ Вт/(м·К); $c=2$ кДж/(кг·К); $\rho=1200$ кг/м³; $a=0,03$; $n=10$; $r_0=0,0015$ м.

На рис. 1 приведена зависимость перепада давления на участке трубы длиной $L=160d$, где d — диаметр канала, от средней скорости. Из этой зависимости следует, что гидравлическое сопротивление канала при течении высоковязкой жидкости качественно отличается от сопро-

тивления при изотермическом течении обычных жидкостей. Особенно следует отметить, что при превышении некоторого значения расхода гидравлическое сопротивление участка канала уменьшается.

Этот неожиданный результат становится понятным, если рассмотреть зависимость перепада давления от продольной координаты для трех характерных случаев (рис. 2). Из этого рисунка видно, что на начальном участке течения гидравлическое сопротивление обычно моно-

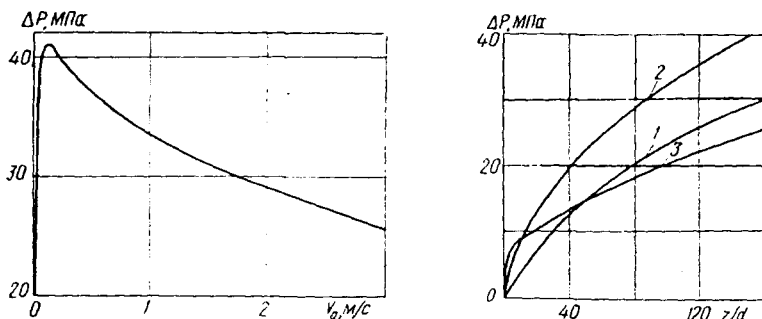


Рис. 1. Зависимость перепада давления канала от средней скорости жидкости

Рис. 2. Зависимость перепада давления от продольной координаты. 1 — $V_0 = 0,02$; 2 — 0,1; 3 — 3 м/с

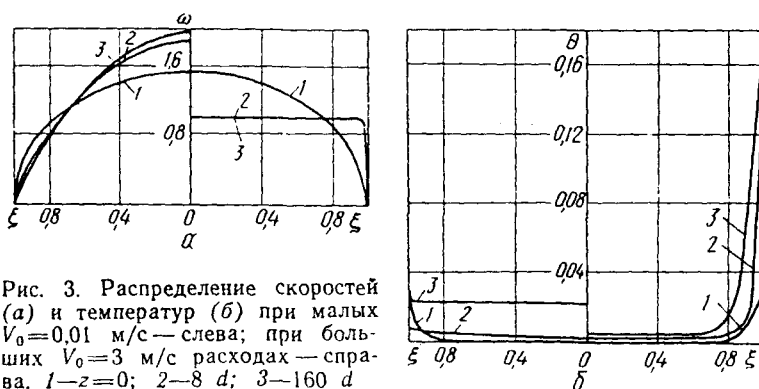


Рис. 3. Распределение скоростей (а) и температур (б) при малых $V_0 = 0,01$ м/с — слева; при больших $V_0 = 3$ м/с расходах — справа. 1 — $z = 0$; 2 — 8 d; 3 — 160 d

тонно возрастает с ростом расхода. Но в дальнейшем за счет диссипации энергии и соответствующего повышения температуры жидкости, увеличивающегося с увеличением расхода, рост перепада давления для больших расходов замедляется более сильно (кривая 3), чем для малых. Это приводит к рассмотренной выше убывающей зависимости гидравлического сопротивления от расхода.

Замедление (по мере удаления от входа) роста перепада давления при течении высоковязкой жидкости в канале происходит при любых расходах (рис. 2) и связано с уменьшением вязкости из-за непрерывного повышения температуры [1]. Наблюдаемое различие в скоростях роста при больших и малых расходах определяется особенностями распределений температур и скоростей (рис. 3).

При малых расходах время пребывания жидкости в канале велико. Поэтому температура жидкости, неравномерно распределенная на входе, при $l = 160 d$ успевает выравняться до почти равномерной (рис. 3, б). Этому способствует и незначительная мощность диссипации механической энергии, которая приводит лишь к небольшому повышению температуры и практически не влияет на равномерность ее распределения. Соответственно профиль скорости (рис. 3, а), более наполненный, чем Пуазейлев, на входе, в дальнейшем вытягивается и приближается к пуа-

зейлевоу. Такая деформация профиля скорости обеспечивает более равномерное по сечению выделение теплоты за счет диссипации и, следовательно, более равномерное распределение температуры.

При больших расходах диссипация энергии особенно велика вблизи стенок канала, где даже на входе существует большой градиент скорости (рис. 3, а). В этой области быстро растет температура (рис. 3, б) и потому уменьшается вязкость. Вследствие этого центральное высоковязкое ядро жидкости оказывается окруженным слоем маловязкой жидкости и в канале формируется стержнеподобное течение (рис. 3, а) с пренебрежимо малой диссипацией в ядре. В периферийной области с увеличением расстояния от входа диссипация быстро уменьшается за счет значительного уменьшения вязкости. Этим и объясняется снижение скорости роста перепада давления и, в конечном итоге, характер приведенной на рис. 1 зависимости гидравлического сопротивления канала от расхода.

Отметим интересную связь между характером зависимости гидравлического сопротивления от расхода и длиной начального термического участка [2]

$$L_{нт} = 0,16r_0 Pr Re,$$

где Pr , Re — числа Прандтля и Рейнольдса. Максимальное гидравлическое сопротивление (см. рис. 1) соответствует расходу, при котором длина начального термического участка равна длине канала. При меньших расходах длина начального термического участка меньше длины канала. В этом случае зависимость гидравлического сопротивления от расхода будет монотонно возрастающей. При расходах, больших расхода, соответствующего максимальному гидравлическому сопротивлению, длина начального термического участка больше длины канала. В этом случае зависимость гидравлического сопротивления от расхода будет монотонно убывающей.

SUMMARY. A dependence of the pressure loss of a round cylindrical channel on the rate during flow of the high-viscous liquid is discussed.

1. Пономаренко В. Г., Потелня Г. Ф., Ульев Л. М. Особенности течения и теплообмена высоковязкой жидкости в цилиндрических каналах // Пром. теплотехника.—1985.—7, № 1.—С. 9—16.
2. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах.—М.: Энергия, 1967.—411 с.

УкрНИИхвмаш, Харьков

Получено 28.02.85
После доработки 19.11.85

УДК 621.47:621.36

Д. Г. Блинов
Ю. Н. Лобунец

**ОПТИМИЗАЦИЯ
ПАРАМЕТРОВ И РАСЧЕТ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ГЕНЕРАТОРА**

В настоящей статье предлагается методика расчета ТЭГ заданной мощности N , выделяющейся на нагрузке R_n . Известны свойства термоэлектрического материала: λ — коэффициент теплопроводности; e — коэффициент термоэдс; σ — коэффициент электропроводности; максимальная рабочая температура T_p ; характеристики стока теплоты: α — коэффициент теплоотдачи; T_0 — температура охлаждающей среды на хо-