

УДК 532.542

© 2002 г. Ю.А. ЛАШКОВ, В.В. МИХАЙЛОВ, Н.В. САМОЙЛОВА, А.А. УСПЕНСКИЙ

О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ТРУБЫ С ПЛЕНКОЙ ЖИДКОСТИ НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

Приведены результаты лабораторных исследований влияния пленки жидкости, покрывающей внутреннюю поверхность круглой газовой трубы, на ее гидравлическое сопротивление. Рассмотрены вопросы подобия течений с жидкой пленкой. Показано, что пленка жидкости увеличивает сопротивление гидравлически гладкой трубы, но может снизить сопротивление шероховатой трубы за счет уменьшения величины эквивалентной шероховатости.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, пленка жидкости, круглая труба.

Опыт эксплуатации газопроводов указывает на уменьшение гидравлического сопротивления при наличии достаточно тонкого слоя жидкости на внутренней шероховатой поверхности труб. В частности, приведенные в [1] экспериментальные зависимости для коэффициента сопротивления труб, покрытых пленкой ингибитора, свидетельствуют о снижении коэффициента сопротивления на 12% по сравнению со случаем "сухой" поверхности.

Цель данной статьи – исследование механизма этого явления. Можно представить, что влияние жидкой пленки связано или с процессом ее взаимодействия с вихревыми структурами, уменьшающим интенсивность генерации турбулентности на поверхности трубы, или с чисто геометрическим снижением величины шероховатости за счет "выравнивания" жидкостью внутритрубной поверхности.

Для подтверждения того или иного механизма проведены сравнительные испытания с гладкой и шероховатой поверхностями трубопровода.

1. Экспериментальная установка. Испытания проведены в круглой горизонтальной трубе длиной около 10 м с внутренним диаметром 48.2 мм. Труба состояла из ряда сменных модулей длиной 1000 и 360 мм. Модули при изготовлении подгонялись по внутреннему диаметру хонингованием.

Установка работала на режиме всасывания воздуха из атмосферы в вакуумную емкость. Средние скорости потока в трубе составляли 10 – 100 м/с. Форма входного коллектора обеспечивала безотрывный равномерный поток в цилиндрической части коллектора. Это позволяло определять расход газа по измеренному перепаду давления в коллекторе с погрешностью, не превышающей 0.5%.

Коэффициент сопротивления рассчитывался по перепаду давления на мерном участке трубопровода. Внутренняя поверхность мерного участка могла быть гидравлически гладкой или шероховатой.

В качестве жидкости использовалось вакуумное масло ВМ-1. Масло вводилось в поток через микроотверстия, расположенные по окружности трубы в кольцеобразной проточке, закрытой мелкоячеистой сеткой. Сечение подачи масла находилось вблизи измерительного модуля вверх по потоку. Масло (при контроле его уровня) подавалось под давлением из бачка достаточно большого объема. Расход масла варьировался путем изменения перепада давления между воздушной полостью бачка и соответствующим сечением трубы. Зависимость между перепадом давления и расходом масла определялась с помощью тарировки. При испытаниях с жидкой пленкой применялись расположенные в канале трубопровода Г-образные датчики статического давления.

Контроль отсутствия уноса масла с поверхности мерного участка осуществлялся при предварительных испытаниях путем непосредственного осмотра укрепленных на датчиках тампонов.

Для визуализации течения с жидкой пленкой на гладкой поверхности использовался прозрачный модуль, выполненный из плексигласа. Это позволяло измерять скорость движения жидкой пленки и поверхностных волн жидкости.

2. Методика обработки результатов измерений. Методика основана на решении задачи в одномерной постановке об установившемся течении сжимаемого газа в круглой трубе при отсутствии теплообмена с внешней средой [2]. Коэффициент сопротивления λ определялся через силу сопротивления τ_w , отнесенную к единице площади внутренней поверхности трубы

$$\lambda = \frac{8\tau_w}{\rho u^2} \quad (2.1)$$

Здесь ρ , u – средние значения плотности и скорости газа.

Подстановка этого соотношения в уравнение сохранения импульса, а также использование уравнений сохранения энергии и расхода приводят к дифференциальному уравнению

$$D \frac{d\chi(W)}{dx} = \lambda$$

$$\chi(W) = \frac{\gamma+1}{2\gamma} \left[\frac{1}{W^2} - 2 \ln(W) \right]; \quad W = \frac{u}{a_*} = -\frac{p}{2C} + \sqrt{\left(\frac{p}{2C}\right)^2 + \frac{\gamma-1}{\gamma+1}} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{\gamma+1}{\gamma} a_* Q_0$$

Здесь D – диаметр трубы; a_* – критическая скорость, равная $a_0 \cdot \sqrt{2/(\gamma+1)}$; a_0 – скорость звука при $u = 0$ (в атмосфере); $Q_0 = \rho u$ – массовый расход газа через единицу площади трубы; γ – показатель адиабаты.

Отсюда, считая, что значение λ не зависит от продольной координаты x в пределах мерного участка, имеем

$$\lambda = \frac{\chi(W_1) - \chi(W_2)}{\Delta x} D \quad (2.3)$$

Индексы 1, 2 – относятся соответственно к сечениям на входе и выходе из мерного участка. При вычислении числа Рейнольдса значение динамической вязкости газа μ определяли по формуле Сазерленда.

В случае малых чисел Маха $M \ll 1$ ($M \sim C/p$) соотношения (2.2), (2.3) дают известное выражение для λ газопровода с большим перепадом давления, а в случае течения несжимаемого газа (малый перепад) – классическое выражение для λ [3].

Параметры масла ВМ-1 при $T = 20^\circ\text{C}$ принимались согласно справочникам [4, 5]. Влияние температуры на значение вязкости масла μ_f учитывалось на основании рекомендаций [6].

3. Измерения коэффициента сопротивления. Для случаев гидравлически гладкой поверхности и поверхности с регулярной шероховатостью в виде гексогонально расположенных на плоскости сферических сегментов (фиг. 1) проведены измерения, соответствующие диапазонам числа $Re_D \approx (1.6-2.8) \cdot 10^5$ для гладкой поверхности и $(0.7-2.6) \cdot 10^5$ для шероховатой (скорости $u = 50-100$ и $20-80$ м/с).

Расход масла составлял $Q_f = 0.1; 0.2; 0.3$ и 0.4 см³/с для гладкой поверхности и 0.3 см³/с для шероховатой поверхности (при непрерывной подаче масла).

С целью выявления возможного минимума коэффициента сопротивления λ_f (при определенной толщине жидкой пленки) измерения проведены и на неустановившемся (квазиустановившемся) режиме через некоторые промежутки времени после "отсечки" подачи масла.

Измеренные значения λ_f для гладкой поверхности при указанных значениях Q_f показаны на фиг. 2.

Результаты измерений на неустановившемся режиме приведены на фиг. 3. Здесь $t = 0$ соответствует моменту отсечки подачи масла. Из графика следует, что сопротивление падает с уменьшением толщины жидкой пленки, но всегда превосходит сопротивление сухой гидравлически гладкой поверхности.

Результаты испытаний на неустановившемся режиме для случая шероховатой поверхности (фиг. 1) даны на фиг. 4. Из приведенных данных видно, что при уменьшении с течением времени толщины жидкой пленки сопротивление, превосходящее при $t = 0$ сопротивление сухой трубы, снижается до меньших значений, достигает минимума и вновь повышается до уровня сопротивления сухой трубы (при дальнейшем уменьшении толщины пленки). Таким образом, существует оптимальное количество жидкости на внутренней шероховатой поверхности трубы, обеспечивающее минимум сопротивления.

Указанные минимумы при различных числах Re_D показаны на фиг. 5. На данном "оптимальном" режиме сопротивление трубопровода с шероховатой поверхностью может снизиться на 25%, однако оно всегда превосходит величину сопротивления гидравлически гладкой поверхности. Оценки показывают, что при достаточно большом уровне подачи масла, когда сопротивления гладкой и шероховатой труб близки по величине, жидкость полностью покрывает неровности поверхности. Сопротивление на этом режиме обусловлено наличием сравнительно больших поперечных поверхностных волн, которые наблюдались при визуализации течения на гладкой поверхности.

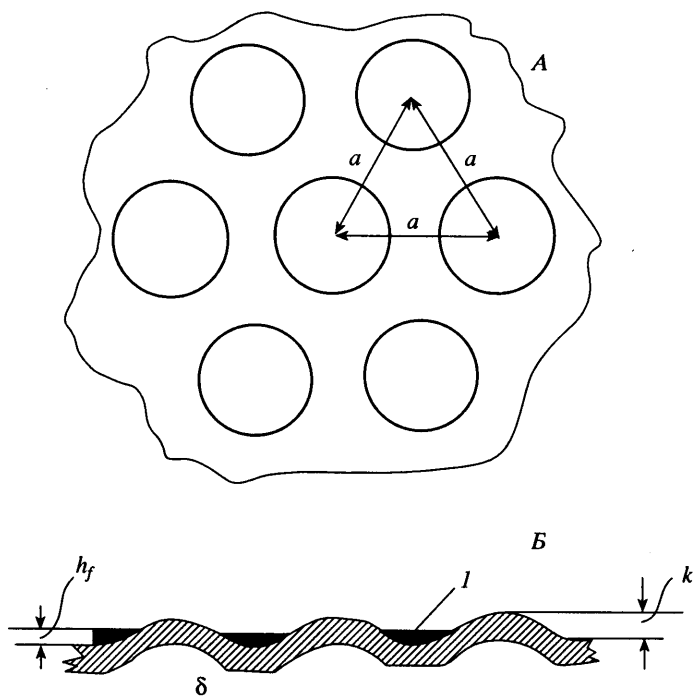
При уменьшении толщины жидкой пленки (уменьшении размеров волн) это сопротивление снижалось, но на шероховатой поверхности появлялось и увеличивалось сопротивление, обусловленное "оголением" выступов шероховатости. Сложение указанных составляющих сопротивления и привело к появлению минимума полного сопротивления при определенном количестве жидкости на единице поверхности.

Для оценки величины заполнения жидкостью впадин на режиме минимума сопротивления применялась методика взвешивания масла, которое стекало со стенок снятого модуля. При скорости $u \approx 50$ м/с ($Re_D = 1.6 \cdot 10^5$) величина заполнения впадин на минимуме сопротивления составляла $h_f \approx 0.1$ мм, что при высоте выступов $k \approx 0.22$ мм соответствует отношению $h_f/k \approx 0.5$, т.е. уменьшению геометрической шероховатости в 2 раза. Отметим, что полученные результаты относятся к конкретным условиям эксперимента, включающим в себя определенные значения плотности, вязкости и поверхностного натяжения жидкости, а также вид и размеры шероховатости.

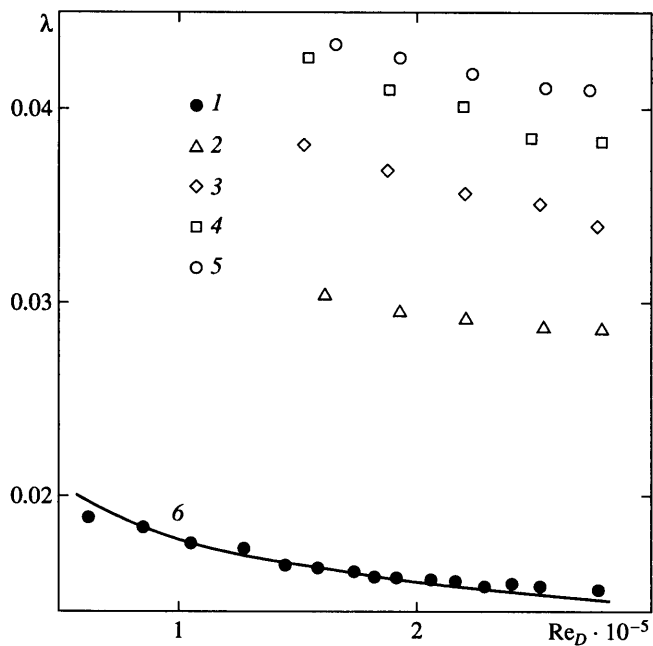
4. Исследования характеристик течения жидкости. Визуализация с помощью прозрачного модуля с гладкой внутренней поверхностью показала, что на всех испытанных режимах наблюдается схема течения в жидкой пленке с относительно далеко отстоящими друг от друга поперечными "уединенными" волнами, сносящимися вниз по потоку со скоростью, примерно в 8 раз превышающей среднемассовую скорость (скорость распространения фронта) жидкой пленки.

Из оценок, основанных на измерениях расхода, скоростей движения волн и переднего фронта пленки, следует, что указанные волны не переносят объем жидкости, а обусловлены вертикальными перемещениями частиц жидкости, создающими бегущую волну. Скорость и среднее расстояние между уединенными волнами зависят от скорости газа и (весьма существенно) от толщины пленки.

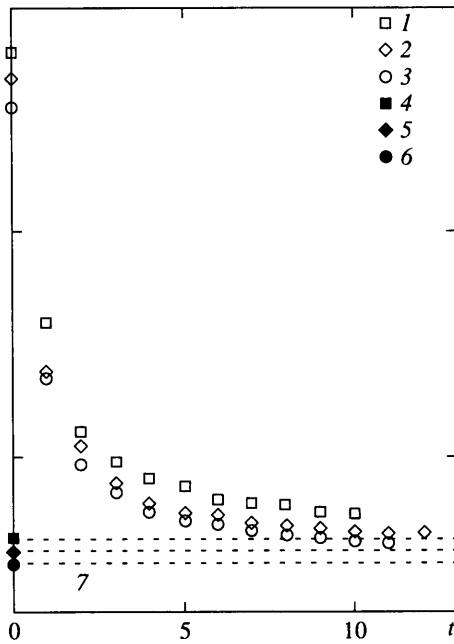
Таким образом, расстояние между волнами и их скорость служили индикатором равномерности толщины пленки. Все приведенные результаты измерений соответ-



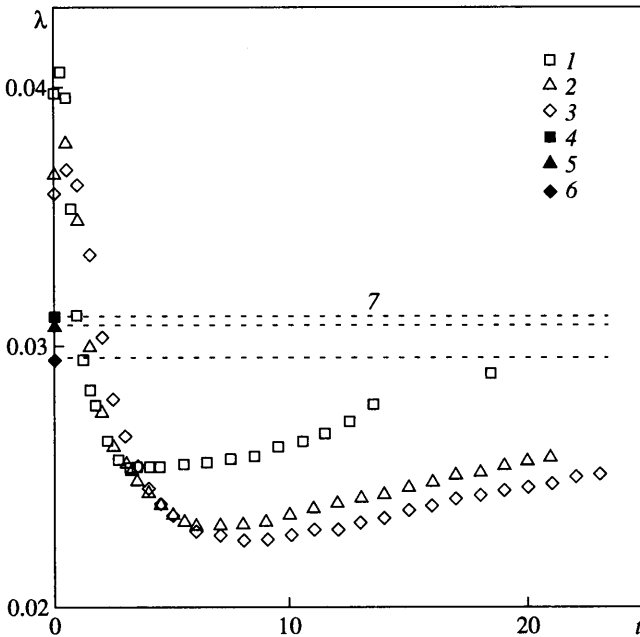
Фиг. 1. Геометрия поверхности с регулярной шероховатостью: А – вид в плане, Б – поперечный разрез, l – масло



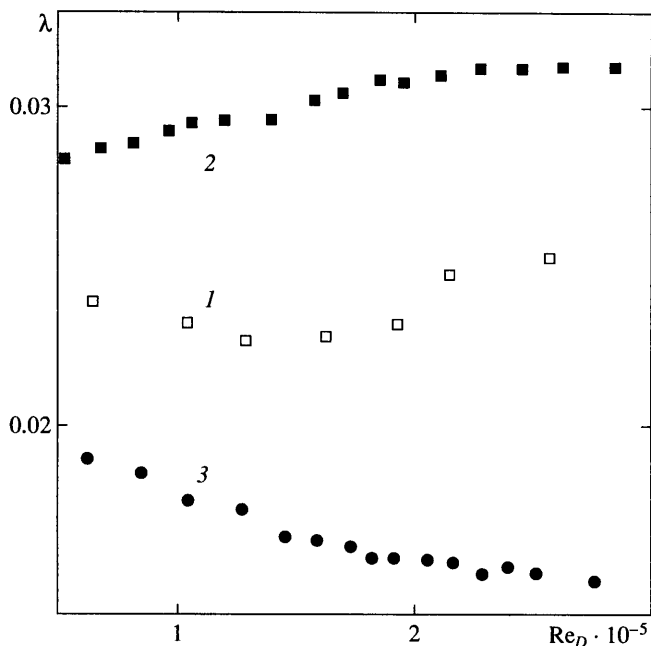
Фиг. 2. Зависимости коэффициента сопротивления λ от числа Re_D для гладких поверхностей: 1 – сухая поверхность; 2–5 – с масляной пленкой для расходов $Q_f = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4 \text{ см}^3/\text{с}$; 6 – зависимость Прандтля [3]



Фиг. 3. Коэффициент сопротивления λ от t (мин) для гладкой поверхности на неустановившемся режиме после прекращения подачи масла: 1–3 – поверхность с масляной пленкой $u = 50; 60$ и 70 м/с; 4–6 – сухая поверхность при тех же скоростях потока; 7 – продолжение 4–6 по t



Фиг. 4. Коэффициент сопротивления λ от t (мин) для шероховатой поверхности на неустановившемся режиме после прекращения подачи масла: 1–3 – поверхность с масляной пленкой для $u = 80; 60$ и 40 м/с; 4–6 – сухая поверхность при тех же скоростях потока; 7 – продолжение 4–6 по t



Фиг. 5. Снижение коэффициента сопротивления λ на шероховатой поверхности: 1 – с оптимальной толщиной масляной пленки, 2 – сухая шероховатая, 3 – сухая гладкая поверхность

ствуют достаточно равномерному распределению жидкости по поверхности трубы. Лишь на "дне" трубы в ряде случаев наблюдалось ускоренное движение волн с увеличенным расстоянием между ними. Но этот участок составлял малую долю (примерно 7%) от общей площади трубы. Измерение скорости перемещения переднего фронта пленки u_f позволило определить объемное количество жидкости на единице площади δ_f , рассчитанное по формуле

$$\delta_f = \frac{Q_f}{\pi D u_f} = \frac{q}{u_f} \quad (4.1)$$

Здесь Q_f – объемный расход жидкости, u_f – скорость перемещения переднего фронта пленки. Значение δ_f можно трактовать как среднюю толщину пленки. Отметим, что скорость u_f измерялась вдоль боковых образующих, так что значение u_f является некоторой средней скоростью движения жидкости.

Одновременно с измерением u_f оценивалась скорость движения волн u_w , а также фиксировались значения давления и перепада давления на мерном участке и во входном коллекторе.

Результаты, полученные после обработки, – среднemasсовая скорость потока u , удвоенный скоростной напор ρu^2 , коэффициент сопротивления λ_f , скорость перемещения переднего фронта пленки u_f и скорость поперечных поверхностных волн u_w приведены в таблице.

Поскольку значения u_f и u_w существенно меньше значения u , поверхность жидкой пленки можно трактовать как твердую шероховатую поверхность, геометрически совпадающую с внешней границей жидкости.

Из результатов измерений следует, что на исследованных режимах течения коэффициент сопротивления при $Q_f \geq 0.2 \text{ см}^3/\text{с}$ возрастает более чем в 2 раза. Как известно, в этом случае шероховатость проявляется полностью, и из формулы, связываю-

u , м/с	u_f , мм/с	u_w , мм/с	δ_f , мм	k_f , мм	ρu^2 , кг/мс ²	λ_f
$Q_f = 0.3 \text{ см}^3/\text{с}, q = 1.98 \text{ мм}^2/\text{с}$						
50.5	6.95	60	0.29	0.67	2960	0.0425
62.7	9.7	80	0.21	0.60	4460	0.0409
74.7	11.9	90	0.17	0.57	6150	0.0400
86.1	13.2	110	0.15	0.50	7920	0.0384
98.0	13.6	–	0.15	0.38	$1.0 \cdot 10^4$	0.0357
$Q_f = 0.2 \text{ см}^3/\text{с}, q = 1.32 \text{ мм}^2/\text{с}$						
49.5	5.0	–	0.27	0.48	2860	0.0379
61.1	6.95	–	0.19	0.44	4260	0.0367
73.6	8.05	–	0.17	0.40	6020	0.0356
85.7	9.0	–	0.15	0.38	7920	0.0350
103.4	10.0	–	0.13	0.34	$1.11 \cdot 10^4$	0.0338
$Q_f = 0.1 \text{ см}^3/\text{с}, q = 0.66 \text{ мм}^2/\text{с}$						
52.4	–	–	–	0.24	3146	0.0304
63.5	–	–	–	0.22	4521	0.0295
74.3	–	–	–	0.21	6045	0.0291
87.5	–	–	–	0.20	8117	0.0286
98.3	–	–	–	0.20	9951	0.0285

щей эквивалентную шероховатость k_e и коэффициент сопротивления λ , можно вычислить значение k_e

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.14 + 2 \lg \frac{D}{k_e} \quad (4.2)$$

Расчитанные по (4.2) значения $k_e = k_f$ приведены в таблице и на фиг. 6.

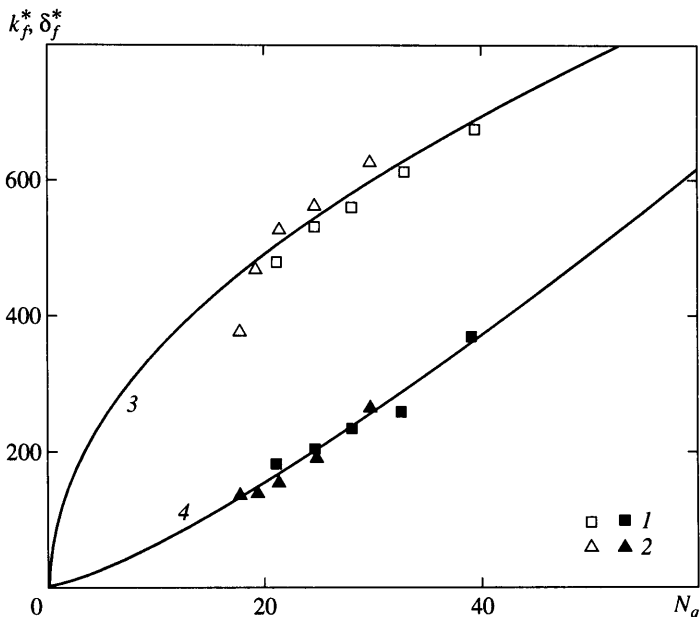
Из данных таблицы следует, что величина эквивалентной шероховатости k_f примерно в 2 раза превышает толщину пленки. Отметим, что значение k_f нельзя непосредственно отождествлять с "высотой" волны.

5. Подобие течений газа в трубах с жидкой пленкой. При исследовании подобия течений газа определенного состава в достаточно длинных цилиндрических круглых трубах будем использовать теорию подобия и размерности [7]. Для гладких труб с гидравлически гладкой сухой внутритрубной поверхностью при малых (< 0.3) числах Маха основным критерием подобия является число Рейнольдса $Re_D = \rho u D / \mu$.

В случае шероховатой внутренней поверхности течение можно описать с помощью еще двух безразмерных параметров: относительной эффективной шероховатости $k_e^* = k_e / D$ и введенного в [8] параметра α , определяющего степень отклонения типа шероховатости от песочной [3] ($\alpha = 1$ – песочная шероховатость, $\alpha = 0$ – чисто техническая).

На режиме полного проявления шероховатости влиянием критериев Re_D и α можно пренебречь, и течение зависит лишь от критерия подобия k_e^* .

Подобие течения с жидкой пленкой будем исследовать в осесимметричной постановке, хотя начальная, равномерная по периметру толщина пленки при движении жидкости по горизонтальному газопроводу становится неравномерной за счет стекания вниз под действием силы тяжести. Чтобы уменьшить влияние этого эффекта, все измерения проводились на относительно малом расстоянии от начального сечения, что позволило исключить ускорение свободного падения из числа размерных определяющих параметров [7].



Фиг. 6. Зависимости безразмерных эффективной шероховатости k_f^* (3) и толщины δ_f^* (4) масляной пленки (соотношения (5.5)) от критерия подобия N_q ; 1, 2 – экспериментальные данные для расхода масла $Q = 0.2$ и $0.3 \text{ см}^3/\text{с}$

Параметрами, определяющими течение в жидкой пленке с учетом сделанных предположений, являются: 1) касательное напряжение, действующее на жидкую пленку $\lambda_f \rho u^2$, $\text{кг}/\text{м} \cdot \text{с}^2$; 2) объемный расход на единицу длины окружности q , $\text{м}^2/\text{с}$; 3) вязкость жидкости μ_f , $\text{кг}/\text{м} \cdot \text{с}$; 4) плотность жидкости ρ_f , $\text{кг}/\text{м}^3$; 5) поверхностное натяжение σ , $\text{кг}/\text{с}^2$.

Вязкость газа не включена в число определяющих параметров в предположении, что капиллярные волны в жидкости достаточно велики, вследствие чего обеспечивается режим полного проявления шероховатости, т.е. независимость течения от вязкости газа.

Согласно экспериментальным данным [3], можно приближенно принять условием существования такого режима выполнение неравенства

$$\lambda_f \lambda_0^{-1} \geq 2 \quad (5.1)$$

Здесь λ_0 – коэффициент сопротивления сухой гладкой трубы. Естественно, предполагаем, что уноса жидкости с поверхности не происходит, т.е. $q = \text{const}$.

Из пяти выписанных размерных величин можно составить две независимые безразмерные комбинации в виде степенных одночленов. Запишем их как

$$N_q = \sigma (\mu_f q \lambda_f \rho u^2)^{-1/2}, \quad \text{Re}_f = \rho_f q (\mu_f)^{-1} \quad (5.2)$$

Полученные комбинации параметров можно выбрать в качестве критериев подобия. Критерий N_q связывает параметры жидкой пленки с действующим на нее касательным напряжением. Критерий Re_f – по существу число Рейнольдса, определяющее в слое жидкости отношение инерционных сил к силам вязкости.

При $\text{Re}_f \rightarrow 0$ основным критерием, задающим режим течения, должен быть N_q . Однако отметим, что в случае $N_q \rightarrow 0$ данная постановка задачи теряет смысл,

поскольку течение в пленке становится независимым от параметров потока в трубе. Возможно, это связано с появлением уноса жидкости в виде капель, который должен возникнуть при $\lambda_f \rho u^2 \rightarrow \infty (N_q \rightarrow 0)$.

Высказанное предположение подтверждается и результатами эксперимента, когда при $N_q \leq 20$ в потоке газа присутствовали капли масла.

Используя [4, 5], оценим величину параметров N_q и Re_f для условий эксперимента, учитывая, что $\mu_f \approx 6.5 \cdot 10^{-2}$ кг/мс; $\sigma \approx 0.12$ кг/с²; $\rho_f \approx 837$ кг/м³; $q \approx (0.7-2) \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\rho u^2 \approx (3-10) \cdot 10^3$ кг/мс. Согласно соотношениям (5.2), будем иметь

$$N_q \approx 17-60, Re_f \approx (0.9-2.6) \cdot 10^{-2} \quad (5.3)$$

Полученные малые значения критерия Re_f позволяют предположить, что при указанных режимах его влияние несущественно. Отсюда же следует, что из числа размерных определяющих параметров можно исключить плотность жидкости ρ_f .

Используя для обезразмеривания оставшиеся параметры, получим из них два степенных одночлена с размерностями длины и скорости

$$L_q = \frac{\mu_f q}{\sigma}, U = \frac{\sigma}{\mu_f} \quad (5.4)$$

Тогда все характеристики течения, обезразмеренные с помощью (5.4), должны быть функциями одного критерия подобия N_q .

В частности, безразмерные эквивалентная шероховатость k_f^* и толщина жидкой пленки δ_f^* должны выражаться через некоторые функции $\Phi_k(N_q)$ и $\Phi_s(N_q)$

$$k_f^* = k_f L_q^{-1} = \Phi_k(N_q), \delta_f^* = \delta_f L_q^{-1} = \Phi_s(N_q)$$

Аналогичным образом для средней скорости движения пленки u_f и скорости перемещения капиллярных волн u_w получим

$$u_f^* = u_f U^{-1} = \Phi_f(N_q), u_w^* = u_w U^{-1} = \Phi_w(N_q)$$

Справедливость этого утверждения будет проверена ниже с помощью результатов испытаний. При этом необходимо провести проверку на таких режимах течения, которые соответствуют сделанным допущениям. Основными из них являются:

1. отсутствие влияния числа $Re_D = \rho u D / \mu$ (режим полного проявления шероховатости). Критерием этого условия является выполнение неравенства (5.1). Естественно, что соотношение (5.1) может быть выполнено лишь при сравнительно большом значении q (достаточной толщине пленки);

2. отсутствие уноса пленки с поверхности ($q = \text{const}$) требует (ориентировочного) значения критерия $N_q \geq 20$. Для фиксированных параметров жидкости и $\lambda_f \rho u^2 \approx \text{const}$ ограничение снизу значения N_q равносильно малости параметра q ;

3. при выполнении условий 1 и 2 область влияния второго критерия подобия Re_f может быть определена при испытаниях с большими значениями Re_f .

Если ориентироваться на результаты, полученные для обтекания тел, то можно предположить, что влияние этого критерия должно быть малым при $Re_f \leq 1$.

В таблице и на фиг. 6 приведены результаты измерений. При этом условия 1, 2 выполнялись лишь для режимов $Q = 0.2$ и 0.3 см³/с. На режиме с $Q = 0.4$ см³/с наблюдался унос жидкости в поток, при $Q = 0.1$ см³/с нарушалось условие (5.1), т.е. проявлялось влияние вязкости газа. Поэтому обработка данных в зависимости от критерия подобия N_q , показанная на фиг. 6, сделана лишь для случаев $q = 0.2$ и 0.3 см³/с.

Степенные аппроксимации этих результатов, нанесенные линиями, соответствуют зависимостям

$$k_f^* = 11N_q^{1/2}, \quad \delta_f^* = 3.7N_q^{5/4} \quad (5.5)$$

Записанные соотношения практически непригодны для оценок характеристик течения с жидкой пленкой по причине того, что в параметр подобия входят неизвестные при реальном течении коэффициент сопротивления λ и расход жидкости в пленке q .

По этой причине вместо характерного размера L_q (5.4) используем толщину пленки δ_f , т.е. исключим из первого уравнения (5.5) параметр q (и связанную с ним характерную длину L_q) с помощью второго уравнения. Тогда получим

$$\frac{k_f}{\delta_f} = 8N_\delta, \quad N_\delta = \frac{\delta_f \rho u^2 \lambda_f}{\sigma} \quad (5.6)$$

Соотношение (5.6) является конкретной формой связи k_f/δ_f с критерием подобия N_δ . Интересно отметить, что при указанном подходе эффективная шероховатость пленки k_f не зависит от вязкости жидкости, а лишь от величины поверхностного натяжения σ и толщины пленки δ_f . Вязкость влияет лишь на u_f и u_w через характерное значение скорости U (5.4).

Используя связь (4.2) между k_f и λ_f , соответствующую режиму течения без влияния вязкости газа, и (5.6), можно получить

$$\lambda_f \exp\left(\frac{0.869}{\sqrt{\lambda_f}}\right) = 46.4 \frac{D\sigma}{\delta_f^2 \rho u^2} = 29 \frac{D^5 \sigma \rho}{\delta_f^2 Q^2} \quad (5.7)$$

Здесь $Q = \rho u D^2 \pi / 4$ – массовый расход газа в трубопроводе.

Соотношение (5.7) позволяет оценить значение коэффициента сопротивления λ_f для гладкой трубы при заданной величине Q .

Отметим, что ограничение (4.1) для случая течения в магистральных газопроводах не столь существенно, так как значение Re_D при этом на два порядка больше, чем в проведенном эксперименте. Следует указать также и на возможность использования (5.7) для шероховатых труб. Требование гладкости стенки, необходимое для применения (5.7), в случае шероховатой трубы с высотой элементов шероховатости k следует заменить ограничением $k \ll \delta_f$. При выполнении этого неравенства, как показали результаты, сопротивления гладкой и шероховатой труб практически одинаковы.

И наконец, отметим, что здесь формула (5.7) рассматривается как сугубо оценочная, поскольку она получена обработкой весьма небольшого экспериментального материала.

Заключение. Проведенные испытания показали, что при течении газа в трубе с жидкой пленкой возникает движение жидкости с перемещением по ее поверхности капиллярных волн. Жидкость и волны движутся с весьма малыми скоростями по сравнению со скоростью движения газа.

Геометрические характеристики капиллярных волн практически не зависят от вязкости газа при заданной средней толщине жидкой пленки. Средняя скорость движения жидкости обратно пропорциональна ее вязкости (при прочих равных условиях) и мала по сравнению со случаем течения Куэтта в слое δ_f , так как толщина слоя жидкости в промежутках между волнами значительно меньше средней толщины этого слоя.

Полученные результаты указывают на то, что принятые при выводе законов подобия упрощения должны быть справедливы в широком диапазоне значений вязкости и плотности жидкости.

Наличие жидкой пленки может только увеличить сопротивление гладкой поверхности.

Для шероховатой поверхности возможно как увеличение, так и уменьшение сопротивления. Максимальное снижение соответствует уровню гладкой поверхности и достигается при шероховатости, утопленной в слое жидкости при поверхностном натяжении σ , стремящемся к бесконечности, когда амплитуда поверхностных волн стремится к нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Одишария Г.Э., Клапчук О.В., Славинский В.П., Кемхадзе Т.В., Клочко Ю.С.* Увеличение пропускной способности газопроводов при их ингибировании // Газовая пром-сть. 1997. № 1. С. 28–30.
2. *Христианович С.А., Гальперин В.Г., Миллионщиков М.Д., Симонов Л.А.* Прикладная газовая динамика / Под ред. С.А. Христиановича. М.: ЦАГИ, 1948. 145 с.
3. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя М.: Наука, 1969. 742 с.
4. Вакуумная техника. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 359 с.
5. *Королев Б.И.* Основы вакуумной техники. М.; Л. Госэнергоиздат, 1957. 399 с.
6. Горное дело. Энциклопедический справочник. Т. 1 М.: Углетехиздат, 1957. 760 с.
7. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Гостехиздат, 1957. 375 с.
8. *Михайлов В.В.* Уточненная формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления трубопроводов. // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 4. С. 159–161.

Москва
E-mail: drsnv@aerocentr. msl.su

Поступила в редакцию
14.IX.2001