

ОЦЕНКА ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

В. Н. Манжай^{1,2}, К. Б. Коновалов¹, М. А. Казарян³, В. И. Сачков¹

Предложено соотношение для расчета объёмного расхода жидкости через цилиндрический канал при турбулентном режиме течения, зависящее от динамической скорости, радиуса трубы и кинематической вязкости жидкости. Экспериментальная проверка полученной формулы, проведенная с жидкостями различной химической природы (вода и нефть), показала достоверность расчетных результатов при теоретическом прогнозировании величины объёмного расхода в условиях турбулентного течения жидкостей.

Ключевые слова: ньютоновская жидкость, ламинарное и турбулентное течение, динамическая и кинематическая вязкость, напряжение сдвига, объёмный расход жидкости.

Введение. Течение жидкости в цилиндрическом канале может осуществляться в ламинарном или турбулентном режимах. Переход одного вида течения в другой сопровождается изменением внутренней структуры потока и сопутствующей сменой параболического профиля скоростей для ламинарного течения на логарифмический профиль при турбулентном режиме. Слоистое ламинарное течение имеет строгое теоретическое обоснование, в рамках которого выведено уравнение распределения скоростей по сечению трубы $U = (\tau_w/\eta) \cdot y \cdot (1 - y/2R_w)$, после интегрирования которого $Q = \int U dS$, получена формула Пуазейля $Q_{\text{LAM}} = \pi \cdot R_w^4 \cdot \Delta P / 8\eta \cdot L$ для расчета объёмного расхода жидкости. Турбулентное течение с хаотическим перемешиванием частиц до сих пор не имеет рационального объяснения [1–5]. Наиболее распространенной в настоящее время является полуэмпирическая теория Прандтля, в основу которой положена упрощенная

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, СФТИ, инновационно-технологический центр, 634050, Россия, г. Томск, пл. Новособорная, 1; e-mail: konoko@tpu.ru.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30; e-mail: mang@ipc.tsc.ru.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kazarmishik@yahoo.com.

модель двухслойного течения в трубе. В этой теории получено уравнение [1, 2], описывающее экспериментально установленный логарифмический профиль скоростей при турбулентном режиме течения ньютоновской жидкости

$$U = \frac{u_*}{\xi} \cdot \ln \left(\frac{u_*}{\nu} \cdot y \right) + C, \quad (1)$$

где $u_* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ – динамическая скорость; $\tau_w = (R_w/2L) \cdot \Delta P$ – напряжение сдвига на стенке трубы; R_w и L – радиус и длина трубы соответственно; ΔP – перепад давления между концами трубы; ρ – плотность жидкости; $\nu = \eta/\rho$ – кинематическая вязкость; y – расстояние от стенки трубы до произвольного слоя; ξ и C – эмпирические коэффициенты.

Уравнение (1) хотя и дает ценную информацию о распределении скоростей в ядре турбулентного потока, но оно имеет существенные ограничения. Например, функция $U = (u_*/\xi) \cdot \ln(y \cdot u_*/\nu)$ неопределенна на стенке канала ($y = 0$) и, следовательно, ее нельзя интегрировать ($Q = \int U dS$) в пределах от $y_1 = 0$ до $y_2 = R_w$ с целью получения формулы для расчета объемного расхода турбулентного потока в трубе, как это делалось при выводе формулы Пуазейля для ламинарного течения.

Поэтому для расчета величины объемного расхода на практике пользуются различными аналитическими выражениями эмпирического происхождения [6], полученными после обработки большого массива экспериментальных результатов, в частности, степенной формулой

$$Q_{\text{STEP}} = 14.8 \cdot \left(\frac{\Delta P}{L \cdot \rho} \right)^{0.571} \cdot \left(\frac{R^{2.714}}{\nu^{0.143}} \right). \quad (2)$$

Однако необходимость использования эмпирических коэффициентов для расчета величины объемного расхода делает обоснованным поиск других аналитических выражений, при теоретическом выводе которых использовались бы определенные модельные представления о поведении частиц жидкости в турбулентном потоке.

В предлагаемой модели при течении жидкости её частицы (молекулы, их ассоциаты и другие формы надмолекулярных образований, существующие в реальных жидкостях вследствие наличия межмолекулярных взаимодействий [4]) наряду с поступательным движением одновременно участвуют и во вращательном, которое реализуется через качение сферических частиц одного слоя по поверхности смежного с ним и близлежащего к стенке слоя. Такой трансляционный механизм движения жидкости в макроскопическом масштабе проявляется в виде сдвигового течения. Исходя из такого механизма течения, получено уравнение, описывающее экспериментально наблюдаемый логариф-

мический профиль скоростей слоев жидкости в цилиндрическом канале

$$U = \frac{\nu}{d} \cdot \ln \left(1 + 2\frac{y}{d} \right), \quad (3)$$

где $\nu = \eta/\rho$ – кинематическая вязкость; $d = \nu/e \cdot u_*$ – диаметр частиц жидкости; y – расстояние слоя от стенки канала.

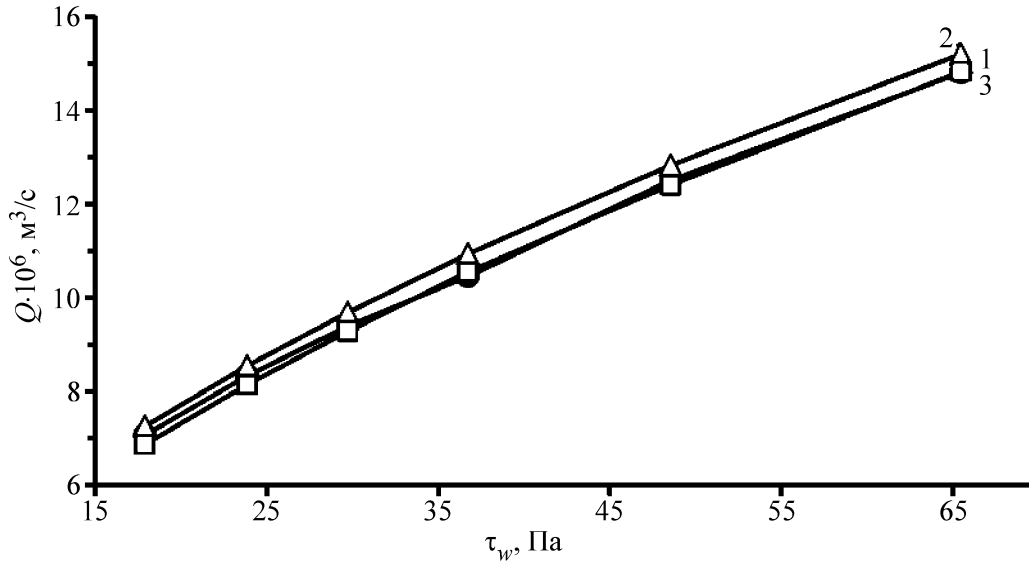


Рис. 1: Зависимость объемного расхода воды в трубе ($R_w = 1.1 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 0.905$ м) от напряжения сдвига на стенке канала: 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты, рассчитанные по формуле (2); 3 – результаты, рассчитанные по формуле (4).

Детальный вывод уравнения (3) многостадийен и пространен, поэтому он будет представлен в последующих публикациях. Следует отметить, что выражение (3), в отличие от уравнения (1), не теряет физического смысла и при значении $y = 0$, когда скорость на стенке $U = 0$, т.е. его, в отличие от (1), можно интегрировать ($Q = \int U dS$) во всем интервале $0 \leq y \leq R_w$. В результате получена формула для расчета объёмного расхода жидкости через цилиндрический канал при турбулентном режиме течения

$$Q_{\text{LOG}} = \pi R_w^2 \cdot u_* \cdot e \cdot \ln \left(\frac{R_w \cdot u_*}{\nu} \right). \quad (4)$$

Экспериментальная проверка выражения (4), проведенная с жидкостями различной химической природы (рис. 1 и рис. 2), показала его вполне удовлетворительную достоверность при теоретическом прогнозировании величины объёмного расхода при турбулентном режиме течения.

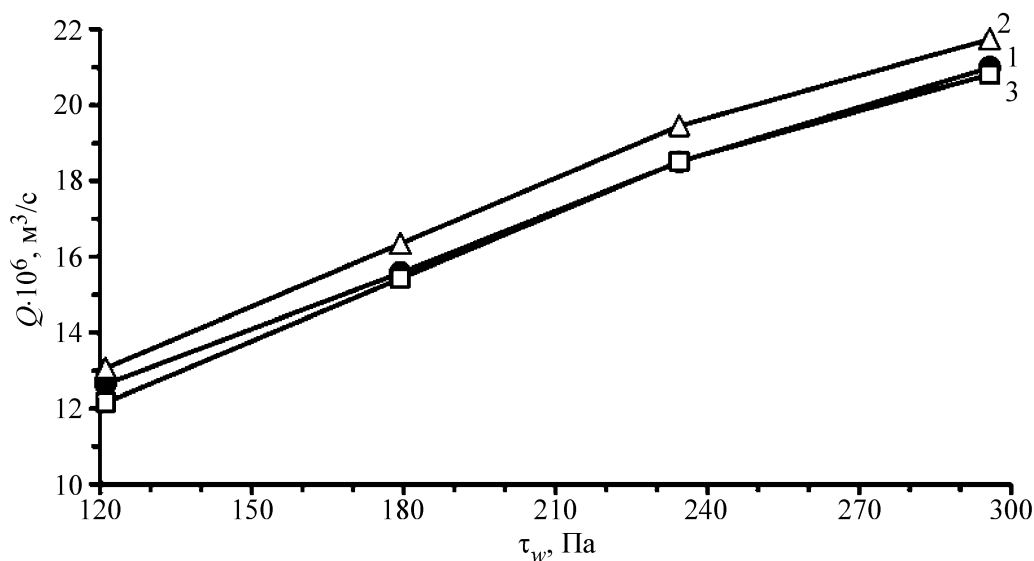


Рис. 2: Зависимость объемного расхода нефти ($\rho = 820 \text{ кг/м}^3$ и $\nu = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) в трубе ($R_w = 0.885 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $L = 0.76 \text{ м}$) от напряжения сдвига на стенке канала: 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты, рассчитанные по формуле (2); 3 – результаты, рассчитанные по формуле (4).

Заключение. Получена интегральная форма уравнения, позволяющая проводить расчет объемного расхода при турбулентном режиме течения жидкости с учетом не только вязкости, но и ее упругости, основанная на известных основных параметрах потока и цилиндрического канала установки, не прибегая к использованию эмпирических констант, как в используемых в настоящее время методах численного моделирования турбулентного течения.

Финансовая поддержка работ по госконтракту RFVEFI57514X0022 Минобрнауки России.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Л. Г. Лойцянский, *Механика жидкости и газа* (М., Наука, 1978).
- [2] Г. Шлихтинг, *Теория пограничного слоя* (М., Наука, 1974).
- [3] *Турбулентные сдвиговые течения* (перев. с англ. под ред. А. С. Гиневского) (М., Машиностроение, 1982).
- [4] Я. И. Френкель, *Кинетическая теория жидкостей* (Л., Наука, 1945).

[5] Ю. В. Лапин, Научно-технические ведомости № 2 (2004).

[6] Е. З. Рабинович, *Гидравлика* (М., Недра, 1980).

Поступила в редакцию 31 октября 2014 г.