

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛИТЕРИРОВАННЫХ ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Э. Х. ИСКЕНДЕРОВ, М. Ф. ШУКУРЛУ

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Баку, Азербайджан*

Аннотация. *Облитерированный (затухающий) поток является одним из частных случаев ламинарных течений. Хотя для частных случаев ламинарных течений с помощью различных экспериментов были подтверждены законы распределения сопротивления и скорости, облитерированные потоки, возникающие при больших перепадах давления в начале течения, требующие внесения ряда дополнительных поправок. Как известно, гидродинамика ламинарного режима движения изучена достаточно подробно. Однако гидродинамическое исследование частных случаев ламинарных течений в соответствии с теорией активного пограничного слоя, которая в настоящее время находит подтверждение в научной литературе, изучено сравнительно мало.*

В статье с учетом модели активного пограничного слоя облитерированные ламинарные потоки исследованы с гидродинамической точки зрения. Проведены расчеты для определения длины начального участка ламинарного потока, то есть участка до зоны стабилизации.

Ключевые слова: *ламинарные потоки, эпюра скорости, потери давления, гидравлические критерии, вязкость.*

Как известно, в существующих теориях основной модели движения вязкой жидкости являются положения о том, что статическое давление по сечению реальной жидкости остается постоянным. Однако исследования, проведенные в последние годы, показали, что такая модель движения подразумевает неравномерное распределение энергетического потенциала по сечению жидкости, что противоречит условию термодинамической устойчивости системы. В модели активного пограничного слоя, напротив, предполагается постоянство полного давления по сечению потока, то есть суммы статического и скоростного давлений. При этом статическое давление может изменяться в зависимости от скорости потока.

В экспериментальной практике встречаются также облитерированные потоки – частный случай ламинарных течений. В ламинарных потоках, происходящих в капиллярах или коротких трубках при высоких давлениях, характер падения давления резко отличается от закона Пуазейля. Так, при больших перепадах давления вдоль потока наблюдается нелинейное падение напора. Это объясняется тем, что хотя расход жидкости при ламинарном течении изменяется пропорционально перепаду давления, потеря энергии изменяется пропорционально квадрату этого перепада. Поэтому энергетические потери, приходящиеся на единицу расхода, возрастают пропорционально перепаду давления. Вследствие увеличения температуры жидкости, вызванного большим перепадом давления, ее вязкость снижается. С другой стороны, из-за падения давления вдоль потока вязкость жидкости также уменьшается по сравнению с начальными участками, в результате чего вязкость приобретает переменный характер по длине потока. В этом случае снижение вязкости происходит под воздействием двух факторов: если, в отличие от вязкости, повышение температуры вызывает увеличение расхода, то при росте давления, наоборот, расход уменьшается.

Таким образом, влияние этих двух факторов на расход проявляется как взаимно противоположное. Поскольку повышение температуры незначительно, полного компенсирования этого эффекта за счет интенсивной теплопередачи от стенки трубы не происходит. Такие течения могут наблюдаться в капиллярах под воздействием высоких перепадов давления, в высоконапорных гидравлических машинах и т.п.

Предположим, что ламинарное течение происходит между двумя параллельными плоскостями, и требуется исследовать влияние изменения вязкости, вызванного изменением температуры и давления, на течение. Примем, что при изменении температуры и давления плотность жидкости не меняется, и что $a/b \rightarrow 0$ (рис. 1).

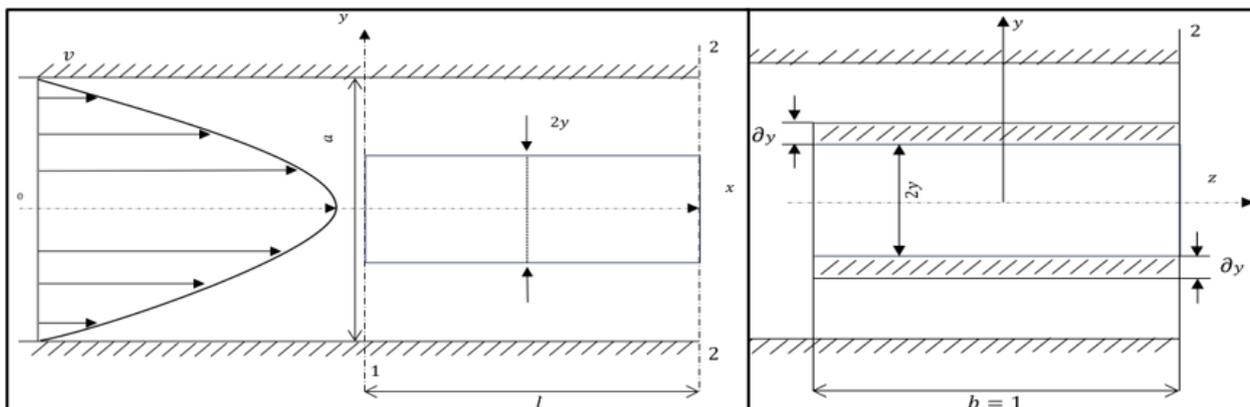


Рисунок 1. – Схема ламинарного течения между двумя параллельными плоскостями

Примем начало координат в центре зазора, расстояние между плоскостями (пластинами) обозначим через a , расстояние между двумя поперечными сечениями – через l , а ширину потока – равной 1 (единице). В результате рассматриваем объем жидкости в форме прямоугольного параллелепипеда размером $l \times 2y \times b$ (где $b = 1$).

Условие обеспечения равновесного движения объема жидкости вдоль оси можно записать следующим образом:

$$2y \times b \times \Delta P = -\mu \times \frac{\partial v}{\partial y} \times 2l \times b \quad (1)$$

Здесь ΔP – перепад давления на рассматриваемом сечении.

Если в выражении (1) при $y = a/2$ принять $v = 0$, то распределение скоростей можно записать следующим образом:

$$v = \frac{\Delta P}{2\mu} \times \left(\frac{a^2}{4} - y^2 \right). \quad (2)$$

Для элементарного расхода (q), приходящегося на единицу ширины потока, можно записать следующее выражение:

$$dq = v \times dS = \frac{\Delta P}{2\mu} \times \left(\frac{a^2}{4} - y^2 \right) \times 2dy = \frac{\Delta P \times a^3}{12\mu}. \quad (3)$$

Учитывая, что в выражении (3) полный расход обозначается как $Q = q \times b$ (при $b \neq 1$), для вычисления потерь давления получаем окончательное выражение:

$$\Delta P = \frac{12 \times \mu \times Q}{a^3 \times b}. \quad (4)$$

Теперь, чтобы оценить влияние температуры на вязкость, можно воспользоваться уравнением энергии, исходя из того, что энергия, затрачиваемая на трение (превращающаяся в тепло), за единицу времени равна увеличению тепловой энергии жидкости:

$$Q \times \rho \times c \times (t - t_1) = k \times (P_1 - P) \times Q. \quad (5)$$

Из последнего уравнения получаем:

$$(t - t_1) = \frac{k}{\rho \times c} \times (P_1 - P). \quad (6)$$

Здесь c – удельная теплоемкость жидкости (с/кг·°С);

P – давление (Па);

k – доля работы вязкостной силы, расходуемая на нагрев жидкости.

Если $k = 1$, то, поскольку отсутствует теплообмен со стенкой трубопровода, вся работа вязкостной силы полностью идет на нагрев жидкости. Если $k = 0$, то за счет интенсивного теплообмена со стенкой температура жидкости не увеличивается (течение изотермично).

С целью учета совместного влияния давления и температуры на вязкость можно использовать следующее известное выражение:

$$\mu = \mu \times e^{[a \times (P - P_1) - \lambda \times (t - t_1)]}. \quad (7)$$

Учитывая выражение (6) в (7), для определения вязкости получаем следующее выражение:

$$\mu = \mu_1 \times e^{[(P - P_1) \times (\alpha + \frac{k \times \lambda}{\rho \times c})]}. \quad (8)$$

Тогда можно записать также следующее выражение:

$$\frac{12 \times Q \times \mu_1}{a^3} dx = - \int e^{[(P - P_1) \times (\alpha + \frac{k \times \lambda}{\rho \times c})]} \times dP.$$

Интегрируя последнее выражение, получаем:

$$\frac{12 \times Q \times \mu_1 \times x}{a^3} dx = - \frac{1}{\alpha + \frac{k \times \lambda}{\rho \times c}} \times e^{[(P - P_1) \times (\alpha + \frac{k \times \lambda}{\rho \times c})]} + c.$$

Поскольку при $x = 0$ давление $P = P_1$, то получаем:

$$c = - \frac{1}{\alpha + \frac{k \times \lambda}{\rho \times c}}.$$

Поскольку при $x = 1$ давление $P = P_{iz} = 0$, в результате получаем:

$$Q = \frac{a^3}{12 \mu_1 \times l} \times \frac{1}{\alpha + \frac{k \times \lambda}{\rho \times c}} \times \left[e^{[P_1 \times (\alpha + \frac{k \times \lambda}{\rho \times c})]} - 1 \right]. \quad (9)$$

Здесь: μ_1 – вязкость жидкости в начале потока (при $P = P_1$ и $t = t_0$). Эту вязкость также можно выразить через μ_0 :

$$\mu_1 = \mu_0 \times e^{a \times P} \quad (10)$$

В частном случае, если течение изотермическое ($k = 0$), то для расхода жидкости уравнение (10) примет следующий вид:

$$Q = \frac{a^3}{12\mu_0 \times l \times \alpha} \times (1 - e^{-\alpha \times P_1}). \quad (11)$$

Для определения относительного расхода (\bar{Q}) разделим выражение (11) на $Q_0 = \frac{P_1 \times a^3}{12\mu_0 \times l}$ (когда $\mu = \mu_0 = const$):

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{e^{-\alpha \times P_1}}{P_1 \times (\alpha + \frac{k \times l}{\rho \times c})} \times \left[e^{P_1 \times (\alpha + \frac{k \times l}{\rho \times c})} - 1 \right] \quad (12)$$

На основе последнего уравнения были проведены расчеты. Расчеты выполнены для различных давлений (P_1) ($0 - \text{дан } 800 \text{ kq/sm}^2 - \text{дәк}$), при значениях $\alpha = \frac{1}{430} \frac{\text{sm}^2}{\text{kq}}$, $\lambda = \frac{1}{36} \frac{1}{^\circ\text{C}}$, $c = 2.1 \frac{\text{kс}}{\text{kq} \times ^\circ\text{C}}$, $\rho = 850 \frac{\text{kq}}{\text{m}^3}$. В результате были построены зависимости $\bar{Q} = f(P_1)$ для случаев $k = 1$ və $k = 0$ (рис. 8).

На рисунке 2 показано, что $k = 1$ соответствует отсутствию теплообмена со стенкой трубы, а $k = 0$ характеризует изотермическое течение.

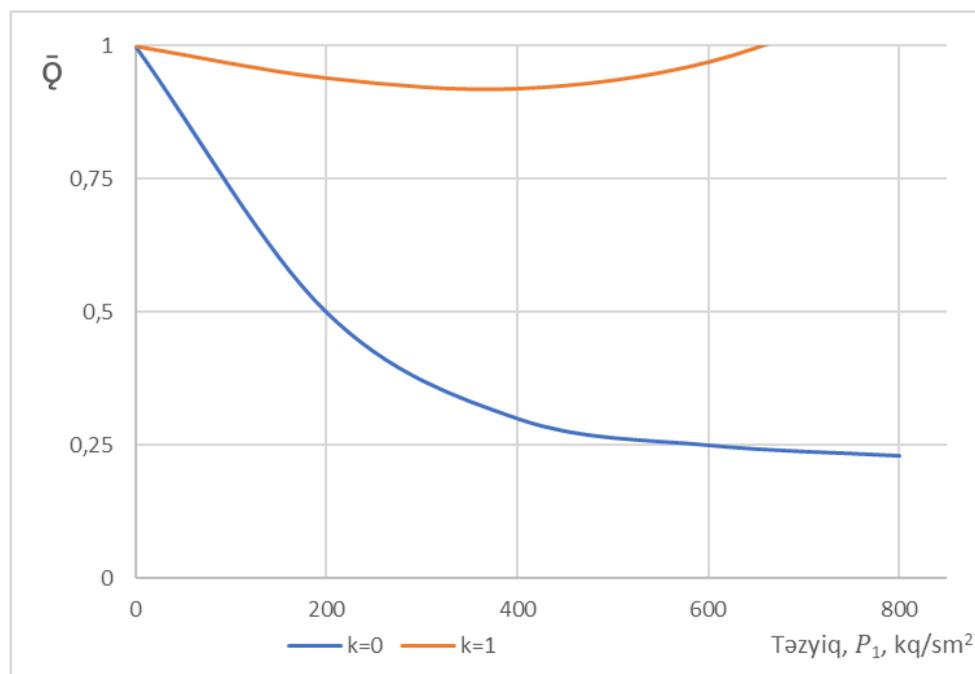


Рисунок 2. – Влияние изменения давления (вязкости) на расход $k = 1$ – теплообмен снаружи отсутствует; $k = 0$ – для изотермического процесса

Как видно из рисунка 2, наиболее вероятным считается режим течения, соответствующий случаю $k = 0$, когда влияние изменения температуры имеет максимальную роль.

Выводы.

1. В рамках высокоактивной модели пограничного слоя проведено гидродинамическое исследование частного случая ламинарных течений – облитерированного потока, возникающего при перепадах давления.

2. Установлено, что в облитерированных ламинарных потоках при больших перепадах давления расход жидкости пропорционален перепаду давления, тогда как потеря энергии изменяется пропорционально квадрату перепада давления. Влияние факторов температуры и давления на расход проявляется как противоположное по направлению. В таких потоках при небольшом увеличении температуры полная компенсация не происходит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Iskandarov, E.Kh., Ismayilova, F.B., Shukurly, M.F., Ismayilova, P.Sh. Changes in energy characteristics of pipeline systems considering hydrodynamic loads. *SOCAR Proceedings*, 2024, (2), p. 105–108. DOI: 10.5510/OGP20240200974.
2. Ismayilov, G., Iskandarov, E., Farzalizade, Z., Abishova, R. SOME ASPECTS OF OPERATIONAL RISK MANAGEMENT IN OIL AND GAS FIELD PIPELINES. *Reliability: Theory and Applications*, 2023, 18(Special Issue 5), p. 565–568. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-575-565-568.
3. G.G. Ismayilov, É.K. Iskenderov, F.B. Ismayilova, G.A. Zeinalova. Controlled methods to suppress pressure pulsations in multiphase pipelines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, 93 (1), pp. 216–222.
4. F.B. Ismayilova, G.G. Ismayilov, E.K. Iskenderov., K.T. Dzhakhangirova construction of a mathematical model of the flow characteristics of a multiphase pipeline with regard for the phase transitions in it. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023, 96 (1), 73–79.
5. Yang, R., Wang, H., Zhong, D., Ge, N. Effects of Frequency and Amplitude of Local Dynamic Hump and Inlet Turbulence Intensity on Flow Separation Control in Low-Pressure Turbine. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2023, 24(3), p. 641–651. DOI: 10.1007/s42405-023-00588-2.
6. Daniely Amorim Neves, Saon Crispim Vieira, Saon Crispim Vieira, Juliana Cenzi, ... Adriano Todorovic Fabro. Identification of the flow pattern from the experimental pressure signal in horizontal pipes carrying two-phase flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Volume 154, May 2024, 111141. doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2024.111141.
7. G.G. Ismayilov, V.H. Nurullayev, E.K. Iskenderov. The role of saturated vapor pressure of cavitations in the process of oil supply. *Bull. Environ., Pharmacol. Life Sci.*, 2016, 5, 15–24.