

В.Г. Перепелица, д-р техн. наук, проф.
(ИГТМ НАН Украины),
И.А. Ефремов, канд. техн. наук
(АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»)

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СИЛ ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

Викладено результати досліджень сил в'язкого тертя при русі газових потоків, які свідчать про різноманіття умов їх течії. Встановлено, що фізична сутність процесів, що досліджуються, залишається незмінною: при встановленій течії зберігається баланс сил, які забезпечують і перешкоджають рухові флюїдів. Знання вказаних особливостей дозволяє краще зрозуміти фізичну природу процесів, які відбуваються, і запобігти помилкам при виконанні відповідних розрахунків.

PECULIARITIES OF VISCOUS-FRICTION FORCES AT THE TRAVELING GAS FLOWS.

This article shows results of viscous-friction force research at the gas in moving that have proved great variety of the gas-flowing conditions. However, it has been ascertained that physical prerequisites of the process under the research are invariable, i.e. balance of the forces facilitating and hampering the fluid flowing is invariable at steady-state gas flowing. Knowledge of these peculiarities contributes to better understanding of physical nature of the processes and helps to avoid errors in calculations.

В соответствии с [1] силы, обеспечивающие и препятствующие движению, подразделяются на объемные и поверхностные. Первые – это силы тяжести и инерции. Вторые – силы давления и трения. Наибольшим разнообразием отличаются силы трения, которые проявляются в результате возникновения касательных напряжений при движении различных сред и потоков. В состоянии покоя касательные напряжения возникают только в твердых телах при их деформировании в результате приложения неравномерной внешней нагрузки.

При движении потока реальной жидкости или газа возникают силы вязкого трения на границе раздела двух фаз и внутри самого потока.

Потери давления на трение отличаются тем, что они рассредоточены по всему пути движущегося потока. Лобовые и местные сопротивления локальны.

Согласно закону Ньютона в движущихся реальных потоках касательные напряжения определяются равенством:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} \quad (1).$$

Знак «минус» свидетельствует, что эта сила действует в противоположном направлении движению потока.

В инженерных расчетах используют другую форму записи:

$$\tau = \psi \frac{\rho u^2}{2}, \quad (2)$$

где ψ – безразмерный коэффициент трения; u – осредненная скорость потока.

При обтекании твердых тел потоком между ними возникает аэродинамическое силовое взаимодействие за счет действия сил давления и трения. Причем закономерности взаимодействия тел с потоком не зависят от того, движется ли тело в неподвижной среде или поток с той же скоростью обтекает неподвижное тело. Этот принцип обратимости используется, в частности, в аэродинамических трубах.

На рис. 1 показаны линии тока и распределение скоростей при обтекании тела потоком. Линии тока отражают направление движения отдельных струек, а вектор скорости – направление и величину. В невозмущенном потоке скорость по всему сечению одинаковая. При обтекании тела картина иная. На поверхности тела скорость равна нулю. На удалении – равна скорости невозмущенного потока. По мере приближения к телу скорость не уменьшается, а наоборот возрастает, несмотря на то, что тело оказывает аэродинамическое сопротивление движущемуся потоку.

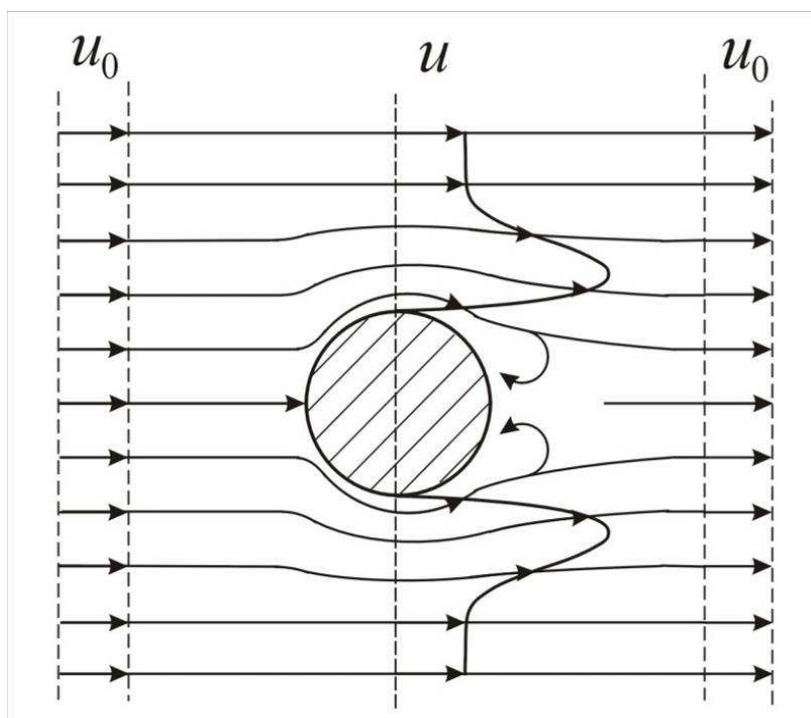


Рис. 1 – Распределение скоростей при обтекании тела потоком

Чтобы понять причину, необходимо воспользоваться уравнением неразрывности, согласно которому постоянным сохраняется расход воздуха, а переменными являются скорость и площадь поперечного сечения потока. Тело, находящееся в потоке, перекрывает часть его поперечного сечения, из-за этого скорость возрастает. Данный вывод имеет непосредственное отношение к распределению сил по поверхности тела.

При взаимодействии тела с потоком на его поверхности, как упоминалось, возникает аэродинамическая сила за счет действия сил давления и трения.

Если действующие силы разложить по осям координат, сообразуясь с направлением набегающего потока, получим их составляющие, каждая из которых имеет свой физический смысл.

$$R_x = c_x S \frac{\rho u^2}{2}; \quad R_y = c_y S \frac{\rho u^2}{2}; \quad R_z = c_z S \frac{\rho u^2}{2} \quad (3)$$

где R_x - представляет собой лобовое сопротивление, R_y - боковая сила, R_z - подъемная сила.

Лобовое сопротивление зависит от вязкости потока, формы тела, его скорости, то есть от параметров, которые входят в формулу для определения числа Рейнольдса. Коэффициент лобового сопротивления тела, находящегося в ламинарном потоке, согласно формуле Стокса равен $c_x = 24 / Re$. В турбулентном потоке при $Re = 10^3 \div 10^5$, $c_x = 0,4-0,48$. При $Re > 10^5$, коэффициент c_x снижается до 0,2. Это связано с переходом ламинарного пограничного слоя обтекаемого тела в турбулентный режим.

На рис. 2 показан качественный характер распределения сил статического давления по поверхности шара, обтекаемого потоком.

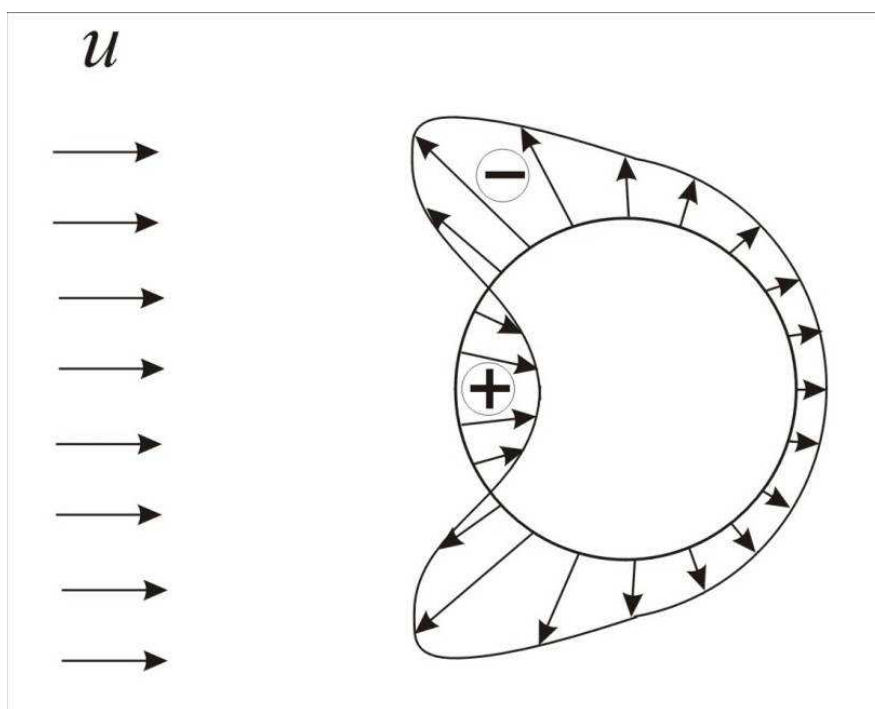


Рис. 2 – Распределение сил по поверхности тела при обтекании его потоком

Статическое давление в атмосфере равно барометрическому. Знак «плюс» с наветренной стороны тела означает, что давление оказывается больше барометрического. По бокам шара статическое давление становится меньше барометрического (знак «минус»).

Полное давление равно сумме статического и скоростного давления. С наветренной стороны поток тормозится, и скоростной напор переходит в статиче-

ское давление, которое испытывает тело. По бокам поток ускоряется, за счет чего падает статическое давление по сравнению с атмосферным.

Форма поперечного сечения горных выработок шахт далеко неравнозначна круглому сечению труб. Поэтому в формуле

$$\Delta P_{TP} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент трения; d , l – диаметр и длина трубопровода; $\rho u^2 / 2$ – скоростной напор.

Вместо диаметра вводят отношение периметра выработки к площади ее поперечного сечения Π / S :

$$\Delta P_{TP} = \psi \frac{\Pi l}{S} \cdot \frac{\rho u^2}{2}, \quad (5)$$

Плотность и кинематическая вязкость воздуха в шахтах остаются практически неизменными. Определяющим фактором при расчетах вентиляции шахт является расход, а не скорость течения воздушного потока. Поэтому расчетную формулу (5) записывают иначе:

$$\Delta P_{TP} = \alpha \frac{\Pi l}{S^3} Q^2, \quad (6)$$

где $\alpha = \psi \frac{\rho}{2}$ – аэродинамический коэффициент трения, который имеет размерность плотности, кг/м³.

Сомножители перед Q в (6) названы аэродинамическим сопротивлением выработки

$$R = \alpha \frac{\Pi l}{S^3}, \quad (7)$$

которое имеет размерность $\frac{\text{Па} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^6}$.

Форма записи уравнения (6) упрощается:

$$P_{TP} = RQ^2 \quad (8)$$

В практике расчета вентиляции шахт принято выражать аэродинамическое сопротивление выработок в киломюргах ($\kappa\mu$) $1 \kappa\mu = 9,81 \frac{\text{Па} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^6}$. Сопротивлени-

ем в 1 киломюрг обладает выработка, по которой при $\Delta P = 1$ мм вод.ст. (дПа) проходит $1 \text{ м}^3/\text{с}$ воздуха.

Коэффициент аэродинамического сопротивления трения α выражает удельное сопротивление горной выработки при такой ее длине, для которой $l/S^3 = 1$. Его связь с безразмерным коэффициентом трения λ имеет вид:

$$\alpha = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (9)$$

Для нормальных условий оно будет равно

$$\lambda = 6,54\alpha, \quad (10)$$

где численный показатель 6,54 имеет размерность $\text{м}^3/\text{кг}$ или в системе СИ $\text{м}^2 / \text{Па} \cdot \text{с}^2$.

Уравнение (8) справедливо для турбулентного режима течения воздушного потока. При ламинарном течении (например, фильтрация через обрушенные горные породы в выработанном пространстве) показатель степени в (8) будет равен единице. Тогда данное выражение примет вид:

$$P_{TP} = RQ. \quad (11)$$

Изменится и размерность аэродинамического сопротивления $\left[\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^3} \right]$.

Еще более сложны для сопоставительного анализа уравнения движения фильтрационных потоков через пористые среды. Обычно их записывают в виде известной формулы Дарси. Для одномерной ламинарной фильтрации вязкой несжимаемой жидкости она имеет вид:

$$k = \frac{\mu l Q}{S(P_1 - P_2)}, \quad (12)$$

где k – коэффициент проницаемости; $\mu = \nu\rho$ – абсолютная вязкость; l – путь фильтрации; Q – расход; S – площадь фильтрационного потока.

Здесь понятие – коэффициент трения – вовсе отсутствует, хотя разность статических давлений, под действием которых движется фильтрационный поток ($P_1 - P_2$), затрачивается именно на преодоление сил трения.

Записывая формулу (12) относительно ΔP_{TP} будем иметь:

$$\Delta P_{TP} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\mu l Q}{S}. \quad (13)$$

То есть коэффициент проницаемости является обратной величиной коэффициента трения. Он также имеет размерность. В системе СИ – м^2 . По сути это площадь просветности поровых каналов. Абсолютные значения ее чрезвычайно малы. В технической системе единиц коэффициент проницаемости измеряют в Дарси. $1\text{Д}=10^{-12} \text{ м}^2$.

Кинематическая вязкость метана при нормальных условиях равна $\nu=1,65 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

В нефтегазовой отрасли промышленности общепринята классификация пород-коллекторов по численным значениям коэффициентов их проницаемости [2], представленная в табл.1.

Таблица 1 – Классификация пород-коллекторов по их проницаемости

Класс пород-коллекторов	Качественная характеристика проницаемости	Значения коэффициента проницаемости	
		мд	м^2
1	Очень хорошо проницаемые	> 1000	> 10^{-12}
2	Хорошо проницаемые	100-1000	10^{-12}
3	Средне проницаемые	10-100	10^{-13}
4	Слабо проницаемые	1-10	10^{-14}
5	Практически не проницаемые	< 1	$\leq 10^{-15}$

Согласно данной классификации углепородная толща Донбасса непроницаема, поскольку фактические значения коэффициентов ее газопроницаемости на порядки ниже, составляя в среднем для угольных пластов $10^{-2}-10^{-4}$ мд или $10^{-17}-10^{-19} \text{ м}^2$, для песчаников $10^{-4}-10^{-6}$ мд. Подобная оценка субъективна и оправдана для отраслей промышленности, продуктом добычи которых является флюид. Техничко-экономически обоснованное расстояние между смежными скважинами должно быть не менее 500 м. Очевидно, чем меньше проницаемость нефтегазоносных пластов, тем меньше объем добычи. Возрастают капитальные и эксплуатационные затраты, в том числе на технические мероприятия по увеличению проницаемости пласта.

В угольной промышленности объектом добычи является твердое полезное ископаемое, а метан, насыщающий углепородный массив, оказывается негативным фактором.

Известно, что природная метаноносность угольных пластов не превышает $40 \text{ м}^3/\text{т}$, а относительная метанообильность шахт может быть в 5-10 раз выше. Это обусловлено фильтрацией метана в атмосферу выработок из углевмещающей толщи в зоне влияния горных работ. Причиной тому несколько факторов при столь низкой газопроницаемости: большая площадь дренирования, сравнительно небольшой путь фильтрации и значительный градиент давления газа (до 10 МПа) на границах контура питания. Кроме того, в зоне разгрузки коэффициент газопроницаемости возрастает на два порядка.

Существует еще одна квалификационная шкала [3], которая подразделяет фильтрационные каналы по размерам пор (см. табл.2).

Таблица 2 – Распределение пор по поперечным размерам

Класс	Характеристика пор	Размеры	
		$\overset{0}{A}$	м
1	Микропоры	$\leq 10^2$	$\leq 10^{-8}$
2	Переходные	10^3	10^{-7}
3	Субмакропоры	10^4	10^{-6}
4	Макропоры	10^5	10^{-5}
5	Видимые поры	10^6	10^{-4}
6	Трещины	$\geq 10^7$	$> 10^{-3}$

Согласно экспериментальным данным определения дифференциальной пористости выбросоопасных песчаников Донбасса объем микропор не превышает 15 %. Наибольшее количество приходится на переходные и субмакропоры (65-83 %). В угольных пластах объем микропор выше, чем в песчаниках. Эти данные согласуются с внутренней удельной поверхностью и сорбционной емкостью угольных пластов и песчаников. При равной величине их абсолютной пористости (10-12 %) внутренняя удельная поверхность песчаников находится в пределах 0,7-2,9 м²/г (лишь в отдельных образцах достигая 5 м²/г), а их сорбционная емкость составляла 0,25-0,65 см³/г. В угольных пластах эти параметры на два порядка выше.

Существует еще один аспект изучаемого вопроса. Фильтрующимся потоком через углевлещающую толщу является метан. Давление газа в массиве достигает 10 МПа, то есть перепад давления на контуре питания составляет 100-кратную величину. Примерно во столько же раз изменяется его плотность по пути движения потока. Определенным образом (значительно меньше) меняется его вязкость. Уравнение Дарси для вязкого сжимаемого газа записывается следующим образом

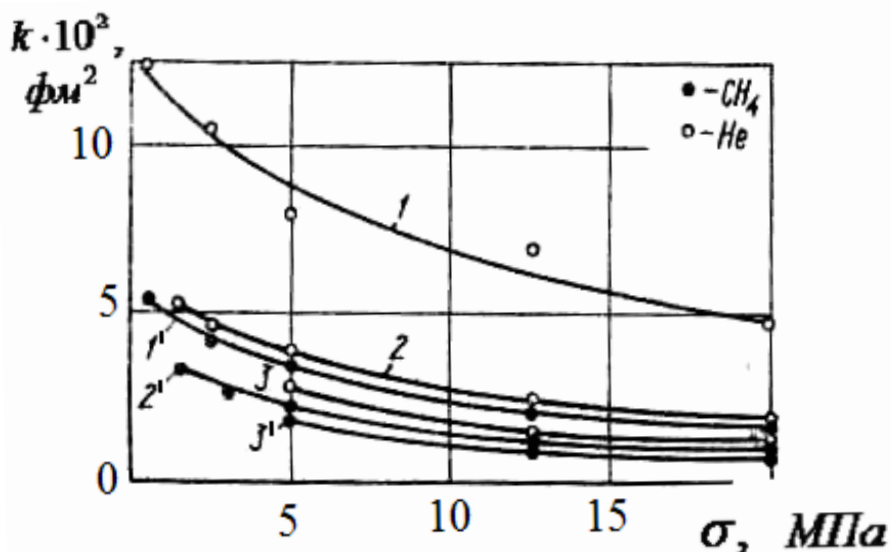
$$k = \frac{2\mu l Q P_B z}{S(P_1^2 - P_2^2)}, \quad (14)$$

где z - коэффициент сжимаемости газа. Для метана при давлении 10 МПа он равен $z=0,92$.

Напряжения в уравнение Дарси в явном виде не входят, но коэффициент проницаемости от них существенно зависит. Чтобы установить качественную и количественную взаимосвязь между параметрами $k(\sigma)$ подобные исследования проводились многократно.

Азот, воздух и метан незначительно отличаются между собой по кинематической вязкости (1,49; 1,51; 1,65) $\cdot 10^{-5}$ м²/с по сравнению с гелием – $10,9 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Метан насыщает угленосную толщу и может в ней находиться в свободном и сорбированном состоянии. Гелий – инертный газ.

На рис. 3 изображены пределы и характер изменения проницаемости образцов песчаника по метану и гелию в функции усилия гидрообжима и градиента давления газа на образце.



1, 1' - при градиенте давления газа $\Delta P = 0,1$ МПа;

2, 2' - соответственно при $\Delta P = 1,0$ МПа; 3, 3' - при $\Delta P = 3,0$ МПа

Рис. 3 – Изменение проницаемости керна песчаника по гелию и метану при изменении напряженного состояния

Гидрообжим образца на установке УИПК-1м моделирует его напряженно-деформированное состояние и позволяет оценить зависимость $k(\sigma)$. Изменяя градиент давления газа, можно судить о соотношении $k(\Delta P)$. Указанные параметры изменяли в пределах: напряжение – от 0,5 до 20 МПа, ΔP - от 0,1 до 3,0 МПа.

Из рис. 3 видно, что при $\sigma = 0,5$ МПа и $\Delta P = 0,1$ МПа, коэффициент газопроницаемости образца песчаника равен: по гелию $k_{He} = 12,5 \cdot 10^{-2}$ фм², а по метану $k_{CH_4} = 5,4 \cdot 10^{-2}$ фм², то есть отличались более чем в два раза. Это обусловлено соответствующими отличиями их кинематической вязкости.

Примерно такое же соотношение сохранялось и при других значениях σ . Так, например, при $\sigma = 20$ МПа и $\Delta P = 0,1$ МПа проницаемость оказалась равной $k_{He} = 4,8 \cdot 10^{-2}$ фм², $k_{CH_4} = 1,6 \cdot 10^{-2}$ фм².

Снижение проницаемости с увеличением напряженного состояния образца коллектора $k(\sigma)$ предсказуемо. Но столь же существенное изменение $k(\Delta P)$ при прочих равных условиях требует дополнительного анализа причин, его побуждающих.

При высоком среднем давлении длина свободного пробега молекул значительно уменьшается. Когда диаметр капилляра оказывается соизмеримым с длиной среднего свободного пробега молекул газа, являющейся функцией раз-

мера молекулы и кинетической энергии газа, происходит его проскальзывание.

На рис. 4 показана экспериментальная зависимость проницаемости песчаника по гелию и метану в функции градиента давления на образце (а) и обратной величины средних давлений газа (б) при различных значениях σ . Сопоставляя характер изменения проницаемости в функции $k(\Delta P)$ и $k\left(\frac{1}{P}\right)$, нетрудно видеть принципиальные различия рассматриваемых зависимостей.

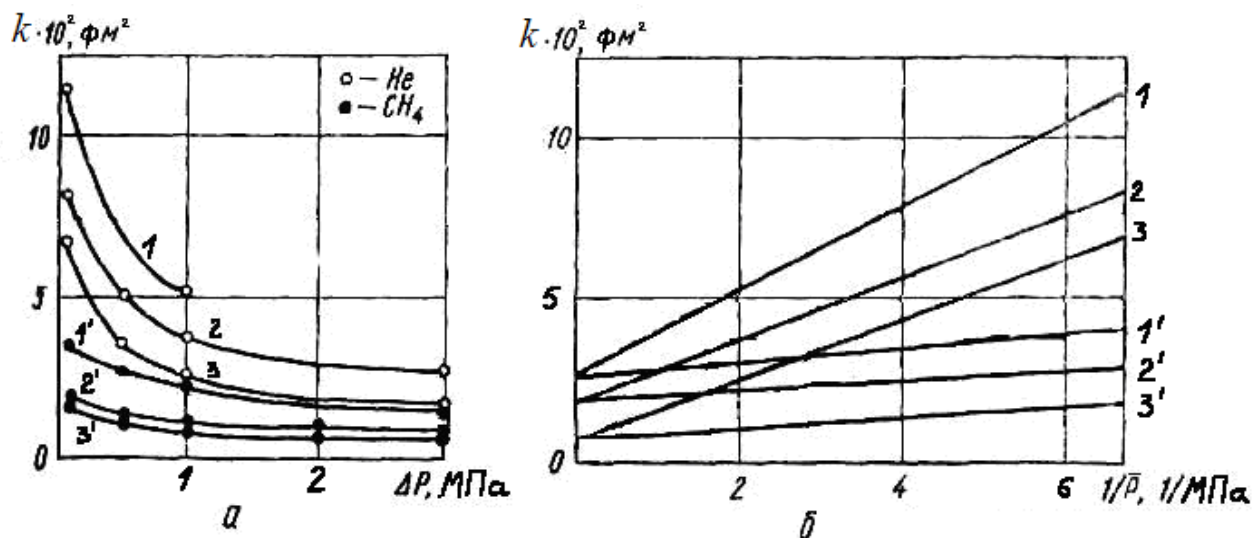


Рис. 4 – Изменение проницаемости керна песчаника в функции градиента (а) и обратной величины давления газа (б) при различном напряженном состоянии: соответственно 15, 50, 125, 200 кг/см²

Если $k(\Delta P)$ выражается криволинейной зависимостью, то функция $k\left(\frac{1}{P}\right)$ трансформируется в прямую линию. Причем различия касаются не только ее вида. Отрезок, отсекаемый на оси ординат, представляет собой численную величину проницаемости k_∞ при $\Delta P \rightarrow \infty$ или проницаемость среды для несжимаемой жидкости.

Отличие проницаемости среды по гелию и метану при прочих равных условиях тем больше, чем меньше градиент давления газа на образце. При $\Delta P \rightarrow \infty$, независимо от состава газов, величина их проницаемости будет одинаковой. Ошибка при определении проницаемости среды без учета влияния градиента давления газа в некоторых случаях может достигать трех- и четырехкратной величины.

Скорость течения газа в тонком капилляре выше, чем скорость жидкости, так как газ как бы скользит вдоль стенок, а жидкость, взаимодействуя со стенкой в краевом слое, плотно прилипает к ней. Поправка на скольжение при движении газа должна вводиться, если радиус капилляров равен средней свободной длине пути газовой молекулы.

Превышение скорости течения газа в связи со скольжением ожидается, если радиус пор в 100 раз больше средней свободной длины молекулы. Отклонение от закона Дарси наблюдается для газа в порах диаметром $< 10^{-3}$ см. С повышением давления граница перемещается в сторону уменьшения диаметра.

Существует еще один вид течения «с проскальзыванием». Он проявляется в совершенно иных условиях: в разреженных газах и называется «Кнудсеновским» течением. При нормальном давлении величина свободного пробега молекул составляет миллионные доли сантиметра. При понижении плотности газа свободный пробег молекул возрастает обратно пропорционально плотности, и если он становится соизмеримым с характерными размерами потока, то дискретная структура газа начинает сказываться на законах газовой динамики и теплообмена.

Имеющиеся теоретические и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при очень малых значениях числа Кнудсена ($K < 0,01$) газ ведет себя как сплошная среда. В интервале значений числа Кнудсена $0,01 < K < 0,1$ можно также пользоваться уравнениями газовой динамики сплошной среды, однако при этом следует в граничные условия на твердой поверхности вводить поправку на так называемое «скольжение».

При очень больших значениях числа Кнудсена ($K > 1$) пограничный слой у поверхности тела не образуется, так как ре-эмитированные (отраженные) поверхностью тела молекулы сталкиваются с молекулами внешнего потока на далеком от него расстоянии, т. е. тело не вносит искажений в поле скоростей внешнего потока. Для этого режима «свободномолекулярного течения газа» трение и теплообмен на поверхности обтекаемого тела рассчитываются из условия однократного столкновения молекул газа с поверхностью.

Разнообразные формы записи коэффициентов трения свидетельствуют о многообразии условий течения потоков. Однако физические предпосылки остаются неизменными: при установившемся течении сохраняется баланс сил, обеспечивающих и препятствующих течению флюидов. Знание указанных особенностей помогает лучше понять их физическую природу и избежать ошибок при выполнении соответствующих расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелев Г.А., Перепелица В.Г. Фильтрация газа в шахтах – К.: Наукова думка, 2010. – 295 с.
2. 146. Ханин, А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение / А.А. Ханин.- М.: Недра, 1969.- 366 с.
3. Ходот, В.В. Метаноемкость выбросоопасных пород Донбасса и максимальная энергия газа, освобождающаяся при их разрушении и измельчении / В.В. Ходот, Ю.С. Премыслер // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело.- 1969.- № 11/12.- С. 29-34.