

В.Ц. Ванчиков¹, Ю.Ф. Мухопад²

¹ Восточно-Сибирский филиал Российского государственного университета права, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ИЗМЕРЕНИЕ УТОЛЩЕНИЯ ГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРАХ

Аннотация. Модификация прибора сталагмометра с целью измерений микроскопического уменьшения просвета капилляров в случае эффекта адгезии частиц потока к твердым поверхностям. Приведены результаты измерения утолщения граничного слоя жидкости, основанные на результатах прямых измерений времени наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости, с которыми определяемая величина связана функциональной зависимостью.

Ключевые слова: сталагмометр, перколяция, формпараметр, пикнометр, облитерация, фильтрационный эффект.

MEASUREMENT THICKENING OF THE BOUNDARY LAYER LIQUID IN THE CAPILLARY

V.Ts. Vanchikov¹, Yu.F. Mukhopad²

¹ East Siberian branch of the Russian state University of law, Irkutsk, Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. Modification stalagmometry instrument to measure microscopic capillary lumen reduction effect in the case of adhesion of the particles flow to solid surfaces. The results of measurements of the boundary layer thickening fluid based on direct measurements of the vessel filling dimensional constant and small capacity, which determined the value associated functional dependence.

Key words: stalagmometry, percolation, the form parameter, pycnometer, obliteration, filtration effect.

1. Введение

В последнее время значительно возрос интерес к свойствам тонких пленок жидкости в капиллярах не только из-за значительных перспектив их практического применения в нанотехнологии, но и в связи с тем, что малые частицы (кластеры), из которых формируется граничный слой, являются мезоскопическими объектами, т.е. их можно рассматривать как промежуточное звено между классическим макромиром и квантовым микромиром. Несмотря на большое количество исследований различных свойств малых частиц их критические свойства до сих пор практически не изучены [1]. Среди этих исследований наибольшую популярность получили работы, основанные на идеях перколяционных переходов.

Явления, описываемые теорией перколяции, относятся к так называемым критическим явлениям. Эти явления характеризуются критической точкой, в которой определенные свойства системы резко меняются. В связи с этим можно предположить, что турбулентный режим перехода упорядоченных элементарных вихрей, непрерывно распределенных в области течения, или ламинарный режим перехода этих вихрей в течение, сопровождаемое эффектом адгезии частиц потока к стенкам капилляров, имеют точки соприкосновения с теорией перколяции.

С точки зрения физики, перколяция – это геометрический фазовый переход [2]. Так, физические свойства кристаллов определяются геометрией кристаллических решеток. Точно так же геометрия связанных элементов вблизи порога перколяции одинакова. Несмотря на то, что в теории перколяции получен ряд строгих результатов, в ее применении достигнуты значительные успехи, она находится еще в процессе становления, многое еще предстоит понять, доказать, применить.

И, наконец, вопрос о причинах возникновения «фильтрационного эффекта» в разнообразных проницаемых материалах или облитерации капилляров является предметом дискуссии и споров [3]. Прекращение течения в капиллярах может вызываться двумя причинами [4]. Первая из них сводится к наличию содержащихся в жидкости твердых частиц размеров порядка микрометров. Эти частицы постепенно полностью закрывают просвет капилляров. Первая причина устраняется при очистке жидкости от твердых примесей. В противоположность этому вторая причина не устраняется при тщательной очистке и обусловлена силами притяжения Ван-дер-Ваальса. Эффект адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров, вызванный Ван-дер-Ваальсовыми силами, приводит к процессу утолщения неподвижного граничного слоя жидкости. С течением времени этот микропроцесс приводит к закрытию просвета капилляров.

Дальнейшие исследования в этой области потребовали разработки экспериментального метода, при помощи которого можно довести регистрацию вышеуказанного микропроцесса до практически наблюдаемых значений. Однако задача создания прибора, посредством которого становятся доступны наблюдению явление прилипания частиц потока к стенкам капилляров, сопряжено со следующими трудностями.

Это, прежде всего, неразличимость частиц потока и частиц неподвижного граничного слоя жидкости в капиллярах. Микроскопические поперечные размеры тонкой пленки жидкости, а также вышеуказанная неразличимость частиц не позволяет прямым измерением определить толщину граничного слоя.

Другим непреодолимым препятствием измерению являются микроскопические размеры частиц потока жидкости, которые постепенно, слой за слоем, приликая к стенкам трубок, изменяют просвет капилляров на микроскопическую величину. Этот процесс приводит к микроскопическому уменьшению поперечного (эффективного) сечения капилляра, что неразрывно связано с микроскопическим уменьшением расхода жидкости. Столь малое уменьшение расхода жидкости в опытах неизмеримо (хотя в принципе существует). Таким образом, выясняется, что непосредственное наблюдение в макроскопической области микроскопического уменьшения расхода жидкости (в случае эффекта адгезии частиц потока к стенкам капилляров) – очень трудная задача, которая, однако, была успешно решена в работе [5]. Кроме того, при постановке измерительного эксперимента наблюдаемость явления маскируется малой величиной сдвиговой устойчивости тонкой пленки жидкости, обусловленной малостью значений адгезионных сил частиц жидкости и микрочастиц твердой поверхности. Это осложнение преодолевается подбором сопоставимого со значением сдвиговой прочности граничного слоя жидкости сдвигового усилия гидродинамического потока.

2. Метод измерения утолщения граничного слоя жидкости в капиллярах

Для определения процесса утолщения граничного слоя жидкости в капиллярах наиболее удобным является метод, предложенный в работе [6]. Основная идея этого метода заключается в том, что, если с течением времени прилипания частиц гидродинамического потока к стенкам капилляров слой за слоем макроскопически утолщает неподвижную пленку жидкости, то простое увеличение длительности наблюдения за расходом с помощью мерного сосуда весьма малой вместимости допускает экспериментальную демонстрацию постепенного закрытия просвета капилляров. То есть постепенное замедление времени наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости, отражающее постепенное уменьшение расхода, связано функциональной зависимости с процессом сужения просвета

капилляров. Иначе говоря, непрерывное микроскопическое уменьшение расхода при эффекте адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров происходит как следствие непрерывного уменьшения внутреннего пространства капиллярной трубки, что связано с непрерывным увеличением времени наполнения мерного сосуда. Таким образом, эта идея (принцип) исходит из внутреннего механизма взаимосвязи природы пространственно-временных событий, сформулированных еще Г. Галилеем и П. Ферма.

Так, например, П. Ферма трансформировал принцип объяснения законов прохождения световых лучей в различных средах с помощью правила от «кратчайшего пути» к «наименьшему времени». В этой связи, на основании работы [5], стоит указать на плодотворность и фундаментальность такого подхода, предоставляющего возможность вывода основных положений исследования из первых принципов, также возможность их изложения без громоздких математических выражений, выражающих тем самым принцип простоты законов природы.

Между тем при расчете гидравлических систем наибольшее распространение получил объемный расход

$$Q = vS, \quad (1)$$

где v – средняя скорость, условно принятая существующим в каком-то промежуточном слое потока реальной жидкости, S – площадь поперечного сечения (просвет) капилляра. Таким образом, эта зависимость связывает геометрические и кинематические параметры потока реальной вязкой жидкости в капиллярах.

В дополнение к этому, одним из хорошо известных следствий уравнений Навье-Стокса является закон Гагена-Пуазейля, связывающий объемный расход Q в стационарном прямолинейном течении по длинной круглой капиллярной трубке с градиентом давления в осевом направлении:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L}, \quad (2)$$

где R – радиус капилляра, Δp – перепад давления, μ – динамический коэффициент вязкости, L – длина капилляра. В отличие от уравнения (1) выражение (2) дополнительно содержит динамическую характеристику течения, характеристику физического свойства жидкости и геометрический параметр, характеризующий длину граничной поверхности. Однако формула (2) не учитывает, что жидкость приобретает кинетическую энергию.

Поскольку приведенные формулы имеют не только общезначимый характер, но и также взаимно дополняют друг друга, то в работе [5] показана их полезность для рациональной постановки опытов по измерению процесса утолщения граничного слоя жидкости и теоретического анализа. Иначе говоря, эти формулы в отдельности не дают исчерпывающей информации об эффекте адгезии частиц потока к стенкам капилляров.

Анализ методов определения расхода жидкости в физической химии, гидромеханике, проведенный в работе [5], показал, что одним из путей изучения процесса адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров может послужить метод «счета капель» при помощи прибора сталагмометра (рис. 1). Метод основан на функциональной зависимости между числом капель, получаемых из сосуда постоянной емкости, и нескомпенсированными силами сцепления (когезией) молекул поверхностного слоя жидкости. Так, например, зная число капель воды и число капель исследуемой жидкости, вычисляют поверхностное натяжение исследуемой жидкости в соответствии с формулой вышеупомянутой функциональной зависимости.

Таким образом, метод «счета капель» основан на постоянстве сил межмолекулярного притяжения (силы Ван-дер-Ваальса) жидкости и гравитационной силы при прочих равных условиях. Однако при переходе к микромиру сил межмолекулярного взаимодействия частиц потока жидкости и микрочастиц стенок капилляров принципиально важно исключить из рассмотрения силы тяжести и конвективные составляющие ускорения сил инерции,

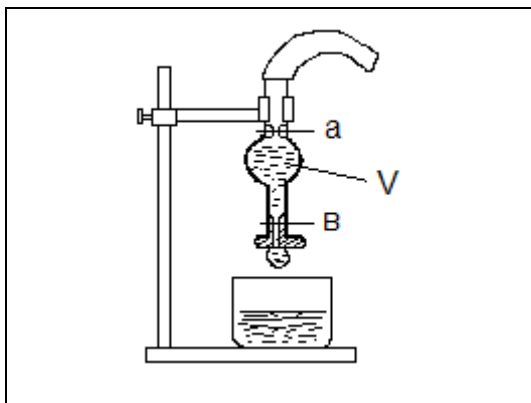


Рис. 1. Определение поверхностного натяжения с помощью сталягмометра («пипетка»): а – верхняя метка; в – нижняя метка; V – сосуд, емкостью 230 - 460 мкл

существенно затрудняющих количественную оценку сравнительно малых сил Ван-дер-Ваальса.

Кроме того, в методе «счета капель» определяется предельная величина когезионной силы молекул жидкости, обусловленная поверхностной энергией, при помощи сил тяготения. В противоположность этому, возникает необходимость определения величины адгезионной силы между частицами потока жидкости и микрочастицами стенок капилляров. Поэтому вышеуказанный метод определения поверхностного натяжения с учетом только сил притяжения молекул жидкости был в работе [6] видоизменен для измерения сил притяжения между частицами потока жидкости и микрочастицами стенок капилляров.

Так как в задачах измерения адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров теряется физический смысл подсчитывания числа капель, учитывающий только когезию молекул поверхностного слоя жидкости, то в работе [5] принято использовать управляющий явлениями образования капель принцип постоянства массы капли, т.е. емкости одной капли. Более того, в работе [7] показано, что капли должны формироваться медленно и при длительности образования капли, равной минуте, ошибка составляет всего 0,2%. Причем, если принять меры, оберегающие образование капли от случайных воздействий тряски, вибрации и т. д., то величину среднеквадратичной ошибки можно довести до 0,1%. Однако с точки зрения общей воспроизводимости конечного результата на практике лишь в редких случаях требуется вычислять ошибки с точностью, превышающей 25%. Часто в предварительных и оценочных экспериментах вполне допустима даже точность 200% [8].

2.1. Экспериментальный прибор

В наших экспериментах использовался сравнительно новый прибор (рис. 2), называемый устройством определения силы адгезии жидкости и твердого тела [6]. Основу прибора составляет горизонтально расположенный капилляр, образующий взаимодействующую систему между поверхностными слоями потока жидкости и твердой поверхностью. Идея горизонтального расположения капиллярной трубки исходит из простого методологического принципа, используемого еще Леонардо да Винчи, который позволяет осуществить равномерность движения жидкости. При этом величины сил тяжести имеют одинаковое значение по всей поверхности контакта между частицами потока жидкости и микрочастицами стенок капилляров, что позволяет исключить из рассмотрения силы гравитации. Равномерность течения жидкости по капиллярам устраняет из анализа конвективные составляющие ускорения сил инерции.

На рис. 2 сбоку напорного сосуда 1 и над ним условно изображены трубки, символизирующие необходимость поддержания постоянства поверхности уровня жидкости в сосуде при измерениях. В начале оценочных опытов этот уровень пытались определять даже катетометром. Однако после пробных опытов логика дальнейшего развития метода, понимание существа вопроса, а также соображения практического характера, связанные с преимуществом относительного метода измерений [8], привели к отказу от катетометра.

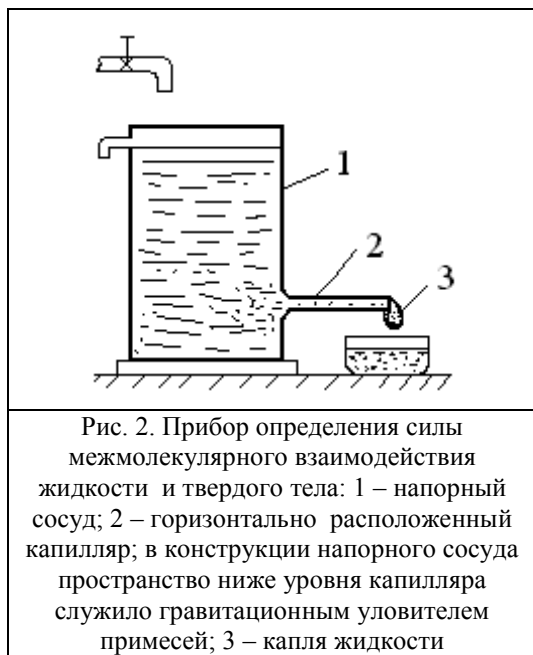


Рис. 2. Прибор определения силы межмолекулярного взаимодействия жидкости и твердого тела: 1 – напорный сосуд; 2 – горизонтально расположенный капилляр; в конструкции напорного сосуда пространство ниже уровня капилляра служило гравитационным уловителем примесей; 3 – капля жидкости

Для поддержания постоянной величины перепада давления вертикальный сосуд 1 должен иметь достаточное превышение по сечению, чем у горизонтального капилляра 2. Тогда силе перепада давления противодействуют силы вязкого трения, адгезии, поверхностного натяжения, которые совместно формируют сферу капли на конце капилляра. В поле тяжести капля отрывается в тот момент, когда ее вес станет равным или превысит на бесконечно малую величину силу поверхностного натяжения, удерживающую каплю. Такое взаимодействие сил, имеющих постоянное значение, при одинаковых условиях проведения опытов обеспечивает постоянство объема капли при наблюдениях, длительность которых значительно превышает десятки часов. В соответствии с этим выявляется приложимость объема капли для количественной оценки весьма малых изменений

величины расхода. Так как температура жидкости сильно сказывается на ее вязкости, то в работе [5] измерения проводились в термостатирующей камере.

Эксперимент проводился непрерывно более суток. Для фиксации подсчета числа капель с отметкой времени между каплями была создана автоматизированная установка, в которой каждая падающая капля попадает на обкладку датчика Холла. Импульс от падения каждой капли через усилитель постоянного тока подается на счетный вход интегральной схемы счетчика. Информационно-управляющая система синхронизации и формирования массива данных с использованием микроконтроллера не имеет особенностей [11,12] кроме управляющего автомата. Управляющий автомат реализован по оригинальной схеме [13-15] с выбором одного логического условия из всего множества для каждого периода между каплями. Для обеспечения устойчивой работы необходимо правильно выбрать датчик Холла и экспериментально подобрать высоту падения капли из горизонтальной трубки прибора (рис.2).

После получения полного массива данных велась автоматизированная обработка с помощью микроконтроллера и специального программного обеспечения.

Таким образом, детектирующее устройство величины силы адгезии молекул жидкости и твердого тела представляет собой новый инструмент экспериментального исследования микромира межмолекулярных взаимодействий поверхностных слоев конденсированных тел и способный проникнуть в них глубже, чем считалось возможным.

2.2.Методика прямого измерения времени наполнения капельного пикнометра

Рассмотрим измерение величины уменьшения внутреннего радиуса капилляра в случае эффекта адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров методом, основанным на формуле Гагена-Пуазейля. Установив постоянный перепад давления вдоль трубки и измерив его, величины $Q = V/t$, L , R , а также, найдя из справочной таблицы значение μ , можно вычислить абсолютное значение уменьшенной площади просвета капилляра.

При этих измерениях, проводимых с использованием абсолютного метода, необходимо преодолеть две трудновыполнимые операции. Первая – поддержание постоянного перепада давления и его измерение, вторая – измерение внутреннего радиуса капилляра, которое следует проводить с высокой точностью, ибо в формулу входит величина R в четвертой степени. Эти трудности устраняются при относительном методе, когда определяются отношения площадей просвета капилляра, измеренных через интервал времени, длительность которого достаточна для перехода микроскопических процессов увеличения толщины неподвижной пленки жидкости до макроскопически наблюдаемых значений. То

есть изучается динамика и кинетика микроскопического процесса утолщения граничного слоя и его макроскопическое развертывание во времени. Более того, относительные измерения имеют очень важное значение в физике. Их можно провести точнее и они проще, нежели абсолютные, и очень часто они дают достаточную информацию для получения фундаментальных результатов эмпирического и теоретического постижения явлений, а также разнопорядковой сущности, скрытой за переходом микроскопических процессов в макроскопические [8].

Сейчас кратко остановимся на существовании методики производства измерений, учитывающих некоторые особенности вышеуказанного перехода. В данном случае определение микроскопического уменьшения расхода жидкости, происходящее из-за микроскопического сужения просвета капилляра, сопряжено с непреодолимыми трудностями. Вот почему в работе [5] особое место занимает отказ от традиционного подхода, связанного с измерением секундного объема жидкости при протекании ее через капилляры. В противоположность такому методу, недостаточно приспособленному для измерения сложных микроскопических процессов, рассмотрим теперь обратную задачу. В соответствии с этой принципиально важной задачей, которая физически равноценна традиционному подходу, фиксированное значение времени заменяется фиксированным объемом малой емкости. Иначе говоря, процедура определения неизвестного значения объема жидкости, протекающей через капилляр, за известный период времени, сводится к процедуре определения неизвестного времени наполнения заранее известного объема малой емкости.

Результатом вышеуказанной замены явилось установление замечательного факта: произведение времени наполнения фиксированного объема малой емкости («капельного» пикнометра) на площадь поперечного сечения капилляра есть величина постоянная [5, 9]:

$$t_n \cdot \pi r_n^2 = t_L \cdot \pi r_L^2 = S_{nL}, \quad (3)$$

где t_n – время наполнения мерного сосуда постоянной и малой емкости (капельного пикнометра) в начале физического эксперимента; $\pi r_n^2 = S_n$ – площадь поперечного сечения (просвета) капилляра в момент времени t_n ; t_L – время наполнения капельного пикнометра, измеряемое (периодически в разное время) в процессе утолщения неподвижной пленки жидкости в капилляре; $\pi r_L^2 = S_L$ – площадь просвета капилляра в момент времени t_L ; $S_{nL} = e^{-\zeta t}$ – безразмерная величина, характеризующая функциональную взаимосвязь между быстротой наполнения капельного пикнометра и площадью просвета капилляра. Последнее требует более подробного пояснения из-за большого интереса к малоизученным явлениям перехода микроскопических процессов в макроскопические.

Кроме того, для лучшего понимания результатов опытов микроскопического масштаба и порядка следования микропроцессов к макромиру воспользуемся методом аналогии. Соответствие формулы (3) общезначимому характеру проявления закономерностей, управляющих явлениями перехода макропроцессов в микроскопические, следует из ряда эмпирических фактов, встречающихся, например, в классической механике, а также при теплофизических расчетах движения тел с переменной массой (ракет). Так, в работах [5, 9] приведена формула Эйлера, описывающая изменение натяжения каната T в зависимости от угла α охвата опоры канатом (в радианах):

$$T = T_n e^{-f\alpha}, \quad (4)$$

где T_n – начальное натяжение каната; f – коэффициент трения.

При больших значениях α усилие T натяжения каната трансформируется в силу трения. Эта формула, полученная Л. Эйлером, исходя из общих принципов механики, по сути отражает количественные соотношения перехода сил трения, обусловленных суммарными микроскопическими силами адгезии соприкасающихся микрочастиц твердых тел (опоры и каната), в макроскопическое усилие натяжения каната. Так, например, в теории движения тел переменной массы применяются два закона изменения массы [5, 9]:

$$1) f(t) = 1 - \zeta t;$$

$$2) f(t) = e^{-\zeta t},$$

где ζ – удельный расход массы (ракетного топлива); $f(t) = M / M_n$ – функция, определяющая закон изменения массы тела M ; M_n – начальная масса тела.

Отсюда разумно ожидать, что уравнения, описывающие процесс закрытия просвета капилляра, в случае эффекта адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров, согласуются с законами изменения массы, используемыми в теории движения тел переменной массы, и уравнением (4). Тогда можно утверждать, что большинство физических процессов в граничном слое жидкости в капиллярах подчиняются тем же немногочисленным закономерностям, общим для других явлений. Причем уравнения, описывающие эти закономерности, имеют фундаментально простой вид, т.е. отражают важнейший принцип простоты законов природы.

Прежде чем приступить к проверке вышеуказанной гипотезы, ответим на вопрос, имеется ли еще какая-нибудь гидромеханическая аналогия, которая совершенно явно выявляет приложимость линейного закона изменения массы из теории движения тел с переменной массы, к нашему процессу. В самом деле, наиболее близкую аналогию можно найти в работе [10], суть которой заключается в следующем. В этой работе рассматривается процесс равномерного маневрирования игольчатого затвора в случае свободнотруйного истечения жидкости через сопло в атмосферу. При закрытии затвора имеет место функциональная зависимость между величиной площади проходного сечения сопла и расходом жидкости, выраженная формулой [5, 9, 10]:

$$\alpha(t) = \alpha_0 - t / T,$$

где α – относительное закрытие сопла; α_0 – относительное начальное закрытие сопла; t – последовательность моментов времени равномерного маневрирования затвора; T – время полного закрытия проходного сечения сопла.

В дополнение к этому в работе [9] приводится зависимость функции F от формпараметра f , учитывающая изменение толщины пристенного слоя жидкости:

$$F(f) = a - bf,$$

где a и b – безразмерные постоянные.

Следует, впрочем, отметить, что в работе [5] определен физический смысл формпараметра, который в неявном виде отображает фактор времени t в сложном процессе формирования неподвижного граничного слоя жидкости на твердой поверхности, таким образом:

$$F(t) = a - bt.$$

С этих же позиций выясним, что закон закрытия просвета капилляров подчиняется не только показательному закону, но и линейному закону. С этой целью соотношение (3) перепишем в виде

$$S_{nL} = \frac{\pi r_L^2}{\pi r_n^2} = \frac{(r_n - \Delta r)^2}{r_n^2} = (1 + \Delta r^2 / r_n^2) - 2\Delta r / r_n, \quad (5)$$

где $r_L = (r_n - \Delta r)$ – внутренний радиус капилляра r_n , уменьшенный на величину утолщения неподвижного пристенного слоя жидкости Δr ; $(1 + \Delta r^2 / r_n^2)$ – отражает микроскопические процессы до начала формирования первоначального «затравочного» граничного слоя жидкости; $2\Delta r / r_n$ – уменьшение просвета капилляра после возникновения эффекта адгезии частиц потока к стенкам капилляров.

Поскольку величина отношения $\Delta r^2 / r_n^2$ чрезвычайно мала и в опытах неизмерима, то ею можно пренебречь. На этом основании выражение (5) следует записать так:

$$S_{nL}(t) = 1 - 2\Delta r / r_n.$$

Здесь величина $2\Delta r / r_n$ растёт от 0 до t_ξ , то есть:

$$\int_0^{t_\xi} (2\Delta r / r_n) dt = (2\Delta r / r_n) t_\xi,$$

где t_ξ – последовательный отсчет времени от начала до полного закрытия просвета капилляра. Для выделения этой последовательности отсчетов времени от общего времени экспериментального наблюдения за процессом течения жидкости в капиллярах служит

нижний индекс ζ , который также указывает на неразрывную взаимосвязь порядка следования микроскопической природы пространственно-временных событий к макроскопическому масштабу.

По соображениям такого характера, обозначая увеличение $(2\Delta r/r_n)$ за один час через ζ в уравнении (5), получим

$$S_{nL}(t) = 1 - \zeta t_\zeta, \quad (6)$$

где $S_{nL}(t) = 1$ – отражает режим течения, когда отсутствует процесс утолщения неподвижной пленки жидкости, т.е. просвет капилляра «работает» с полным проходным сечением; ζt_ζ – процесс увеличения толщины неподвижного граничного слоя жидкости, который приводит к закрытию просвета капилляра.

Но, с другой стороны, из математики известно, что при малых значениях аргумента справедливо

$$e^{-\zeta t_\zeta} \approx 1 - \zeta t_\zeta.$$

В случае отсутствия эффекта адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров, т.е. $\zeta = 0$

$$S_{nL} = e^{-\zeta t_\zeta} = e^{-0t} = 1/e^0 = 1. \quad (7)$$

Исходя из работы [5], существенно здесь следующее: при малых скоростях течения инерционные (конвективные) члены уравнений Навье-Стокса были малы по сравнению с вязкостными, и теперь такое управляющее условие уже не соблюдается, и выражение (6) переходит к форме (7).

Суть последнего объяснения, обсуждавшегося с классических позиций, с адгезионной точки зрения заключается в том, что в данном случае величина вязкости не ограничивается свойством одной только жидкости; до известной степени количественное значение ее дополнительно обусловлено нескомпенсированными силами притяжения микрочастиц стенок капилляров, т.е. силами адгезии. Более того, подробное изучение взаимодействия частиц потока жидкости с микрочастицами стенок капилляров в работе [5] показало, что вязкостные представления не достаточны для понимания адгезионных явлений. И можно надеяться, в конечном итоге такие исследования приведут к коренным изменениям взглядов на сложную и неоднозначную природу сил межмолекулярного взаимодействия частиц гидродинамического потока с микрочастицами стенок капилляров. Прежде всего, между любыми молекулами осуществляется всеобщее ван-дер-ваальсовое взаимодействие с энергией, порядка 4,2 кДж/моль. Это межмолекулярное взаимодействие проявляется в первичных актах и активированных переходных состояниях различных каталитических процессов. И теоретическое значение их изучения велико, прежде всего, как типа физического взаимодействия.

Теперь возвратимся к непосредственному обсуждению уравнений (6) и (7). Выше мы выяснили, что в этих уравнениях и содержится вся адгезионная теория явления прилипания частиц потока жидкости к стенкам капилляров. Здесь поразительным является совпадение формальной стороны этого явления с указанными выше законами изменения массы, используемые в теории движения тел переменной массы, уравнением (4), линейным законом закрытия сопла игольчатого затвора, формпараметром. С другой стороны, уравнения (6) и (7) позволяют подойти к более полному объяснению явлений перехода микроскопических процессов в макромир, тем самым преодолевая ограниченность каждой из вышеупомянутых формальных построений при описании реального мира. Так, например, физический смысл взаимной обусловленности переходов микропроцессов в макроскопические, описываемые показательными и линейными законами, есть отражение общего свойства материи. В дополнение к этому, также выяснен смысл единицы в уравнении (6), которая ясно отвечает на специфические вопросы теплофизических процессов микропереноса субстанций (энергии, импульса, массы) гидродинамическим потоком, усилие последнего при превышении некоторого порогового значения разрушают неподвижный граничный слой в капиллярах, и просвет капилляра «работает» полным проходным сечением.

Заканчивая обсуждение характерных особенностей проявлений сил межмолекулярных взаимодействий частиц потока жидкости с микрочастицами стенок капилляров, следует еще раз упомянуть, что, если измерять величину времени наполнения капельного пикнометра в начальный период микропроцесса адгезии частиц потока к стенкам капилляров, затем эту величину измерять через промежуток, длительность которого соответствует времени перехода микроскопических наслоений на стенках капилляров в макроскопические, то эти процессы становятся вполне доступными экспериментальному наблюдению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Камиллов И.К. Исследование фазовых переходов и критических явлений методами Монте-Карло / И.К. Камиллов, А.К. Муртазаев, Х.К. Алиев // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169. - № 7. – С. 773 – 795.
2. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю.Ю. Тарасевич. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
3. Поляев В.М. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов / В.М. Поляев, В.А. Майоров, Л.Л. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. - 168 с.
4. Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод / А.А. Шейпак. М.: МГИУ, 2005. – 192 с.
5. Ванчиков В.Ц. Управление слоем трения в технологических процессах / В.Ц. Ванчиков. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – 168 с.
6. Пат. № 72764 Российская Федерация, Устройство определения силы адгезии жидкости и твердого тела / В.Ц. Ванчиков. Бюл. № 12, 27.04.2008.
7. Адамсон А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
8. Сквайрс Дж. Практическая физика / Дж. Сквайрс. – М.: Мир, 1971. – 246 с.
9. Ванчиков В.Ц. Микроскопические изменения в контактных системах / В.Ц. Ванчиков // Вестник машиностроения. – 2005. - № 8. – С. 32-33.
10. Емцов Б.Т. Техническая гидромеханика / Б.Т. Емцов. – М.: Машиностроение, 1978. – 463 с.
11. Мухопад Ю.Ф. Микроэлектронные системы управления / Ю.Ф. Мухопад.- Братск:БрГУ, 2009. -285с.
12. Мухопад Ю.Ф. Алгоритмические системы управления / Ю.Ф. Мухопад, А.Ю. Мухопад.- Иркутск:ИрГУПС, 23018.- 110с.
13. Патент на полезную модель №183109 РФ Управляющий автомат / Мухопад Ю.Ф., Мухопад А.Ю., Пунсык-Намжилов Д.Ц. - БИ. № 26, 11.09.2018.
14. Мухопад А.Ю. Теория управляющих автоматов/А.Ю. Мухопад.- Иркутск:ИрГУПС, 2018.-72 с.
15. Патент на полезную модель № 82888 РФ Микропрограммный автомат/ Мухопад Ю.Ф., Мухопад А.Ю.– БИ № 13, 2009.

REFERENCES

1. Kamilov I. K. Research of critical phenomena and phase transitions by Monte Carlo methods / I. K. Kamilov, A. K. Murtazaev, H. K. Aliyev / Advances in physical Sciences. - 1999. - Vol. 169. - № 7. – P. 773 – 795.
2. Y. Y. Tarasevich, Percolation: theory, applications, algorithms / Y. Y. Tarasevich. – M.: editorial URSS, 2002. - 112 p.
3. Fields Of Hydrodynamics and heat transfer in the porous elements of aircraft structures / V. M. Polyayev, V. A. Mayorov, L. L. Vasiliev. - Moscow: Mechanical Engineering, 1988. 168 p.
4. Sheypak A. A. Hydraulics and hydropneumatic / A. A. Voros. M.: Moscow state industrial University, 2005. - 192 p.
- 5.. V.Ts. Vanchikov Management layer friction in industrial processes /. V.Ts. Vanchikov – Irkutsk: Irkutsk State University Of Communications, 2006. 168 p.

6. Pat. No. 72764 Russian Federation The device determine the strength of adhesion of liquid and solid bodies /; V.Ts. Vanchikov, BI. No. 12, 27.04.2008.
7. Adamson A. physical chemistry of surfaces / Adamson. - M.: Mir, 1979. - 568 p.
8. J. Squires. Practical physics / J. Squires. - M.: Mir, 1971. - 246 p.
9. V.Ts. Vanchikov Microscopic changes in the contact systems / / V.Ts. Vanchikov / messenger of mechanical engineering. - 2005. - № 8. – Pp. 32-33.
10. Emtsev B. T. Technical hydromechanics / B. T. Emtsev. - Moscow: Mechanical Engineering, 1978. - 463 p.
11. Mukhopad Yu.F. Microelectronic control system / Yu. F. Mukhopad.- Bratsk: BrSU, 2009. – 285p.
12. Mukhopad Yu.F. Algorithmic control system / Yu. F. Mukhopad . A. Yu. Mukhopad.- Irkutsk: Irkutsk State University Of Communications, 2018.- 110p.
13. The patent for useful model No. 183109 RF control machine / Mukhopad Yu.F. F., A. Yu. Mukhopad, Punsik-Namzhilov D. C. , BI No 26, 11.09.2018.
14. The Theory of control automata /Mukhopad A.Yu.- Irkutsk: Irkutsk State University Of Communications, 2018.- 72p.
15. The patent for useful model No. 82888 Firmware machine/. Mukhopad Yu.F., A. Yu. Mukhopad – BI No. 13, 2009.

Информация об авторах:

Виктор Цыренович Ванчиков, к.т.н., доцент кафедры «Гражданское, арбитражное судопроизводство, организация судебной деятельности», Восточно-Сибирский филиал Российского государственного университета права ВСФ РГУП, г. Иркутск, e-mail: vanchikov.viktor@yandex.ru

Юрий Федорович Мухопад, д. т. н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: bts48@mail.ru

Authors

Victor Tsirenovich Vanchikov, candidat of Technical Science, associate Professor of the Department "Civil, arbitration proceedings, organization of judicial activity", East Siberian branch of the Russian state University of law , Irkutsk, e-mail: vanchikov.viktor@yandex.ru

Yuri Fedorovich Mukhopad, Doctor of Technical Science, Professor of the Department «Automation of production processes», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: bts48@mail.r

Для цитирования

Ванчиков В.Ц., Мухопад Ю.Ф. Измерение утолщения граничного слоя жидкости в капиллярах // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2019. – №1. – С. 72-81 – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 25.03.2019)

For citation

Vanchikov V.Ts., Mukhopad Yu.F. Izmerenie utolsheniya granichnogo sloya zhidkosti v kappilyarah [Measurement of the thickening of the boundary layer of fluid in the capillaries] // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2019, No. 1, P. 72-81. [Accessed 25/03/19]