

УДК 533.6: 621.52

Физические явления и процессы переходного течения разреженного газа

Ю. М. Печатников

Государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

Сформулированы теоретические положения, которые согласуют представления о хаотическом блуждании молекул в молекулярном режиме и ламинарном течении в вязкостном режиме. На базе этих положений и вероятностного подхода к имитационному моделированию проведены многочисленные эксперименты, которые прояснили природу явлений, наблюдаемых в переходной области.

Исследованию молекулярно-вязкостного или переходного течения (рис. 1) посвящено большое число работ [1–5]. Однако не ясна природа целого ряда явлений, наблюдаемых в натуральных экспериментах при изотермическом течении разреженного газа в каналах в переходной области. Современные представления кинетической теории о хаотическом блуждании молекул в молекулярном режиме и континуальной теории о ламинарном течении в вязкостном режиме несогласованны. В данной работе исследования, которые проясняли природу газодинамических процессов переходного течения, выполняются на базе вероятностного подхода к имитационному моделированию [6–9] и новой физической модели [10, 11].

Метод вероятностного моделирования

Моделируем блуждания молекул (N_f) в газовом потоке (Q), последовательно, по одной на базе статистических решений.

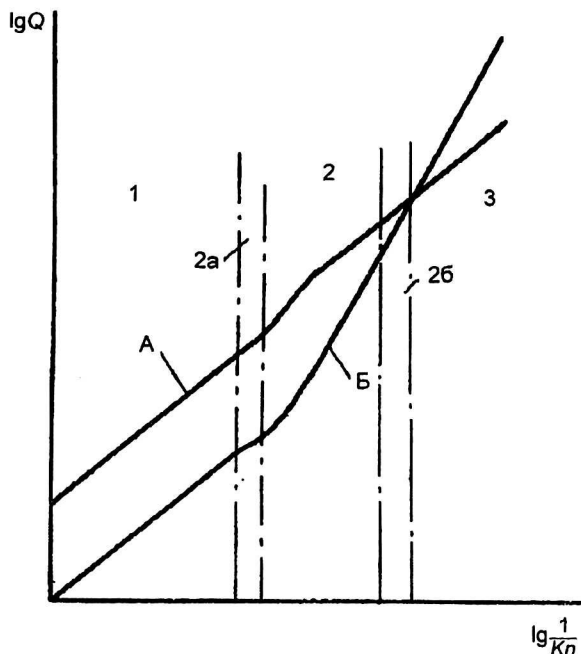


Рис. 1. Зависимость газовой скорости (Q) от числа Кнудсена (Kn) при течении разреженного газа через отверстие (кривая А) и длинный трубопровод (кривая Б) в различных режимах: 1 — молекулярном при $Kn > 100$; 2 — молекулярно-вязкостном; 2а — вблизи молекулярного; 2б — вязкостном со скольжением; 3 — вязкостном при $Kn < 0,001$

Это положение следует из анализа представлений кинетической теории о стационарном изотермическом течении разреженного газа в каналах в переходной области:

- газовый поток рассматривается как совокупность движения одинаковых детерминированных материальных молекул, характеризующихся массой и эффективным диаметром. Движения молекул носят случайный характер. Каждая из молекул является сложной системой, состоящей из атомов. Поскольку при числе Кнудсена выше 0,01 среднее расстояние между молекулами в вакуумном канале оценивается, как значительно превышающее эффективный радиус межмолекулярного взаимодействия, то молекулы рассматриваем как статистически независимые;

- число молекул (N_p), участвующих в изотермическом процессе переноса количества движения между входным и выходным сечениями канала, возрастает с увеличением отношения характерного размера канала к средней длине свободного пути молекулы [12];

- учитывая, что рассматриваем стационарное течение, то не принимаем во внимание фактор времени при эволюции системы молекул.

Моделирование блуждания одной статистической ("пробной") молекулы в канале выполняем на базе вероятностных представлений, включая представления о эффектах межмолекулярных взаимодействий: молекула движется в канале, изменяя свою траекторию при межмолекулярных взаимодействиях и соударениях с поверхностью канала, до тех пор, пока не покинет канал через входное или выходное сечение.

Конфигурацию канала в математической форме представляем совокупностью связанных отдельных поверхностей в трехмерном пространстве, каждая из которых описывается одним аналитическим уравнением и системой неравенств не выше второго порядка.

Координаты молекулы во входном сечении канала определяем случайным образом, равномерно распределенные по входному сечению. Молекула влетает в канал в направлении в соответствии с начальными условиями, которые определяются кинетической теорией, и свободно движется по прямой в сторону выходного сечения до столкновения, на длину не более свободного пути (λ_0):

$$\lambda_0 = -\lambda \ln(R), \quad (1)$$

где λ — средняя длина свободного пути молекулы, соответствующая среднему давлению в системе, задается в качестве исходных данных при моделировании;

R — случайное число, $R \in [0, 1]$.

Свободное движение молекулы между соударениями предопределяется тем, что молекулы статистически независимы. Направление движе-

ния "пробной" молекулы изменяется под действием эффектов межмолекулярных взаимодействий только на малых расстояниях вследствие соударения с другой молекулой или с поверхностью канала.

Если траектория движения молекулы пересеклась с поверхностью канала, то моделируется процесс взаимодействия молекулы с группой приповерхностных молекул твердой стенки. Молекула, столкнувшись с поверхностью канала, поглощается стенкой канала, а затем покидает ее в соответствии с граничными условиями, которые определяются в зависимости от рода газа в потоке, от температуры газа, от материала и качества поверхности канала. Для условий течения воздуха в канале из нержавеющей стали при комнатной температуре используем диффузное распределение [1].

Если молекула пролетела длину λ_0 и не столкнулась с поверхностью канала, то моделируется процесс столкновения с другой молекулой. В процессе столкновения первоначально происходит перераспределение энергии по степеням свободы "пробной" молекулы в соответствии с моделью межмолекулярных взаимодействий, затем молекула отлетает от места соударения. В результате межмолекулярного столкновения "пробная" молекула под воздействием силы межмолекулярных взаимодействий (Φ) изменяет направление своего дальнейшего движения.

Силу, действующую на "пробную" молекулу (Φ) в момент соударения, рассчитываем на основе следующих положений кинетической теории:

в потоке газа молекулы взаимодействуют друг с другом, порождая корреляции (Φ). Общая потенциальная энергия взаимодействия молекул может быть представлена в соответствии с принципом суперпозиции в виде суммы парных потенциалов, каждый из которых зависит только от расстояния между двумя молекулами. Малость значений потенциала парного взаимодействия делает возможным описать результат взаимодействия ансамбля молекул как линейную комбинацию парных взаимодействий;

существует характерный пространственный микрообъем, в общем случае определяемый родом и внутренними свойствами разреженного газа ($sort$), за пределами которого эффективная сила парного (F_a) взаимодействия двух молекул практически обращается в нуль.

Исходя из вышеназванных положений, выражение для расчета силы (Φ) запишем:

$$\Phi = F_a + F_{ij}, \quad (2)$$

где F_a — сила воздействия на пробную молекулу от ближайшей к ней;

F_{ij} — сила воздействия на пробную молекулу окружающих ее молекул, которые находятся в микрообъеме, ис-

ключая ближайшую к ней; направление силы F_{ij} совпадает с градиентом концентрации молекул в потоке газа, особенно в осесимметричных каналах.

В области, в которой среднее расстояние между молекулами настолько велико, что в момент соударения статистической "пробной" молекулы в микрообъеме находится только пара молекул ($F_{ij} \cong 0$), принимается, что направление движения пробной молекулы из точки межмолекулярного соударения равновероятно в полном телесном угле 4π стерадиан применительно к совокупности большого числа одинаковых молекул [6]. В соответствии с теорией вероятностей равновероятное распределение движения молекул после парного соударения действительно для однородного газа независимо от рода газа (*sort*) и его температуры (T). Равновероятное распределение можно применять при уменьшении чисел Кнудсена до значения приблизительно 0,1 с допустимой степенью точности [7].

В области, в которой эффекты групповых взаимодействий молекул начинают оказывать влияние на характер течения разреженного газа в канале [10], моделируем эффекты как парных, так и групповых взаимодействий ансамбля молекул (Φ) на основе следующих рассуждений. В случае, если "пробная" молекула подлетает к какой-либо молекуле на близкое расстояние, при котором сила межмолекулярного взаимодействия между ними начинает оказывать влияние на направление движения "пробной" молекулы и, с геометрической точки зрения, парное соударение между этими молекулами неизбежно, но все же оно может не произойти, так как другие молекулы газа столкнутся с ними прежде, чем они успеют провзаимодействовать между собой. Эти "другие молекулы" будут экранировать более дальние корреляции. В пространстве есть выделенные направления, вдоль которого корреляции сохраняются даже в случае, если они превосходят среднюю длину свободного пути. Из вышеприведенных рассуждений следует важное положение физической модели переходного течения [10] о том, что существуют условия, в зависимости от концентрации молекул в потоке газа, при которых эффекты взаимодействия группы молекул (F_{ij}) оказывают существенное влияние на направление движения "пробной" молекулы.

Сформулируем положения, на основе которых согласуем на микроуровне представления кинетической теории о свободном хаотическом блуждании молекул при молекулярном режиме и континуальной теории о ламинарном течении при вязкостном режиме [11]:

в процессе преобразования характера течения от молекулярного к вязкостному на хаотическое движение молекул, вследствие групповых взаимодействий ансамбля молекул (F_{ij}), накладывается

составляющая движения в направлении, определяемым градиентом концентрации, и в результате образуется направленный поток;

придает направленность движению каждой статистически независимой молекулы по направлению течения сила F_{ij} , определяемая градиентом концентрации молекул в газовом потоке;

в условиях стационарного течения при малых перепадах давления во входном и выходном сечениях каналов сила Φ , определяемая градиентом концентрации молекул в газовом потоке, воздействует на молекулы потока с одним и тем же усилием по всей длине канала [7].

Поскольку после межмолекулярного столкновения "пробные" молекулы приобретают случайную скорость, направление которой случайным образом формируется под воздействием ансамбля молекул (Φ), то задачу моделирования групповых взаимодействий статистического ансамбля молекул заменяем задачей выявления статистической закономерности проявления эффекта влияния групповых межмолекулярных взаимодействий молекул на направление движения "пробной" молекулы после столкновения в зависимости от числа Кнудсена (Kn), которым характеризуем среднее расстояние между молекулами в канале.

При соударении молекулы под влиянием межмолекулярных сил приобретают некоторый импульс:

$$mV = \Phi t_m,$$

где $V(Kn, sort, T)$ — вектор скорости, направляющий движение молекул, возникающий под действием силы $\Phi(Kn, sort)$;

m — масса молекулы;

t_m — временной параметр соударения;

T — температура газа.

Учитывая (2), направление траектории движения "пробной" молекулы после межмолекулярного соударения формируется в соответствии с принципом суперпозиции при сложении вектора скорости V_a , возникающего под действием F_a , направленного равновероятно в полном телесном угле 4π стерадиан случайным образом, и вектора скорости V_{ij} , возникающего под действием F_{ij} при взаимодействии групп окружающих молекул, направленного по потоку течения разреженного газа:

$$V = V_{ab} + V_{ij},$$

где $V_{ab} = V_a/b$,

здесь b — коэффициент перераспределения энергии при соударении.

В соответствии с теорией вероятности принимаем, что направление вектора скорости V_{ij} совпадает с градиентом концентрации в микрообъеме газового потока, расположенного вокруг

“пробной” молекулы, особенно в осесимметричных каналах.

Учитывая, что при сложении векторов складываются их соответствующие координаты, то уравнения для расчета направляющих траекторию движение “пробной” молекулы углов α , β , ξ в локальной декартовой системе координат (рис. 2) записываем:

$$\cos \alpha = \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}; \quad \cos \beta = \frac{y_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}};$$

$$\cos \xi = \frac{z_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}},$$

где $x_2 = x'_2 + x''_2$; $y_2 = y'_2 + y''_2$; $z_2 = z'_2 + z''_2$;

$\bar{r}'_2(x'_2; y'_2; z'_2)$ — единичный безразмерный радиус-вектор возможного перемещения молекулы при направляющем векторе скорости $V'_2(Kn, sort, T)$;

$\bar{r}''_2(x''_2; y''_2; z''_2)$ — радиус вектор возможного перемещения молекулы при направляющем векторе скорости $V''_2(Kn, sort, T)$;

$\bar{r}_2(x_2; y_2; z_2)$ — радиус-вектор действительного перемещения молекулы при направляющем векторе $V(Kn, sort, T)$, $V = \lambda_0/t$, где t — время свободного движения молекулы между соударениями; $\lambda_0 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}$.

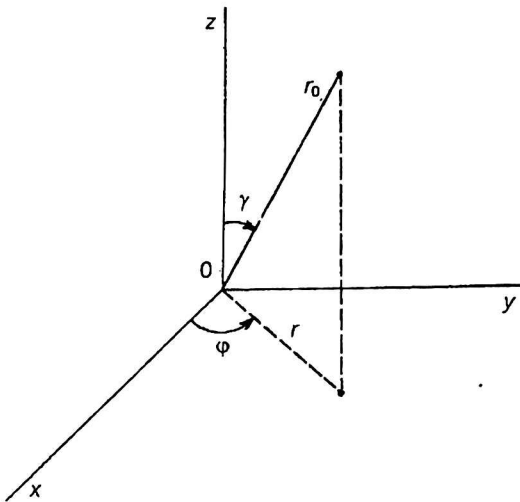


Рис. 2. Координаты молекулы радиуса-вектора $r_0(\gamma, \varphi, r)$ в локальной сферической системе координат

Преобразовывая значения углов в декартовой системе координат в сферическую (см. рис. 2) и учитывая, что угол φ в плоскости (xy) (см. рис. 2) всегда распределяется по закону:

$$\varphi = 2\pi R_1,$$

где R_1 — случайное число, $R_1 \in [0, 1]$, делаем важный вывод о том, что, моделируя распределение угла γ ($Kn, sort$) при определении траектории движения “пробной” молекулы после

соударения, моделируются эффекты парных и групповых взаимодействий ансамбля молекул в потоке разреженного газа.

Из анализа методами теории подобия и по результатам эксперимента [7] следует, что закономерность распределения угла γ ($Kn, sort$) целесообразно представить (рис. 3):

$$\gamma = \pi R_2 (1 - P_f), \quad (3)$$

где $P_f(Kn, sort, T)$ — зависимость, характеризующая коллективный эффект взаимодействия группы молекул в процессе преобразования хаотичного движения молекул в ламинарный поток;

R_2 — случайное число, $R_2 \in [0, 1]$.

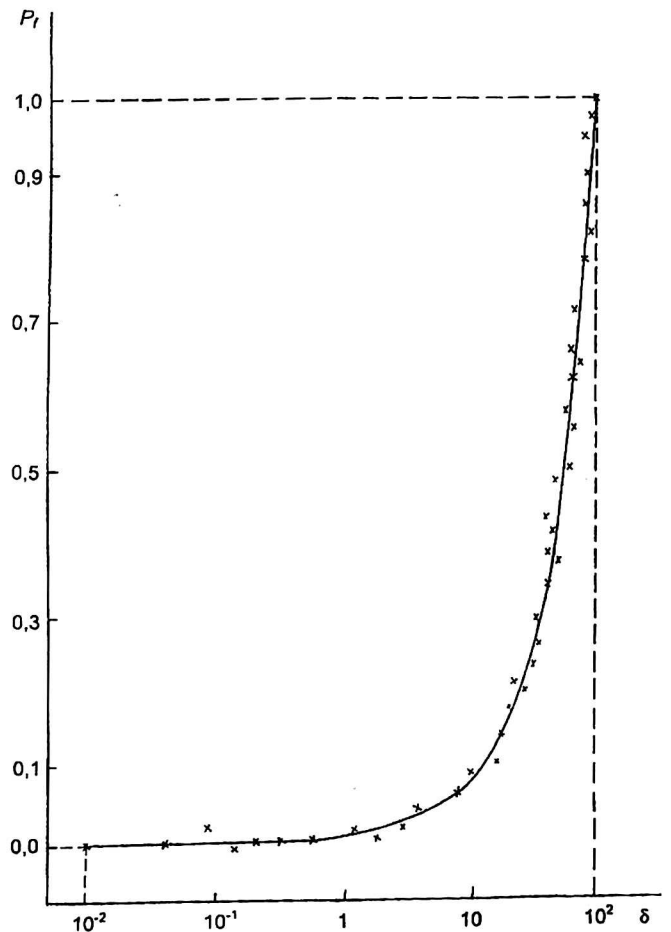


Рис. 3. Вероятность P_f направленности вектора скорости молекул по потоку течения газа в процессе преобразования характера течения от молекулярного к вязкостному от степени разреженности δ , $\delta = 1/Kn$

Зависимость $P_f(Kn, sort)$ является “внутренним” свойством потока и не зависит от конфигурации канала. Анализ измерений проводимости методами теории подобия [12] и взаимодействия “пробной” молекулы с группой приповерхностных молекул при соударении с твердой стенкой канала показывает, что род газа и его температура, значительно влияющие на ве-

личину скорости молекул в потоке, незначительно влияют на направление движения молекулы и вид (3).

Зависимость $P_f = P_f(Kn)$ может быть интерпретирована как вероятностная интегральная функция ($P_f \in [0; 1]$) распределения направленных векторов скорости молекул в потоке разреженного газа при формировании направленной скорости течения во всем диапазоне молекулярно-вязкостного режима при преобразовании характера течения от молекулярного ($P_f = 0$) к ламинарному потоку ($P_f = 1$).

Определив по (3) новое направление движения молекулы, далее моделируем ее свободное движение до следующего соударения. Повторяем этот алгоритм до тех пор, пока молекула не покинет канал. После завершения вычислительного эксперимента по моделированию блужданий "пробной" молекулы в канале, траектория ее движения выглядит в виде ломаной линии.

Вероятность прохождения канала от входного к выходному сечению этой статистической ("пробной") молекулой (P_e) рассчитывается:

$$P_e = N_r / N_e, \quad (4)$$

где N_e — число независимых вычислительных экспериментов, в которых прослеживается блуждания статистической ("пробной") молекулы в канале с момента входа и до момента выхода из него;

N_r — число экспериментов из множества N_e , в которых "пробная" молекула покинула канал через выходное отверстие.

Повторяя вычислительный эксперимент N_e раз, фиксируем N_r . Число экспериментов N_e , которые обеспечат требуемую точность вычислений P_e , рассчитывается по методу Монте-Карло. По формуле (4) вычисляем P_e . Учитывая, что все молекулы одинаковые, интегральные характеристики потока газа (Q) вычисляются

$$Q = Q_0 P_e,$$

где Q_0 — газовый поток, падающий на входное отверстие канала.

Наиболее ярко показывает действенность метода вероятностного моделирования тот факт, что результаты многочисленных экспериментов [13], полученные на микро- и макроуровне, прояснили природу газодинамических процессов и явлений, наблюдаемых при переходном течении разреженного газа.

Молекулярное течение наблюдается при моделировании по (1) длины свободного пути (λ_0) "пробной" молекулы, значительно превосходящей характерный размер канала ($Kn > 100$), вследствие чего соударения молекул наблюдаются, как правило, с поверхностью канала.

При $Kn \approx 100$ кроме соударений со стенкой дополнительно наблюдаются первые межмолекулярные соударения.

При переходе от молекулярного к молекулярно-вязкостному течению на макроуровне наблюдаем, что степень увеличения или уменьшения значений проводимости каналов находится в зависимости от таких параметров канала, как конфигурация и длина (рис. 4). Это объясняется двумя противоречивыми процессами, происходящими одновременно:

степень уменьшения P_e находится в зависимости от таких параметров канала, как конфигурация и длина. Это вытекает из результатов, полученных на микроуровне. Поскольку на начальной стадии формирования направленной скорости течения сила F_{ij} , приблизительно равная нулю ($P_f \approx 0$), не помогает движению молекул вдоль канала, а значительно увеличивающееся число межмолекулярных парных соударений затрудняет перемещение молекул вдоль канала, то число молекул, проходящих канал в процентном соотношении (P_e), уменьшается по сравнению с молекулярным течением. Степень уменьшения P_e определяется числом межмолекулярных парных соударений, которое претерпевает "пробная" молекула, прежде чем вылетит из канала. Чем длиннее канал и сложнее его конфигурация, тем больше межмолекулярных соударений, и тем более трудно "пробной" молекуле перемещаться вдоль канала по сравнению с молекулярным течением, и тем меньше P_e ;

увеличивается число молекул, участвующих в процессе переноса [12].

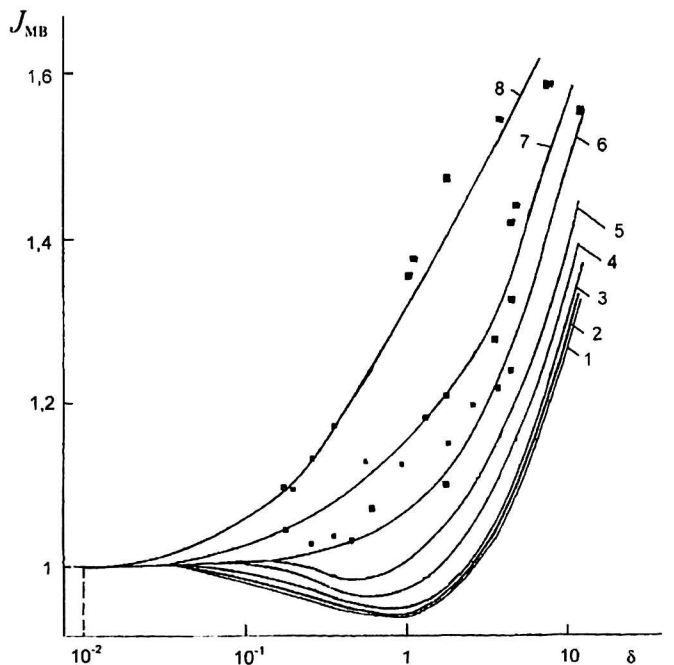


Рис. 4. Зависимость безразмерной проводимости трубы (J_{mv} — отношение значений газового потока или проводимости, вычисленных в молекулярно-вязкостной области течения к значению, вычисленному в молекулярной области течения) от степени разреженности δ , $\delta = 1/Kn$: 1 — длинный квадратный трубопровод; 2 — длинный угловой круглый трубопровод; 3—8 — трубы круглого сечения при L/D : 40, 10, 8, 4, 2, 0,1, соответственно; ■ — натурные эксперименты

Результаты этих противоречивых процессов наблюдаются на макроуровне в любых конфигурациях каналов. Например, при переходе от молекулярного к молекулярно-вязкостному течению значения проводимости круглых труб, с соотношением длины (L) к диаметру (D) больше 5, уменьшаются, а значения проводимости отверстий и коротких труб, с соотношением длины (L) к диаметру (D) меньше 4, монотонно возрастают (см. рис. 4).

При уменьшении чисел Кнудсена приблизительно от 2 до 0,1 доля групповых взаимодействий возрастает, в том числе около стенки трубопровода, в общем числе межмолекулярных соударений до 10 %. Начинает проявляться тенденция формирования дрейфового движения молекул, направленного к выходному сечению канала, P_f монотонно увеличивается от 0 до ~0,1 (см. рис. 3). Этот эффект частично компенсирует трудности “пробной” молекулы перемещаться вдоль канала из-за соударений. Как следствие, P_e первоначально замедляет свое падение, а затем начинает монотонно увеличиваться.

При уменьшении чисел Кнудсена от 0,1 до 0,01 проводимости каналов любых конфигураций монотонно возрастают благодаря тому, что:

формируется течение, в значительной степени направленное к выходному сечению канала, P_f монотонно увеличивается до 1 (см. рис. 3), P_e монотонно увеличивается до значения приблизительно 1;

увеличивается число молекул, участвующих в процессе переноса.

При приближении к границе “молекулярно-вязкостный режим—вязкостный режим” при уменьшении чисел Кнудсена от 0,02 до 0,01 наблюдается, что значения проводимости круглых и квадратных отверстий, коротких и длинных каналов с одинаковой площадью входного сечения стремятся к одинаковым значениям (см. рис. 1, 4). Это объясняется следующим. При $Kn \cong 0,01$ направленность движения молекул в канале произвольной конфигурации формируется в основном под действием силы F_{ij} и ориентировано по потоку течения разреженного газа $P_f \cong 1$, $\gamma \cong 0$. Поскольку кроме межмолекулярных соударений имеются соударения молекул с поверхностью канала, благодаря которым молекулы могут покинуть канал через входное сечение, то при $\gamma \cong 0$ $N_e \neq N_r$, но $N_r \Rightarrow N_e$, откуда $P_e \Rightarrow 1$ и, следовательно, $Q \Rightarrow Q_0$.

В условиях границы “молекулярно-вязкостный режим—вязкостный режим” на макроуровне возникает впечатление ее размытости в диапазоне чисел Кнудсена от 0,01 до 0,001 в зависимости от конфигурации и длины канала. При $\gamma \cong 0$ молекулы кроме межмолекулярных соударений, которые обеспечивают направленное движение к выходному сечению канала, претерпевают соударения с поверхностью канала. Более того, после соударения с поверхностью

часть молекул покидает канал через входное сечение. Чем короче канал, тем большая часть молекул покинет канал через входное сечение. Например, при $Kn \cong 0,01$ при изменении соотношения длины к диаметру канала от 0,1 до 10 вероятность P_e монотонно уменьшается от 0,95 до 0,8. Границей можно считать условие: все молекулы, падающие на входное отверстие, будут вылетать через выходное отверстие, $P_e = 1$, $Q = Q_0$. Для отверстия это условие выполняется при $Kn \cong 0,01$ (см. рис. 3), для разных каналов все молекулы, падающие на входное отверстие, будут вылетать через выходное отверстие при более низких и отличных друг от друга, в зависимости от сложных конфигурации канала, числах Кнудсена.

Заключение

Сформулированы теоретические положения динамики разреженного газа, которые согласуют представления кинетической и континуальной теории о течении разреженного газа в переходной области. На их основе разработан метод вероятностного моделирования, который экономит значительные компьютерные ресурсы по сравнению с методом прямого моделирования [1, 14]. Выявлены принципы и механизмы, которые определяют природу переходного течения. Объяснены, ранее необъяснимые, явления, наблюдаемые при переходном течении в канале.

Литература

1. Sharipov F., Seleznev V. Data on Internal Rarefied Gas Flows (Review)// J. Phys. Chem. Ref. Data. 1998. V. 27. № 3. P. 657—714.
2. Печатников Ю. М. Современные модели и методы моделирования переходного течения разреженных газов// Журнал технической физика. 2003. Вып. 12. С. 20—25.
3. Proceedings of conference on Vacuum Gas Dynamics. Espania. Aseva. 2003. — 194 p.
4. Печатников Ю. М. Современные методы вычислительных экспериментов в молекулярно-вязкостном режиме// Инженерная физика. 2003. № 3. С. 50—52.
5. Печатников Ю. М. Физические явления и процессы переходного течения разреженного газа// Сб. докл. семинара: Вакуумная техника и технология. СПб: УНИВАК, 2003. С. 32—37 (Электронная версия на сервере Vacuum.ru)
6. Печатников Ю. М. Статистическое моделирование течения разреженного газа вблизи молекулярного режима// Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1991. Вып. 4. С. 67—69.
7. Печатников Ю. М. Статистическое моделирование стационарного течения разреженного газа через вакуумную трубопроводную арматуру при молекулярно-вязкостном режиме// Инженерно-физический журнал, 1992. № 6. С. 673—676.
8. Печатников Ю. М. Вероятностная модель и метод моделирования газовых потоков через вакуумные элементы при молекулярно-вязкостном режиме// Инженерная физика. 2003. № 2. С. 32—36.
9. Печатников Ю. М. Вычислительно-эвристический подход к расчету и проектированию вакуумных систем// Научно-технические ведомости. СПбГТУ. 2002. № 1. С. 80—87.
10. Печатников Ю. М. Инженерно-физическая модель газовых потоков при среднем вакууме// Журнал технической физика. 2003. Вып. 8. С. 40—45.

11. Pechatnikov Yu. A new physical model of vacuum gas dynamics of transition flow// Abstract of EVC on Vacuum Science and Technology. Berlin. 2003. P. 50.

12. Печатников Ю. М. Расчет проводимости вакуумных систем (Обзор)// Вакуумная техника и технология. 1996. Т. 6. № 2. С. 5—14.

13. Печатников Ю. М. Расчет проводимости сложных элементов при среднем вакууме// Сб. докл. науч.-техн. конф.: Вакуумная наука и техника. — М.: МИЭМ. 2002. С. 51—54.

14. Ребров А. К. Научные маршруты// Наука в Сибири. 2000. № 48 (1284). С. 4.

Effects in the transition flow of rarefied gas

Y. M. Pechatnikov

Technical University, St. Petersburg, Russia

This paper is devoted to development of Probable Simulation Method for modeling rarefied gas flow in the transitional, from molecular to continuum, range through three-dimensional ducts and slits of any length. A theoretical discussion of the transition range between from molecular flow and laminar viscous flow is actually. The transition regime has always presented considerable theoretical difficulty since both the theoretical formalism employed and the physical processes occurring are so different for the two extremes. From the standpoint of modeling, Vacuum Gas Dynamics has been discussed as an isothermal subset of Rarefied Gas Dynamics in duct. Theoretical Probable approaches to gas flow through duct has been considered, with an emphasis on physical interpretation. It's based on the assumptions of the kinetic theory of gases and new physical model of gas flow in transition range. As results, the Probable Simulation Method to gas flow has been developed. The flow of a gas through ducts of long and finite length has been investigated. The Probable Simulation Method was tested for similarity geometric components and was found to agree well with published results. The results have been discussed and verified. Effects in the transition flow of rarefied gas have been discussed.