

03

## Явления неравновесности при конденсации на черной сфере

© М.Ю. Плотников, А.К. Ребров

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 25 мая 1998 г.

На основе численного моделирования методом Монте-Карло проведено детальное исследование неравновесной зоны, возникающей у поверхности конденсирующей сферы. Обнаружена существенная анизотропия температуры по направлениям. Установлено, что неравновесность вблизи абсолютно черной сферы является причиной отличия вычисленных значений удельного массового потока от данных, полученных в литературе в предположении малого отличия состояния пара на бесконечности от условий насыщения по температуре поверхности сферы.

Процессы конденсации-испарения на поверхности капли изучаются несколько последних десятилетий в связи с важностью практических приложений и интересом к неравновесным состояниям пара у поверхности. Несмотря на завершенность моделей конденсации при малых отличиях состояния пара на бесконечности от условий насыщения по температуре поверхности [1,2], структура кнудсеновского слоя даже для этих условий изучена недостаточно.

Исследование данной работы представляет результаты прямого статистического моделирования конденсации на поверхности абсолютно черной сферы, т.е. в том предельном случае, когда температура поверхности капли может быть принята равной нулю и, следовательно, реализуется максимальная неравновесность. Условия, близкие к конденсации на абсолютно черной сфере, возникают при попадании сильно охлажденных капель в газ, осаждающийся на поверхность с коэффициентами конденсации, близкими к единице.

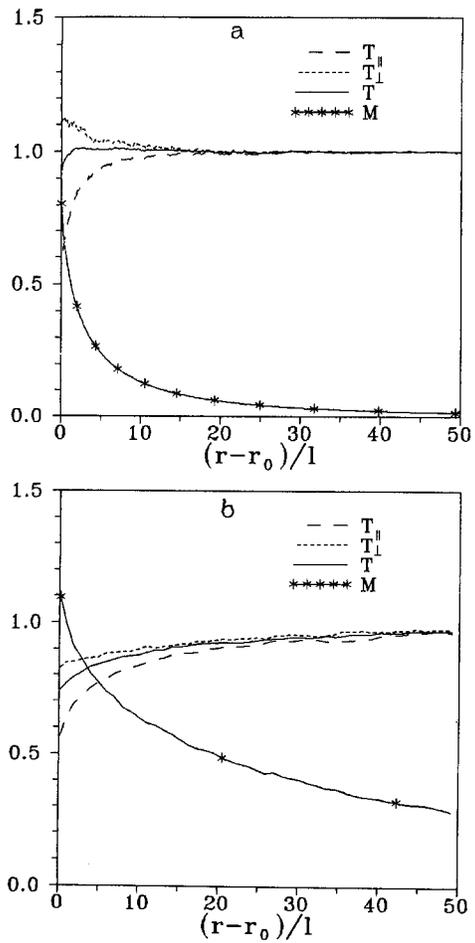
Авторам известна лишь одна работа, посвященная задаче о конденсации на абсолютно черную сферу (задача об идеальном стоке) [3]. По результатам этой работы можно судить об общем характере поведения макроскопических параметров, качественно согласующимся с результатами решения уравнений Навье–Стокса.

Метод прямого статистического моделирования [4], свободный от ограничений в постановке граничных условий, позволяет получить данные об эволюции функции распределения скоростей молекул при натекании пара на сферу в любой точке. Для обозримого представления структуры потока в данной работе используется определение температур по координатам и безразмерной скорости потока в виде числа Маха.

Пусть заданы радиус сферы  $r_0$ , температура и плотность газа на бесконечности ( $T_\infty$ ,  $n_\infty$ ). Процесс конденсации является функцией параметров  $T_\infty$ ,  $n_\infty$  и числа Кнудсена  $\text{Kn} = l/r_0$ . Здесь  $l$  — длина свободного пробега молекул на бесконечности:  $l = 1/(\sqrt{2}n_\infty\sigma)$ , где  $\sigma$  — сечение столкновения для молекул паров.

В расчетной схеме метода прямого статистического моделирования сфера радиуса  $r_0$  окружалась сферической оболочкой радиуса  $R_0$ , который выбирался максимальным по возможностям компьютера типа Пентиум. При этом в диапазоне чисел Кнудсена от  $\infty$  до 0.01 в расчет вовлекались до  $5 \cdot 10^5$  молекул с потенциалом взаимодействия в виде твердых сфер. Это обеспечивало возможность детального анализа структуры течения для заданного числа Кнудсена при несущественном отличии параметров на внешней оболочке от параметров на бесконечности. При заданном однородном распределении параметров в сферической прослойке "включалась" конденсация на поверхности сферы и в ходе моделирования вырабатывалось стационарное течение. На основе полученного стационарного течения далее вычислялись необходимые макропараметры потока.

Типичный для переходных режимов характер распределения параметров у конденсирующей сферы приведен на рис. 1, а для случая  $\text{Kn} = 0.1$ . Здесь и ниже температуры  $T_{||}$ ,  $T_{\perp}$  и  $T = (T_{||} + 2T_{\perp})/3$  (вдоль радиуса, перпендикулярно ему и общая) отнесены к температуре на бесконечности. Число Маха определено по общей температуре  $T$ , в том числе и в окрестности конденсирующей сферы, где это определение можно считать условным, но допустимым для качественной характеристики ускорения потока типа стока. Снижение температуры  $T$  вблизи сферы не вызывает вопроса, так как оно может отражать как ускорение потока, так и отвод тепла к сфере ( $T_s = 0$ ). Не нуждается в качественном объяснении понижение температуры  $T_{||}$ . Характерным и неожиданным оказалось повышение температуры  $T_{\perp}$  над температурой на бесконечности. Этот эффект нельзя трактовать односторонне как неравновесный. Он связан с натеканием газа на объект ограниченных



**Рис. 1.** Распределение температур по направлениям и числа Маха для  $Kn = 0.1$  (a),  $Kn = 0.01$  (b),  $Kn = 1$  (c).

размеров, соизмеримых с длиной свободного пробега, когда энергия направленного движения в выбранной трубке тока переносится не только на объект, но и на окружающую его газовую оболочку за пределами трубки тока. Следует также отметить некоторое превышение

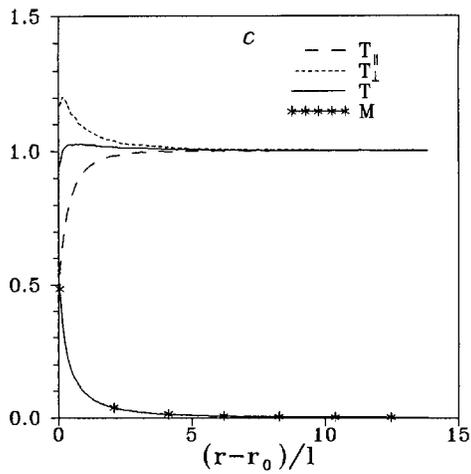
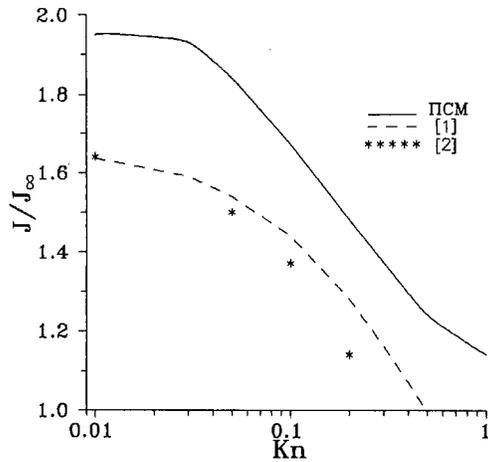


Рис. 1 (продолжение).

общей температуры над температурой на бесконечности. Очевидно, что такой эффект невозможен в одномерном случае конденсации на плоской поверхности. Но даже при конденсации на сфере с  $Kn = 0.01$  (рис. 1, *b*) описанный эффект не имеет места.

На рис. 1, *c* приведено распределение параметров для случая  $Kn = 1$ . Поведение температуры качественно мало отличается от предыдущего случая. Следует лишь отметить существенное уменьшение размера неравновесной зоны (в длинах свободного пробега) по сравнению с рис. 1, *a* и *b*. Проведение дополнительных численных экспериментов показало, что пик превышения общей температуры над  $T_\infty$  лежит в промежутке чисел Кнудсена от 0.1 до 1. При дальнейшем увеличении числа Кнудсена этот эффект становится менее выраженным, что объясняется, по-видимому, уменьшением массового потока к сфере.

Из рисунков видно, что с уменьшением числа Кнудсена от 1 до 0.01 скорость газа у поверхности становится сверхзвуковой, причем по любой температуре. Не обсуждая условность определения числа Маха у поверхности, заметим, что поступательная неравновесность становится заметной при относительно малой дозвуковой скорости, т. е. существенное ускорение потока в диапазоне чисел Кнудсена, больших 0.01, происходит в неравновесной области.



**Рис. 2.** Зависимость относительно удельного массового потока  $J/J_\infty$  от числа Кнудсена для данных, полученных методом прямого статистического моделирования [ПСМ] [1,2].

Описанной эволюции зоны существенной неравновесности при изменении числа Кнудсена от 0.01 до 1 соответствует зависимость относительно удельного массового потока  $J/J_\infty$  от числа Кнудсена на рис. 2. Здесь  $J_\infty = 1/4n_\infty V_\infty$  — удельный массовый поток на поверхность при  $Kn \rightarrow \infty$ ,  $V_\infty = \sqrt{8RT_\infty/\pi}$ , а  $R$  — газовая постоянная. Из этих данных следует, что максимальное изменение расхода соответствует зоне существенной перестройки потока, когда, в частности, отмечается слабое превышение тепловой энергии газа над тепловой энергией на бесконечности — эффект, известный по исследованиям структуры ударных волн в газе. Существующие модели конденсации [1,2] дают заниженное значение  $J/J_\infty$  для условий конденсации на абсолютно черной сфере.

Проведенное исследование показало наличие существенной неравновесности вблизи абсолютно черной сферы, которая приводит к отличию значений  $J/J_\infty$  по сравнению с данными [1,2], полученными в предположении малого отличия состояния пара на бесконечности, от условий насыщения по температуре поверхности поглощающей сферы.

## Список литературы

- [1] *Yamamoto K., Nishitani T.* // Proc. of the 14th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics / Ed. by H. Oguchi. 1984. V. II. P. 893–900.
- [2] *Humber G.F., Titulaer U.M.* // Proc. of the 17th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics / Ed. by E. Beilich. 1990. P. 1266–1273.
- [3] *Гусев В.Н., Жбакова А.В.* // Изв. АН СССР. МЖГ. 1968. № 3. С. 109–113.
- [4] *Bird G.A.* Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. Oxford: Clarendon Press, 1994. 458 p.