

РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ГИДРОДИНАМИКИ ОБТЕКАНИЯ ПРОНИЦАЕМОГО ТЕЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ MPI ТЕХНОЛОГИЙ

МАДЕРА А.Г.

*Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук (www.niisi.ru), г. Москва, Россия*

alexmadera@mail.ru

АКЖОЛОВ М.Ж.

*Институт проблем проектирования в микроэлектронике
Российской академии наук (www.ippm.ru), г. Москва, Россия*

ak-1@mail.ru

DECISIONS OF THE LARGE DIMENSION PROBLEMS FOR EXAMPLE OF HYDRODYNAMICS OF PERMEABLE BODY BY THE MPI TECHNOLOGY

MADERA A.G.

*Scientific-Research Institute for System Studies,
Russian Academy of Sciences (www.niisi.ru), Moscow, Russia*

alexmadera@mail.ru

AKZHOLOV M.ZH.

*Institute for microelectronics designing problems,
Russian Academy of the Sciences (www.ippm.ru), Moscow, Russia*

ak-1@mail.ru

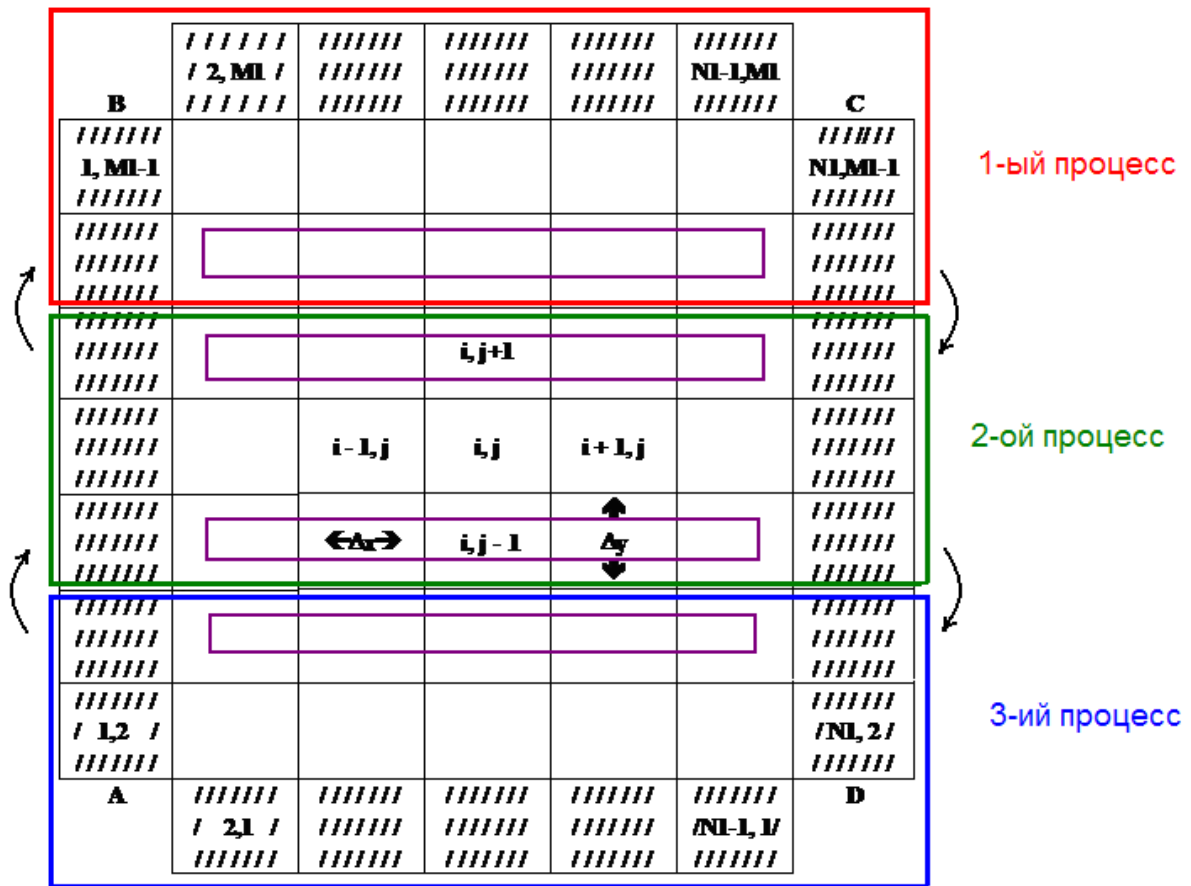
Данная работа посвящена решению задач обтекания проницаемого тонкого тела методом крупных частиц на высокопроизводительном вычислительном комплексе Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН) в режиме удаленного доступа через Интернет (www.jscc.ru). Данная работа выполнялась на вычислительном комплексе МВС-100К, находящемся на сегодняшний день в мировом рейтинге TOP500 (<http://top500.org>) на 38-м месте.

Алгоритм метода крупных частиц может быть успешно отображен на архитектуру современных и перспективных суперЭВМ: многопроцессорных ЭВМ, многомашинных вычислительных комплексов с нетрадиционной архитектурой, вычислительных машин потоков данных (data flow) и т. п. [1]. Для реализации параллельной части программ использовался стандарт MPI (The Message Passing Interface).

Первые исследования течений сплошных сред через пористую среду были проведены Н.Е. Жуковским, а затем развиты в работах С.А. Христиановича, П.Я. Полубариновой-Кочиной и др. Для тонкого тела модель проницаемости впервые была предложена Х.А. Рахматулиным. Достаточно подробные исследования обтекания проницаемого тонкого тела были проведены в работах [2 и др.].

Здесь мы предлагаем результаты расчетов обтекания полупроницаемого тонкого тела с использованием линейно-кинематической модели проницаемости, которая имеет следующий вид:

$$W_{ip} = k \cdot W_n, \quad (1)$$



где W_{np} – значение вектора скорости через проницаемые границы, k – линейный кинематический коэффициент проницаемости среды $0 \leq k \leq 1$, W_n – нормальная компонента вектора скорости потока у проницаемой границы. Коэффициент проницаемости k задавался в диапазоне $0 \leq k \leq 1$, который охватывает все режимы от полного непротекания до свободного протекания. Исследовались как до-, так и сверхзвуковые режимы обтекания.

Рис. 1. Разбиение заданной $M \times N$ матрицы на подматрицы.

В рамках единого численного подхода проведены исследования с помощью линейно-кинематической модели проницаемости. Подробно исследовано обтекание проницаемого тонкого тела во всем диапазоне проницаемости от непротекания до свободного течения. В ходе выполнения работы удалось добиться повышения скорости решения задачи на суперкомпьютерном комплексе МСЦ РАН. Проведенные исследования и построенные графики зависимости времени работы программы, от числа вычислительных узлов, показывают эффективность загрузки суперкомпьютера МВС-100К.

Реализация параллельного алгоритма метода крупных частиц

Задана матрица размером $M \times N$ с количеством расчетных ячеек $(M-2) \times (N-2)$. Ячейки, не используемые в расчетах, являются фиктивными и необходимы для постановки граничных условий. Для распараллеливания расчета матрица разбивается на подматрицы по блокам строк следующим образом: для корректной работы алгоритмов необходимо пересылать на эйлеровом этапе данные о давлении и вертикальной компоненте скорости. На лагранжевом этапе – данные о давлении, внутренней энергии, плотности и вертикальной компоненте скорости. Всего в количестве шести величин.

Таким образом при параллельной обработке матрицы $N \times M$ методом полос во время одной итерации пересылается $6 \cdot 2 \cdot M \cdot (num-1) \cdot 64$ байт данных. Например, для расчета матрицы в 1000 столбцов на 16 процессорах на каждой итерации необходимо пересылать 11 мегабайт данных.

Ниже приведены результаты тестирования параллельного алгоритма метода крупных частиц на суперкомпьютерном комплексе МВС-100К МСЦ РАН.

Таблица 1.

Кол-во процессов	1 млн.	4 млн.	9 млн.
1	46,02	193,13	452,98
4	13,20	68,04	158,99
16	4,60	18,89	43,78
64	1,26	5,21	11,57
144	0,85	2,42	5,21

Результаты исследований, приведенные в табл. 1 и на рис. 2, показывают, что, начиная с 32 вычислительных узлов и с дальнейшим увеличением количества вычислительных процессоров, время выполнения программы не уменьшается. Далее расчеты проводились на 32 вычислительных узлах суперкомпьютера МВС-100К, показавшем свою эффективность для данного алгоритма.

Анализ полученных результатов физических процессов

При обтекании тонкого проницаемого тела с различными степенями проница-

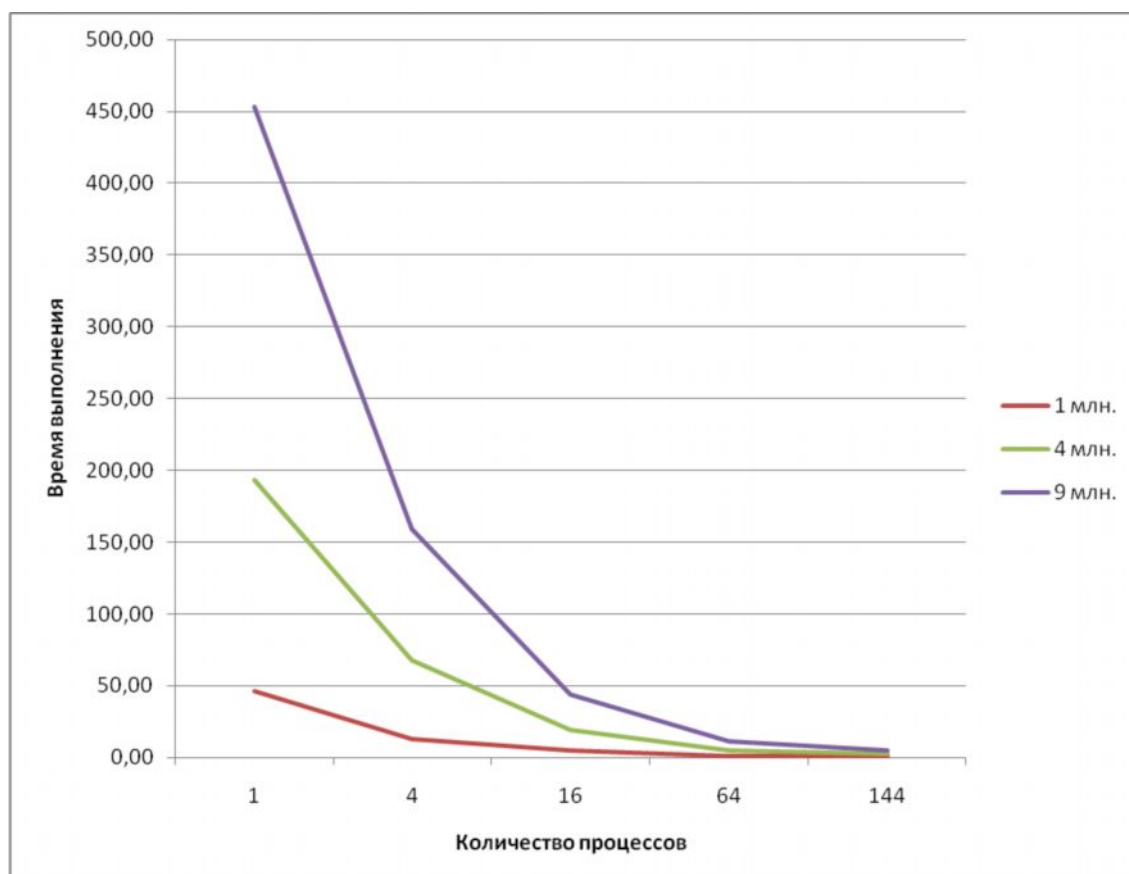


Рис.2. Зависимость времени выполнения программы от количества процессоров.

емости (от непроницаемого тела до безпрепятственного (свободного) течения) за телом образуются сложные вихревые и безвихревые течения различного рода. Эти сложные структуры течения за проницаемым телом зависят от физических граничных условий на поверхности обтекаемого тонкого тела. Такие физические граничные условия имеют место при протекании через перфорированные тела, при течении сплошных сред через пористую среду и др. Получение

точных численных результатов, адекватных реальным физическим процессам, во многом зависит от качества математической модели изучаемых процессов. С этой целью были проведены достаточно подробные исследования обтекания

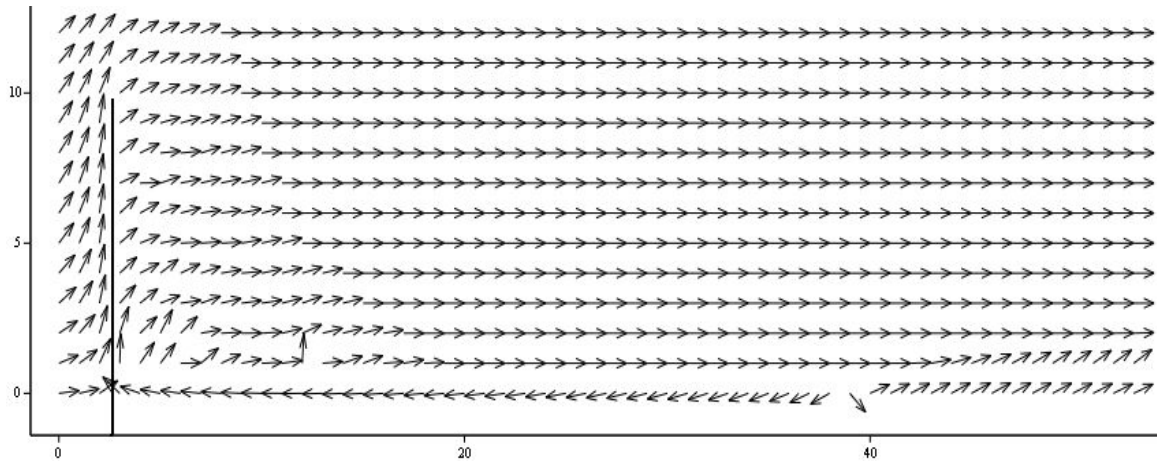


Рис.3. Поле вектора скорости при $k=0.0$.

проницаемого тонкого тела. Ниже приведены некоторые результаты данных исследований (рис. 3 – 8).

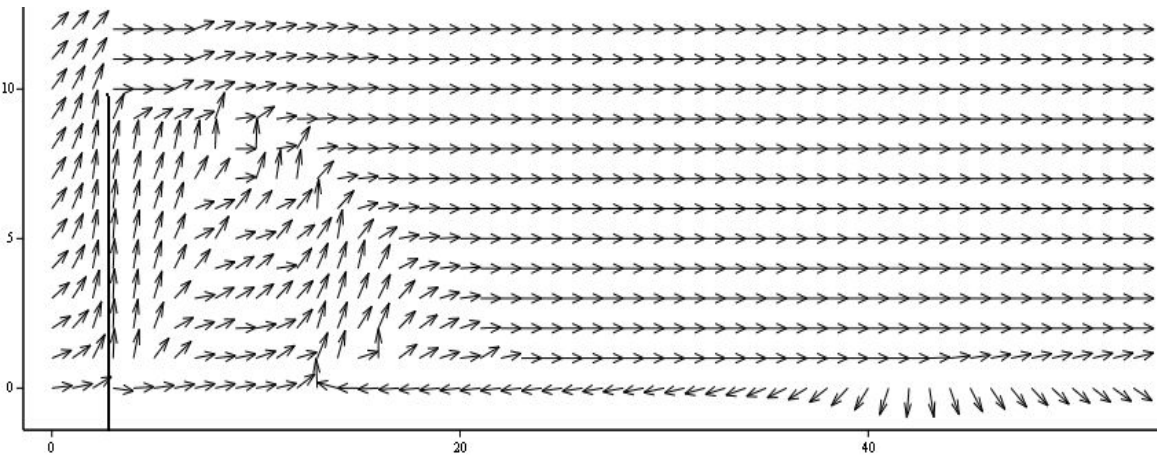


Рис.4. Поле вектора скорости при $k=0.1$.

При $k=0.0$, который соответствует тонкой твердой стенке, за пластиной имеет место известная структура возвратно-циркуляционного течения. За пластиной ближе к плоскости симметрии имеет место возвратное течение "справа-налево", и толщина этого слоя с приближением к тонкому телу увеличивается. С приближением к корме тонкого твердого тела этот слой заворачивается вертикально вверх и, встречаясь с основным потоком, уносится вместе с ним. По-

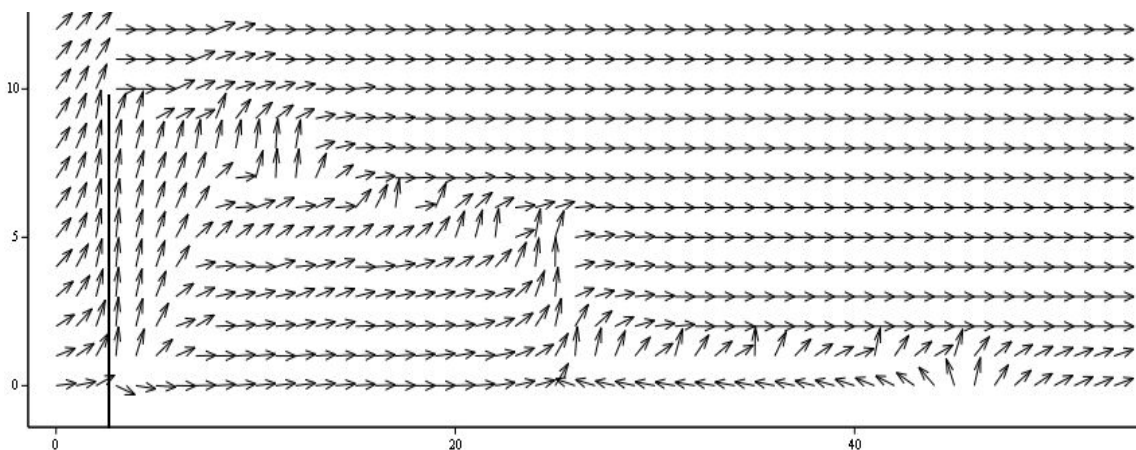


Рис.5. Поле вектора скорости при $k=0.175$

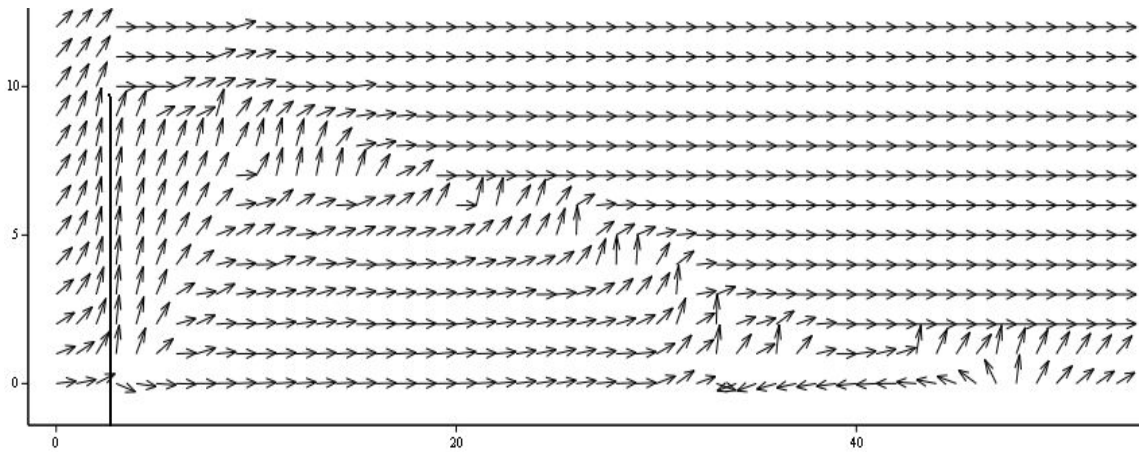


Рис.6. Поле вектора скорости при $k=0.225$

люс центра вращения возвратно-циркуляционного движения находится за тонким телом (рис.3).

За слабо пропускающим ($k=0.1$) тонким телом образуется очень сложная вихревая зона. В этом случае, вблизи плоскости симметрии, начиная от экрана ($i=3$) и до месторасположения,

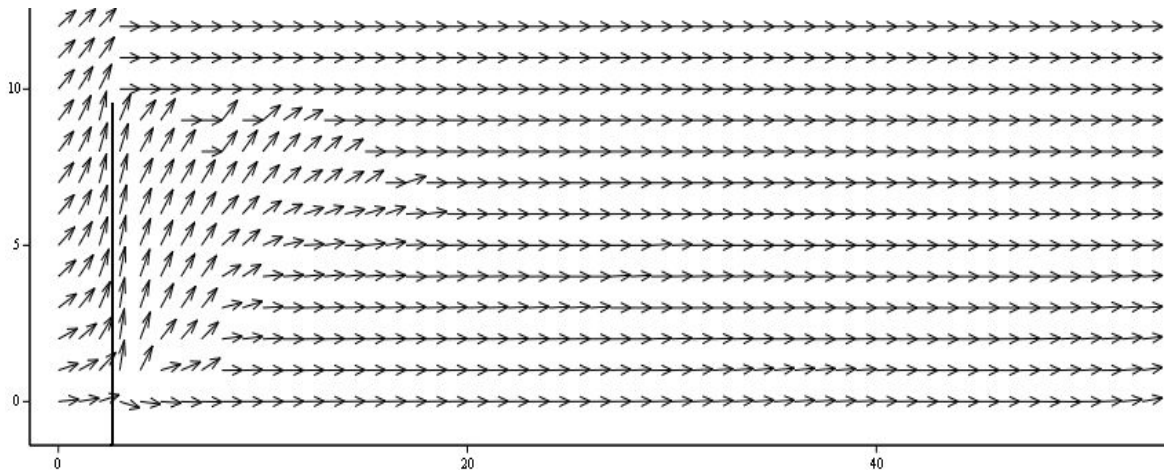


Рис.7. Поле вектора скорости при $k=0.5$.

соответствующему расстоянию $i=17$ по оси ОХ, направление движения потока осуществляется слева - направо. Другой поток расположен за пластиной ближе к плоскости симметрии справа-налево, начало которого находится за $i=41$. В районе $i=17$ по оси ОХ происходит встреча (столкновение) двух потоков. Эти слои, заворачиваясь вертикально вверх и, встречаясь с основным потоком, частично уносятся им (рис.4).

При $k=0.175$ реализуется сквозной поток ближе к плоскости симметрии. Возвратно-

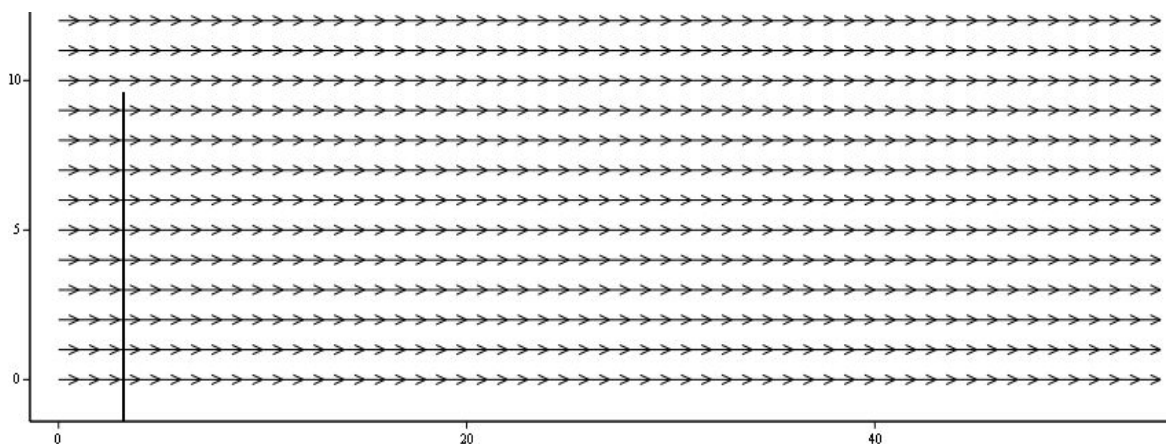


Рис.8. Поле вектора скорости при $k=1.0$

циркуляционная зона отходит от проницаемого тела; при этом ее размер уменьшается (рис.5).

С увеличением коэффициента проницаемости ($k=0.225$) происходит дальнейшее увеличение толщины сквозного потока вдоль плоскости симметрии и уменьшение размера возвратно-циркуляционной зоны (рис.6).

При значении $k=0.5$ возвратно-циркуляционное течение пропадает (рис.7). Реализуется безотрывное течение с некоторым сопротивлением через проницаемую пластину; перед пластиной поток под тормаживается, в окрестности пластины линии тока искривлены и обтекают верх пластины в районе ее кромки.

Дальнейшее увеличение значения линейного кинематического коэффициента проницаемости k приводит к уменьшению сопротивления проницаемого тонкого тела. При этом происходит "выравнивание" физических параметров перед и за проницаемой тонкой пластиной. Значение $k=1.0$ соответствует полной проницаемости (беспрепятственному течению (рис.8)). В этом случае все газодинамические параметры во всем поле течения за все время проведения счета не изменяются и равны параметрам невозмущенного набегающего потока.

Литература

1. В.С. Бурцев. Параллелизм вычислительных процессов и развитие архитектуры супер-ЭВМ. –М.: ИВВС РАН, 1997. –152 с.
2. Х.А. Рахматулин. Обтекание проницаемого тела. Вестник Московского университета, серия физико-математических и естественных наук, 1950. № 3, с. 3 – 21.
3. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. –М.: Книга, 1982. –392 с.
4. М.Ж. Акжолов, А.Г. Мадера, А.Н. Сотников. Численные методы решения задач математической физики на высокопроизводительном вычислительном комплексе МСЦ (системы МВС-1000/М) в режиме удаленного доступа//Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). М.: 2004. – 64 с.