

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

На правах рукописи

Чивилихин Сергей Анатольевич

Создание и исследования класса математических моделей течения вязкой
жидкости с подвижной границей при малых числах Рейнольдса

Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование, численные мето-
ды и комплексы программ

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2014

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Течения вязкой ньютоновской жидкости с подвижной границей при малых числах Рейнольдса в настоящее время активно изучаются в связи с двумя основными приложениями - описанием процессов формирования изделий из стекла и расчетов течений жидкости в наноразмерных областях.

Создание новых и совершенствование существующих технологических процессов, связанных с течениями стекол, приводит к необходимости исследования широкого класса гидродинамических эффектов, разработки методов качественного и количественного анализа течений со свободной границей. Эволюция свободной поверхности высоковязкой жидкости определяется объемными и поверхностными силами, приложенными к рассматриваемому объему жидкости. Весьма существенным является исследование устойчивости процессов течения жидкости со свободной границей. В первую очередь, требуется получить условия устойчивости рассматриваемого течения. При малых отклонениях от устойчивой конфигурации жидкость асимптотически приближается к равновесной форме. При этом представляет интерес характерное время релаксации и последовательность конфигураций, которую принимает жидкость в процессе релаксации к равновесию. Для неустойчивых конфигураций требуется ответить на сходные вопросы - определить характерное время развития неустойчивости и эволюцию поверхности в ходе развития неустойчивости.

Течения жидкости в наноразмерных областях до сих пор изучены явно недостаточно. Многие яркие гидродинамические эффекты, выявленные экспериментально, не нашли должной теоретической интерпретации. Более того, не существует адекватной системы уравнений нанофлюидики, аналогичной уравнениям классической гидродинамики. Основным методом исследований в этой области является молекулярная динамика, которая позволяет

описывать течения лишь в весьма малых объемах жидкости, зачастую недостаточных для описания гидродинамики всей рассматриваемой наносистемы. В этой ситуации использование обычных уравнений гидродинамики для описания нанотечений представляется разумным компромиссом.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы было построение и исследование математических моделей течения вязкой жидкости с подвижной границей при малых числах Рейнольдса.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи:**

1. Построение математической модели плоских стоксовых течений с подвижной границей, основанной на разложении давления в ряд по полной системе гармонических функций.
2. Получение, для случая действия капиллярных сил, строгой верхней оценки закона убывания периметра двумерной области.
3. Разработка метода качественного анализа процесса релаксации малых возмущений плоской свободной поверхности жидкости под действием гравитационных и капиллярных сил.
4. Исследование устойчивости диффузионного роста плоской свободной границы жидкости.
5. Построение математической модели эволюции нанотрубок в процессе гидротермального синтеза.
6. Построение математической модели течения внутри нанотрубки, учитывающей наличие кристаллитов в жидкости.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель плоских стоксовых течений с подвижной границей, позволяющая рассчитать распределение скорости на границе для произвольной геометрии области и произвольных поверхностных силах. В отличие от метода граничных элементов, модель позволяет, в ряде случаев, получать точные аналитические результаты. В случае действия капиллярных сил и внешнего давления, модель дает строгую верхнюю оценку времени существования области с заданным числом компонент связности границы.
2. Метод качественного анализа процесса релаксации малых возмущений плоской свободной поверхности жидкости под действием гравитационных и капиллярных сил. Метод позволяет выявить существенные отличия в характере релаксации возмущений с пространственным масштабом большим и малым по сравнению с гравитационно-капиллярным масштабом, а также исследовать формирование частично-упорядоченной структуры поверхности.
3. Математическая модель, описывающая устойчивость диффузионного роста плоской свободной границы жидкости. Найдена критическая скорость роста поверхности, превышение которой приводит к формированию фрактальной структуры поверхности.
4. Математическая модель эволюции нанотрубок в процессе гидротермального синтеза. Модель включает описание скручивания отдельной нанотрубки под действием внутренних напряжений в ее стенке и уравнения эволюции ансамбля нанотрубок.
5. Математическая модель течения внутри нанотрубки, учитывающая наличие кристаллитов в жидкости. Модель описывает характер зависимости эффективной вязкости жидкости в нанотрубке от радиуса нанотрубки, качественно соответствующий экспериментальным данным. Модель дает объяснение эффекту «запирания» нанотрубки при малых значениях перепада давления.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в журналах из списка ВАК

1. Belonenko M.B., Chivilikhin S.A., Gusarov V.V., Popov I.Yu., Rodygina O.A. Soliton-induced flow in carbon nanotubes // Europhysics Letters. 2013. V.101. № 6. P. 66001-p1 - 66001-p3.
2. Aryslanova E.M., Alfimov A.V., Chivilikhin S.A. Model of porous aluminum oxide growth in the initial stage of anodization // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics, 2013, V.4, N5, P. 585–591.
3. Chivilikhin S.A., Amosov A.S., Melikhov I.F. Response of a stratified viscous half-space to a perturbation of the free surface // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics, 2013, V.4, N5, P. 592–604.
4. Pogosyan T.N., Chivilikhin S.A. Calculation of nanoparticle surface shape instability development // Proc. SPIE, Nanotechnology VI. 2013. V.8766. P.87660O-1 - 87660O-6.
5. Aryslanova E.M. , Alfimov A.V., Chivilikhin S.A. Modelling the initial stage of porous alumina growth during anodization // Proc. SPIE. Nanotechnology VI. 2013. V.8766. P. 87660T-1 - 87660T-16.
6. Alfimov A.V., Aryslanova E.M., Chivilikhin S.A. Simulation of size distribution function's evolution in colloidal solutions of zinc oxide nanoparticles // Proc. SPIE, Nanotechnology VI. 2013. V.8766. P.87660R-1 - 87660R-8.
7. Мелихов И.Ф., Чивилихин С.А. Малые колебания нанослоя на начальном этапе скручивания наносвитка // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. Т.3. № 4. С.28-35.
8. Чивилихин С.А. Релаксация малых возмущений плоской поверхности высоковязкой жидкости // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. Т.3. № 4. С.54-65.

9. Chivilikhin S.A, Popov I.Yu., Aryslanova E.M., Vavulin D.N., Gusarov V.V. Liquid flow in nanotubes // Journal of Physics: Conference Series. 2012. V.345. № 012036. P.1-3.
10. Vavulin D., Alfimov A., Aryslanova E., Panteleev A., Chivilikhin S. Determination of nanoscale inhomogeneities in scattering and absorbing medium // Journal of Physics: Conference Series. 2012. V.345. № 012021. P.1-7.
11. Chivilikhin S.A., Gusarov V.V., Popov I.Yu. Flows in nanostructures: hybrid classical-quantum models // Nanosystems: Physics, chemistry, mathematics. 2012. V.3. № 1. P.7-26.
12. Chivilikhin S.A., Popov I.Yu., Gusarov V.V. Planar flows in nanoscale regions // Nanosystems: Physics, chemistry, mathematics. 2011. V.2. № 3. P.49-52.
13. Чивилихин С.А. Плоские стоковые течения со свободной границей // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. 2011. Т.4. № 3. С.1257-1258.
14. Голубок А.О., Пинаев А.Л., Феклистов А.А., Чивилихин С.А. Об устойчивости вольфрамовых зондов при функционировании сканирующего зондового микроскопа в режимах динамической силовой литографии и наноиндентирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 4(74). С. 91-97.
15. Голубок А.О., Пинаев А.Л., Чивилихин Д.С., Чивилихин С.А. Динамическая силовая литография на тонких металлических пленках в сканирующем зондовом микроскопе с пьезорезонансным датчиком локального взаимодействия // Научное приборостроение. 2011. Т.21. №.1. С.31-43.
16. Савельев Р.С., Розанов Н.Н., Социлин Г.Б., Чивилихин С.А. Релей-тейлоровская неустойчивость запыленного газа // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики // 2011. №3(73). С.18-22.

17. Альфимов А.В., Арысланова Е.М., Вавулин Д.Н., Андреева О.В., Темнова Д.Д., Лесничий В.В., Альмяшев В.И., Кириллова С.А., Чивилихин С.А., Попов И.Ю., Гусаров В.В. Диффузия света в среде с наноразмерными неоднородностями // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. №2(72) С.105-108.
18. Попов И.Ю., Родыгина О.А., Чивилихин С.А., Гусаров В.В. Солитон в стенке нанотрубки и стоково течение в ней // Письма в Журнал технической физики. 2010. тТ. 36. Вып. 18. С.48 – 54.
19. Ершова А.А., Попов И.Ю., Чивилихин С.А., Гусаров В.В. Волноводные моды и условия прилипания для течения в наноканале // Доклады Академии наук. 2010. Т.432. №6. С.761-763.
20. Чивилихин С.А., Попов И.Ю., Чивилихин Д.С., Гусаров В.В. Диффузионно-контролируемый рост системы наносвитков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. Т.53. №3/2. С.201-204.
21. Popov I. Yu., Chivilikhin S.A., Gusarov V. V. Model of fluid flow in nanotube: classical and quantum features //Journal of Physics: Conference Series. 2010. V. 248. №012006. № P.1-8.
22. Чивилихин С.А., Попов И.Ю., Свитенков А.И. Чивилихин Д.С., Гусаров В.В. Формирование и эволюция ансамблей наносвитков на основе соединений со слоистой структурой // Доклады Академии наук. 2009. Т.429. № 2. С.185-186.
23. Чивилихин С.А., Попов И.Ю., Богданов М.С., Лесничий В.В., Гусаров В.В. Гидродинамика скручивания наносвитка // Известия высших учебных заведений. Физика. 2009. Т.52. №11. С.3-6.
24. Свитенков А.И., Лесничий В.В., Чивилихин С.А., Гусаров В.В. Морфология и динамика нанофазы// Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. №1(59). С.52-56.
25. Chivilikhin S.A., Gusarov V.V., Popov I.Yu., Svitenkov A. I. Model of fluid flow in a nano-channel // Russian Journal of Mathematical Physics. 2008. V.15. №3. P.410-412.

26. Чивилихин С. А., Свитенков А. И., Лесничий В. В. Элементарные течения в наногидродинамике // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2008. №6(51). С. 309-315.
27. Чивилихин С.А., Попов И.Ю., Гусаров В.В. Динамика скручивания нанотрубок в вязкой жидкости // Доклады Академии наук. 2007. Т.412. №2. С.201-203.
28. Чивилихин С.А., Попов И. Ю., Блинова И. В., Кириллова С. А., Коновалов А. С., Облогин С. И., Тишкин В. О., Чернов И. А., Гусаров В. В. Моделирование процессов формирования наноразмерных свитков // Физика и химия стекла. 2007. Т.33. Вып.4. С.442-448.
29. Блинова И.В., Попов И.Ю., Свитенков А.И., Чивилихин С.А. Формирование наносвитков в вязкой жидкости // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2007. №8(42). С.56-59.
30. Блинова И.В., Попов И.Ю., Чивилихин С.А. Скручивание нанотрубки в вязкой жидкости // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 7(30). С.65-70.
31. Чивилихин С.А. Двумерное стоковское течение вязкой жидкости со свободной границей под действием капиллярных сил // Журнал прикладной механики и технической физики. 1992. №5. С.47-51.
32. Чивилихин С.А. Плоское капиллярное течение вязкой жидкости с многосвязной границей в приближении Стокса // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1992. №1. С.117-122.
33. Чивилихин С.А. Динамика свободной многосвязной поверхности вязкой жидкости // Доклады АН СССР. 1990. Т.315. №3. С.558-560.
34. Чивилихин С.А. Релаксация малого локального возмущения поверхности вязкой жидкости в приближении Стокса // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1985. №3. С.133-137.

35. Сергеев В.П., Чивилихин С.А.. Образование структуры на поверхности кварцевого стекла при его синтезе из газовой фазы // Письма в Журнал технической физики. 1983. Т.9. Вып.9. С.523-525.
36. Крылов О.С., Сергеев В.П., Хотимченко В.С., Чивилихин С.А., Эраносян Г.М. Полигональная оптическая неоднородность – проявление памяти кварцевого стекла // Доклады АН СССР. 1983. Т.273. №5. С.932-934.

Главы в книгах

1. S.A. Chivilikhin, I.Yu. Popov, V.V. Gusarov. Fluid Flow in Nanotubes // In book “New Developments in Hydrodynamics Research”. Book edited by: Maximiano J. Ibragimov and Miroslava A. Anisimov. ISBN: 978-1-62081-223-5. PP.265-274. NOVA. 2012.
2. S. Chivilikhin, A. Amosov. Planar Stokes flows with free boundary // In book “Hydrodynamics - Advanced Topics”. Book edited by: Dr. Harry Edmar Schulz, André Luiz. ISBN 978-953-307-596-9. PP.77-92. Intech. 2011.

Статьи в изданиях, не входящих в список ВАК

1. Pogosian T.N., Chivilikhin S.A., Popov I. Yu., Gusarov V.V. Research of instability development of nanoparticle surface shape // Proceedings of the XLI Summer School – Conference “Advanced problems in mechanics”. St.-Petersburg. 2013. P.443 - 448.
2. Chivilikhin S.A., Popov i.Yu., Gusarov V.V. Planar flows in nanoscale regions // Proceedings of XXXIXI International Summer School–Conference “Advanced problems in mechanics”. St.-Petersburg. 2011. P.101-105.
3. Popov I.Yu., Rodygina O.A., Chivilikhin S.A., Gusarov V.V., Solitons and flow in nanotube // Proceedings of XXXVIII International Summer School–Conference “Advanced problems in mechanics”. St.-Petersburg. 2010. P.558-560.

4. Chivilikhin S.A. Evolution of free surface of high viscous liquid due to capillary forces // Proceedings of XXXVIII Summer School – Conference “Advanced problems in mechanics”. St.-Petersburg. 2010. P.130-133.
5. Альмяшев В.И., Альфимов А.В., Арысланова Е.М., Д.Вавулин Д.Н., Кириллова С.А., Попов И.Ю., Чивилихин Д.С., Чивилихин С.А., Гусаров В.В.. Теоретическое и экспериментальное исследование физико-химических процессов формирования, трансформации и транспорта наноструктур // Труды НИЦ фотоники и оптоинформатики: Сборник статей / Под ред. И.П. Гурова, С.А. Козлова - СПб: СПбГУ ИТМО. 2010. С. 140 - 167.
6. Альмяшева О.В., Альмяшев В.И., Ершова А.А., Кириллова С.А., Красилин А.А., Попов И.Ю., Свитенков А.И., Чивилихин С.А., Гусаров В.В. Физико-химические и гидродинамические процессы формирования, трансформации и транспорта наноструктур // Труды национального исследовательского центра фотоники и оптоинформатики. Санкт-Петербург, 2009. В.1. С.109-124.
7. Chivilikhin S.A., Korytkova E.N., Maslennikova T.P., Popov I.Yu. , Chivilikhin D. S., Gusarov V.V. Diffusion controlled evolution of nanorolls ensemble // Proceedings of the XXXVII Summer School. Advanced problems in mechanics. St.-Petersburg. 2009. P. 152-156.
8. Чивилихин С.А. Формирование и оптические свойства световодов на фотонных кристаллах со структурными дефектами // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. Сборник статей. Под ред. С.А. Козлова, И.П.Гурова. СПб: СПбГУ ИТМО. 2006. С.54-62.
9. Chivilikhin S. A., Kuznetsov P. V., Tanaev A. V., Korostelev V. S., Babushkin M. J. , Kondratijev Yu.N., Ivanov G.A., Isaikina E.D. Fluid boundary sticking in process of lightguides fabrications // Third International Soviet Fiber Optics and Telecommunications Conference. St. Petersburg, Russia, April 26-30, 1993. In Proceeding ISFOC'93. P. 351-357.
10. Chivilikhin S.A., Tsifrinovich G.L., Maslov M.S. Evolution of fractal trees on the boundary of viscous fluid // // Third International Soviet Fiber Optics and Telecommunications Conference. St. Petersburg, Russia, April 26-30, 1993. In Proceeding ISFOC'93. P.358-262.

11. Chivilikhin S.A. Propagation of sintering wave in porous viscous medium // Second International Soviet Fiber Optics and Telecommunications Conference. St. Petersburg, Russia, October 5-9. 1992. P. 262-264.
12. Chivilikhin S.A., Tarakanov S.V., Tselovalnikova L.M., Khoruznikova T.D., Sergeev V.P., Alekseev V.P., Kharshak A.A. Viscous flow of silica glass in lightguides fabrication // The First International Soviet Fiber Optics Conference. 1991. P.214-219.
13. Сергеев В.П., Чивилихин С.А. Термофоретическое осаждение мелкодисперсных частиц из осесимметричного потока, набегающего на подложку // Высокочистые вещества, N4, 1988. С.243 - 245.
14. Krilov O.S., Sergeev V.P., Chotimchenko V.S., Chivilikhin S.A., Eranosjan G.M. Zur Erscheinung der Selbstorganisation bei der Synthese des Kieselglases aus der Gasphase // 9 Internationale Baustoff- und Silikattagung. Weimar, 1985. P.27 - 34.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. Чивилихин С.А., Чивилихин Д.С. Программа расчета процессов формирования наночастиц, нанопластин и нанотрубок "NAEN". Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23 октября 2009 г. N2009615889.
2. Чивилихин С.А., Свитенков А.И. Программа расчета транспортных свойств нанотрубок "NanoFlow". Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 1 октября 2009 г. N2009615463.