

УДК 539.4:548.4:621.77:669.539.382:669.17

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. Д. Сарычев

Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В работе приводится анализ теоретических основ формирования микро- и наноразмерных гидродинамических неустойчивостей. В традиционных и современных технологиях встречаются развивающиеся на микро- и нанорасстояниях процессы, на которые раньше не могли обратить внимание. Выявление новых закономерностей и определение диапазона параметров, при которых они реализуются, определяет научную значимость и фундаментальность исследований. Рассмотрены конкретные физические ситуации, где реализуются или могут проявиться неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Практическая значимость поставленных задач заключается в создании принципиально новых технологий на базе полученных знаний. Описаны решенные задачи.

Ключевые слова: скорость роста, неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, микрофлюидика

Для цитирования: Сарычев В.Д. Разработка теоретических основ формирования микро- и наноразмерных гидродинамических неустойчивостей для создания принципиально новых технологий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 29 – 38.

DEVELOPMENT OF THEORETICAL FOUNDATIONS FOR THE FORMATION OF MICRO- AND NANOSCALE HYDRODYNAMIC INSTABILITIES FOR THE CREATION OF BREAKTHROUGH TECHNOLOGY

V. D. Sarychev

Siberian State Industrial University (42 Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The paper analyses the theoretical foundations of micro- and nanoscale hydrodynamic instabilities formation. In traditional and modern technologies, there are processes developing at micro and nano distances that previously could not be paid attention to. Identification of new patterns and determination of the range of parameters under which they are implemented determines the scientific significance and fundamental nature of research. Specific physical situations where Kelvin-Helmholtz instabilities are realized or can manifest themselves are considered. The practical significance of the tasks is to create fundamentally new technologies based on the gained knowledge. The solved tasks are described.

Keywords: growth rate, Kelvin-Helmholtz instability, microfluidics

For citation: Sarychev V.D. Development of theoretical foundations for the formation of micro- and nanoscale hydrodynamic instabilities for the creation of breakthrough technologies. *Bulletin of the SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 29 – 38 (In Russ.).

Введение

Впервые связать формирование локальных структур (капель) из движущейся струи жидкости с развитием неустойчивости поверхности удалось в конце XIX века Релею. Он предложил использовать анализ линейной устойчивости к

предсказанию размеров капель: среди всех неустойчивых длин волн выбирается такая, которая имеет самую высокую скорость роста. Другими словами, размер капель определяется такой длиной волны, при которой достигается максимум в зависимости инкремента или скорости

роста (growth rate) от длины волны. Использование идеи Релея продолжается в настоящее время и связано с фундаментальностью проблемы поиска выражения для наиболее неустойчивой длины волны для различных сред от масштабов вселенной до субатомных длин.

Целью настоящей работы является обзор исследований, в которых рассматриваются микро- и наноразмерные гидродинамические неустойчивости границы раздела, вызванные скольжением слоев относительно друг друга, так называемые неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (НКГ).

В работе исследуется разбиение области параметров на характерные зоны со специфическими режимами. Рассмотрены конкретные физические ситуации, где реализуются или могут проявиться НКГ. Предложены подходы для создания принципиально новых технологий.

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца

Обширные исследования неустойчивости Кельвина-Гельмгольца обусловлены практическим использованием при оптимизации и улучшении работы жидкостного реактивного и дизельного двигателей, устройств для получения порошков, струйной печати, микро- и нанокпель в медицине [1]. Для нахождения наиболее неустойчивой длины волны НКГ выводится и анализируется дисперсионное уравнение, которое связывает скорость роста и длину волны (или волновое число). Это зависимость от некоторого количества параметров. Как правило, это уравнение решается численно (или проводится приближенный аналитический анализ при определенных предположениях). Первый, кто взялся за поиск аналитического выражения для наиболее неустойчивой длины волны НКГ, был Д. Тейлор. В своей работе [2] он рассматривал НКГ в плоской постановке двух полубесконечных несжимаемых слоев жидкости различной плотности, одна из которых идеальная и движется относительно другой вязкой жидкости с определенной скоростью. В этой работе выведено трансцендентное дисперсионное уравнение от трех безразмерных параметров (в общем случае зависимость длины волны от трех безразмерных параметров). В приближении малости отношения плотностей идеальной жидкости к вязкой дисперсионное уравнение было сведено к алгебраическому уравнению от одного безразмерного параметра (зависимость длины волны от одного безразмерного параметра). Это позволило получить важный результат: универсальную зависимость наиболее неустойчивой длины волны от безразмерного параметра. В таком приближении зависимость скорости роста от длины волны имеет один максимум.

В работе [3] при численном решении трансцендентного дисперсионного уравнения впервые получены зависимости скорости роста от волнового числа. Эти зависимости при некоторых параметрах имеют два максимума (или два режима неустойчивости): первый режим – аэродинамический, который слабо зависит от вязкости; второй режим обусловлен вязкостью. В этой работе был проведен трехпараметрический анализ (отношение плотностей, число Вебера и число Онезорге) определения существования двух режимов, при этом выводы носят качественный характер. Двойственная роль вязкости НКГ анализируется в настоящее время, например в работе [4], где приведен трехпараметрический анализ (отношение плотностей, число Вебера и число Рейнольдса) режимов. При постоянном значении отношения плотностей получено разбиение плоскости параметров (число Вебера и число Рейнольдса) на области аэродинамической и вязко обусловленной неустойчивости. Четких границ этих областей не выявлено, так как дисперсионные уравнения брались в самом общем виде, а размерность пространства параметров равнялась трем.

Для более четкого выделения границ режимов необходимо провести аналитическое исследование выявления режимов, а для этого должно быть использовано упрощенное дисперсионное уравнение, которое справедливо при определенных предположениях.

В настоящей работе предполагается приближение коротких волн, для которого дисперсионное уравнение совпадает с дисперсионным уравнением вязко-потенциальной модели НКГ [5, 6]. В настоящее время вязко-потенциальная модель активно используется: М.К. Awasthi при исследовании различных гидродинамических неустойчивостей [7 – 12], НКГ для наножидкого слоя [13], взаимодействия НКГ с акустическими волнами [14]; для предсказания наноразмерных длин волн при развитии НКГ с умеренными скоростями скольжения [15]; в модели перемешивания слоев при электровзрывной обработке [16], формирования белого слоя в рельсах [17]; в модели формирования нано- и микрочастиц [18]. В работах [19, 20], используя разработанный графоаналитический подход, найдены параметры из трех областей, при которых в зависимости скорости роста от волнового числа реализуются один гидродинамический максимум, один вязко обусловленный максимум, одновременно два максимума.

Отметим работы, в которых приводятся результаты анализа дисперсионного уравнения НКГ с учетом вязкости и кусочно-постоянным профилем скорости [21 – 26]: не было обнару-

жено двух максимумов в зависимости скорости роста от длины волны, то есть вязкость играет роль только диссипации энергии.

Важна работа [15], где показана принципиальная роль вязкости. Сам факт того, что максимум обусловлен вязкостью, является примером формирования диссипативных структур и подобен известным явлениям: возникновению неустойчивости течения Пуазейля, пограничному слою Блазиуса, ячейкам Бенара, вихрям Толмина-Шлихтинга. Вязкость в этих примерах не приводит к затуханию движения, а, наоборот, ведет к появлению определенной динамической структуры. Двойственная роль вязкости при НКГ анализировалась в работах [27, 28].

Таким образом, задача о разбиении пространства параметров на характерные области при НКГ ставилась, но корректного решения не получила. Решение тесно связано с разработкой подходов создания принципиально новых технологий формирования микро- и наноструктур.

Severe plastic deformation (SPD)

При мегапластических деформациях (Severe Plastic Deformation (SPD)) реализуются наноструктурные состояния [29, 30]. При кручении под высоким давлением биметаллических слоев обнаружено формирование вихрей, подобных неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в жидкостях [31]. Авторы утверждают, что сходство только кажущееся, физические причины неустойчивостей принципиально отличаются от таковых в жидкостях. При этом использовано моделирование пластического течения и показано, что завихрения металлических слоев обусловлены пластической неустойчивостью из-за локального блокирования сдвиговой деформации. Такого сложного объяснения можно избежать, если заметить, что уравнения пластического течения сводятся к уравнениям Навье-Стокса с переменной вязкостью, тогда обнаруженные вихри при SPD объясняются НКГ с вязкостью. Выяснение справедливости двух разных точек зрения на природу формирования вихрей при SPD имеет важное практическое значение в определении механизма формирования наноразмерных структурно-фазовых состояний с размером зерна в несколько десятков нанометров («белый» слой), обнаруженных, например в рельсах [32]. Анализ формирования белого слоя в рельсах уделяется самое пристальное внимание [33 – 41]. Известно, что в процессе качения колеса по рельсу в зоне пятна контакта имеются участки скольжения [42], поэтому важно понимать, как ведет себя материал при скольжении. В работах [43 – 45] показано, что при скольжении материалы деформируются по механизму зернограничного про-

скольжения и ведут себя так, как если бы обладали ньютоновской вязкостью. Поэтому развивать теорию НКГ с вязкостью необходимо для понимания процессов эволюции рельсов в процессе длительной эксплуатации [46] и фрагментации материала при SPD [47].

Отметим, что рассматриваемая модель НКГ с вязкостью при скоростях скольжения порядка 1 м/с может давать максимум в наноразмерном диапазоне длин волн [48]. Следовательно, требуется дальнейшее развитие в направлении разбиения области параметров.

Микро- и нанокapли

Распад струи жидкости на капли в микро- и нанодиапазоне становится все более привлекательным благодаря их различным применениям в химии, медицине и других областях [49, 50]. Основная задача заключается в разработке фундаментальных научных принципов, которые объясняют возникновение различных режимов неустойчивости, вызванных микрофлюидным переносом. В обзоре [49] рассматриваются капиллярные потоки, способные растягивать границы раздела жидкостей до микрометрических размеров и меньше. Растяжение струи или сужение ее диаметра может происходить гидродинамическими (микрокапли) или электрическими (нанокapли) силами. Первый способ заключается в фокусировке жидкости из толстой струи в тонкую при совместном течении газа (co-flow focusing (CFF)), предложен в 1998 г. Gañán-Calvo [51]. Первые попытки моделирования CFF, основанные на исследовании неустойчивости границы раздела основного течения и газа с прямоугольными профилями скорости, не привели к параметризации экспериментальных данных. Поэтому в работе [52] для нахождения распределения скорости основного течения решали численно уравнения пограничного слоя для жидкости и газа. Для анализа устойчивости основного течения решали краевую задачу на собственные значения. В результате получены пять различных типов течений, которые в общих чертах объясняют общие особенности, наблюдаемые в экспериментах при распаде струи.

В серии работ [53 – 57] под руководством Ting Si экспериментально и теоретически изучалось течение CFF. В работе [53] анализ экспериментальных данных позволил в плоскости параметров число Рейнольдса – число Вебера выделить шесть областей, где режимы дробления струи на капли различаются. Линейная краевая задача на собственные значения решалась с базовыми профилями скорости в виде гиперболического тангенса. Совпадение теории и эксперимента было частичным. В работе [54] проведено ис-

следование неустойчивости поверхностей раздела коаксиальных струй жидкости при СФФ экспериментальными и численными методами. В работе [55] выбиралось основное течение: в центральной струе в виде параболического профиля, а для внешнего движущегося потока – в виде функции ошибок. Анализировалось численно дисперсионное уравнение. Теоретическая граница неустойчивости хорошо согласуется с экспериментальными и численными результатами. В работе [56] проведены исследования межфазной неустойчивости и струйно-капельный переход в процессе СФФ с помощью экспериментов, прямого численного моделирования уравнений Навье-Стокса и численного теоретического анализа дисперсионного уравнения. Построена фазовая диаграмма режимов струи и капания. В работе [57] при численном моделировании при некоторых параметрах обнаружена вихревая зона при взаимодействии газа с жидким конусом, исследуются ее размеры в зависимости от параметров задачи.

В работе [58] экспериментально и численно изучается устойчивость гидродинамической фокусировки конуса для случая, когда вторая среда находится в покое и является поверхностно-активным веществом. Показано, что значительно уменьшился диаметр капли.

Таким образом, теоретические результаты этих работ являются руководством при изготовлении микрокапель для практического применения, а экспериментальные данные по распаду коаксиальных струй могут быть использованы для верификации новых моделей.

Микроструи

По сравнению с микроструями исследованию свободных макроструй уделяется большее внимание из-за их широкого использования в различных областях науки и техники. Однако в последнее время интерес к изучению микроструй значительно возрос, что связано, в частности, с развитием МЭМС-технологий (микроэлектромеханические системы). Появилась возможность потенциального использования микроструй в различных процессах, например таких, как микроохлаждение, струйное горение, производство нанопорошков и другие. В последнее время появились результаты по исследованию дозвуковых ламинарных микроструй [59 – 67]. В работе [60] сформулированы основные свойства микроструй, некоторые из них следующие:

- механизм неустойчивости Кельвина-Гельмгольца для круглой струи с «ударным» профилем скорости на срезе сопла сохраняется до диаметра струи, равного примерно 5 мм, при меньших диаметрах не наблюдается;

- механизм развития микроструи как с ударным, так и с параболическим профилем скорости на срезе сопла кардинально меняется;

- обнаружены новые явления, связанные с трансформацией круглой микроструи в плоскую под воздействием поперечного акустического поля и с раздвоением микроструи на две развивающиеся независимо друг от друга струи.

Одним из важных приложений микроструй является охлаждение [68 – 72]. В работе [68] впервые обсуждалось охлаждение нагретой поверхности газовыми микроструями. Структура течения, образованного натеканием газовой микроструи на нагретую поверхность, принципиально отличается от структуры течения, образованного макроструей. Когда сопло находится очень близко к стене, выходящая из сопла струя может плавно и горизонтально перемещаться вдоль стены подобно потоку в канале. По мере увеличения расстояния между соплом и пластиной вблизи пластины формируются вихревые ячейки, которые значительно увеличивают теплоотдачу.

Своеобразный характер струйного течения вызывает большой интерес и требует дальнейшего изучения теплопередачи вдоль стенки. Численное моделирование расщепления круглой микроструи приводится в работе [73]. Полученные детальнее экспериментальные данные [65] позволяют верифицировать разрабатываемые в проекте модели.

Охлаждение рельсов

В Японии широкое распространение получил способ термической обработки воздухом (газовыми струями) [74]. В настоящее время этот способ используется на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для закалки рельсов. Охлаждение образцов рельсов осуществлялось на опытной установке, разработанной на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [75], основным элементом которой является пластина с перфорированными соплами, через которые подается воздух под избыточным давлением $(0,10 - 0,22) \cdot 10^5$ Па. Закалку рельсовых проб длиной до 400 мм проводили в течение 90 – 280 с после нагрева до температуры 900 °С. Диаметр сопел составлял 5 мм. Температуру замеряли с помощью термопар, которые запаивались в высверленные отверстия на глубине 5, 10 и 20 мм. По зависимости температуры от времени можно определить коэффициент теплообмена [76], по которому можно определить характер охлаждения. Является открытым вопрос, как влияет диаметр сопла на характер теплообмена, особенно в режиме микроструи.

Выводы

Показано важное значение разбиения области параметров на характерные зоны со специфиче-

скими режимами. Рассмотрены конкретные физические ситуации, где реализуются или могут проявиться НКГ. Предложены подходы для создания принципиально новых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eggers J., Villermaux J. Physics of liquid jets // Report on Progress in Physics. 2008. Vol. 71. Article 036601.
2. Taylor G.I. Generation of ripples by wind blowing over a viscous liquid. In: The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor. Bachelor G.K. ed. 1940. Vol. III. P. 244–254. Cambridge University Press, 1963.
3. Li X.И., Tankin R.S. On the temporal instability of a two-dimensional viscous liquid sheet // Journal of Fluid Mechanics. 1991. Vol. 226. P. 425–443.
4. Dasgupta D., Nath S., Bhanja D. A study on dual role of viscosity on the stability of a viscous planar liquid sheet surrounded by inviscid gas streams of equal velocities, and prediction of resulting droplet distribution using maximum entropy formulation // Physics of Fluids. 2019. Vol. 31 (7). Article 074103.
5. Joseph D.D., Funada T., Wang J. Potential Flows of Viscous and Viscoelastic Fluids. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 497 p.
6. Padrino J.C., Joseph D.D., Kim H. Viscous effects on Kelvin-Helmholtz instability in a channel // J. Fluid Mech. 2011. Vol. 680. P. 398–416.
7. Awasthi M.K., Asthana R., Agrawal G.S. Pressure Corrections for the Potential Flow Analysis of Kelvin-Helmholtz Instability with Heat and Mass Transfer // Int. J. Heat Mass Transf. 2012. Vol. 55. No. 9-10. P. 2345–2352.
8. Awasthi M.K. Kelvin-Helmholtz instability of viscoelastic liquid-viscous gas interface with heat and mass transfer // International Journal of Thermal Sciences. 2021. Vol. 161. No. 2. Article 106710.
9. Awasthi M.K., Agarwal S. Rayleigh-Taylor instability in a spherical configuration: A viscous potential flow approach // Chinese Journal of Physics. 2020. Vol. 68. P. 866–873.
10. Awasthi M.K., Agarwal S. Instability of a radially moving cylindrical surface: a viscous potential flow approach // Journal of Fluids Engineering. 2020. Vol. 142. No. 9. Article 09450.
11. Awasthi M.K. Rayleigh-Taylor instability of swirling annular layer with mass transfer // Journal of Fluids Engineering. 2019. Vol. 141 (7). Article 071202.
12. Awasthi M.K., Sarychev V.D., Nevskii S.A., Kuznetsov M.A., Solodsky S.A. Kelvin-Helmholtz instability of swirling annular layer with heat and mass transfer // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2019. Vol. 11 (5). P. 86–96.
13. Han Y. Kelvin-Helmholtz instability of a confined nano-liquid sheet with the effects of heat and mass transfer and Marangoni convection // Atomization and Sprays. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 73–89.
14. Bilgili S., Ugarte O., Akkerman V. Interplay of Kelvin-Helmholtz instability with acoustics in a viscous potential flow // Phys. Fluids. 2020. Vol. 32. Article 084108.
15. Грановский А.Ю., Сарычев В.Д., Громов В.Е. Модель формирования внутренних нанослоев при сдвиговых течениях материалов // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 10. С. 155–158.
16. Сарычев В.Д., Грановский А.Ю., Черемушкина Е.В., Громов В.Е. Модель перемешивания слоев, созданных при электровзрывной обработке // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 4. С. 558–562.
17. Сарычев В.Д., Невский С.А., Коновалов С.В., Грановский А.Ю. Модель образования наноструктур в рельсовой стали при длительной эксплуатации // Математическое моделирование в естественных науках. 2015. Т. 1. С. 394–398.
18. Sarychev V., Nevskii S., Granovskii A., Chinkhov D. Simulation of Nanoparticles Formation by Mechanism of Kelvin-Helmholtz Instability // Int. J. Nanoparticles Nanotech. 2017. Vol. 3. No. 012. P. 2–10.
19. Сарычев В.Д., Невский С.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Громов В.Е. Модель формирования наноструктурных слоев при длительной эксплуатации рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 9. С. 699–706.
20. Sarychev V.D., Nevskii S. A., Kuznetsov M. A. et al. Kelvin-Helmholtz Instability of Cylindrical Geometry for Micro-Dimensional Range of Wavelengths // Jordan Journal of Physics. 2022. No. 3. P. 33–47.
21. Куликовский А.Г., Шикина И.С. О влиянии вязкости на устойчивость тангенциального разрыва в несжимаемой жидкости // Вестник Московского университета. 1997. № 6. С. 29–32.
22. Разуменко Л.С., Ткаченко В.И. Неустойчивость границы раздела вязких течений // Вестник Харьковского университета. 2005. № 710. С. 72–80.
23. Алиев И.Н., Юрченко С.О., Назарова Е.В. Особенности комбинированной неустойчивости заряженной границы раздела движущихся сред // Инженерно-физический журнал. 2007. Т. 80. № 5. С. 64–69.
24. Алиев И.Н., Юрченко С.О. К вопросу о неустойчивости границы раздела двух сред конечной толщины // Инженерно-физический журнал. 2007. Т. 80. № 6. С. 127–133.
25. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Суханов С.А. О роли вязкости жидкости в реализации не-

- устойчивости Кельвина-Гельмгольца // Электронная обработка материалов. 2013. Т. 49. С. 56–61.
26. Григорьев А.И., Ширяева С.О. О нахождении аналитических выражений для декрементов в асимптотике маловязкой жидкости // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 10. С. 18–25.
27. Senecal P.K., Schmidt D.P., Nouar I., Rutland C.J., Reitz R.D., Corradini M.L. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization // International Journal of Multiphase Flow. 1999. Vol. 25. P. 1073–1097.
28. Sirignano W.A., Edwards C.F. Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays. Cambridge University Press, 2010. 462 p.
29. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурированные материалы, полученные сильной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
30. Glezer A.M., Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A., Kurzina I.A. Plastic deformation of nanostructured materials. N.Y.: Taylor and Francis Group, 2017. 323 p.
31. Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Y., Mazilkin A., Straumal B., Hahn H. Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion // Materials Letters. 2018. Vol. 222. No. 1. P. 172–175.
32. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the Surface Layers of Railway Rails and Wheels // Steel tech. 2008. Vol. 3. No. 1. P. 19–23.
33. Baumann G., Fecht H.J., Liebelt S. Formation of white-etching layers on rail treads // Wear. 1996. Vol. 191. P. 133–140.
34. Österle Rooch H., Pyzalla A., Wang L.W., Oesterle W., Rooch H., Pyzalla A., et al. Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electronmicroscopy // X-ray and synchrotron X-ray diffraction. Mater. Sci. Eng. A. 2001. Vol. 303. P. 150–157.
35. Wild Wang L., Hasse B., Wroblewski T., Goe-rigk G., Pyzalla A.E. Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with strong ripple formation // Wear. 2003. Vol. 254. P. 876–883.
36. Zhang H.W., Ohsaki S., Mitao S., Ohnuma M., Hono K. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail // Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 421. P. 191–199.
37. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface // Acta Mater. 2010. Vol. 58. P. 3602–3612.
38. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Gierlotka S., Zielinski W., Fecht H.J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks // Mater. Sci. Eng. A. 2001. Vol. 303. P. 197–208.
39. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies // Electron. J. Struct. Eng. 2013. Vol. 13. P. 67–74.
40. Steenbergen M., Dollevoet R. On the mechanism of squat formation on train rails. Part I: Origination // Int. J. Fatigue. 2013. Vol. 47. P. 361–372.
41. Pal S., Valente C., Daniel W., Farjoo M. Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation // Wear. 2012. Vol. 284–285. P. 30–42.
42. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 1987. 510 p.
43. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев А.В. Одномерная модель неоднородного сдвига при трении скольжения // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. № 4. С. 103–103.
44. Тарасов С.Ю., Рубцов В.Е., Колубаев А.В., Горбатенко В.В. Анализ микроскопических полей деформации при трении скольжении // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 7-2. С. 350–355.
45. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев А.В. Неоднородность деформации и сдвиговая неустойчивость материала при трении // Известия вузов. Физика. 2011. № 11-3. P. 215–220.
46. Ivanov Y.F., Glezer A.M., Sundeev R.V., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Y.A., Semin A.P. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation // Materials Letters. 2022. Vol. 309. Article 131378.
47. Straumal B.B., Kulagin R., Klinger L., Rabkin E., Straumal P.B., Kogtenkova O.A., Baretzky B. Structure refinement and fragmentation of precipitates under severe plastic deformation // A Review. Materials. 2022. Vol. 15. Article 601.
48. Сарычев В.Д., Невский С.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Громов В.Е. Модель формирования наноструктурных слоев при длительной эксплуатации рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 9. С. 699 – 706.
49. Barrero A., Loscertales I. Micro- and nanoparticles via capillary flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 2007. Vol. 39. No. 1. P. 89–106.
50. Anna S.L. Droplets and bubbles in microfluidic devices // Annu. Rev. Fluid Mech. 2016. Vol. 48. P. 285–309.
51. Gañán-Calvo A.M. Generation of steady liquid micro threads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80. P. 285–288.
52. Gordillo J.M., Pérez-Saborid M., Gañán-Calvo A.M. Linear stability of co-flowing liquid – gas jets // Journal of Fluid Mechanics. 2001. Vol. 448. P. 23–51.
53. Si T., Li F.A., Yin X.I.Y., Yin X.Z. Modes in flow focusing and instability of coaxial liquid-gas jets // J. Fluid Mech. 2009. Vol. 629. P. 1–23.

54. Mu K., Ding H., Si T. Experimental and numerical investigations on interface coupling of coaxial liquid jets in co-flow focusing // *Phys. Fluids*. 2020. Vol. 32. Article 042103.
55. Mu K., Li G.B., Si T. Instability and interface coupling of coaxial liquid jets in a driving stream // *Phys. Fluids*. 2020. Vol. 32. Article 092107.
56. Mu K., Qiao R., Si T., X Cheng X., Ding H. Interfacial instability and transition of jetting and dripping modes in a co-flow focusing process // *Phys. Fluids*. 2021. Vol. 33. Article 052118.
57. Mu K., Qiao R., Guo J., Yang C., Wu Y., Si T. Parametric study on stability and morphology of liquid cone in flow focusing // *International Journal of Multiphase Flow*. 2021. Vol. 135. Article 103507.
58. López M., Cabezas M.G., Montanero J.M., Herada M.A. On the hydrodynamic focusing for producing microemulsions via tip streaming // *J. Fluid Mech*. 2022. Vol. 934. A47.
59. Gau C., Shen C.H., Wang Z.B. Peculiar Phenomenon of Micro-Free Jet Flow // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21. No. 9. Article 092001.
60. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. 2010. Т. 5. № 2. С. 28–42.
61. Kozlov V.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Litvinenko Y.A. Stability of Subsonic Jet Flows // *Journal of Flow Control, Measurement and Visualization*. 2013. Vol. 1. P. 94–101.
62. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A. Visualization of conventional and combusting subsonic jet instabilities. Dordrecht: Springer International Publishing, 2016. 126 p.
63. Aniskin V.M., Bountin D.A., Maslov A.A., Mironov S.G., Tsyryulnikov I.S. Investigation of stability of a subsonic gas microjet // *Zh. Tekh. Fiz.* 2012. Vol. 82. No. 2. P. 17–23.
64. Aniskin V.M., Lemanov V.V., Maslov N.A., Mukhin K.A., Terekhov V.I., Sharov K.A. Experimental study of subsonic flow plane mini- and microjets of air // *Tech. Phys. Lett.* 2015. Vol. 41. P. 26–31.
65. Aniskin V.M., Maslov A.A., Mukhin K.A. Structure of subsonic plane microjets // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2019. Vol. 23 (4). P. 57.
66. Krivokorytov M.S., Golub V.V., Moralev I.A. Development of instability in gas microjets under an acoustic action // *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 2013. Vol. 39 (18). P. 38–44.
67. Lemanov V.V., Terekhov V.I., Sharov K.A., Shumeiko A.A. Experimental study of submerged jets at low Reynolds numbers // *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 2013. Vol. 39 (9). P. 34–40.
68. Chang C.J., Shen C.H., Gau C. Flow and heat transfer of a micro jet impinging on a heated chip. part i. micro free and impinging jet flow // *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*. 2013. Vol. 17 (1). P. 50–68.
69. Xiaobing L., Wei C., Renxia S., Sheng L. Experimental and numerical investigation of a microjet-based cooling system for high power LEDs // *Heat Transf. Eng.* 2008. Vol. 29 (9). P. 774–781.
70. Hadrys D., Piwnikb J. Welding with microjet cooling as a method of improving, the plastic properties of welds // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2014. Vol. 87 (5). P. 1170–1176.
71. Rusowicza A., Leszczynski M.J., Grzebieleca A., Laskowski R. Experimental investigation of single-phase microjet cooling of microelectronics // *Arch. Thermodyn.* 2015. Vol. 36 (3). P. 139–147.
72. Carpenter J.-B., Baillot F., Blaisot J.-B., Dumouchel C. Behavior of cylindrical liquid jets evolving in a transverse acoustic field // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21. Article 023601.
73. Шевченко А.К., Яковенко С.Н. Численное исследование методов управления потоком и эффектов расщепления в круглой затопленной струе // *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. Т. 28. № 3. С. 379–395.

REFERENCES

1. Eggers J., Villermaux J. Physics of liquid jets. *Report on Progress in Physics*. 2008, vol. 71, article 036601.
2. Taylor G.I. Generation of ripples by wind blowing over a viscous liquid. In: *The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*. Bachelor G.K. ed., 1940, vol. III, pp. 244–254. Cambridge University Press, 1963.
3. Li X.H., Tankin R.S. On the temporal instability of a two-dimensional viscous liquid sheet. *Journal of Fluid Mechanics*. 1991, vol. 226, pp. 425–443.
4. Dasgupta D., Nath S., Bhanja D. A study on dual role of viscosity on the stability of a viscous planar liquid sheet surrounded by inviscid gas streams of equal velocities, and prediction of resulting droplet distribution using maximum entropy formulation. *Physics of Fluids*. 2019, vol. 31 (7), article 074103.
5. Joseph D.D., Funada T., Wang J. Potential flows of viscous and viscoelastic fluids. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 497 p.
6. Padrino J.C., Joseph D.D., Kim H. Viscous effects on Kelvin-Helmholtz instability in a channel. *J. Fluid Mech*. 2011, vol. 680, pp. 398–416.
7. Awasthi M.K., Asthana R., Agrawal G.S. pressure corrections for the potential flow analysis of Kelvin-Helmholtz instability with heat and mass transfer. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2012, vol. 55, no. 9-10, pp. 2345–2352.
8. Awasthi M.K. Kelvin-Helmholtz instability of viscoelastic liquid-viscous gas interface with heat and mass transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021, vol. 161, no. 2, article 106710.

9. Awasthi M.K., Agarwal S. Rayleigh-Taylor instability in a spherical configuration: A viscous potential flow approach. *Chinese Journal of Physics*. 2020, vol. 68, pp. 866–873.
10. Awasthi M.K., Agarwal S. Instability of a radially moving cylindrical surface: a viscous potential flow approach. *Journal of Fluids Engineering*. 2020, vol. 142, no. 9, article 09450.
11. Awasthi M.K. Rayleigh-Taylor instability of swirling annular layer with mass transfer. *Journal of Fluids Engineering*. 2019, vol. 141 (7), article 0701202.
12. Awasthi M.K., Sarychev V.D., Nevskii S.A., Kuznetsov M.A., Solodsky S.A. Kelvin-Helmholtz instability of swirling annular layer with heat and mass transfer. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2019, vol. 11 (5), pp. 86–96.
13. Han Y. Kelvin-Helmholtz instability of a confined nano-liquid sheet with the effects of heat and mass transfer and Marangoni convection. *Atomization and Sprays*. 2022, vol. 32, no. 1, pp. 73–89.
14. Bilgili S., Ugarte O., Akkerman V. Interplay of Kelvin-Helmholtz instability with acoustics in a viscous potential flow. *Phys. Fluids*. 2020, vol. 32, article 084108.
15. Granovskij A.Ju., Sarychev V.D., Gromov V.E. Model of internal nanolayers formation under shear flows of materials. *Zhurnal tehnichej fiziki*. 2013, vol. 83, no. 10, pp. 155–158.
16. Sarychev V.D., Granovskij A.Ju., Cheremushkina E.V., Gromov V.E. Model of mixing of layers created during electro-explosive treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenija*. 2013, vol. 10, no. 4, pp. 558–562.
17. Sarychev V.D., Nevskij S.A., Kononov S.V., Granovskij A.Ju. Model of the formation of nanostructures in rail steel during long-term operation. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennyh naukah*. 2015, vol. 1, pp. 394–398.
18. Sarychev V., Nevskii S., Granovskii A., Chinkov D. Simulation of Nanoparticles Formation by Mechanism of Kelvin-Helmholtz Instability. *Int. J. Nanoparticles Nanotech*. 2017, vol. 3, no. 012, pp. 2–10.
19. Sarychev V.D., Nevskij S.A., Kormyshev V.E., Jur'ev A.A., Gromov V.E. Model of formation of nanostructured layers during long-term operation of rails. *Izvestija. Chernaja metallurgija*. 2020, vol. 63, no. 9, pp. 699–706.
20. Sarychev V.D., Nevskii S. A., Kuznetsov M. A. et al. Kelvin-Helmholtz Instability of Cylindrical Geometry for Micro-Dimensional Range of Wavelengths. *Jordan Journal of Physics*. 2022, no. 3, pp. 33–47.
21. Kulikovskij A.G., Shikina I.S. On the effect of viscosity on the stability of tangential rupture in an incompressible fluid. *Vestnik Moskovskogo universiteta*. 1997, no. 6, pp. 29–32.
22. Razumenko L.S., Tkachenko V.I. Instability of the interface of viscous flows. *Vestnik Har'kovskogo universiteta*. 2005, no. 710, pp. 72–80.
23. Aliev I.N., Jurchenko S.O., Nazarova E.V. Features of the combined instability of the charged interface of moving media. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2007, vol. 80, no. 5, pp. 64–69.
24. Aliev I.N., Jurchenko S.O. On the issue of instability of the interface between two media of finite thickness. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2007, vol. 80, no. 6, pp. 127–133.
25. Shirjaeva S.O., Grigor'ev A.I., Suhanov S.A. On the role of fluid viscosity in the realization of Kelvin-Helmholtz instability. *Jelektronnaja obrabotka materialov*. 2013, vol. 49, pp. 56–61.
26. Grigor'ev A.I., Shirjaeva S.O. On finding analytical expressions for decrements in the asymptotics of a low-viscosity fluid. *Zhurnal tehnichej fiziki*. 2013, vol. 83, no. 10, pp. 18–25.
27. Senecal P.K., Schmidt D.P., Nouar I., Rutland C.J., Reitz R.D., Corradini M.L. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization. *International Journal of Multiphase Flow*. 1999, vol. 25, pp. 1073–1097.
28. Sirignano W.A., Edwards C.F. Fluid dynamics and transport of droplets and sprays. Cambridge University Press, 2010, 462 p.
29. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Nanostrukturirovannye materialy, poluchennye sil'noj plasticheskoj deformaciej*. Moscow: Logos, 2000, 272 p.
30. Glezer A.M., Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A., Kurzina I.A. Plastic deformation of nanostructured materials. N.-Y.: Taylor & Francis Group, 2017, 323 p.
31. Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Y., Mazilkin A., Straumal B., Hahn H. Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion. *Materials Letters*. 2018, vol. 222, no. 1, pp. 172–175.
32. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels. *Steel tech*. 2008, vol. 3, no. 1, pp. 19–23.
33. Baumann G., Fecht H.J., Liebelt S. Formation of white-etching layers on rail treads. *Wear*. 1996, vol. 191, pp. 133–140.
34. Österle R., Pyzalla A., Wang L.W., Oesterle W., Rook H., Pyzalla A., Wang L., Österle W., Rook H., Pyzalla A., et al. Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electronmicroscopy. *X-ray and synchrotron X-ray diffraction. Mater. Sci. Eng. A*. 2001, vol. 303, pp. 150–157.
35. Wild Wang L., Hasse B., Wroblewski T., Goerigk G., Pyzalla A.E. Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with

- strong ripple formation. *Wear*. 2003, vol. 254, pp. 876–883.
36. Zhang H.W., Ohsaki S., Mitao S., Ohnuma M., Hono K. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail. *Mater. Sci. Eng. A*. 2006, vol. 421, pp. 191–199.
 37. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface. *Acta Mater*. 2010, vol. 58, pp. 3602–3612.
 38. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Gierlotka S., Zielinski W., Fecht H.J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks. *Mater. Sci. Eng. A*. 2001, vol. 303, pp. 197–208.
 39. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies. *Electron. J. Struct. Eng.* 2013, vol. 13, pp. 67–74.
 40. Steenbergen M., Dollevoet R. On the mechanism of squat formation on train rails. Part I: Origination. *Int. J. Fatigue*. 2013, vol. 47, pp. 361–372.
 41. Pal S., Valente C., Daniel W., Farjoo M. Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation. *Wear*. 2012, vol. 284–285, pp. 30–42.
 42. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 1987, 510 p.
 43. Rubcov V.E., Tarasov S.Ju., Kolubaev A.V. One-dimensional model of inhomogeneous shear under sliding friction. *Fizicheskaja mezhmehanika*. 2012, vol. 15, no. 4, pp. 103–103.
 44. Tarasov S.Ju., Rubcov V.E., Kolubaev A.V., Gorbatenko V.V. Analysis of microscopic deformation fields during sliding friction. *Izvestija vuzov. Fizika*. 2013, vol. 56, no. 7-2, pp. 350–355.
 45. Rubcov V.E., Tarasov S.Ju., Kolubaev A.V. Inhomogeneity of deformation and shear instability of the material under friction. *Izvestija vuzov. Fizika*. 2011, no. 11-3, pp. 215–220.
 46. Ivanov Y.F., Glezer A.M., Sundeev R.V., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Y.A., Semin A.P. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation. *Materials Letters*. 2022, vol. 309, article 131378.
 47. Straumal B.B., Kulagin R., Klinger L., Rabkin E., Straumal P.B., Kogtenkova O.A., Baretzky B. Structure refinement and fragmentation of precipitates under severe plastic deformation. A Review. *Materials*. 2022, vol. 15, article 601.
 48. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Kormyshev V.E., Yur'ev A.A., Gromov V.E. Model of nanostructural layer formation during long-term operation of rails. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 9, pp. 699–706.
 49. Barrero A., Loscertales I. Micro- and Nanoparticles via Capillary Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2007, vol. 39, no. 1, pp. 89–106.
 50. Anna S.L. Droplets and bubbles in microfluidic devices. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2016, vol. 48, pp. 285–309.
 51. Gañán-Calvo A.M. Generation of steady liquid micro threads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams. *Phys. Rev. Lett.* 1998, vol. 80, pp. 285–288.
 52. Gordillo J.M., Pérez-Saborid M., Gañán-Calvo A.M. Linear stability of co-flowing liquid – gas jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 2001, vol. 448, pp. 23–51.
 53. Si T., Li F.A., Yin X.I.Y., Yin X.Z. Modes in flow focusing and instability of coaxial liquid-gas jets. *J. Fluid Mech.* 2009, vol. 629, pp. 1–23.
 54. Mu K., Ding H., Si T. Experimental and numerical investigations on interface coupling of coaxial liquid jets in co-flow focusing. *Phys. Fluids*. 2020, vol. 32, article 042103.
 55. Mu K., Li G.B., Si T. Instability and interface coupling of coaxial liquid jets in a driving stream. *Phys. Fluids*. 2020, vol. 32, article 092107.
 56. Mu K., Qiao R., Si T., X Cheng X., Ding H. Interfacial instability and transition of jetting and dripping modes in a co-flow focusing process. *Phys. Fluids*. 2021, vol. 33, article 052118.
 57. Mu K., Qiao R., Guo J., Yang C., Wu Y., Si T. Parametric study on stability and morphology of liquid cone in flow focusing. *International Journal of Multiphase Flow*. 2021, vol. 135, article 103507.
 58. López M., Cabezas M.G., Montanero J.M., Herada M.A. On the hydrodynamic focusing for producing microemulsions via tip streaming. *J. Fluid Mech.* 2022, vol. 934, A47.
 59. Gau C., Shen C.H., Wang Z.B. Peculiar phenomenon of micro-free jet flow. *Physics of Fluids*. 2009, vol. 21, no. 9, article 092001.
 60. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A., Kozlov G.V., Litvinenko M.V. Subsonic round and plain macro and micro jets in a transverse acoustic field. *Vestnik NGU. Seriya: Fizika*. 2010, vol. 5, no. 2, pp. 28–42.
 61. Kozlov V.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Litvinenko Y.A. Stability of Subsonic Jet Flows. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. 2013, vol. 1, pp. 94–101.
 62. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A. *Visualization of conventional and combusting subsonic jet instabilities*. Dordrecht: Springer International Publishing, 2016, 126 p.
 63. Aniskin V.M., Bountin D.A., Maslov A.A., Mironov S.G., Tsyryulnikov I.S. Investigation of stability of a subsonic gas microjet. *Zh. Tekh. Fiz.* 2012, vol. 82 (2), pp. 17–23.
 64. Aniskin V.M., Lemanov V.V., Maslov N.A., Mukhin K.A., Terekhov V.I., Sharov K.A. Experimental study of subsonic flow plane mini- and microjets of air. *Tech. Phys. Lett.* 2015, vol. 41, pp. 26–31.

65. Aniskin V.M., Maslov A.A., Mukhin K.A. Structure of subsonic plane microjets. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2019, vol. 23 (4), pp. 57.
66. Krivokorytov M.S., Golub V.V., Moralev I.A. Development of instability in gas microjets under an acoustic action. *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 2013, vol. 39 (18), pp. 38–44.
67. Lemanov V.V., Terekhov V.I., Sharov K.A., Shumeiko A.A. Experimental study of submerged jets at low Reynolds numbers. *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 2013, vol. 39 (9), pp. 34–40.
68. Chang C.J., Shen C.H., Gau C. Flow and heat transfer of a micro jet impinging on a heated chip. Part I. Micro free and impinging jet flow. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*. 2013, vol. 17 (1), pp. 50–68.
69. Xiaobing L., Wei C., Renxia S., Sheng L. Experimental and numerical investigation of a microjet-based cooling system for high power LEDs. *Heat Transf. Eng.* 2008, vol. 29 (9), pp. 774–781.
70. Hadrys D., Piwnikb J. Welding with microjet cooling as a method of improving, the plastic properties of welds. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2014, vol. 87 (5), pp. 1170–1176.
71. Rusowicza A., Leszczynski M.J., Grzebieleca A., Laskowski R. Experimental investigation of single-phase microjet cooling of microelectronics. *Arch. Thermodyn.* 2015, vol. 36 (3), pp. 139–147.
72. Carpenter J.-B., Baillot F., Blaisot J.-B., Dumouchel C. Behavior of cylindrical liquid jets evolving in a transverse acoustic field. *Physics of Fluids*. 2009, vol. 21, no. 023601.
73. Shevchenko A.K., Yakovenko S.N. Numerical investigation of flow control methods and splitting effects in a round submerged jet. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2021, vol. 28, no. 3, pp. 379–395.

Сведения об авторах

Владимир Дмитриевич Сарычев, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sarychev_vd@mail.ru

Information about the authors:

Vladimir D. Sarychev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: sarychev_vd@mail.ru

© 2022 г. В.Д. Сарычев

Поступила в редакцию 21 февраля 2022 г.