

Микроструктура гидродинамических неустойчивостей

Н. В. НЕВМЕРЖИЦКИЙ



Н. В. Невмержицкий

Гидродинамические неустойчивости Рэля – Тейлора, Рихтмайера – Мешкова, Кельвина – Гельмгольца и связанное с ними турбулентное перемешивание играют существенную роль в различных направлениях науки и техники: в астрофизике, гидродинамике, инерционном термоядерном синтезе, в ряде технологических процессов.

В некоторых случаях, например, в процессах диспергирования жидкостей, они играют положительную роль, но в устройствах по получению высоких плотностей энергий – отрицательную. Так, в мишенях инерционного термоядерного синтеза сколь угодно малые возмущения на границе раздела разнородных сред под действием этих неустойчивостей начинают интенсивно расти, что со временем приводит к турбулентному перемешиванию веществ. В результате этого происходят энергетические потери и возникают ограничения достигаемой плотности кумулируемой энергии.

Исследования неустойчивостей в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся практически со дня основания института. Начало этих работ связано с именами А. Д. Сахарова, Р. М. Зайделя, А. Г. Олейника, Ю. Ф. Алексеева, И. Г. Проскурина, Н. Ф. Зеленцовой, Е. Е. Мешкова, В. В. Никифорова, А. Л. Михайлова, С. М. Бахраха, В. А. Андронина, А. В. Певницкого и др. В настоящее время исследования неустойчивостей проводят как экспериментальными, так и расчетными методами. Лабораторные эксперименты позволяют глубже понять физические закономерности этих процессов и получить базовые результаты для тестирования численных методик, которые применяются при расчете конструкций реальных устройств.

Масштаб экспериментальных исследований в этой области в ИФВ постоянно растет. На сегодняшний день мы обладаем рядом методик и установок (рис. 1), позволяющих проводить модельные исследования неустойчивостей не только в плоском, но и в цилиндрическом, сферическом случаях, при рекордных (для лабораторных условий) величинах ускорений жидкого слоя до $g \sim 10^5 g_0$, числах Рейнольдса течения до $\sim 10^7$, ширине зоны перемешивания до 200 мм и числах Маха ударной волны в газах до $M \sim 10$.

Благодаря этому ИФВ стал первооткрывателем в ряде фундаментальных закономерностей развития неустойчивостей. Так, в частности, в 1992 г. было обнаружено, что на развитие неустойчивости Рэля – Тейлора существенно влияет геометрия основного течения: на неустойчивых наружных границах сходящихся оболочек скорость проникновения возмущений и фронта зоны перемешивания в жидкость увеличивается, а на внутренних расходящихся – уменьшается по сравнению с плоским случаем.

Экспериментально установлено, что снижение эффективности передачи кинетической энергии в слоистых системах, обусловленное турбулентным перемешиванием, связано не только с расходом энергии на процесс перемешивания веществ, а и с уменьшением (из-за перемешивания) толщины сплошной части ускоряемого «тяжелого» слоя и турбулентной теплопроводностью (1993 г.). Кроме этого, показана роль сжимаемости газов, числа Маха ударной волны на развитие возмущений и зоны перемешивания (2002 г.) и др. Эти результаты позволили на более высоком уровне оттестировать численные методики и феноменологические модели турбулентности РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В настоящее время для точного численного моделирования различных газодинамических процессов требуются экспериментальные данные по микроструктуре гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания. В 2007 г. в ИФВ создана микроскопическая

электронно-оптическая методика, позволяющая напрямую регистрировать микронные частицы в газодинамическом потоке, и начаты исследования в этом направлении.

Некоторые работы в этой области выполнены по контрактам с французскими учеными (CEG, Франция). В частности, для расчета процесса диспергирования, были необходимы экспериментальные данные о спектре частиц жидкости после воздействия на нее воздушной ударной волной. При нагружении жидкости ударной волной она подвержена неустойчивостям и Рэлея–Тейлора, и Рихтмайера–Мешкова, и Кельвина–Гельмгольца. В результате действия этих неустойчивостей жидкость (капля, струя жидкости) дробится на микронные фрагменты (рис. 2). Получено, что при увеличении давления в воздушной ударной волне от 0,2 до 6 атм средний размер фрагментов диспергированной капли или струи уменьшается от ~30 до ~4 мкм.

Конечно, основная наша деятельность по исследованию неустойчивостей связана с тематикой РФЯЦ-ВНИИЭФ. Требования к полноте и качеству экспериментальных данных для тести-

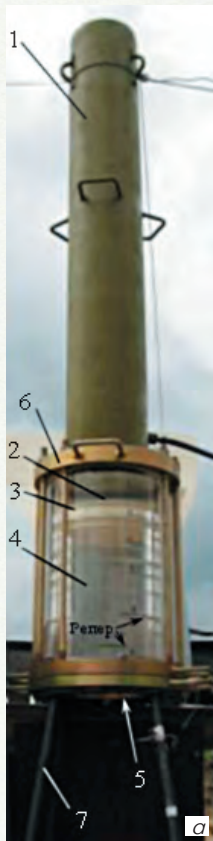


Рис. 1. Экспериментальные установки: а) канал ускорительный КУ-200 для исследования развития неустойчивости Рэлея–Тейлора на границе газ–жидкость (1 – драйвер; 2 – жидкость; 3 – подложка; 4 – секция измерительная; 5 – мембрана; 6 – фланец; 7 – подставка); б) измерительно-вычислительный комплекс

рования численных методик по расчету развития неустойчивостей постоянно растут. В частности, необходимы данные по размерам и конфигурации фрагментов струй и пузырей в зоне турбулентного перемешивания. Они важны как для определения времени перехода процесса развития возмущений в турбулентную стадию, так и для определения процессов теплопередачи. На сегодняшний день такие экспериментальные результаты не известны.

На рис. 3 представлен видеокادر микроструктуры зоны турбулентного перемешивания на границе газ–жидкость, полученный в ИФВ. В зоне перемешивания наряду с крупными фракциями (\varnothing 5 мм) наблюдаются и на порядок меньшие (\varnothing 0,5 мм), т. е. структура зоны очень неравномерна.

В настоящее время в ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ создано несколько пакетов программ двумерных

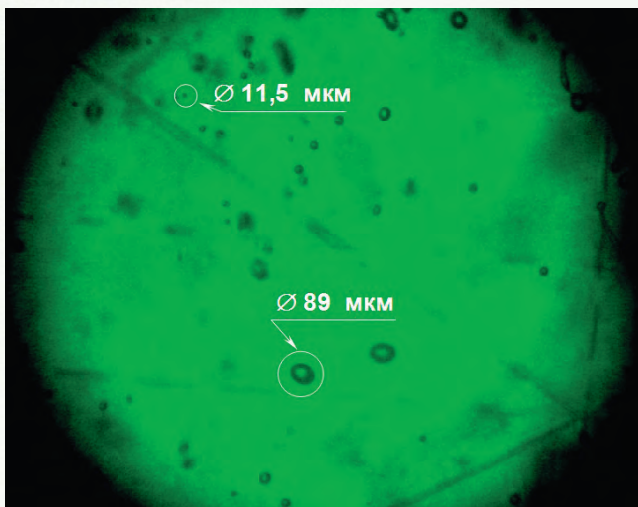


Рис. 2. Фрагменты капли (\varnothing 2 мм) жидкости после воздействия воздушной ударной волны интенсивностью 0,2 атм

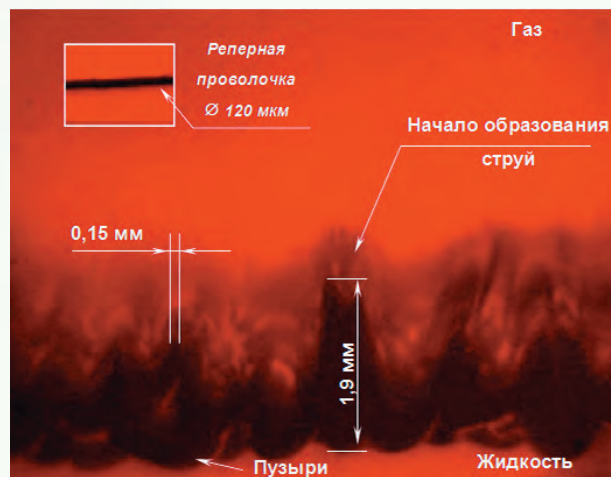


Рис. 3. Микроструктура зоны турбулентного перемешивания на границе газ–жидкость: переход процесса развития возмущений в турбулентную стадию

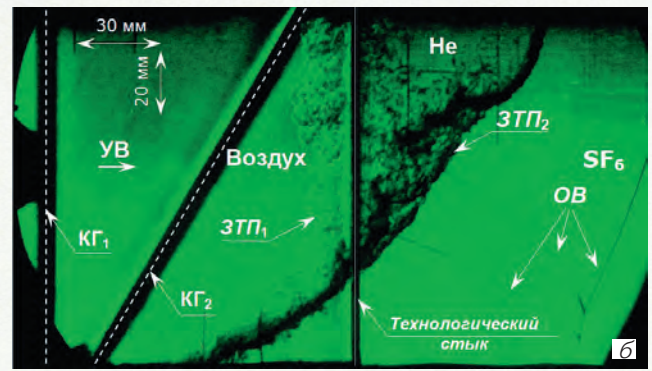
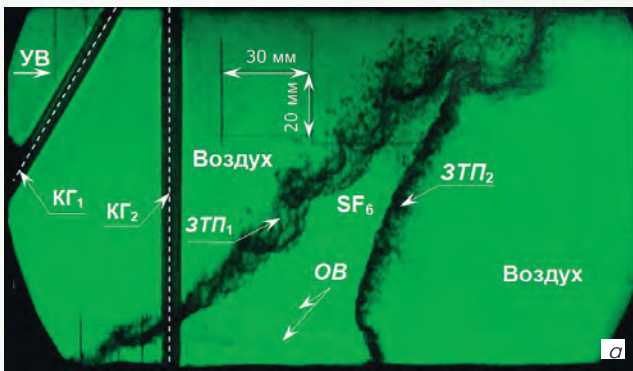


Рис. 4. Развитие турбулентного перемешивания в трехслойных газовых системах при двумерном течении: а) воздух-SF₆-воздух; б) воздух-He-SF₆ (УВ – ударная волна; КГ₁ и КГ₂ – контактные границы; ЗТП₁ и ЗТП₂ – зоны турбулентного перемешивания на КГ₁ и КГ₂; ОВ – отраженная волна)

методик по расчету развития гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания. Для тестирования этих методик ИТМФ предложил провести комплекс специальных базовых экспериментов. Такие эксперименты были проведены в ИФВ на воздушной удар-

стигает несколько километров в секунду. Этот процесс называется еще «пылением» материала. В ИФВ впервые напрямую микроскопической электронно-оптической методикой зарегистрированы такие частицы (рис. 5), построен их спектр по размерам и по скоростям. Получено, что в металлах с уменьшением шероховатости (R_z) свободной поверхности и/или с увеличением интенсивности ударной волны спектр частиц смещается в сторону меньших размеров. Со свободной поверхности жидкости выбрасываются изначально тонкие ($\varnothing 6-10$ мкм) струи, которые со временем распадаются на капли. Природа этих струй пока не известна.

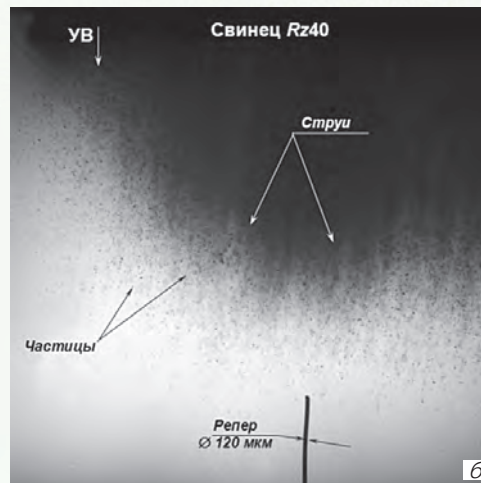
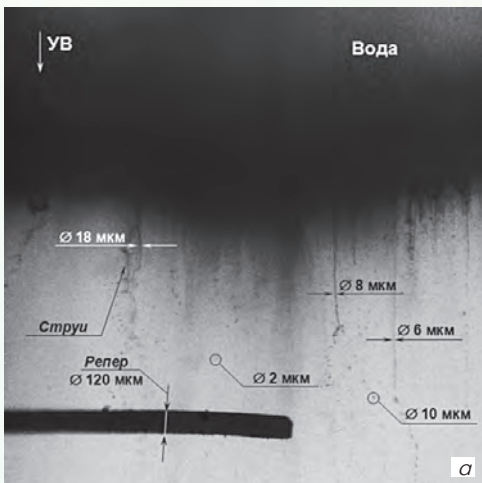


Рис. 5. Выброс частиц со свободной поверхности: а) воды; б) свинца

ной трубе с трехслойными газовыми системами при двумерном течении (рис. 4). В этих экспериментах на контактных границах газов развиваются неустойчивости и Рихтмайера-Мешкова, и Кельвина-Гельмгольца при воздействии как ударных волн, так и волн разрежения. Эти данные стали уникальным материалом для тестирования численных методик РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Специфическое развитие неустойчивости Рихтмайера-Мешкова происходит при выходе сильной ударной волны на свободную поверхность конденсированного вещества. В этом случае со свободной поверхности выбрасывается множество микронных частиц. Их скорость до-

Представленные результаты являются новым шагом в исследовании физики гидродинамических неустойчивостей. Они получены при участии многих сотрудников ИФВ: Е. А. Сотскова, Е. Д. Сеньковского, О. Л. Кривонос, А. А. Никулина, А. А. Половникова, С. А. Абакумова, А. В. Кальманова, Е. Д. Вишневецкого, С. В. Фролова, Е. В. Левкиной, А. С. Соколовой, В. В. Мармышева, Л. В. Точиной и др.

НЕВМЕРЖИЦКИЙ Николай Васильевич –
начальник лаборатории ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ,
кандидат физ.-мат. наук