

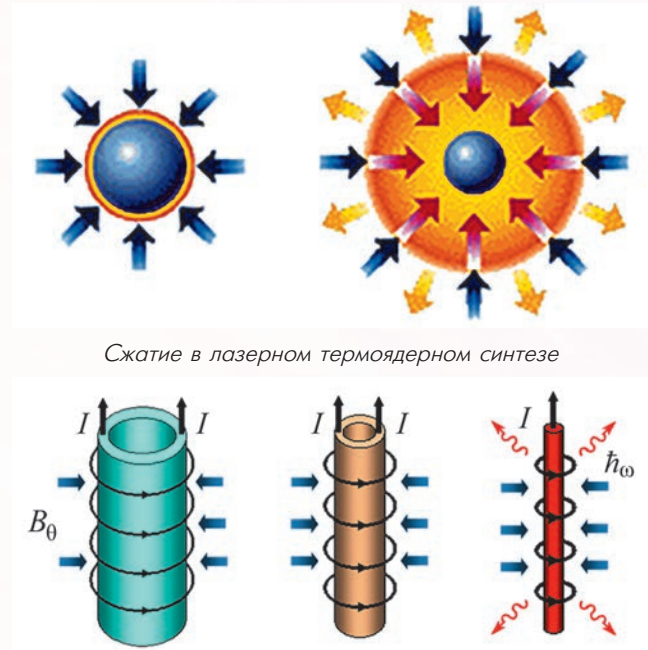
Гидродинамические и магнитодинамические неустойчивости в задачах физики высоких плотностей энергии

С. Ф. ГАРАНИН

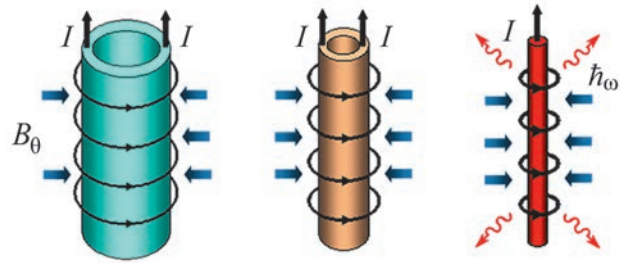
Введение

В последние десятилетия в мире продолжают исследования физики высоких плотностей энергии (ВПЭ), т. е. такого состояния вещества, когда в единице объема концентрируется большая энергия. Эти исследования необходимы для изучения свойств материалов при высоких давлениях (которые реализуются, например, во внутренних областях планет и звезд), для изучения возможности зажигания термоядерных реакций, для создания мощных источников излучений (рентгеновского, гамма, нейтронного), используемых в различных приложениях, для генерации сильных магнитных полей и для других задач.

Для этих исследований создаются мощные электрофизические (Z – в США, PTS – в Китае, наивысший достигнутый уровень плотности энергии ~ 200 МДж/см³) и лазерные установки (NIF – в США, LMJ – во Франции, наивысший достигнутый уровень плотности энергии ~ 40000 МДж/см³), проводятся эксперименты по генерации сверхвысоких магнитных полей (поля до 28 МГс – во взрывных экспериментах и 10 МГс – в лаборатории, достигнутый уровень плотности энергии ~ 3 МДж/см³) и концентрации энергии во взрывных экспериментах, где в настоящее время получены давления 20 ТПа, что превосходит давление в центре Земли в 50 раз (уровень плотности энергии ~ 30 МДж/см³). Задача всех этих экспериментов – сконцентрировать энергию в малых объемах, поскольку исходная энергия имеет относительно низкую плотность. Действительно, исходный уровень плотности энергии для электромагнитной энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, составляет $\sim 0,1$ Дж/см³ (эта исходная электромагнитная энергия используется в экспериментах на электрофизических установках и для генерации сверхвысоких магнитных полей), в сфокусированных лазерных пучках, используемых в лазерных мишенях для термоядерного синтеза, $\sim 0,2$ МДж/см³, в химическом взрывчатом веществе ~ 10 кДж/см³.



Сжатие в лазерном термоядерном синтезе



Имплозия и сжатие в Z-пинче

Рис. 1. Примеры имплозии

Обычный путь концентрации энергии – это гидродинамическая (или магнитогидродинамическая) имплозия (сжатие оболочек, газа или плазмы, рис. 1) в симметричной конфигурации (осесимметричной для цилиндрической имплозии или центрально-симметричной для сферической).

Однако в процессе имплозии могут развиваться (и, как правило, развиваются) неустойчивости, приводящие к искажению симметрии и росту неоднородности, в результате чего уменьшается достигаемый уровень плотности энергии. Из потенциально опасных неустойчивостей можно выделить рэлей-тейлоровскую (РТ) неустойчивость, возникающую, когда низкоплотное вещество ускоряет более плотное, например, когда магнитное поле (вещество с нулевой плотностью) ускоряет плотное (плазму или металлическую оболочку – лайнер, рис. 2).

РТ-неустойчивость эквивалентна неустойчивости, которую можно наблюдать в бытовых условиях, когда плотная жидкость в поле тяжести

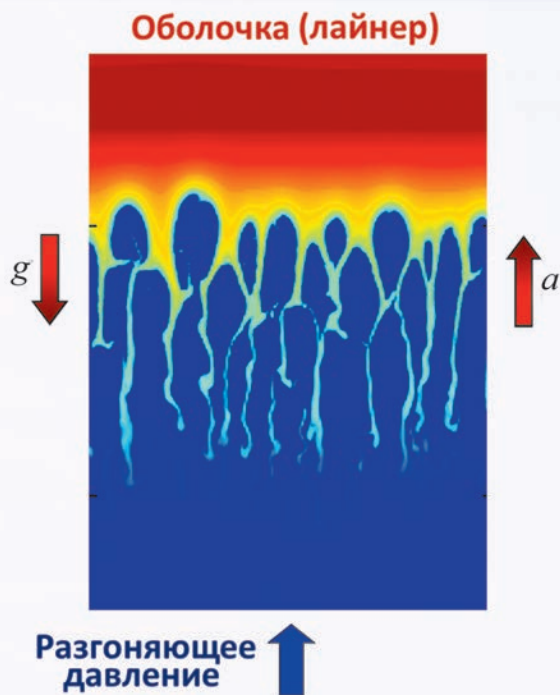


Рис. 2. Неустойчивость при разгоне лайнера: a – ускорение лайнера, g – эффективное гравитационное ускорение ($g = -a$)

оказывается над низкоплотной (ртуть на воде) или над газом (граница воздух – вода, рис. 3). РТ-неустойчивость может возникать также при сжатии лайнером магнитного поля или низкоплотной плазмы (при торможении лайнера).

Родственной РТ-неустойчивости является «сосисочная» неустойчивость (рис. 4), возникающая из-за кривизны силовых линий азимутального магнитного поля, которое часто используется при разгоне лайнеров или исследованиях так называемого Z-пинча (рис. 1), когда в осесимметричной конфигурации плазма сжимается под действием пропускаемого через нее прямого тока. Эта неустойчивость играет особенно важную роль на заключительной стадии сжатия Z-пинча (в том числе и в специальном случае так называемого «плазменного фокуса»), когда в близкой к оси области происходит концентрация энергии и генерация пучков заряженных частиц (электронов и ионов). Родственной РТ-неустойчивости является также неустойчивость Рихтмайера – Мешкова, возникающая при прохождении ударной волны через контактную границу двух разноплотных сред. Эта неустойчивость встречается при имплозии реже, поскольку сильные ударные волны возникают в этом случае только при очень специальных условиях, а роль слабых, как правило, можно описывать

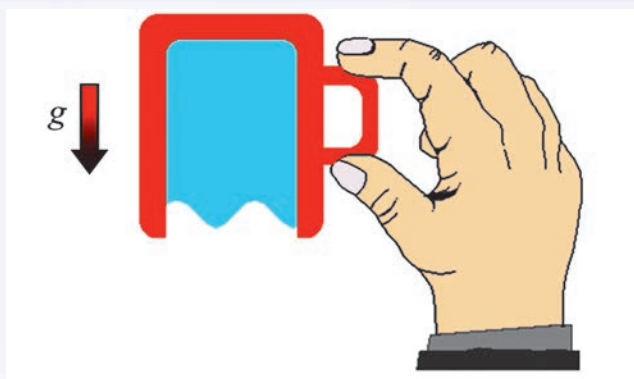


Рис. 3. РТ неустойчивость на границе воздух – вода

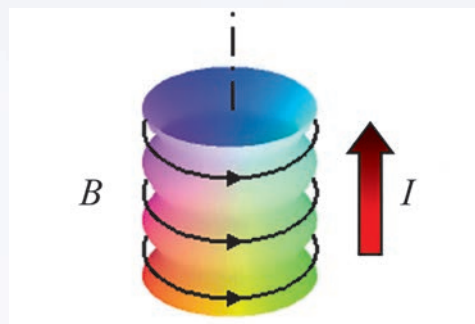


Рис. 4. «Сосисочная» неустойчивость Z-пинча

с помощью РТ-неустойчивости с зависящим от времени ускорением.

Во всех перечисленных случаях неустойчивая неустойчивость переходит в турбулентную фазу хаотического движения, которая отличается в разных случаях. Проиллюстрируем развитие разных неустойчивостей на нескольких примерах.

Развитие гидродинамических и магнито-гидродинамических неустойчивостей

Рост малых возмущений. Рассмотрим самый простой случай РТ-неустойчивости. Пусть имеется несжимаемая жидкость, находящаяся в поле тяжести, имеющем ускорение g . Согласно линейной теории, если жидкость поддерживается давлением воздуха против силы тяжести (рис. 3), смещение синусоидального по координате малого возмущения поверхности жидкости ζ , с пространственным периодом (длиной волны)

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (k - \text{ так называемое волновое число,}$$

определяющее длину волны), растет со временем экспоненциально

$$\zeta = \zeta_0 \exp(\gamma t),$$

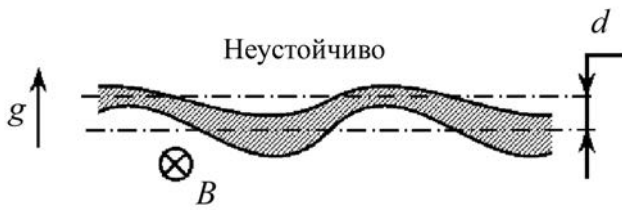


Рис. 5. Неустойчивость Рэлея–Тейлора для ускоряемого лайнера

где величина γ , которую называют инкрементом, равна:

$$\gamma = \sqrt{gk}. \quad (1)$$

Этим результатом можно воспользоваться для исследования устойчивости лайнера, если заменить ускорение силы тяжести ускорением, вызванным силой инерции, направленной противоположно ускорению жидкости (рис. 2). Дисперсионное соотношение (1) остается также справедливым, если вместо бесконечно толстого слоя жидкости рассмотреть лайнер с толщиной d , так что ускорение лайнера g определяется, например, магнитным давлением $p_B \equiv B^2/8\pi$ (B – магнитное поле):

$$g = p_B/\rho d \quad (2)$$

(ρ – плотность лайнера). Если ускорение лайнера происходит под действием магнитного давления, как на рис. 5, движение лайнера неустойчиво (формула (1)).

При ускорении лайнера азимутальным магнитным полем кроме РТ-неустойчивости некоторую роль может играть «сосисочная» неустойчивость, связанная с тем, что при заданном аксиальном токе азимутальное магнитное поле зависит от радиуса, как $B \sim 1/r$, а, следовательно, магнитное давление на лайнер будет пропорционально $p_B \sim 1/r^2$. Тогда провалившиеся по радиусу участки лайнера под действием возросшего магнитного давления будут проваливаться еще сильнее, и возмущения будут нарастать. Для малых длин волн развитие «сосисочной» неустойчивости сводится к РТ-неустойчивости и имеет инкремент (1). При этом вещество лайнера играет роль тяжелой жидкости, магнитное поле – легкой, а роль ускорения g – величина

$$g_B = 2p_B/\rho r = B^2/4\pi r. \quad (3)$$

Однако, когда лайнер приблизился к оси и его радиус стал малым, то малые возмущения (с характерной длиной волны большей его ра-

диуса) хотя по-прежнему и растут экспоненциально, но их инкремент уже описывается другой зависимостью:

$$\gamma \sim \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}k. \quad (4)$$

Инкременты (1) РТ- и «сосисочной» неустойчивостей (4) неограниченно растут при уменьшении рассматриваемых пространственных масштабов (при неограниченном увеличении k), поэтому в реальных течениях, если вначале возмущения были малыми, они быстро перестают быть таковыми, их амплитуды становятся сравнимыми с пространственными масштабами и тогда необходимо учитывать нелинейные эффекты. Течения становятся хаотическими, турбулентными и изучение таких течений, теоретическое и экспериментальное, оказывается непростым.

Однако для ряда экспериментальных условий скорость развития возмущений оказывается уменьшенной. Дело в том, что инкременты (1) РТ- и «сосисочной» неустойчивостей (4) соответствуют случаю, когда имеется резкая граница между веществом и магнитным полем, так что длины волн велики по сравнению с масштабом переходной области. Это представляется оправданным для случая конденсированного лайнера с резким изменением плотности на границе с вакуумом. Однако, когда лайнер взрывается, начиная с наружной поверхности, граница между магнитным полем и веществом перестает быть резкой (вещество лайнера превращается в газ и на границе с вакуумом плотность вещества обращается в нуль). В этой переходной области инкременты неустойчивости будут зависеть от волнового числа более сложным образом, чем (1, 4). Поскольку инкременты для этих неустойчивостей увеличиваются с ростом волнового числа, то могут быть опасны самые короткие длины волн. В случае плавного распределения плотности в РТ-неустойчивости или магнитного поля в «сосисочной» неустойчивости, инкременты развития этих неустойчивостей должны при стремлении длины волны к нулю выходить на постоянный предел, а не расти неограниченно с ростом k . Тем не менее и в этом случае неизбежно наступает время, когда возмущения становятся большими, а течение – турбулентным.

Нелинейное развитие РТ- и «сосисочной» неустойчивостей. Полезным для рассмотрения турбулентных течений, развивающихся в условиях действия неустойчивостей, оказывается изучение некоторых специальных случаев не-

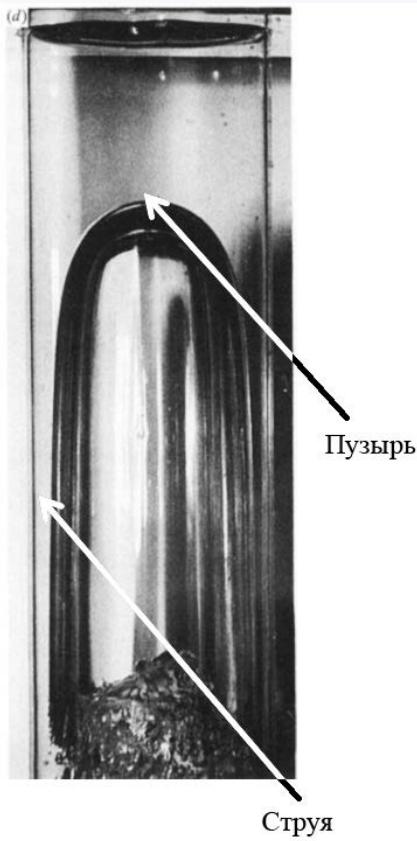


Рис. 6. Всплытие пузыря в вертикальной трубе

линейного развития неустойчивости. Одним из таких случаев является задача о развитии периодических возмущений с постоянной длиной волны для бесконечного отношения плотностей тяжелой и легкой жидкостей¹.

В этой постановке задача о развитии неустойчивости на нелинейной стадии сводится при больших временах к стационарной, что облегчает ее анализ. Основными особенностями стационарного течения в этой постановке является наличие «пузырей», которые всплывают в тяжелой жидкости со скоростью v , постоянной при неизменном ускорении силы тяжести, и наличие струй, уходящих на бесконечность в стационарной задаче, а в реальной постановке падающих с постоянным ускорением g (так, что конец струи в лабораторной системе остается на месте первоначального положения жидкости). Пример

¹В задачах РТ-неустойчивости несжимаемой жидкости часто используется число Атвуда, определяемое как $A = (\rho_1 - \rho_2)/(\rho_1 + \rho_2)$, где ρ_1 и ρ_2 – плотности тяжелой и легкой жидкостей. При $\rho_2 = 0$ $A = 1$. Для случая отличной от нуля плотности ρ_2 в линейной задаче вместо ускорения g в формуле (1) будет фигурировать величина Ag .

стационарного течения пузыря, всплывающего в вертикальной трубе, наблюдаемого в экспериментах, представлен на рис. 6.

Удивительным фактом для РТ-неустойчивости является то, что граница пузырей во многих экспериментах (например, на рис. 6) довольно гладкая, хотя априори могла бы быть искажена из-за развития РТ-неустойчивости, и формула (1) для инкрементов вполне применима к границе пузырей. Гидродинамические и магнитогидродинамические (МГД) расчеты развития различных пузырей также часто показывают довольно гладкую форму границы (см., например, результат развития токово-плазменной оболочки в плазменном фокусе, рис. 7). В некоторых случаях эта устойчивость объясняется наличием поверхностного натяжения жидкости в экспериментах. Для других задач можно предположить, что на малых масштабах развитие РТ-неустойчивости должно приводить к неоднородной турбулентной форме границы, на больших масштабах, сравнимых с полным масштабом задачи, двумерные эффекты (растягивание масштабов в пузыре и сдвиг скорости) подавляют развитие неустойчивости, что и наблюдается в экспериментах и расчетах. Таким образом, в ряде случаев теоретические автомодельные или

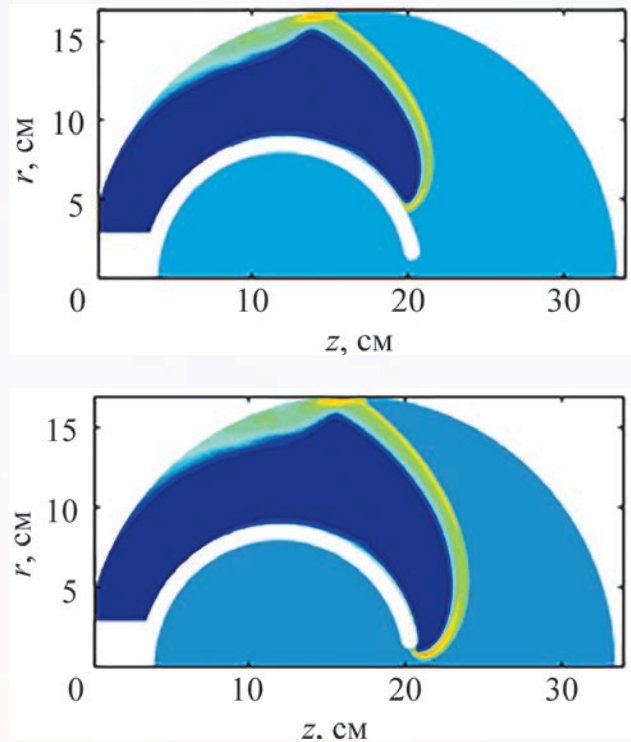


Рис. 7. Распределение плотности при движении токово-плазменной оболочки в плазменном фокусе

расчетные формы границ пузырей могут реализовываться в экспериментах.

Что касается «сосисочной» неустойчивости, то, как мы видели, линейная теория показывает (1, 3), что эта неустойчивость может развиваться по мере уменьшения радиуса пинча (когда лайнер сходится к оси, он из оболочки превращается в цилиндрический столб, который называют пинчем, или для тока, протекающего вдоль оси, – Z-пинчем) гораздо быстрее, и, казалось бы, имеются основания считать, что на финальной стадии при развитии неустойчивости (в перетяжке) будут реализовываться большие магнитные поля и высокие плотности энергии. Изучение нелинейного развития «сосисочной» неустойчивости является непростой задачей, поскольку инкременты растут с уменьшением разрешаемых масштабов. Для изучения этого вопроса использовались разные методы, в том числе модельные задачи, частные идеальные (не учитывающие рост всего набора возмущений, присутствующих в реальных экспериментах), аналитические или автомодельные решения. Выдвигались различные гипотезы о том, что на финальной стадии сжатия перетяжки ее динамика будет следовать некоторым автомодельным решениям. При этом во всех этих решениях предполагалось, что радиус перетяжки пинча R стремится к нулю, а магнитное поле на этом радиусе стремится к бесконечности $B \sim I/R$ (ток, определяющий магнитное поле, «доходит» до этого радиуса), и, следовательно, должны реализовываться высокие плотности энергии и давления $B^2 \sim 1/R^2$.

Высокие плотности энергии, которые потенциально могли бы реализовываться в перетяжке Z-пинчей (частным случаем которых можно считать плазменный фокус), давали надежду на осуществление зажигания термоядерных реакций (считалось возможным получение высокого сжатия по радиусу $\sim 10^4$, соответственное увеличение плотности энергии и давления в $\sim 10^8$ раз, достижение критерия Лоусона, а затем термоядерная детонация вдоль оси пинча) или, по крайней мере, на получение высокого нейтронного выхода. Таким образом, была надежда на положительное использование самой неустойчивости, хотя обычно неустойчивости для всяких технических приложений играют вредную роль.

Кроме того, уже в самых первых экспериментах с Z-пинчами были получены нейтроны, образующиеся в результате термоядерных реакций, но было выяснено, что эти нейтроны генерируются за счет столкновений ионов, ускоренных

до энергий, намного превышающих тепловые, с ионами плазмы пинча. Этот механизм генерации нейтронов получил название ускорительно-го или пучково-мишенного. Но и этот механизм мог бы быть следствием больших напряжений, развивающихся, когда значительный магнитный поток уходит на ось за короткие времена, соответствующие максимальному сжатию перетяжки. В последние годы в ряде работ по Z-пинчу зарегистрированы ионы, ускоренные до высоких энергий, намного превосходящих ту, которую они могли бы получить, разгоняясь в электрическом поле, генерируемом установкой (в десятки и даже сотни раз).

Таким образом, для этих задач развития «сосисочной» неустойчивости общим является вопрос: может ли развитие перетяжки довести ток до малых радиусов и создать область с высокой плотностью энергии или же создать условия для генерации вблизи оси высоких напряжений. Однако для решения этого вопроса необходимо учитывать весь спектр возмущений, которые могут влиять на развитие перетяжки.

Турбулентное развитие гидродинамических и МГД неустойчивостей. Для турбулентной стадии РТ- (см., например, рис. 2) и «сосисочной» неустойчивостей, так же как для нелинейной стадии периодических и локализованных возмущений, характерно наличие пузырей и струй. Однако, в отличие от периодических возмущений, положение этих пузырей и струй хаотично и по мере развития неустойчивости происходит слияние пузырей, так что характерные амплитуды и длины волн возмущений растут. Общим свойством этой стадии можно назвать то, что характерные длины волн и амплитуды возмущений оказываются по величине порядка некоторой части длины пути, пройденной с ускорением.

Сравнение ускорений g (2) и g_b (3), определяющих зоны перемешивания РТ- и «сосисочной» неустойчивостей, показывает, что их величины соотносятся как R/D , и для лайнеров с большим аспектным отношением R/D роль «сосисочной» неустойчивости должна быть невелика.

Турбулентность, возникающая при движении лайнеров в азимутальном магнитном поле (Z-пинч-геометрия), может быть двумерной, поскольку магнитное поле препятствует искривлению магнитных силовых линий и возникновению соответствующих движений. Поэтому есть основания считать, что двумерные расчеты в координатах r - z для магнитного поля с одной азимутальной компонентой описывают возника-

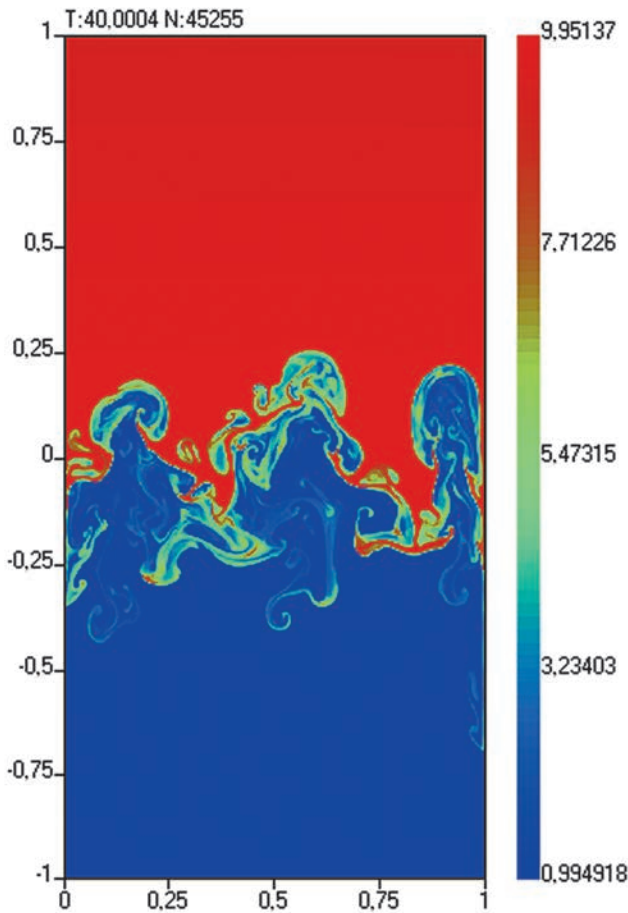


Рис. 8. Распределение плотности вещества для двумерного развития РТ-неустойчивости в плоской задаче с постоянным ускорением при $\rho_1/\rho_2 = 10$ ($A = 0,82$)

ощую турбулентность. Свойства двумерной магнитогидродинамической (МГД) турбулентности должны быть аналогичны свойствам двумерной

гидродинамической турбулентности. Примером такого рода турбулентности может быть двумерное развитие РТ-неустойчивости для плоской задачи с постоянным ускорением, когда зона перемешивания растет со временем по автомодельному закону (представлен на рис. 8).

Что касается турбулентного развития «сосисочной» неустойчивости Z-пинча, расчеты показали, что развитие турбулентности препятствует формированию перетяжки с неограниченно уменьшающимся радиусом. При развитии неустойчивости происходит турбулентное перемешивание и экранирование струями плазмы зоны сжатия (рис. 9, в «сосисочной» неустойчивости пузыри магнитного поля движутся в сторону уменьшения радиуса, поэтому картина выглядит перевернутой по отношению, например, к рис. 2). В итоге, максимальные давления, плотности и магнитные поля в зоне сжатия не растут неограниченно по мере сжатия, а увеличившись до некоторого уровня, далее стабилизируются и остаются примерно на постоянном уровне. Расчеты показали также, что при сжатии перетяжки не происходит и генерации высоких напряжений вблизи оси, что могло бы способствовать формированию ионных пучков высокой энергии и генерации нейтронов с помощью этих пучков. В расчетах довольно быстро устанавливается турбулентное, пульсирующее в зависимости от времени, медленно теряющее ток МГД квазиравновесное состояние. Из-за того, что максимальные давления, плотности и магнитные поля в зоне сжатия не растут неограниченно по мере сжатия, предположения по получению зажигания термоядерных реакций в перетяжке Z-пинча оказываются несостоятельными, и за-

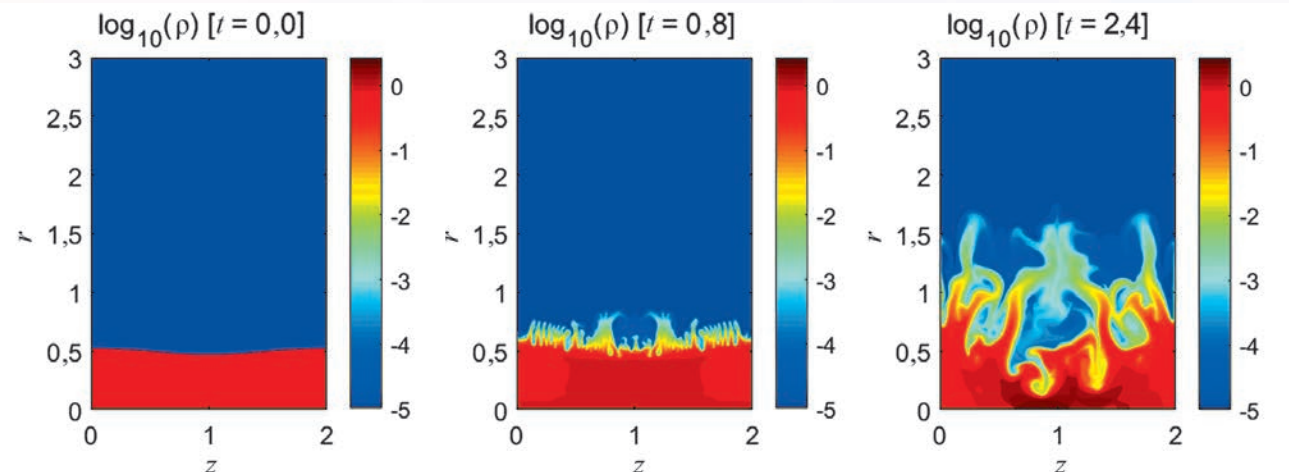


Рис. 9. Распределение плотности в процессе турбулентной эволюции Z-пинча

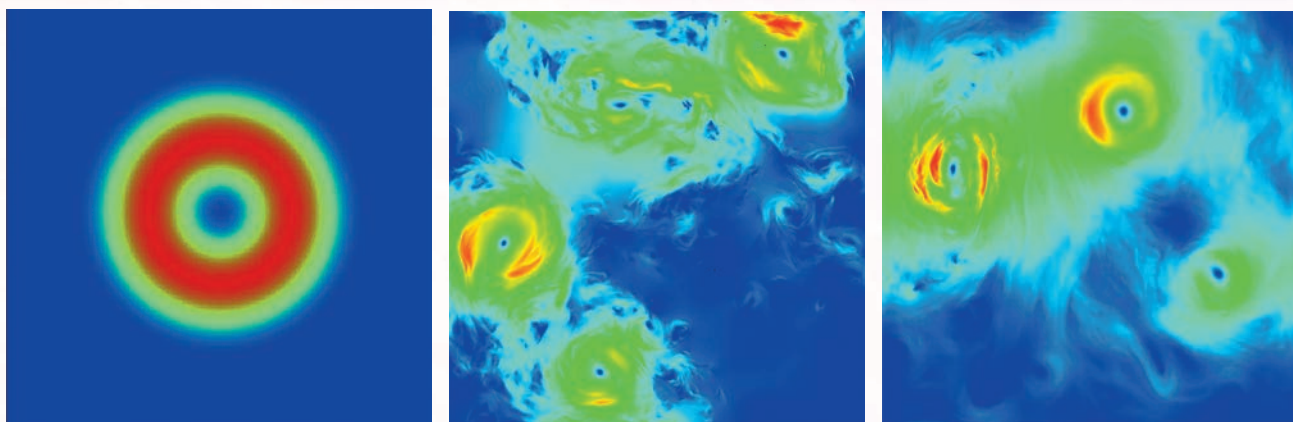


Рис. 10. Распределение скорости плазмы по объему в последовательные моменты времени

жечь плазму из-за развития «сосисочной» неустойчивости при больших токах современных установок и даже установок обозримого будущего не удастся.

Следует сказать, что не только РТ- и «сосисочная» неустойчивость играют вредную роль в исследованиях систем с ВПЭ. Течения плазмы в ряде устройств, в том числе в так называемой системе МАГО (МАГнитное Обжатие), в которой предварительно нагретая замагниченная плазма доводится до термоядерных температур с помощью сжатия лайнером, также имеют вихревой неустойчивый характер и могут смывать вещество со стенок, поставляя примеси в плазму, что приводит к ее остыванию из-за излучения на примесях. Если, например, в начальный момент времени в ограниченной области возникает вихрь, то он затем, будучи неустойчивым, со временем начинает разрушаться за счет роста возмущений, и приобретает сложный турбулентный вид, однако в дальнейшем, в противоположность хаотическому турбулентному течению, превращается в один или два вихря, которые, хотя и несколько искажаются возмущениями, в целом сохраняют форму (рис. 10). Такое течение затухает довольно медленно и способно смывать вещество со стенок.

Заключение

Существенным препятствием для достижения высоких плотностей энергии являются развивающиеся в экспериментах гидродинамические и магнитогидродинамические неустойчивости, приводящие к искажению симметрии и росту неоднородности. Из потенциально опасных неустойчивостей можно выделить рэлей-тейлоровскую и «сосисочную» неустойчивости, а также

неустойчивость ламинарных гидродинамических течений, приводящую к турбулизации и перемешиванию веществ.

Для изучения гидродинамических неустойчивостей, влияющих на течения жидкости и плазмы в экспериментах, в том числе и на имплозию лайнеров, используются различные методы. Наиболее простым является случай малых возмущений, когда допустим линейный анализ. Упрощения возможны также и при исследовании специальных случаев и геометрий, таких как изучение развития периодических возмущений и возмущений, не имеющих характерного размера (например, локальных возмущений), когда упрощение достигается при привлечении автоточных соображений. Однако в реальных случаях спектр начальных возмущений достаточно сложен и быстрое нелинейное развитие коротковолновых возмущений приводит к турбулентному состоянию зоны перемешивания. Эффективным методом изучения развития неустойчивостей в этом случае являются гидродинамические и МГД расчеты.

ГАРАНИН Сергей Флорович –
главный научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ