

# Суперкомпьютеры и исследования сильноточных импульсных электрических разрядов



## 7 Суперкомпьютеры и исследования сильноточных импульсных электрических разрядов

Управляемый термоядерный синтез — глобальная проблема современной науки. Один из подходов к ее решению лежит через эксперименты с самосжимающимися разрядами на сильноточных импульсных генераторах. Для оптимизации условий экспериментов необходимо компьютерное моделирование с привлечением самой современной высокопроизводительной техники и новых численных методик.

### АВТОРЫ:

Б.Н. Четверушкин — проф., чл.-корр. РАН, директор Института математического моделирования РАН, [e-mail: chetver@imamod.ru](mailto:chetver@imamod.ru)

В.А. Гасилов — проф., зав. отделом Института математического моделирования РАН, [e-mail: vgasilov@gmail.com](mailto:vgasilov@gmail.com)

Е.В. Грабовский — канд. техн. наук, директор отделения физики токонесущей плазмы, Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, [e-mail: anqara@triniti.ru](mailto:anqara@triniti.ru)

Магнитное поле, порождаемое электрическим током, сжимает проводящее ток вещество. Это явление называют пинч-эффектом. «Самосжимаемые» сильным импульсом тока электрические разряды — пинчи привлекают физиков как эффективное средство получения плотной высокотемпературной плазмы. В природе вещество в условиях высокой плотности и давления существует внутри звезд под действием гравитации [1]. Но электромагнитные силы значительно превосходят гравитационные. Поэтому электромагнитное сжатие позволяет исследовать в лабораторных экспериментах плотную, нагретую до миллионов градусов плазму, а также сверхсильные магнитные поля, действие которых на хорошо проводящие среды (на ту же плазму) эквивалентно давлению в десятки миллионов атмосфер. Экстремально высокие значения параметров вещества и поля определяют перспективы подобных исследований, прежде всего в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС) [1,2]. Именно в связи с УТС в России, США, Англии и Франции в 50-х годах прошлого столетия начались широкомасштабные исследования пинчей.

В середине 70-х годов прошлого столетия были сконструированы сверхмощные электрогенераторы, производившие импульсы тока в миллионы ампер при весьма малом времени достижения максимальной амплитуды — от 100 наносекунд до 1 микросекунды ( $10^{-7}$ – $10^{-6}$  сек). Были изобретены и особые типы нагрузки генераторов — цилиндрические оболочки (лайнеры) из различных материалов: металлической фольги, полимеров и даже полых газовых струй из специальных сопел. Наилучшие результаты были достигнуты для цилиндрических сборок из двухсот и более тонких (диаметром несколько микрон) металлических проволочек. Такие оболочки имеют сантиметровые размеры и весят доли миллиграмма. Будучи трансформированы током в плазменное состояние, лайнеры формируют пинчи, в которых скорость сжатия плазмы достигает небывалых прежде значений — сотни километров в секунду. В финальной стадии сжатия такого «быстрого» пинча вещество уплотняется и тормозится, при этом его кинетическая энергия переходит в тепло столь интенсивно, что вещество нагревается до «звездных температур» — миллионов градусов. В быстрых пинчах можно в десятки раз усилить мощность энерговыхода по сравнению с мощностью генератора. За те небольшие промежутки времени, пока плазма еще не разлетелась, в «сердцевине» пинча сохраняется высокотемпературное плотное вещество, которое используется для фундаментальных исследований свойств материи в экстремальном состоянии и различных приложений, таких, как УТС, «лабораторная астрофизика», источники рентгеновского излучения для медицины, биотехнологий, нанотехнологий, материаловедения и многого другого.

До недавнего времени наиболее мощным генератором был генератор Z, созданный в национальной лаборатории США в Сандии, в этом году его место

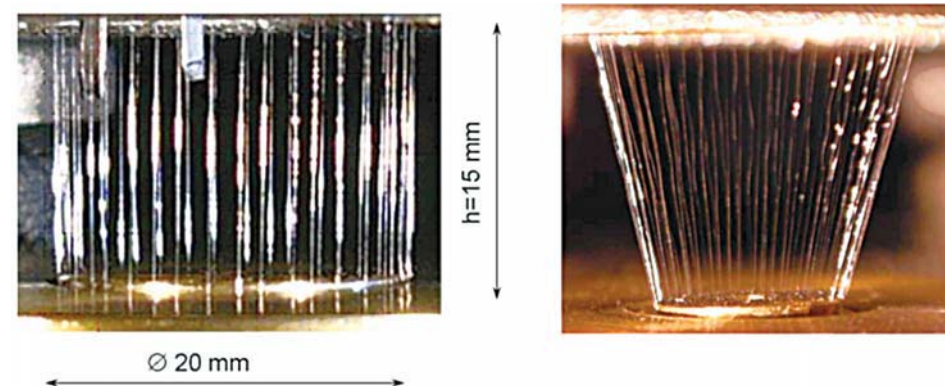
занял обновленный генератор ZR, который способен развивать ток до 26 МА. Эксперименты с пинчами на установке Z по получению рентгеновского излучения для инициирования термоядерных мишеней дали выдающиеся результаты. При начальном энергозапасе в конденсаторных батареях 40 МДж, токе в 20 МА и мощности генератора 40 ТВт получены импульсы рентгеновского излучения из пинча мощностью более 200 ТВт! Для сравнения — мощность всех электростанций США составляет примерно 1 ТВт. Самый мощный в России генератор АНГАРА-5-1 находится в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ, г. Троицк, Моск. обл.). Он позволяет получать токи до 5 МА за время около 100 нс. Аналогичные установки имеются в РНЦ «Курчатовский институт», в Институте Сильноточной Электроники СО РАН и в ряде других институтов. Несколько лет назад в России начались исследования, цель которых — создание генератора нового поколения БАЙКАЛ, рассчитанного на токовые импульсы до 50 МА.



**Рис. 1.**  
Сильноточный генератор АНГАРА-5-1

Эксперименты на Z и других установках стимулировали развитие новых схем УТС, в которых мощное рентгеновское излучение плазмы пинча нагревает сфериче-

ские мишени, наполненные смесью дейтерия и трития. Одна из наиболее перспективных современных концепций эксперимента была предложена и исследована в ТРИНИТИ [1]: мишень помещается в центр многопроволочной цилиндрической сборки и фиксируется там малоплотной полимерной пеной. При взаимодействии сжатой плазменной оболочки с пеной образуется ударная волна, разогревающая вещество до высоких температур. Горячее вещество генерирует мощные потоки рентгеновского излучения, под действием которых внешние слои мишени испаряются и разлетаются с огромной скоростью, оказывая реактивное давление на внутреннюю часть мишени, тем самым заставляя ее сжиматься. Внешняя плазменная оболочка пинча при этом экранирует излучение, препятствуя его выходу наружу и способствуя нагреву мишени.

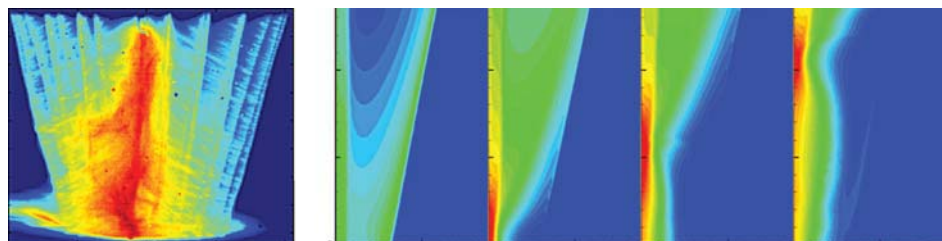


**Рис. 2.**  
Проволочные сборки перед экспериментом

Оптимальные условия подобных экспериментов определяются в основном методом компьютерного моделирования. Коды, моделирующие поведение пинчей, пока не развиты в такой степени, чтобы во всех возможных случаях давать надежные прогнозы экспериментов. Создание универсальных «прогнозирующих» кодов — это основная современная проблема в данной области вычислительной физики. Физика пинчей чрезвычайно разнообразна, в ней переплетаются нелинейные волновые процессы, движение плазмы подвержено всевозможным тепловым и гидродинамическим неустойчивостям, оно существенно неоднородно, турбулентно, и масштабы плазменных структур различаются в десятки и сотни раз. Поэтому полноценные численные исследования пинчей могут быть реализованы лишь на суперкомпьютерах терафлопной и более высокой производительности. Однако на пути успешной реализации возможностей таких компьютеров стоят серьезные

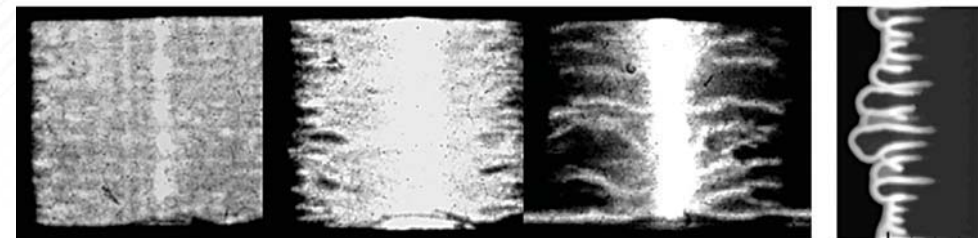
проблемы [3], такие, как адаптация алгоритмов к архитектуре многопроцессорных систем, в особенности систем с распределенной памятью, создание ориентированных на многопроцессорные расчеты задач гидродинамики средств подготовки данных, т.е. программ генерации и разбиения на подобласти сеток блочной, или нерегулярной, вообще говоря, структуры, а также средств обработки и визуализации результатов вычислений.

Одной из разработок, ориентированной на использование суперкомпьютеров, является объектноориентированный код, созданный в ИММ РАН на основе современных технологий программирования и автоматизированных средств поддержки документации и контроля версий [4]. В основу кода положены современные разностные схемы высокой точности, а для вычислений используются неструктурированные сетки, строящиеся из элементов различных типов — тетраэдров, гексаэдров или призм. Такой подход обеспечивает универсальность вычислений для расчетных областей различной геометрической сложности. Средства пре- и постпроцессинга и вычислительное ядро кода работают с единой структурой данных, для чего применяются методы теории клеточных топологических комплексов. Код развивается в тесном сотрудничестве с физиками из ФГУП ГНЦ РФ ТРИНИТИ, РИЦ КИ, а также французского исследовательского центра CEG (Centre des Etudes de Gramat). К настоящему времени с помощью этого кода выполнены исследования перспективных типов нагрузок электрогенераторов, обеспечивающих квазитрехмерное сжатие плазмы и, тем самым, более высокие концентрации вещества и энергии по сравнению с традиционными «цилиндрическими» пинчами.



**Рис. 3.** Рентгеновское изображение сжатия цилиндрической сборки, развертка по времени (слева) и результаты расчета, финальная стадия (справа)

Суперкомпьютеры открывают перспективу внедрения усовершенствованных моделей пинчей и использования вычислительных сеток с числом узлов до миллиарда и более, благодаря чему можно будет делать прогнозные расчеты для экс-



**Рис. 4.** Рентгеновское изображение плазмы конусной сборки, полученное при помощи интегральной по времени камеры-обскуры (слева) и результаты расчета, развертка по времени (справа)

периментов на генераторах следующего поколения с проектируемой мощностью 1000 ТВт [1,2]. В связи с этим укажем на сложную и интересную проблему верификации таких высокопроизводительных вычислений, что относится не только к моделированию плазмодинамики, но и к вычислительной гидродинамике в целом. Суперкомпьютеры позволяют повысить детализацию структуры течения при моделировании гидродинамических неустойчивостей и возникновения турбулентности. Однако при использовании столь мелких сеток неустойчивости могут иметь «счетное», нефизическое происхождение, что, очевидно, препятствует полноценному анализу истинных неустойчивостей. Поэтому приобретает особое значение вопрос разработки корректных вычислительных алгоритмов [3] для высокопроизводительных вычислений.

Данные работы выполняются при поддержке Отделения математических наук РАН (проект 3-ОМН), а также Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-01-12109-офи\_м).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики. /Сб. статей Под ред. чл.-корр. РАН Б.Ю.Шаркова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
2. *Фортюв В.Е.* Экстремальные состояния вещества. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
3. *Четверушкин Б.Н.* К вопросу об ограничении снизу на масштабы в механике сплошной среды. Труды семинара «Время, хаос и математические проблемы». Вып. 4 т. 38; Сост. А.И. Козко, А.С. Печенцев. - М.: КДУ, 2009. С. 75–96.
4. *Gasilov V.A., et al.* Object-Oriented Programming and Parallel Computing in Radiative Magnetohydrodynamics Simulations. Parallel Computing: Architectures, Algorithms, and Applications Book of Abstracts of the International Conference ParCo-2007. Aachen, Germany, 4–7 September, 2007. Publication Series of the John von Neumann Institute for Computing (NIC Series), 2007. Vol. 37. P. 110.