

## Совершенная методика суперкомпьютерного моделирования задач аэродинамики и аэроакустики

*A. B. Горобец, A. P. Дубенъ, P. A. Бахвалов, H. C. Жданова*

*ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва*

Работа посвящена совершенствованию вычислительной методики для задач газовой динамики, которая реализуется на базе кода NOISETTE [1]. Чтобы название не показалось излишне амбициозным, сразу уточним, что речь скорее идет о наших представлениях о совершенстве, а не о факте его достижения. Здесь важными качествами являются точность и производительность, а также робастность и простота применения. Помимо результатов работы, внимание будет уделено тому, что еще предстоит сделать на пути к совершенству, пределов которому, конечно же, нет.

Результат моделирования в значительной степени зависит от расчетной сетки. Будет рассмотрен подход к построению сетки на основе равномерного измельчения, позволяющий снизить ресурсоемкость генерации сетки и ускорить сходимость стационарных расчетов. Высокая производительность на гибридных суперкомпьютерах обеспечивается комбинированным распараллеливанием на основе стандартов MPI, OpenMP и OpenCL [2], в котором повышена эффективность обмена данными, оптимизирована реализация вычислений и снижено потребление памяти. Для дискретизации на неструктурированных сетках используются схемы EBR, которые дают повышение точности, но могут быть весьма капризными на сетках низкого качества. Надежность методики была повышена за счет небольшой стабилизирующей модификации [3] для этих схем. Для вихреразрешающих расчетов повышение точности и снижение ресурсоемкости достигается улучшением гибридного RANS-LES подхода семейства DES за счет использования альтернативных LES моделей, улучшения защитной функции погранслоя, внедрения адаптивного метода расчета подсеточного масштаба. Другим важным компонентом методики являются пристеночные функции, применение и развитие которых нужно для точного моделирования в зоне погранслоя в условиях недостаточности сеточного разрешения. Наконец, проблема сложности применения, связанная с большим количеством настроек численного метода и моделей, решается внедрением автоматической динамической конфигурации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российской научного фонда, проект № 24-11-00287. Результаты расчетов получены с использованием оборудования ЦКП ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (<http://ckp.kiam.ru>).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Abalakin I., Bakhvalov P. et al. NOISEtte CFD&CAA Supercomputer Code for Research and Applications. *Supercomput. Front. Innov.* 2024. 11(2). 78–101.
2. Gorobets A., Bakhvalov P. Heterogeneous CPU+GPU parallelization for high-accuracy scale-resolving simulations of compressible turbulent flows on hybrid supercomputers. *Comput. Phys. Commun.* 2022. Vol. 271. 108231.
3. Gorobets A. Improving the Robustness and Applicability of Higher-accuracy EBR Schemes. *Lobachevskii J. Math.* 2024. 45(10). 5000–5013.

**Горобец Андрей Владимирович**, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва **e-mail:** gorobets@keldysh.ru

**Дубень Алексей Петрович**, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва **e-mail:** aduben@keldysh.ru

**Бахвалов Павел Алексеевич**, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва

**Жданова Наталья Сергеевна**, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва