

**А. В. Корольков, О. К. Чернобровина** (Мытищи, МГУ леса). **Вычислительный эксперимент в развитии гидродинамики невесомости.**

Гидродинамика невесомости зародилась в середине двадцатого века на базе гидродинамики, как раздела механики сплошной среды. Причиной ее зарождения стало бурное развитие космонавтики. Гидродинамика невесомости обеспечивала ученых, конструкторов и технологов необходимыми сведениями о поведении жидкостей в условиях реального космического полета. Именно прикладные задачи космонавтики определяли направления развития этой науки. Основополагающей можно считать книгу [1], обобщающую имеющиеся к тому времени фундаментальные сведения о поведении жидкостей в невесомости. Из-за высокой стоимости космических экспериментов одним из основных методов изучения поведения жидкостей в невесомости стал вычислительный эксперимент. Таким образом, в рамках гидродинамики невесомости появилось направление, называемое вычислительная гидродинамика невесомости. В настоящей работе представлена хронология ряда проблем, решение которых с использованием вычислительного эксперимента способствовало развитию вычислительной гидродинамики невесомости.

В 60-х годах начались регулярные космические полеты и были проведены первые технологические эксперименты в невесомости. Цель экспериментов — отработка методик получения новых веществ и материалов, используя невесомость. В ряде космических экспериментов были получены неожиданные результаты. Так при выращивании кристаллов на борту ОНС «Салют» иногда получали образцы с большей неоднородностью, чем в земных условиях. Причиной тому были остаточные ускорения, которые всегда присутствуют на борту космического аппарата (КА). В реальном космическом полете нет полной невесомости, а реализуется состояние, близкое к невесомости. Таким образом, возникла необходимость изучения самого состояния близкого к невесомости.

На основе анализа многочисленных результатов измерений остаточных ускорений на борту КА, результатов расчетов и теоретических исследований удалось для различных режимов функционирования КА количественно описать законы изменения суммарного вектора остаточных ускорений во времени. В ряде случаев можно считать, что изменение во времени суммарного вектора остаточных ускорений сводится к вращению в некоторой плоскости постоянного по модулю вектора с постоянной угловой скоростью [2].

Количественные характеристики состояния, близкого к невесомости, — уровень остаточных ускорений ( $g$ ) и период изменения направления вектора остаточных ускорений ( $T_g$ ) — необходимо учитывать при реализации различных технологических процессов. От величины  $g$  зависит интенсивность гравитационной конвекции и время ее «разгона»  $T_f$  [3]. Соотношение характерных времен  $T_g$  и  $T_f$  определяет режим развития конвекции. Если  $T_g \gg T_f$ , гравитационная конвекция развивается как в постоянном поле вектора ускорения. Если  $T_g \ll T_f$ , то конвективное течение подавляется, а теплообмен осуществляется практически за счет теплопроводности. Если же

эти два характерных времени одного порядка, то возможно значительное увеличение интенсивности конвективного течения. Режимы развития гравитационной конвекции в условиях, близких к невесомости, изучались в вычислительном эксперименте, основанном на численном решении системы уравнений Навье–Стокса [4]. Именно эффектом увеличения интенсивности конвекции за счет изменения во времени направления вектора остаточных ускорений были объяснены причины серии неудач при проведении технологических экспериментов по выращиванию кристаллов.

В результате проведения многочисленных вычислительных экспериментов было установлено, что закон изменения суммарного вектора остаточных ускорений (его величины и направления) играет определяющую роль в поведении жидкости. Характер развития конвекции зависит не только от частотно-амплитудных характеристик остаточных ускорений. Необходимо учитывать эволюцию вектора в целом. Каждая гидродинамическая система чувствительна к определенному частотно-амплитудному диапазону [5]. Суммарный вектор остаточных ускорений на борту КА складывается из множества отдельных возмущений от различных источников. Сложное нерегулярное изменение суммарного вектора остаточных ускорений, как правило, удается представить в виде суммы нескольких регулярных возмущений различной частоты и амплитуды. В этом случае можно моделировать конвективное движение жидкости, учитывая воздействие на систему лишь составляющие вектора ускорений, у которых характеристики  $T_g$  и  $T_f$  одного порядка.

В 90-е годы появилось большое количество работ по изучению поведения в невесомости сложных многокомпонентных гидродинамических систем, в частности систем жидкость–газ. Одной их важнейших задач этого направления является проблема подачи жидкого топлива в двигательную установку в условиях невесомости при запуске двигательной установки для выполнения маневра КА. Гидродинамика невесомости пополнилась новыми вычислительными алгоритмами, в частности, позволяющими рассчитывать поведение системы жидкость–газ сквозным способом, без явного выделения границы раздела сред [6].

В настоящее время спектр задач, решаемых в рамках гидродинамики невесомости, очень широк. Это гидродинамические процессы, осложненные химическими реакциями, фазовыми переходами, различными внешними воздействиями и др. Вычислительный эксперимент по-прежнему является важнейшим инструментом исследований и определяет дальнейшее развитие гидродинамики невесомости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидромеханика невесомости. / Под ред. А. Д. Мышкиса. М.: Наука, 1976, 504 с.
2. Ветошкин А. М., Домашев В. Ф., Корольков А. В., Рябуха С. Б., Савичев В. В. Анализ малых ускорений на борту орбитальных научных станций с точки зрения воздействия на гидродинамические системы. — Космические исслед., 1998, т. 36, № 2, с. 221–224.
3. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен. М.: Мир, 1983.
4. Авдуевский В. С., Корольков А. В., Купцова В. С., Савичев В. В. Исследование тепловой гравитационной конвекции в переменном поле вектора малых ускорений. Проблемы матем. теор. физ., 1987, № 1, с. 54–59.
5. Технологические эксперименты в невесомости. / Под ред. В. С. Авдуевского. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983.
6. Корольков А. В. Математическое моделирование поведения системы жидкость–газ под действием различных возмущающих факторов. — Изв. РАН, сер. мех. жидк. и газа, 1997, № 2, с. 19–29.

- 
7. *Корольков А. В.* Анализ параметров сложной гидродинамической системы при управляющем воздействии внешних факторов. — Лесной вестник, 2007, № 4(53), с. 151–154.