

# ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПРИ ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В ВИСКОЗИМЕТРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

*И.В. Елюхина, Т.С. Кочурин*

Выполнено приложение параллельных алгоритмов к процедурам оценки линейных и нелинейных свойств жидкостей крутильным вискозиметром и отмечены особенности их оптимизации.

Корректная реализация основных этапов параметрической идентификации, выполняемая в терминах теории чувствительности, чрезвычайно важна для получения надежной оценки свойств крутильным вискозиметром. Особенно это касается высокотемпературных случаев, которым отвечает более низкая точность наблюдаемых в эксперименте величин. Поэтому целесообразно, учитывая многопараметричность таких задач, как поиск оптимальных условий и пр., для обеспечения полноты и законченности решения проводить его в рамках параллельных вычислений. При моделировании в прямой и обратной задачах вискозиметрии, в частности, в вопросах, касающихся оптимизации, решения нелинейных нестационарных распределенных систем дифференциальных уравнений, можно воспользоваться обычно применяемыми на практике схемами распараллеливания, в т.ч. специализированными параллельными библиотеками. Обратим внимание на частные алгоритмы, возможность параллелизации которых вполне очевидна.

При интерпретации данных в рамках ньютоновской жидкости с плотностью  $\rho$  и кинематической вязкостью  $\nu$  выбор наилучших условий измерения проводится для конкретно выбранной, уже используемой в приложениях, установки с внутренним радиусом  $R$ . Тогда изменению могут подлежать, например, период колебаний  $\tau_0$  и момент инерции  $K$  пустой подвесной системы, высота заполнения вискозиметра  $H$ . Для проектируемой установки в определенных границах может варьироваться полный набор ее параметров. Обычно в экспериментах над жидкометаллическими системами  $R\sqrt{2\pi/\nu\tau_0} < 25$ ,  $A = 0,5\rho\pi HR^4/K \sim 0,05, \dots, 0,15$ ,  $\chi = H/R \sim 1, \dots, 10$  (часто  $\chi \sim 2,5$ ),  $\tau_0 \sim 1, \dots, 10$ . При исследовании опытных образцов с неизвестной зависимостью плотности от температуры актуальной становится проблема одновременного расчета из одного вискозиметрического уравнения  $\nu$  и  $\rho$ , что представляет интерес также при проверке согласованности получаемых данных и позволяет устранить ошибки, связанные с раздельным их измерением.

В этом случае решается прямая задача вискозиметрии, заключающаяся в нахождении свойств жидкости из наблюдаемых в эксперименте параметров колебаний при известных параметрах установки. Надежная одновременная оценка возможна при адекватном выборе двух точек измерения с различными массами образца [1] в комплексе с поиском оптимальных характеристик эксперимента, им отвечающим. В соответствии некоторой высоте заполнения  $h_1$  ставится высота  $h_2 > h_1$  (рис. 1), обеспечивающая оптимальную оценку, затем проводится выбор набора этих высот. В общем случае функция на рис. 1 не унимодальна, что определяется, в частности, интервальными оценками прямо измеряемых в эксперименте параметров. При расчете учитывается,

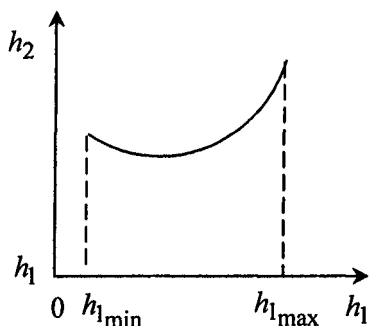


Рис. 1. Выбор высот заполнения образцом

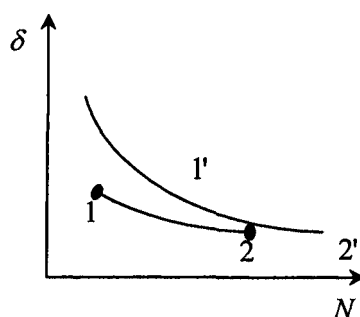


Рис. 2. Изменение  $\delta$  в процессе опыта

что, во-первых, величины  $h_2$  и  $h_1$  должны существенно различаться: дно оврага функции качества на множестве  $(v, p)$  тогда менее пологое и ее минимум более выражен, но, во-вторых, чувствительность параметров колебаний к  $v$  и  $p$  с уменьшением  $A$  и чувствительность  $v$  к  $p$  с ростом  $\chi$ , когда влияние торцов слабее, падает. Важно также, какой и параметров: вязкость или плотность, следует оценить точнее или какая из точек преобладает по чувствительности: при различных массах различен наклон откосов оврага, т.е. соответствующее влияние на оценки.

При расчете нелинейных свойств среды [2] с использованием точных решений для линейно вязких жидкостей возникает алгоритм, когда на каждом шаге выполняется решение обратной задачи [3] расчета характеристик колебаний. Для каждого номера колебания  $N$ , прошедшего от начала опыта, по угловому смещению тигля из положения равновесия и параметрам колебаний: периоду  $m$  и логарифмическому декременту затухания  $\delta$ , проводится расчет скорости сдвига и зависящей от нее эффективной вязкости, по которой из вискозиметрического уравнения для ньютоновской среды уточняются  $\tau$  и  $\delta$ , а степень их соответствия измеренным является критерием качества. При этом величина  $a_N$ , отвечающая началу  $N$ -го колебания, может отсутствовать в опытных данных и определяться в расчетах совместно с периодом и декрементом, т.к. степень их изменения в зависимости от  $N$  при идентифицируемых нелинейных эффектах для одной и той же установки однозначно определяется характеристиками реологического уравнения состояния. Так, элемент 12 на рис. 2, соответствующий данным эксперимента с меньшим начальным  $\alpha_0$ , совпадает при сдвиге вдоль оси  $N$  с участком 1'2' верхней кривой. Выбираемый для обработки интервал значений  $N$  отвечает с одной стороны отсутствию переходных процессов в пределах точности измерений и расчетов, а с другой - возможности надежной регистрации  $\alpha$ .

Анализ различными процессами интервалов  $\alpha_0$  для серии реологических законов или их коэффициентов внутри заданного закона оптимизирует процедуру идентификации, в т.ч. в плане затрат на передачу сообщений. Аналогичная ситуация наблюдается при поиске  $h_2$  для определенного диапазона значений  $h_1$  в ньютоновском случае и в ряде иных задач планирования экспериментов с целью получения адекватного вискозиметрического описания жидких металлов, поэтому выделим некоторые общие для них особенности. Так, в рамках базового, нулевого, процесса проводится изучение в пределах требуемых областей свойств объекта и найденные оценки систематизируются. При эффективных взаимодействиях процессов и выборе групп ускорение, обеспечиваемое параллелизацией, близко к линейному. Возможность сужения здесь диапазона рабочих величин и сокращения суммарного итерационного цикла относительно последовательной реализации приводит к тому, что, например, для 24 процессоров ускорение может превышать 30 раз. Если анализ экспериментальных условий на оптимальность проводится не для имеющейся, а проектируемой, установки, то трудоемкость решения снижается, в частности, при распределении по процессам внешнего цикла варьируемых характеристик прибора и организации межпроцессорного обмена по равномерной и взаимно независимой их загруженности. Вычисления проводились с учетом архитектуры кластера университета с использованием FORTRAN и MPI.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-02-96016\_Урал).

## Литература

1. Елюхина, И.В. Одновременное измерение вязкости и плотности жидкости крутильно-колебательным методом / И.В. Елюхина, Г.П. Вяткин // Изв. вузов. Черная металлургия. - 2006. - №5. - С. 3-6.
2. Елюхина, И.В. Наблюдение и измерение неньютоновских свойств высокотемпературных жидкостей крутильно-колебательным методом / И.В. Елюхина // Теплофизика высоких температур. - 2006. - Т. 44, № 3. - С. 411-417.
3. Елюхина, И.В. Обратная задача крутильно-колебательной вискозиметрии для нелинейных жидкостей / И.В. Елюхина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». - 2006. - Вып. 7. - № 7(62). - С. 203.

*Поступила в редакцию 15 января 2008 г.*