

[1] Овсянникова Л. П., Явор С. Я. ЖТФ, 1978, т. 48, № 6, с. 1306—1308.

[2] Никифоров Н. Я., Казаков А. Т., Рабинович М. Н. Изв. вузов. Физика, 1981, т. 24, № 10, с. 35—40.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
16 декабря 1986 г.

Журнал технической физики, т. 58, в. 1, 1988

## ПРЯМОЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОНСТАНТ СКОРОСТЕЙ ПО СТРУЙНЫМ РЕЛАКСАЦИОННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАМ

А. В. Богданов, Н. В. Станкус

1. Из всех вариантов релаксационной спектроскопии измерение кинетики заселенностей внутренних степеней свободы в струйных течениях [1] позволяет охватить самый широкий спектр параметров и достигнуть значительной неравновесности в течении. Однако использование стандартных методов подбора параметров в аналитических параметризациях констант скоростей [2] показало слабую чувствительность заселенностей к виду и величине релаксационных коэффициентов. Мы покажем тем не менее, что существует режим течения, в котором зависимость от констант скоростей достаточно сильна, и предложим процедуру прямого восстановления релаксационных коэффициентов в этом режиме.

2. Введем отношение констант  $a(n-1, t) = K_{n-1, n} / K_{n-1}$  и определим, следуя [3], модифицированные заселенности соотношением

$$f(n-1, t) a(n-1, t) = N_n(t) / N_{n-1}(t). \quad (1)$$

Уравнения для  $f(n, t)$  намного проще уравнений для  $N_n(t)$ ; в частности, в них наблюдается разделение вкладов в изменение заселенностей от столкновений, газодинамического процесса и источников накачки [3]

$$\dot{f}(n, t) = R(f, f) + Hf + S(f) f. \quad (2)$$

В отсутствие накачки член  $S(t)$ , который содержит  $f$  с индексами, отличными от  $n$ , является малым второго порядка как по отклонению от равновесия, так и по гладкости начального распределения, а поэтому в струйных течениях может быть отброшен.  $H$  — это вклад газодинамических градиентов  $H(n, t) = -d/dt \ln a(n, t) (\equiv -G(t) \Delta E(n))$ , а  $R$  — интеграл столкновений. Например, в приближении одноквантового  $VT(RT)$ -обмена он имеет вид

$$R(f, f) = A_n f^2 + B_n f + C_n (A_n + B_n + C_n = 0), \quad (3)$$

где  $A_n \div C_n$  — некоторые комбинации констант скоростей [3]. В струях  $A, B, C \gg H \gg S$ .

3. Из анализа (2) с учетом (3) нетрудно получить, что все течение в струе разбивается на три области. На начальном этапе расширения при выходе из форкамеры заселенности близки к равновесным,  $f(n, t) \simeq 1$  и в силу (3)  $R(f, f) \simeq 0$ . Поэтому решение на начальном этапе имеет универсальный вид

$$f(n, t) \simeq \exp \left\{ -\Delta E(n) \int_0^t G(t) dt \right\} \quad (4)$$

и слабо зависит от констант скоростей в системе (интеграл в (4) берется вдоль токовой трубки). Во второй области, на временах порядка

$$\tau_n = (C_n - A_n)^{-1} \equiv (K_{n+1, n} - K_{n, n-1} - K_{n+1, n+2} - K_{n, n+1})^{-1}, \quad (5)$$

вклады газодинамических градиентов и релаксационных членов сравниваются

$$A_n f_n^2 + B_n f_n + C_n + Hf_n \simeq 0, \quad (6)$$

и в решении получается плато. Максимальное отклонение от положения равновесия (в линейном приближении)

$$\varphi_n^* = (f_n^* - 1) = H(\tau_n) \tau_n. \quad (7)$$

Подчеркнем, что положение плато малочувствительно к виду констант скоростей, а вот величина его зависит от них значительно сильнее. Кроме того, для каждого уровня положение максимума будет, конечно, свое. Если параметры в форкамере подобраны так, что максимумы для соседних уровней соответствуют одному  $\tau$  (т. е.  $\tau_n \approx \tau_{n+1}$ ), то из (7) в силу принципа детального равновесия следует соотношение

$$K_{n+1, n} (1 - a_n - (1 - a_{n+1})^{-1}) = \tau_n^{-1} + \tau_{n+1}^{-1} (1 - a_{n+1})^{-1} + K_{n, n-1}. \quad (8)$$

связывающее положение максимума отклонения от равновесия со значениями констант скоростей в изучаемой системе.

4. На основе сформулированной качественной картины течения можно предложить следующую процедуру восстановления констант скоростей всех переходов при некоторой фиксированной температуре. Путем предварительного просчета течения с некоторыми модельными константами устанавливаются давления в форкамере, при которых для данного уровня положение максимума отклонения от равновесия (6) попадает в ту часть струи, где установлена диагностическая аппаратура. Из-за малой чувствительности положения максимума расчеты на этом этапе могут носить характер прикидок. Для того чтобы максимумы на всех уровнях соответствовали одной температуре, температура в форкамере при всех измерениях должна быть постоянной. Серия измерений (при своем давлении для каждого уровня) дает нам значения заселенностей, соответствующих максимальному отклонению от равновесия  $N_n^*$ . В силу (1) отсюда находим  $\varphi_n^*$  и, зная из газодинамического расчета  $H(\tau_n)$ , получаем значения  $\tau_n$  (5).

Из системы уравнений (8) можно теперь последовательно определить все константы скорости начиная с  $K_{1,0}$  ( $K_{0,-1} \equiv 0$ ). Температура, при которой определяются значения  $K_{n+1,n}$ , зависит от положения диагностической аппаратуры на оси струи и также находится на этапе газодинамического расчета струи.

5. Если в системе существует многоквантовый обмен, то предлагаемая методика позволяет восстанавливать комбинации  $\sum m K_{n+m,n}$ , а если эффективен  $VV(RR)$ -обмен, то  $K_{n+1,n} + \sum K_{n+1,n}^{m,m+1} N_m$ , где суммирование проводится по квантовым числам, соответствующим состояниям, которые заметно заселены. Поскольку значения заселенностей  $N_m$  также определяются в эксперименте, авторам представляется, что использование предлагаемой методики совместно с аналитическими параметризациями констант из [4] позволяет в рамках автоматизированного эксперимента прямо восстанавливать значения констант связи в этих параметризациях.

#### Литература

- [1] Варгин А. И., Ганина Н. А., Карелов Н. В. и др. ЖПМиТФ, 1979, № 3, с. 73—83.  
 [2] Сквородко П. А., Шарафутдинов Р. Г. ЖПМиТФ, 1981, № 5, с. 40—49.  
 [3] Дубровский Г. В., Стрельченя В. М. ЖПМиТФ, 1986, № 3, с. 22—31.  
 [4] Богданов А. В., Горбачев Ю. Е., Дубровский Г. В., Павлов В. А. ЖТФ, 1985, т. 55, № 12, с. 1889—1897.

Ленинградский  
 государственный университет  
 им. А. А. Жданова

Поступило в Редакцию  
 16 декабря 1986 г.