

02;03;12

Многосопловой газодинамический источник молекулярного пучка

© В.В. Ящук, В.Ф. Ежов, Г.Б. Крыгин, В.Л. Рябов

Петербургский институт ядерной физики, Гатчина

Поступило в Редакцию 6 марта 1997 г.

Представлены результаты экспериментального исследования многосоплового газодинамического источника молекулярных пучков, в котором рабочее вещество вводится непосредственно в сверхзвуковую струю газа-носителя. Источник предназначен для создания медленных, холодных пучков атомов и молекул. Приведены времяпролетные распределения пучков газа-носителя N_2 и рабочего вещества SF_6 , сформированных источником с шестью соплами. Измеренные параметры поля течения газа-носителя сравниваются с результатами расчетов для осесимметричного сопла с внутренним телом, имеющего кольцевое критическое сечение. Полученные результаты показывают, что в источниках молекулярных пучков принципиально возможно применять многосопловые конструкции вместо осесимметричных сопел с внутренним телом. Это позволяет облегчить требования к точности изготовления источника, уменьшить расход газа-носителя и применять достаточно простые схемы закливания газа-носителя.

Один из наиболее эффективных методов получения холодных пучков труднолетучих молекул и радикалов основан на способе уменьшения фазового объема атомного пучка [1]. Идея метода состоит в том, что пары рабочего вещества вводятся непосредственно в сверхзвуковую струю газа-носителя. В ходе термализации паров рабочего вещества и газа-носителя, охлажденного при сверхзвуковом расширении, их поступательные скорости и температура выравниваются, достигая значений, определяемых большим количеством газа-носителя. Одновременно происходит уменьшение температур, соответствующих внутренним степеням свободы — колебательным и вращательным. В результате сужаются не только распределения молекул в выведенном пучке по скорости и углу, но и их распределение по квантовым состояниям.

Первый и пока единственный источник молекулярного пучка, реализующий описанный метод, был создан в ПИЯФ РАН в 1986 году для получения пучка химических радикалов PbI [2]. В этом источнике

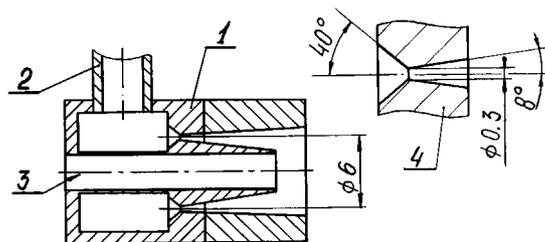


Рис. 1. Шестисопловой источник молекулярного пучка: 1 — корпус сопла с внутренним телом, 2 — штуцер для подачи газа-носителя, 3 — канал внутреннего тела для подачи рабочего вещества, 4 — конфигурация одного из шести сопел.

сверхзвуковой поток газа-носителя — азота формируется с помощью осесимметричного сопла Лавала с внутренним телом. Критическое сечение сопла представляет собой кольцо с зазором около 0.1 мм. Пары рабочего вещества вводятся в сверхзвуковой поток азота по прогрееваемому капилляру через полое внутреннее тело.

Уже в ходе испытаний, подтвердивших эффективность самого метода, выявился существенный недостаток конструкции этого источника. Дело в том, что при изготовлении сопла практически невозможно добиться равномерного зазора в критическом сечении. Неравномерность зазора приводит к проблемам юстировки источника, так как его оптическая и газодинамическая оси не совпадают. Кроме того, при кольцевой форме критического сечения возможности оптимизации источника за счет профилирования сопла ограничены из-за увеличения радиуса критического сечения [3]. При неизменном зазоре это приводит к неоправданному возрастанию полного расхода газа-носителя через сопло и, как следствие, к ужесточению и без того жестких требований к вакуумной системе источника. Минимизировать величину полного расхода особенно важно при работе с дорогостоящим газом, таким, например, как ксенон [4,5], когда необходимо осуществлять сбор, очистку и закливание газа-носителя.

Для решения указанных проблем в работе [6] предложено использовать многосопловую конструкцию источника, представляющую собой набор сопел, расположенных равномерно по окружности критического

сечения. Полный расход газа-носителя в этом случае определяется числом сопел и величиной критического сечения единичного сопла. Достоинства предложенной схемы очевидны.

Основная цель данной работы — показать принципиальную возможность использовать многосопловые источники для формирования молекулярных пучков. Ниже представлены результаты экспериментального исследования источника с шестью осесимметричными соплами Лавалья, схематически изображенного на рис. 1.

Эксперименты проводились на установке генератора молекулярных пучков ПИЯФ с помощью кросскорреляционного времяпролетного (ВП) спектрометра [7,8].

В генераторе молекулярных пучков исследуемый источник располагается на пятикоординатном юстировочном столе в вакуумной камере диаметром 90 см. Три бустерных насоса НВБМ-15 с суммарной производительностью $(4 \div 5) \cdot 10^4$ л/с при остаточном вакууме $(0.1 \div 1)$ Па обеспечивают непрерывный режим работы источника с расходом газа-носителя до $4 \cdot 10^4$ Па · л/с. Пучок, состоящий из смеси газа-носителя и рабочего вещества, формируется из приосевой части потока с помощью расположенных последовательно двух скиммеров и двух диафрагм с системой дифференциальной откачки между ними. Детектором служит монополярный масс-спектрометр с ионизацией электронным ударом.

Юстировочный стол предназначен для автоматического перемещения источника по трем декартовым и двум угловым координатам и используется при поиске оптимального — соответствующего максимуму интенсивности сформированного пучка — положения источника относительно скиммера. Кроме того, с помощью юстировочного стола проводились измерения пространственных распределений параметров потока газа-носителя и рабочего вещества.

В эксперименте измерялись ВП распределения для пучков газа-носителя N_2 и Хе и рабочего вещества SF_6 , сформированных шести-сопловым источником. При этом исследовалась зависимость основных параметров пучков от таких условий формирования, как давление в ресивере сопла (давление торможения) — P_0 , рабочее давление SF_6 на входе в капилляр внутреннего тела, пространственное положение и угловая ориентация источника относительно первого скиммера. Цель этих исследований состояла в определении оптимальных условий формирования. На рис. 2 представлены характерные для данного источника ВП распределения. Близость распределений для пучков SF_6 и

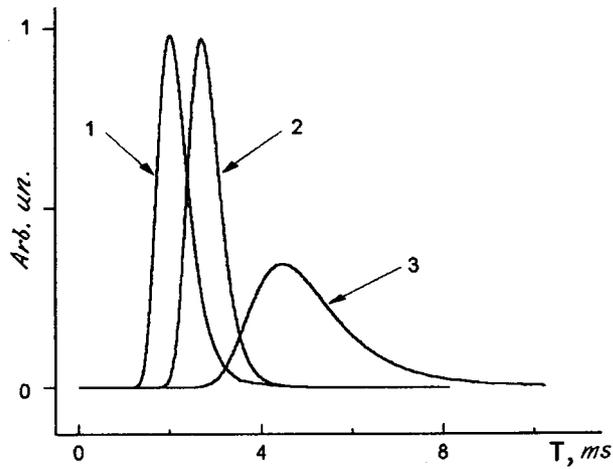


Рис. 2. Времяпролетные распределения пучков газа-носителя N_2 ($P_0(N_2) = 1 \cdot 10^4$ Pa) — 1 и рабочего вещества SF_6 ($P_0(SF_6) = 1 \cdot 10^2$ Pa) — 2. ВП распределение пучка SF_6 , полученное при отсутствии газа-носителя, — 3. Распределения 1, 2, 3 описываются максвелловскими распределениями по скоростям со скоростными отношениями $S = V/\alpha$, равными 3.7, 5.4 и 2.4 соответственно.

соответствующего ему газа-носителя является результатом процесса термализации. Сравнение этих распределений с ВП распределением для пучка SF_6 , полученного при отсутствии газа-носителя, также наглядно демонстрирует эффективность источника. Отметим, что в данном источнике рабочее давление SF_6 выбирается в пределах $(10 \div 100)$ Pa. Без газа-носителя при таких давлениях невозможно создать пучок SF_6 со скоростным отношением $S = V/\alpha$, существенно большим единицы; здесь V — поступательная скорость, α — тепловой разброс скоростей. Необходимо повышать давление до величин 10^3 Pa и больше, обычных для газодинамических источников, в которых используется сверхзвуковое расширение самого рабочего вещества. Однако к SF_6 этот путь не применим из-за появления конденсации.

В рамках данной работы специально исследовался вопрос об адекватности конструкции, изображенной на рис. 1, и осесимметричного сопла со сплошным кольцевым критическим сечением. С этой целью

полученные экспериментально параметры сверхзвукового потока газа-носителя сопоставлялись с результатами газодинамических расчетов для модельного сопла той же конфигурации, но имеющего в критике сплошное кольцевое сечение с площадью, равной сумме критических сечений сопел многосоплового источника.

Такое сопоставление необходимо проводить с определенной осторожностью.

Как известно, времяпролетные измерения представляют однозначную информацию о параметрах пучков, формируемых газодинамическими источниками [9]. Однако связать найденные экспериментально параметры пучка с параметрами сверхзвукового потока в области носика скиммера можно только в том случае, если исключены (или по крайней мере могут быть учтены) искажения, вносимые взаимодействием потока со скиммером, рассеянием на фоновом газе и газе, отраженном от поверхности скиммера.

В условиях, когда к потоку в районе носика скиммера применимы представления газодинамики сплошных сред, конечная величина кромки носика приводит к возникновению отошедшей ударной волны. При ее прохождении параметры потока — давление, плотность, скорость, температура — резко и непредсказуемо изменяются. Невозмущенным остается полный поток газа через скиммер, величине которого пропорционально (с точностью до постоянства скорости откачки) давление в камере за скиммером — P_{sk} . Поэтому для сопоставления эксперимента с расчетом измерялись зависимости давления P_{sk} от R — положения источника в плоскости, перпендикулярной оси скиммеров. Были получены семейства таких зависимостей, соответствующих различным условиям формирования — давлению P_0 и расстоянию по Z между соплом и скиммером. Типичная измеренная зависимость P_{sk} от R и соответствующая ей расчетная кривая приведены на рис. 3, *а*.

При режимах течения, соответствующих переходу потока к свободномолекулярному, даже незначительное изменение направления движения частиц в результате столкновений приводит к их выводу из пучка. Это непосредственно отражается в интенсивности пучка и в меньшей степени — в его ВП спектре. В этом случае в качестве критерия адекватности экспериментальных данных и результатов газодинамических расчетов может служить величина числа Маха, извлекаемая из ВП спектров пучка газа-носителя — рис. 3, *б*.

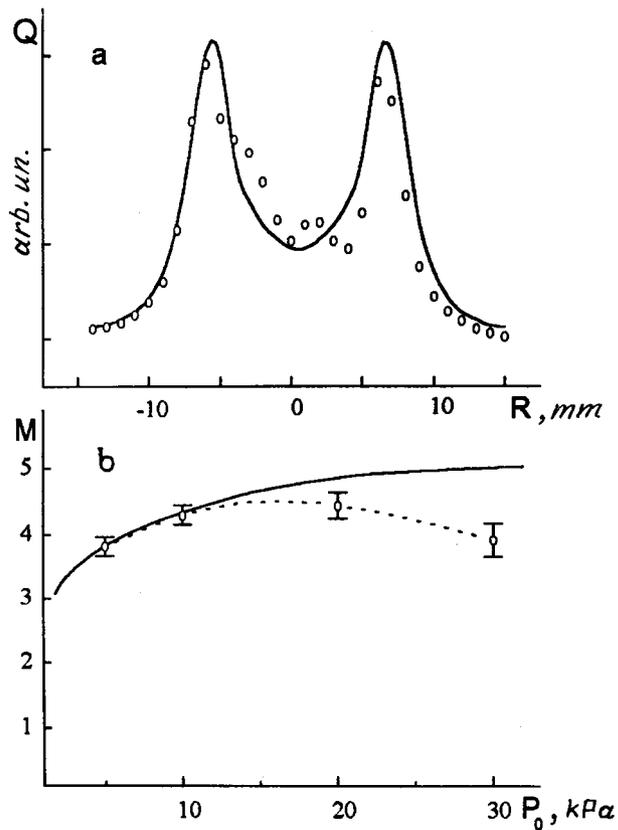


Рис. 3. Сопоставление полей течения газа-носителя N_2 , сформированного шестисопловым источником и рассчитанного для модельного сопла. *a* — поперечное распределение расхода газа-носителя ($P_0(N_2) = 1 \cdot 10^4$ Pa) через скиммер; *b* — зависимость предельного значения числа Маха на оси источника от давления $P_0(N_2)$.

Для расчета поля истечения газа-носителя из модельного осесимметричного сопла использован известный метод крупных частиц, детальное изложение которого можно найти в [10]. В методе крупных частиц состояние среды описывается системой уравнений Эйлера в дивергент-

ной форме, замыкаемой уравнением состояния идеального газа. Система уравнений аппроксимируется разностной схемой первого порядка точности, которая позволяет получить устойчивые решения без введения искусственной вязкости. Здесь уместно подчеркнуть, что, хотя исходно берутся уравнения Эйлера для невязкого газа, сама разностная схема расчета способна воспроизвести вязкостные эффекты. Трудоемкость решения этой нестационарной системы удастся существенно уменьшить, используя принцип расщепления по физическим процессам, с помощью которого строятся численные модели для уравнений Эйлера, Навье–Стокса и Больцмана [11].

Расчеты выполнены в цилиндрической системе координат с использованием равномерной сетки (1000 узлов по R и 300 по Z). На поверхности сопла и скиммера установлены условия непротекания, т.е. нормальная к поверхности компонента скорости приравнивается нулю. Начальные условия — обычные: по всей расчетной области компоненты скоростей принимаются равными нулю. Давление газа в дозвуковой части сопла равно заданному давлению торможения P_0 . В остальном пространстве давление близко к величине остаточного давления в камере источника — $P_1 = 1 \text{ Pa}$. На открытых границах области интегрирования проводится экстраполяция нулевого порядка, при которой в фиктивный слой переносятся значения параметров из ближайшего к границе расчетного слоя.

Как видно из рис. 3, выполненные расчеты истечения газа-носителя из модельного сопла довольно хорошо описывают результаты экспериментов для шестисопловой конструкции.

Таким образом, полученные результаты показывают, что в источниках молекулярных пучков принципиально возможно применять многосопловые конструкции вместо осесимметричных сопел с внутренним телом. Это облегчает требования к точности изготовления источника, позволяет уменьшить расход газа-носителя и, следовательно, применить достаточно простые схемы зацикливания газа-носителя.

Кроме того, полученный положительный ответ на вопрос об адекватности многосопловой конструкции, изображенной на рис. 1, и осесимметричного сопла со сплошным кольцевым критическим сечением позволяет существенно упростить газодинамические расчеты, направленные на оптимизацию геометрии источника, так как вместо трехмерной задачи достаточно рассматривать двумерную.

Данная работа выполнена в рамках подготовки эксперимента по поиску эффектов нарушения T -инвариантности в молекулах, поддержанного грантом № 97-02-16908 Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] *Варенцов В.Л., Ящук В.В.* // Письма ЖТФ. 1983. Т. 9. С. 147.
- [2] *Варенцов В.Л., Ежов В.Ф., Князьков В.А.* и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. С. 755.
- [3] *Пирумов У.Г., Росляков Г.С.* // Газовая динамика сопел. М.: Наука, 1990.
- [4] *Ashkinadzi B.N., Groshev M.N., Ezhov V.F.* et al. Preprint LNPI-1801. L., 1992.
- [5] *Козлов М.Г., Ящук В.В.* // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 64. С. 659.
- [6] *Ящук В.В.* Автореф. канд. дис. Л., 1994.
- [7] *Ашкинадзи Б.Н., Ежов В.Ф., Грошев М.Н.* и др. Препринт ПИЯФ-2127. С.-Петербург, 1996.
- [8] *Ящук В.В., Ашкинадзи Б.Н., Ежов В.Ф.* и др. // ПТЭ. 1997 (в печати).
- [9] *Auerbach D.J.* // Atomic and molecular beam methods. V. 1 / Ed. G. Scoles. New York–Oxford: University Press, 1988. P. 362.
- [10] *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982.
- [11] *Белоцерковский О.М.* // Численные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1981. С. 348.