

9. Kroesser F. W., Middleman S. Viscoelastic jet stability.— AICHe J., 1969, vol. 15, N 3.
10. Middleman S. Stability of a viscoelastic jet.— Chem. Eng. Sci., 1965, vol. 20, N 12.
11. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: ГИФМЛ, 1959.
12. James P. W. On the atomization of elasticoviscous liquids.— Rheol. Acta, 1976, vol. 15, N 5.
13. Шульман З. П., Хуснд Б. М. О распаде вязкоупругой струи.— В сб.: Тепло- и массоперенос: физические основы и методы исследований. Минск, 1979.
14. Петров Г. И., Калинина Т. Д. Применение метода малых колебаний к исследованию распада струи топлива в воздухе.— Технические заметки МАП, 1947, № 4.
15. Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В., Ягодкин В. И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977.

УДК 533.6.071; 629.7.018.1

ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ АДИАБАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ С ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

В. И. Пинаков, В. Н. Рычков, М. Е. Топчиян

(Новосибирск)

Перспективы развития авиационной и аэрокосмической техники требуют создания новых наземных аэродинамических установок, обеспечивающих моделирование полетных условий в диапазоне чисел Маха $M = 6-24$ при сохранении чисел Рейнольдса, близких к натурным. Как следует из работы [1], для полного моделирования обтекания при указанных числах Маха необходимо иметь числа Рейнольдса, отнесенные к диаметру рабочей части сопла, на уровне 10^9 при $M = 6$ и $3 \cdot 10^8$ при $M = 13$.

Сооружение промышленных установок для аэродинамических испытаний перспективных летательных аппаратов в диапазоне натуральных чисел Re , по оценкам американских специалистов, потребует затрат в сотни миллионов долларов, при этом стоимость одного запуска составит от 1,6 до 3,4 млн. долларов [1].

Перспективным направлением, обеспечивающим максимальное приближение к натурным числам Re , является создание достаточно дешевых в изготовлении и эксплуатации аэродинамических установок импульсного действия с высокими начальными параметрами газа в форкамере. Импульсный режим работы дает возможность получать высокие начальные параметры истекающего газа, а вследствие этого большие числа Маха и Рейнольдса в рабочей части.

На импульсных установках получены в настоящее время рекордные параметры по предельным числам Маха при давлениях в форкамере до $p_0 \approx 400$ МПа. Однако моделируемые на этих установках числа Re в настоящее время уже недостаточны.

Органический недостаток существующих импульсных систем, работающих в диапазоне времен более десяти миллисекунд, обусловлен непрерывным падением давления газа в форкамере в процессе истечения, вследствие чего эти установки работают в режиме меняющихся во времени параметров потока. Повышение начального давления в форкамере увеличивает числа Рейнольдса, но из-за эффектов реального газа ведет к дополнительному увеличению скорости спада параметров газа [2], это осложняет интерпретацию полученных результатов, уменьшает и без того низкие коэффициенты использования рабочего газа.

Существующие импульсные установки используют различные способы подогрева рабочего газа, которые можно условно разделить на две группы. Первая использует специальные вспомогательные устройства, которые осуществляют подогрев от внешнего теплового источника: электро-разрядные, омические, кауперные системы и системы, использующие хи-

мическую энергию. Для второй группы характерно использование «естественного» разогревания газа в процессе адиабатического сжатия.

Для установок первой группы необходимо создание специальных дополнительных мощных энергетических источников или теплообменников, работающих в условиях высоких давлений и агрессивной среды (при работе с воздухом). Электроразрядные и химические подогреватели существенно загрязняют рабочий газ. Омические и кауперные требуют специальной сложной системы охлаждения и тепловой изоляции, обеспечивающей прочность конструкции при высоких температурах, увеличенного объема установки, работающего при высоких давлениях, и ввиду длительности процесса нагревания подвержены сильному коррозионному воздействию, что лишает возможности использовать в качестве рабочего газа воздух.

Установки адиабатического сжатия используют так называемый принцип «свободного поршня», не имеют указанных выше недостатков и, обладая в этом смысле рядом преимуществ, требуют, однако, решения проблем, связанных с динамикой сжатия газа. Так, установки типа «Long Shot» [3—7] для того, чтобы при отскоке поршня удерживать адиабатически сжатый газ, снабжены сложной системой, состоящей из множества клапанов, размещенных на специальной клапанной доске. Клапаны работают в экстремальных условиях, подвержены довольно быстрой эрозии, что вызывает загрязнение потока, необходимость их частой смены и ограничивает предельную температуру и давление газа в форкамере. При протекании газа через клапаны теряется значительное количество тепла. Во время рабочего цикла после перекачки газа в форкамеру поршень существующих установок совершает затухающие периодические движения, которые приводят к паразитным колебаниям установки, затрудняя эксперимент. Максимальные давления в форкамере, полученные на установках подобного типа, достигают 400 МПа [4, 5] и являются в настоящее время рекордными.

Расчеты газодинамики истечения газов при сверхвысоких начальных давлениях показывают целесообразность дальнейшего повышения начальных давлений в форкамере, поскольку повышение плотности газа и использование потенциальной энергии отталкивания молекул дают возможность увеличить достижимые на линии насыщения числа Маха и чрезвычайно благоприятно отражаются на числах Рейнольдса, обеспечиваемых при заданном масштабе установки [2, 4]. Отметим, что это влияние существенно сказывается на числах Маха, начиная с давлений около 400 МПа, следовательно, существующие установки еще слабо используют эти эффекты.

Важным преимуществом установок со сверхвысоким давлением является возможность получения высоких чисел Маха на линии насыщения при пониженных температурах в форкамере и в критическом сечении. Так, запас удельной энтальпии при давлении $p_0 = 1500$ МПа и температуре $T_0 = 2000$ К такой же, как в идеальном газе при $T_0 = 3150$ К (см. [2]). При сохранении величины скорости истечения это благоприятно влияет на стойкость критического сечения, а также уменьшает потери тепла в стенку форкамеры.

Работы, проводившиеся в последнее время в Институте гидродинамики и СКБ ГИТ СО АН СССР, имели своей целью доказать возможность дальнейшего повышения параметров газа в форкамере, улучшения технических и эксплуатационных характеристик систем со свободным поршнем.

В результате этих работ была создана установка адиабатического сжатия А-1, которая при небольших габаритах обладает характеристиками, позволяющими при последующем увеличении ее масштаба получить потоки с натурными числами Re . Одним из основных элементов установки является труба адиабатического сжатия с рабочей длиной около 1,8 м, внутренним диаметром 50 мм, снабженная тяжелым заклинивающимся поршнем, описанным в [8]. Поскольку примененная конструкция поршня обеспечивает его остановку в положении максимального сжатия, удается

решить сразу две проблемы: избавить устройство от клапанной системы и ликвидировать упомянутые выше колебания.

Гашение импульса, возникающего при разгоне и торможении поршня, обеспечивается специальным компенсатором, вследствие чего перемещения ствола в процессе сжатия не превышают 0,1 мм без передачи каких-либо усилий на фундамент установки. Для существующих адиабатических установок эта проблема является достаточно серьезной. В состав установки входит специальная система автоподжатия, обеспечивающая истечение до 40 см³ газа (примерно половина всего сжимаемого газа) в режиме постоянного давления, что позволяет получить «полочку» параметров p_0 , T_0 , ρ_0 в форкамере в течение времени от 10 до 150 мс (в зависимости от диаметра критического сечения).

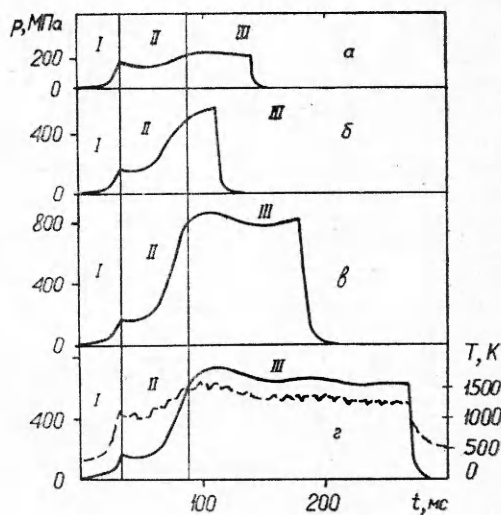
Установка дает чистый, не загрязненный частицами и посторонними газами однородный поток. Как следует из [2], повышение начальных давлений от 400 до 1500 МПа при одной и той же температуре ($T_0 = 2000$ К) приводит к увеличению чисел Маха, достижимых на линии равновесной конденсации, от 15,5 до 18. При сохранении числа Маха на уровне $M \approx 16$ такое повышение давления приводит к увеличению чисел Рейнольдса, рассчитанных на единицу длины, примерно в 20 раз, при этом температура газа в форкамере понижается до $T_0 = 1600$ К.

Аэродинамическая установка А-1 спроектирована и изготовлена в расчете на рабочие давления до ≈ 1500 МПа. Гидростатические испытания, проведенные для определения несущей способности конструкции, показали, что пластические деформации появляются при давлениях около 2500 МПа. На установке достигнуты следующие максимальные параметры: $p_0 = 1000$ МПа, $T_0 = 1800$ К (при работе с азотом). Ограничение по давлению связано с отсутствием в настоящее время необходимого источника для питания системы сжатым газом (200 МПа), с установкой соответствующего источника параметры будут повышены до проектных. Проведены исследования, позволившие обеспечить необходимую стойкость критического сечения при таких параметрах в форкамере.

Максимальные параметры, полученные при работе с воздухом, не превышают 500 МПа, дальнейшее повышение не производилось преднамеренно, чтобы избежать возможных коррозионных повреждений до достижения проектных максимальных параметров на азоте. За время испытания и эксплуатации установка совершила уже более 200 циклов работы без замены каких-либо деталей (кроме соловой вставки), никаких остаточных явлений, повреждений или отклонений от нормы обнаружено не было.

При испытаниях использовались конические сопла с углом полного раствора $\alpha = 8^\circ$ и диаметром среза $d_{ср} = 13,4; 15$ и $16,4$ мм. Диаметр критического сечения изменялся от 0,14 до 0,925 мм. При выпуске гиперзвукового потока в атмосферу достигнуты в настоящее время числа Маха около 11.

Примеры осциллограмм давления в форкамере, полученных при различных режимах, для диаметров критических сечений 0,805; 0,78; 0,336 и 0,319 мм приведены на фиг. 1, а—г соответственно. Показано, что рабочий цикл установки проходит три этапа. Участок осциллограмм I отвечает сжатию газа свободным заклинивающимся поршнем с резким возрастанием давления в конце цикла сжатия



Ф и г. 1

до ≈ 150 МПа, участок *II* соответствует работе системы автоподжатия, в конце которого в форкамере достигается максимальное давление. Затем следует участок постоянного давления *III*, являющийся собственно рабочим режимом истечения. На приведенных примерах значение давления в рабочем режиме составляет в среднем 210; 540; 810 и 650 МПа для фиг. 1, *a—г* соответственно. Видно, что осциллограммы давления имеют «полочку», в пределах которой происходят некоторые колебания, амплитуда их, однако, не превышает 5% величины среднего давления. Отметим сразу, что эти колебания есть следствие некоторых непринципиальных конструктивных особенностей системы питания установки и в дальнейшем могут быть существенно уменьшены. После участка постоянных параметров происходит резкий спад давления, соответствующий концу цикла работы.

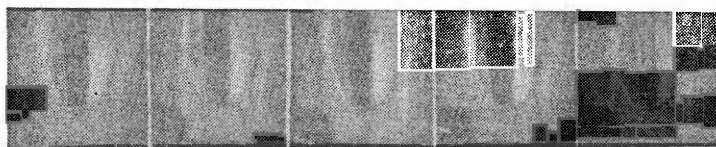
На фиг. 1, *г* приведена осциллограмма температуры газа в форкамере (штриховая линия). Наблюдаемый спад температуры к концу рабочего режима объясняется как потерями тепла в стенки, так и некоторыми особенностями датчика температуры. Спад этот не превышает 2,5 К/мс и может быть уменьшен за счет введения в форкамеру теплоизоляции. Как видно из осциллограмм, при критическом диаметре $d_* \approx 0,3$ мм время поддержания постоянных параметров достигает на установке 180 мс, а при $d_* \approx 0,8$ мм еще сохраняется на уровне ≈ 30 мс.

На фиг. 2 приведена выборка кадров из теневой кинограммы обтекания трубки Пито истекающим в атмосферу гиперзвуковым потоком с $M \approx 11$, полученным на установке А-1. Давление в форкамере $p_0 = 550$ МПа, $d_* = 0,78$ мм, $d_{\text{ср}} = 13,4$ мм. В этом эксперименте использовался азот, сжатый от начального давления 0,95 МПа и комнатной температуры 290—295 К. На приведенных кинограммах время между кадрами 5 мс. Можно видеть, что в течение 20 мс существенных изменений в характере картины течения не наблюдается, как и каких-либо заметных неоднородностей в ядре потока.

Проведем теперь сопоставление возможностей существующих систем с установкой А-1. В публикациях (см., например, [9]), посвященных импульсным трубам, часто справедливо указывается, что при работе с постоянным объемом форкамеры спад давления не влияет существенно на числа Маха потока за время рабочего режима и поэтому для точности воспроизведения чисел Маха не существен. Это верно лишь в случае, если параметры течения в рабочей части в начале режима достаточно далеки от линии насыщения, так как в противном случае во время рабочего цикла вблизи обтекаемой модели может начаться конденсация газа.

Что же касается чисел Рейнольдса и скоростного напора, то спад давления в форкамере, происходящий во время рабочего режима, сказывается на них губительно. Например, в установке ИТ-301 [9] при $M=8,5$ уже через 15 мс после начала режима числа Re уменьшаются примерно в 2 раза по сравнению с исходными. Аналогичная ситуация будет иметь место и в других установках с постоянным объемом форкамеры. Попытки повышения начальных давлений в подобных системах вследствие эффектов реального газа будут только усугублять эти явления.

Вопрос о необходимой точности воспроизведения на моделях чисел Re в литературе нигде серьезно не обсуждается, однако требования необходимости исследований при $Re = \text{const}$ существуют [6, 9, 10], и они свя-



Ф и г. 2

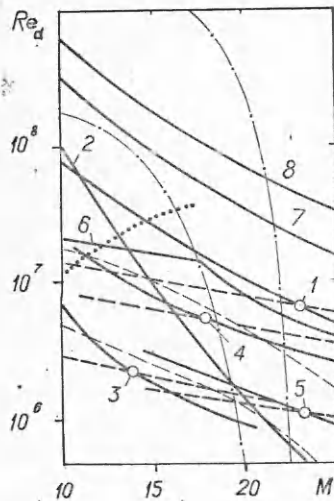
заны с возможностью перехода от турбулентного к ламинарному характеру обтекания модели в процессе одного эксперимента. В зависимости от решаемых задач изменение чисел Re может явиться препятствием в получении достоверных данных, например, при изучении режима нагрева поверхностей, эффективности работы рулей и т. д., поскольку эти явления существенно зависят от характера течения в пограничном слое (турбулентный или ламинарный).

При режимах вблизи области перехода пограничного слоя изменение числа Re в 3—5 раз полностью изменяет режим течения в пограничном слое от турбулентного до ламинарного (см., например, [7, 9]). В установке А-1 в течение рабочего режима числа Re практически остаются неизменными. Исходя из вышесказанного, для сопоставления с другими системами будем считать, что числа Re в процессе одного эксперимента не должны изменяться более чем в 2 раза. Для установок типа ИТ-301 [9] и «Long Shot» [4, 5] это условие сильно уменьшает времена рабочего режима по сравнению с указанными в паспортных данных установок.

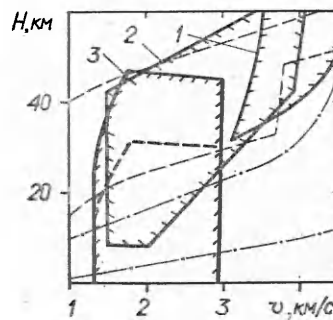
Еще более серьезно дело обстоит со скоростным напором. Оценки показывают, что при работе с постоянным объемом форкамеры для измерения силовых воздействий на модель с точностью хотя бы 10% можно использовать не более 7% запасенного в форкамере газа. Как следует из [4, 5], максимальные давления в рекордной на сегодняшний день системе «Long Shot» достигают 400 МПа, температура 2400 К, объем форкамеры 0,33 л, из которых менее 20 см³ вытекает в условиях, когда спад p_0 не превышает 10%. На малоразмерной установке А-1 при этом давлении обеспечено истечение до 30 см³ газа в режиме постоянного давления.

Расчет показывает, что для $M \approx 18$ использование в существующей установке А-1 давлений до 1500 МПа, несмотря на ее малые размеры, дает возможность получить числа Re , рассчитанные на диаметр среза сопла, примерно в 6 раз более высокие, а температуру в форкамере понизить от 2400 до 2000 К по сравнению с установкой «Long Shot», размеры которой превышают 28 м.

Фиг. 3 показывает области моделирования потока по числам M и Re , получаемые на А-1 и других установках импульсного действия. При построении для определения чисел Re_d за характерный размер взят диаметр среза сопла. Для установки А-1 приняты размеры критического сечения, обеспечивающие рабочий режим в течение 15 мс. Для других установок светлыми кружками отмечены точки, определяющие режим работы при спаде давления в форкамере на 10% за 15 мс. Уменьшение числа Маха приводит к значительному ускорению спада давления. Так, в установке типа «Long Shot» при $M=15$ такой спад давления происходит за 2 мс [4]. Общее время работы ударных труб (характеристика одной из них приведена на фиг. 3) вообще не превышает нескольких миллисекунд.



Фиг. 3



Фиг. 4

На фиг. 3 области показывают коридоры входа орбитальных аппаратов (между тонкими штриховыми линиями), баллистических ракет (между штрихпунктирными линиями) и линию перехода течения в пограничном слое (точки) по данным работ [6, 7, 9], кривые 1—8 указывают границы области моделирования для различных систем: 1 — установка типа «Hot Shot-F» [6, 7], 2 — ударная труба Корнельской лаборатории (CAL-96) [6, 7], 3 — ИТ-301 [9], 4 — импульсная труба компании Мак-Доннел (МАК) [10, 11], 5 — система «Long Shot» [3, 4, 7], 6 — установка А-1. Штриховыми линиями, пересекающими кривые в точках, показаны границы области моделирования при спаде давления в форкамере на 10% от начального за время 15 мс. Из фиг. 3 можно видеть, что, несмотря на малые размеры, А-1 превосходит существующие системы по области моделирования чисел M и Re .

Фиг. 4 показывает области моделирования в координатах скорость — высота полета. Здесь штриховыми линиями ограничен коридор полета возможных гиперзвуковых аппаратов [6, 7], штрихпунктирными — коридор баллистических снарядов от средней до межконтинентальной дальности [4, 6, 7], линия 1 ограничивает область моделирования, обеспечиваемую системой типа «Hot Shot-F» [12], 2 соответствует ударной трубе Корнельской лаборатории [6, 7], 3 показывает область, обеспечиваемую установкой типа А-1. Штриховая линия ограничивает область моделирования по скорости и плотности. В данном случае А-1 покрывает значительную область высоких скоростных напоров. Из существующих систем конкурентоспособной оказывается только крупноразмерная (≈ 30 м) система CAL-96, которая обеспечивает время рабочего режима не более 6 мс.

Газодинамическая установка А-1 может рассматриваться как действующая модель крупной аэродинамической трубы.

Известно, что число Маха, плотность и скорость потока, достигаемые на линии насыщения, определяются для заданного газа только параметрами в форкамере, в то время как числа Рейнольдса зависят еще от размеров установки и времени рабочего режима. Для сравнения установок разного масштаба с одними и теми же параметрами потока на линии насыщения представим число Рейнольдса в рабочей части потока в виде $Re = \rho v d / \eta = 4 \rho_0 V_0 / \pi \eta t d$, где ρ_0 и V_0 — плотность и объем газа в форкамере; η — коэффициент динамической вязкости; t — время рабочего режима; d — диаметр потока; ρ , v — плотность и скорость газа в рабочей части сопла. При геометрически подобном изменении размеров установки (L) и сохранении параметров потока в рабочей части сопла объем форкамеры изменяется как L^3 , площадь сечения потока как L^2 , а $t \sim L$. Таким образом, $Re \sim L$.

Поскольку силы, действующие в системе со стороны газа, и соответствующие напряжения на два порядка больше, чем силы тяжести; последними при прочностных расчетах можно пренебречь. Эта ситуация сохраняется при увеличении масштаба установки на порядок. Все напряжения в элементах конструкции обусловлены действием статических сил со стороны газа, инерционных и ударных нагрузок. Установка рассчитана и сконструирована таким образом, что напряжения во всех ее элементах не выходят за пределы зоны упругости. Очевидно, что напряжения, вызываемые статическими нагрузками, при подобном геометрическом увеличении размеров установки будут сохраняться. Как показывает размерный анализ, скорость установившегося движения элементов системы также будет сохраняться, откуда следует сохранение напряжений, связанных с ударными и инерционными нагрузками.

Что касается тепловых явлений, то увеличение масштаба приведет к уменьшению относительных тепловых потерь и снижению интенсивности термических ударов, поскольку зоны прогрева увеличиваются пропорционально \sqrt{t} , а время растет линейно с ростом масштаба установки. Увеличение диаметра критического сечения сопла благоприятно скажется на его стойкости.

Таким образом, возможность существенного увеличения размеров установки определяется лишь технологическими соображениями. Опыт проектирования и изготовления установки А-1 показывает возможность увеличения масштаба, по крайней мере, в 4 раза без привлечения для ее изготовления специального крупного технологического оборудования, так как габариты наиболее крупных деталей не превысят 1,5 м. В этом случае числа Re и время рабочего режима увеличатся в 4 раза.

В случае сохранения времени рабочего режима в диапазоне 15 мс возможно увеличение чисел Re в 8 раз, при этом динамические нагрузки, хотя и возрастут, все же останутся в пределах допустимых величин. Однако в связи с увеличением взаимной скорости движения элементов конструкции устройства автоподжата может потребоваться доработка системы уплотнения форкамеры.

На фиг. 3 показаны границы области моделирования для систем типа А-1 увеличенного в 4 раза масштаба для времени рабочего режима 60 и 15 мс (кривые 7, 8 соответственно).

Можно видеть, что при таких размерах установки на ней возможно натурное по числам M и Re моделирование течения практически для всех задач современной гиперзвуковой аэродинамики. Использование в качестве рабочего газа воздуха открывает возможности исследований течений в моделях гиперзвуковых прямоточных ВРД совместно с воздухозаборником.

Поступила 5 I 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Мачехина Г. П., Хвостов Н. И. Перспективы развития аэродинамической экспериментальной базы за рубежом.— *Обзоры ЦАГИ*, 1976, № 490.
2. Гавриленко Т. П., Топчий М. Е. и др. Газодинамические параметры истечения азота с высокими начальными давлениями.— В сб.: *Аэродинамика. Труды I Сибирской конф.* Новосибирск: Наука, 1973.
3. Параццоли Ц., Энкенус К. Р. Эффекты плотного газа в гиперзвуковой аэродинамической трубе со свободным поршнем.— *РТК*, 1970, т. 8, № 1.
4. Ричардс Б. Е., Энкенус К. Р. Гиперзвуковые исследования, проведенные в аэродинамической трубе со свободным поршнем.— *РТК*, 1970, т. 8, № 6.
5. Von Karman Institute for Fluid Dynamics. Education and Research 1956—1976.
6. Мачехина Г. П., Хвостов Н. И. Аэродинамические трубы для исследования при больших числах Рейнольдса.— *Обзоры ЦАГИ*, 1971, № 353.
7. Lucasiewicz J.— In: *Experimental Methods of Hypersonics*. Vol. 3. N. Y., 1973.
8. Мещеряков А. А., Пинаков В. И., Топчий М. Е. О распределении напряжений в заклинивающемся поршне и стволе системы адиабатического сжатия газа.— *ИМТФ*, 1980, № 2.
9. Бошнятов Б. В., Королев А. С. и др. Импульсные трубы в аэродинамических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1978.
10. Техника гиперзвуковых исследований/Под ред. Г. Ф. Бураро. М.: Мир, 1964.
11. *Advances in hypervelocity techniques*. N. Y.: Plenum Press, 1962.
12. Lucasiewicz J. Experimental investigation of hypervelocity flight.— In: 1st Int. Congr. of the Aeronautical Sciences. Madrid, 1958.

УДК 541.124/128

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СВЕРХЗВУКОВОЙ ЧАСТИ СОПЛА НА СКОРОСТЬ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ПО КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ УРОВНЯМ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ СО-ГДЛ

Н. Я. Василик, А. Д. Марголин, В. М. Шмелев

(Москва)

В большинстве экспериментальных работ, посвященных изучению газодинамических СО-лазеров [1—5], использованы конические сопла с полууглом раскрытия сверхзвуковой части $7,5$ — 12° , резонатор в этих работах находился на значительном ($0,5$ — 1 м) расстоянии от критического сечения сопла. Однако в работах [6, 7] экспери-