

2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., Гостехиздат, 1952.
3. Предводителей А. С., Ступоченко Е. В., Рождественский И. Б. Таблицы газодинамических и термодинамических величин потока воздуха за прямым скачком уплотнения. М., Изд-во АН СССР, 1959.
4. Плешанов А. С., Зайцев С. Г. Состав, термодинамические и газодинамические свойства углекислого газа для температур от 1000 до 12000° К и давлений от 10^{-2} до 10^3 атм. Сб. «Физическая газодинамика, теплообмен и термодинамика газов высоких температур», М., Изд-во АН СССР, 1962.
5. Предводителей А. С., Ступоченко Е. В., Самуилов Е. В. Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 6000 до 12000° К). М., Изд-во АН СССР, 1957.
6. Nardone M. S., Breene R. S., Zeldin S. S., Reithof T. R. Radiance of species in high temperature air. General Electric. Space Sci. Lab. Rept., R 63 SD 3, 1963.
7. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Норман Г. Э., Якубов И. Т. Радиационный нагрев при гиперзвуковом обтекании. Космические исследования, 1964, т. 2, вып. 3.
8. Сошников В. Н. Степень черноты углекислого газа при $T = 1000-4000^\circ \text{K}$. Оптика и спектроскопия, 1962, т. 13, вып. 4.
9. Яков М. Вопросы теплопередачи. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
10. Пластинин Ю. А., Николаев В. М., Баула Г. Г. Излучательные и поглощательные свойства воздуха при высоких температурах ($T = 2000-20000^\circ \text{K}$). Тезисы докладов на Всес. конф. по физике низкотемпературной плазмы. Киев, «Наук. думка», 1966.
11. Neger R. M., Stickford G. H. Shock — Tube studies of Equilibrium air radiation. AIAA Journal, 1965, vol. 3, No. 6, p. 1010—1018.
12. Neger R. M. Equilibrium radiative heating at superorbital Re-entry velocities. 15-th International Astronaut. Congress Warsava, 1964, Proc., vol. 3, Paris, Guuther — Villars, 1965.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ СКОРОСТИ РЕКОМБИНАЦИИ КИСЛОРОДА И АЗОТА В УСЛОВИЯХ ТЕЧЕНИЯ ДИССОЦИИРОВАННЫХ ГАЗОВ В СОПЛАХ

В. П. ИОНОВ, Г. Н. НИКОЛАЕВ

(Москва)

Представляет интерес знание констант скорости рекомбинации газов при температуре в несколько тысяч градусов.

Целесообразно и практически удобно определить указанные константы из опытов по исследованию сверхзвукового течения диссоциированных газов в соплах.

За последние годы опубликован ряд теоретических и экспериментальных исследований по данному вопросу, позволивших установить одну существенную особенность течения. Как оказалось, наблюдается явление «внезапного» замораживания состава газа в некотором сечении сопла. Иначе говоря, до некоторого сечения сопла осуществляется равновесное течение (с переменным значением γ), а затем замороженное течение (с постоянным значением γ).

Подобное явление обусловлено тем, что скорость химических реакций быстро падает в связи с сильным понижением температуры и плотности газа вдоль оси сопла и время, необходимое для химической реакции в некотором объеме газа, становится больше характерного времени течения.

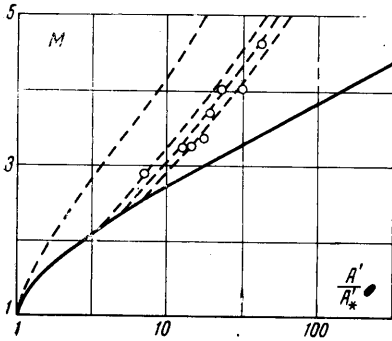
Указанное обстоятельство позволило Брею [1] ввести удобный критерий перехода равновесного течения к замороженному и приближенный метод расчета течения.

Проведенное им сравнение точного и приближенного решения дало хорошие результаты. Схема внезапного замораживания и приближенный метод расчета были приняты другими авторами [2].

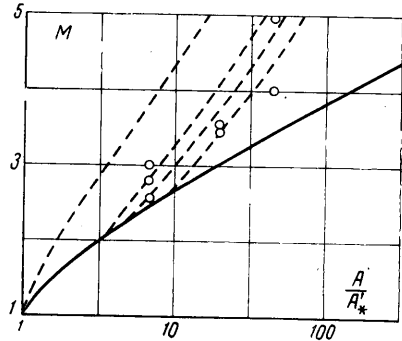
В данной работе используется модифицированный метод Брея для получения значений констант скорости рекомбинации кислорода и азота по экспериментальным данным изменений числа M потока вдоль оси сопла.

Число M потока, как это следует из работы Брея [1] и наших расчетов (фиг. 1 и 2), является чувствительным параметром, характеризующим отклонение течения от равновесного.

Экспериментальное исследование неравновесного течения диссоциированных кислорода и азота в соплах. Экспериментальная установка представляла собой ударную трубу с соплом, в которое истекал газ, сжатый и нагретый падающей и отраженной ударными волнами. Площадь критического сечения сопла составляла 3% площади сечения канала ударной трубы. В конструкции установки предусмотрено



Фиг. 1. Изменение числа M потока в зависимости от отношения данного сечения к критическому для диссоциированного кислорода. Параметры торможения: $T_0 = 4400^\circ \text{K}$, $p_0 = 10.3 \text{ атa}$. Сплошная кривая соответствует равновесному, пунктирные — неравновесному режимам течения



Фиг. 2. Изменение числа M потока в зависимости от отношения данного сечения к критическому для диссоциированного азота. Параметры торможения: $T_0 = 8500^\circ \text{K}$, $p_0 = 20 \text{ атa}$. Сплошная кривая соответствует равновесному, пунктирные — неравновесному режимам течения

наблюдение при помощи прибора ИАБ-451 (по схеме Теплера) картины обтекания моделей, и регистрацию развития обтекания путем покадрового фотографирования с частотой съемки до 200 000 кадров в 1 сек при помощи камеры СФР-2М. Измеряемой величиной был угол наклона слабого возмущения, возникающего на острие полуклина, установленного у среза сопла и обтекаемого сверхзвуковым потоком.

Использование серии сопел одинакового профиля, но с различным отношением площадей выходного и критического сечений позволило получить данные о зависимости числа Маха от степени расширения потока при постоянстве параметров торможения.

Исследование течения диссоциированных газов проводилось в осесимметричных соплах с внутренним профилем, меняющимся по гиперболическому закону, с полным углом между асимптотами в 20° .

На выходе сопла поле течения было не вполне одномерное. Однако экспериментально наблюдаемая линия Маха в некоторой области течения за срезом сопла была прямолинейной, что позволяло достаточно точно определить направление линии Маха вблизи острия клина. Прямолинейность линии Маха частично объясняется компенсирующим эффектом: увеличением числа M потока и изменением направления линий тока.

Кроме того, следует указать, что число M потока определялось для стадии квазистационарного течения газа из сопла, что контролировалось по ряду параметров течения, в том числе по устойчивости измеряемого угла наклона линии Маха.

Более подробные данные по методике исследования и анализу возможных ошибок измерения числа M потока содержатся в работах [3-5].

Были проведены необходимые расчеты течения диссоциированных газов в соплах в предположении равновесного и замороженного течения в соплах, которые включали в себя:

1) расчет параметров газа за отраженной волной (параметров отражения) на основе данных о начальном состоянии газа и экспериментально изме-

Параметры торможения кислорода и азота (параметры газа за отраженной ударной волной)

№	Газ	$T_0, ^\circ \text{K}$	$p_0, \text{ атa}$	$\alpha_0, \%$
1	O_2	5000	35.8	46
2	O_2	4400	10.3	43
3	O_2	4200	11.4	30
4	N_2	8500	20	45

ренной скорости ударной волны на основе законов сохранения с использованием термодинамических таблиц соответствующих газов.

2) расчет (в приближении одномерного, изэнтропического течения) параметров расширяющегося газа (в частности, числа M) вдоль оси сопла для случая полностью равновесного течения;

3) расчет в том же приближении распределения числа M при замороженном химическом составе с начала расширения или от определенного состояния, достигнутого в процессе равновесного расширения.

Экспериментальные данные о распределении числа Маха вдоль оси (в функции безразмерной площади сопла) сравнивались с результатами этих расчетов. При отнесении измеренных значений числа M к тому или иному сечению сопла учитывалось сокращение эффективной площади сечения сопла вследствие нарастания пограничного слоя на его стенках.

Для расчета толщины вытеснения пограничного слоя в критическом сечении сопла использованы рекомендации работы [6], в которой получена зависимость эффективного выходного сечения сопла, создающего поток при $M = 1$, от числа Рейнольдса, отнесенного к диаметру канала.

Расчет толщины вытеснения пограничного слоя в сверхзвуковом участке сопла проводился по методу, изложенному в работе [7].

Указанным выше методом были получены данные об изменении числа M потока вдоль оси сопла для ряда режимов течения диссоциированного кислорода и азота в соплах.

В таблице приведены параметры торможения, реализованные в экспериментах, включая исходную степень диссоциации α_0 , давление p_0 и температуру T_0 .

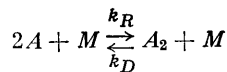
На фиг. 1, 2 приведены кривые зависимости числа M от отношения площади выходного сечения к критическому, рассчитанные в предположении равновесного и замороженного по составу течения кислорода (один из исследованных вариантов) и азота в сопле. Там же нанесены экспериментальные точки.

На каждом из графиков нижняя сплошная кривая соответствует равновесному расширению, верхняя штриховая — полностью замороженному течению с самого начала расширения. Три близкие штриховые линии, которые ответвляются от кривой, соответствующей равновесному течению, рассчитаны в предположении внезапного замораживания состава газа. Средняя из них наилучшим образом отвечает экспериментальным данным, крайние — приближенно указывают погрешность в определении сечения внезапного замораживания, связанную с разбросом и неточностью полученных значений числа M . В случае кислорода расчеты замороженных ветвей производились в предположении постоянного возбуждения колебательных степеней свободы наполовину. В случае азота молекулярной компоненте приписывалось пять степеней свободы.

Колебательное возбуждение предполагалось замороженным, не участвующим в превращениях энергии сопровождающих расширение потока газа. Основанием этому послужили данные работы [8], в которой замораживание колебательных степеней свободы молекул азота на раннем участке расширения в соплах было показано экспериментально.

Расчет констант рекомбинации по экспериментальным данным о замораживании химического состава при течениях диссоциированных газов в соплах. Полученные результаты подтверждают теоретические [4, 9] и экспериментальные данные работ [8, 10, 11], указывающие на быстрый переход в пределах сопла от равновесного режима расширения диссоциированных газов к практически замороженному. Это позволило при помощи приближенного метода расчета связать параметры расширяющегося потока со скоростью химической реакции, сопоставив полученное экспериментально сечение замораживания со значением константы скорости рекомбинации.

Принимается следующая схема химической реакции:



Здесь A , A_2 — означают соответственно атом и двухатомную молекулу данного элемента, M — любая из этих двух частиц газа.

Согласно одному из вариантов приближенного расчета течений в соплах, описанному в работе [2], точку внезапного замораживания находят из условия, что в данном месте полная скорость реакции в процессе равновесного расширения практически определяется скоростью рекомбинации.

С целью нахождения сечения замораживания по данным расчета равновесного расширения строятся две кривые в функции осевой координаты x или отношения площадей поперечных сечений потока A'/A'_* , именно:

1) кривая скорости изменения концентрации молекул за счет только рекомбинации, определяемая составом в процессе равновесного расширения

$$\left(\frac{\partial [A_2]}{\partial t} \right)_p = k_R [A] [M]$$

2) кривая полной скорости изменения концентрации молекулярной компоненты, соответствующая равновесному расширению

$$\left(\frac{\partial [A_2]}{\partial t} \right)_{p,e} = \left\{ \rho V \frac{\partial (X_{A_2}/\mu)}{\partial x} \right\}$$

где скобками [] обозначена концентрация частиц данного вида (моль/см³); k_R — константа скорости рекомбинации (см⁶/моль²сек); t — время (сек); ρ — плотность газа (г/см³); V — скорость газа (см/сек); X_{A_2} — молярная доля молекулярной компоненты; μ — молекулярный вес смеси атомов и молекул; x — линейная координата вдоль оси сопла; индекс e соответствует равновесию.

Обе зависимости учитывают изменение концентрации лишь за счет химической реакции, но не за счет падения плотности вследствие расширения. Это условие обозначено индексом p .

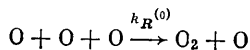
Пересечение двух указанных кривых определяет точку замораживания. Очевидно, что можно решить и обратную задачу: зная сечение внезапного замораживания, подобрать значение k_R , обеспечивающее пересечение кривых в нужной точке.

Вопрос о точности описания течения в соплах по схеме внезапного замораживания обсуждался в ряде работ [1, 12]. Высказывались соображения о том, что для лучшего совпадения приближенного метода с данными экспериментов и с точными численными расчетами следует ввести перед величиной k_R в кинетическом уравнении множитель K , близкий к единице. Уточнение этого множителя по экспериментальным данным о рекомбинации в соплах двуокиси азота NO_2 с образованием N_2O_4 в атмосфере азота содержится в работе [11]. Там указывается, что значения множителя K для конкретных условий исследования остаются в пределах от 0.45 до 1.25. В расчетно-теоретической работе [13] проанализировано приложение схемы внезапного замораживания к диссоциации — рекомбинации кислорода, расширяющегося в соплах с тем же профилем, который использован в данной работе. Там же предложено вычислять значение дополнительного множителя по формуле

$$K = \frac{3 - \alpha e}{2 - \alpha e}$$

где α_2 — степень диссоциации, достигнутая в процессе равновесного расширения до сечения внезапного замораживания. Для условий исследованных нами течений газов K было близко к 1.6 (как в кислороде, так и в азоте). Это значение было использовано при расчете констант скоростей рекомбинации кислорода и азота.

Согласно литературным данным эффективность атомов кислорода в качестве третьей частицы в тройных соударениях в несколько раз выше эффективности молекул. Поскольку в условиях экспериментов концентрация атомов была достаточно высока (табл. 1), приближенно можно считать, что в опытах была определена константа скорости реакции



Аналогичное рассуждение справедливо и в отношении экспериментов с азотом. Описанный выше метод приближенного расчета неравновесного расширения использован для определения констант скорости рекомбинации кислорода и азота по экспериментальным данным о сечениях внезапного замораживания. Как видно из графиков на фиг. 1 и 2, это сечение удается определить со значительной погрешностью. Вследствие этого, усредняя имеющиеся данные, приходится говорить лишь об установлении некоторой области значений k_R , отвечающей результатам экспериментов. Численным результатом можно считать среднее геометрическое крайних значений k_R при возможно более полном учете экспериментальных и расчетных погрешностей. Пусть множитель α характеризует погрешность определения полученных значений в сторону увеличения или уменьшения.

Так, для O_2 при температуре в сечении замораживания $\theta = 3200$ — $3500^\circ K$ получено $k_R = 7 \cdot 10^{15}$ см⁶моль⁻²сек⁻¹, $\alpha = 2.5$, а для N_2 при $\theta = 6450^\circ K$ значение $k_R = 6 \cdot 10^{15}$, $\alpha = 2.0$.

Нижнее значение полученной нами константы рекомбинации атомов кислорода с участием третьей частицы атома кислорода совпадает со значением, полученным в работе [14].

Поступило 30 X 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Braу K. N. C. Atomic recombination in a hypersonic wind-tunnel nozzle. *J. Fluid Mech.*, 1959, vol. 6, pt. 1. (Рус. перев. в сб.: «Газодинамика и теплообмен при наличии химических реакций», М., Изд-во иностр. лит., 1962).
2. Sarly V. J., Burwell W. G., Hofland R., Zurnik T. F. Evaluation of the Bray sudden freezing criterion for predicting nonequilibrium performance in multi-reaction rocket nozzle expansions. *AIAA Paper*, 1965, No. 65-554. (Рус. перев.: Вопросы ракетн. техн., 1966, № 12.)
3. Ионов В. П., Николаев Г. Н., Гусев М. В., Лунева О. И. Изучение потоков газа в ударной трубе с помощью системы Теплера и скоростной покадровой съемки. Сб. «Физическая газодинамика и свойства газов при высоких температурах», М., «Наука», 1964.
4. Николаев Г. Н. Расчет константы скорости рекомбинации двухатомных газов по числу Маха потока на выходе сверхзвукового сопла. Сб. «Исследования по физической газодинамике», М., «Наука», 1966.
5. Ионов В. П., Николаев Г. Н. Экспериментальное исследование истечения диссоциированных газов через сверхзвуковые сопла. Сб. «Исследования по физической газодинамике», М., «Наука», 1966.
6. Hall G. H. Application of boundary layer theory to explain some nozzle and venturi flow peculiarities. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1959, vol. 173, No. 36.
7. Burke A. F., Bird K. D. The use of conical and contoured expansion nozzels in hypervelocity facilities. In: «Advances in Hypervelocity Techniques». N. Y. Plenum Press, 1963. (Рус. перев. в сб.: «Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях». М., Машиностроение, 1965, стр. 258-298.)
8. Nagamatsu H. T., Sheer R. E., Jr. Vibrational relaxation and recombination of nitrogen and air in hypersonic nozzle flows. *AIAA Journal*, 1965, vol. 3, No. 8. (Рус. перев.; Ракетная техника и космонавтика, 1965, № 8.)
9. Кацкова О. Н., Крайко А. Н. Расчет плоских и осесимметричных сверхзвуковых течений при наличии необратимых процессов. ПМТФ, 1963, № 4.
10. Widawsky A., Oswald L. D., Harp J. L. Jr. Experimental determination of hydrogen recombination constant. *ARC Journal*, 1962, vol. 32, No. 12. (Рус. перев.: Ракетная техника, 1962, № 12.)
11. Wegener P. P. A review investigations of stationary supersonic nozzle flow with a reaction gas mixture. In: «Combustion and Propulsion, 4-th, AGARD Colloquium», Milan, 1960, Pergam. Press, 1961. (Рус. перев.: Вopr. ракетн. техн., 1963, № 4.)
12. Lordi J. A. Comparison of exact and approximate solutions for nonequilibrium nozzle flows. *ARS Journal*, 1962, vol. 32, No. 8. (Рус. перев.: Ракетная техника, 1962, № 8.)
13. Hall J. G., Russo A. L. Studies of chemical nonequilibrium in hypersonic nozzle flows. In: «Kinetics, Equilibria and Performance of High Temperature Systems», Proc. 1-st Conference, London, Butterworths, 1960.
14. Солоухин Р. И. Измерение скорости рекомбинации кислорода в ударных волнах. Физика горения и взрыва, 1967, № 3.