

16. Волчков В. В. и др. Струи низкой плотности за звуковым соплом при больших перепадах давления // ПМТФ.— 1973.— № 2.
17. Granquist C. G., Buhrman R. A. Ultrafine metal particles // J. Appl. Phys.— 1976.— V. 47, N 5.
18. Кузьменко Н. Е., Кузнецова Л. А., Кузяков Ю. Я. Факторы Франка — Кондона двухатомных молекул.— М.: Изд-во МГУ, 1984.

Поступила 30/V 1986 г.

УДК 537.639

КАСКАДНЫЙ МК-ГЕНЕРАТОР С ПЕРЕХВАТОМ ПОТОКА

Е. И. Биченков, С. Д. Гилев, В. С. Прокопьев,
В. И. Теленков, А. М. Трубачев

(Новосибирск)

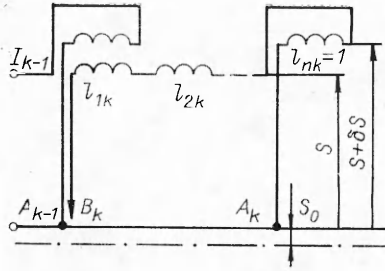
Описаны эксперименты по разработке секционированного спирального МК-генератора, начальные секции которого используются для захвата и выжимания магнитного потока, а последняя — в качестве нагрузки; она выполнена так, что возможно индуктивно сопрячь ее с первой секцией такого же генератора, построив тем самым многокаскадную систему и осуществив перехват и компрессию потока при переходе из одного каскада в последующий. Определены энергетические характеристики, потери и ограничения для функционирования такой системы.

1. Общие принципы. Принципиальная схема генератора и возможная область его использования. Магнитно-кумулятивный (МК) генератор представляет собой уникальный источник большой импульсной мощности, преобразующий заметную долю высокого запаса энергии, заключенного в заряде химического ВВ, в импульс электромагнитной энергии. Со времени формулировки принципа магнитной компрессии прошло 30 лет, в течение которых усилиями в первую очередь советских и американских исследователей разработаны десятки вариантов различных МК-генераторов, достигнуты казавшиеся ранее фантастическими рекорды по величинам токов, магнитных полей, уровней энергии и импульсной мощности [1—3]. При этом осуществлены очень высокие (в десятки процентов) эффективности преобразования энергии взрыва в электромагнитную и на высоких уровнях энергии создан взрывной источник, коммерчески конкурентноспособный со всеми современными источниками другого типа [4].

В настоящей работе сосредоточено внимание на возможностях использования принципов магнитной кумуляции для разработки и создания источников запитки мощных взрывных генераторов. Сложившаяся сегодня в этой проблеме ситуация парадоксальна и противоестественна: генерируя за счет энергии ВВ десятки мегаджоулей энергии, приходится создавать начальный запас электромагнитной энергии в МК-генераторе в основном разрядом громоздких и довольно дорогих архаичных конденсаторных батарей.

Сформулируем требования, которым должен удовлетворять источник запитки. Во-первых, он обязан работать от источника с запасом энергии ~ 100 Дж и обеспечивать в довольно большой индуктивной нагрузке (~ 10 мкГн и более) энергию ~ 100 кДж. Во-вторых, при относительной простоте, дешевизне и обязательной надежности работы в таком источнике нужно предусмотреть возможность изменения выходных параметров, чтобы обеспечить согласование с широким набором различных мощных МК-систем. Обратим внимание, что энергетический выход данного генератора (100 кДж) соответствует лишь 20 г ВВ или при КПД преобразования энергии взрыва всего в 1% — 2 кг ВВ — величине, ничтожной в сравнении с сотнями килограммов, используемых в мощных современных МК-генераторах [4]. Поэтому бороться за высокую эффективность преобразования энергии взрыва в источнике запитки не имеет никакого смысла.

Удовлетворить перечисленному набору требований путем разработки маленького классического МК-генератора, прямо нагруженного на боль-



Р и с. 1

ным представляется решение ее путем построения многокаскадного генератора с перехватом потока. Высказанный В. К. Чернышевым [5] и А. И. Павловским [6] принцип перехвата потока не получил пока широкого распространения, хотя опубликованные авторами результаты крайне интересны и многообещающи. В каскадном варианте этот принцип приводит к компенсации потерь потока в предыдущем каскаде при захвате его в большой индуктивности последующего каскада, и работа генератора может сопровождаться даже нарастанием потока к концу, чего нельзя достигнуть в других типах МК-генераторов.

Принципиальная схема рассматриваемого генератора приведена на рис. 1, где детально показан k -й каскад его, который состоит из n секций с индуктивностями $l_{1k}, l_{2k}, \dots, l_{nk}$. Все индуктивности отнесены к индуктивности последней секции, так что принято $l_{nk} = 1$. Через свою первую индуктивность l_{1k} k -й каскад индуктивно связан с последней индуктивностью предыдущего каскада, которую будем полагать такой же, как и последняя индуктивность k -го каскада. Концы последней секции всех каскадов замкнуты на сплошной проводник... $A_{k-1}A_k \dots$, начало первой секции каждого каскада B_k образует изолированный разрыв, замыкаемый при движении проводника... $A_{k-1}A_k \dots$ под действием находящегося внутри него заряда $ВВ$. До замыкания этого разрыва происходит компрессия потока в индивидуальном каскаде. После замыкания совершается перехват потока и компрессия его начинается в следующем каскаде, повторяя предыдущий этап, если каскады идентичны. Полная индуктивность k -го каскада, отнормированная на индуктивность последней секции его, составляет так называемый коэффициент перестройки МК-цепи λ_k , который для идеального генератора без потерь оказывается равным коэффициенту усиления тока i и увеличения энергии ϵ , т. е.

$$\lambda_k = \sum_1^n l_{ik}, i_k = \lambda_{k\epsilon} \epsilon_k = \lambda_k, \varphi_k = 1.$$

Изменение потока и усиление энергии при срабатывании одного каскада. У каскадного генератора с перехватом потока есть ряд специфических особенностей, отличающих его работу от классического МК-генератора. Рассмотрим их.

Пусть при начале работы k -го каскада в нем захвачен поток φ_k^0 . Это означает, что в каскаде сосредоточен начальный запас магнитной энергии

$$(1.1) \quad \epsilon_k^0 = (\varphi_k^0)^2 / 2\lambda_k.$$

В результате уменьшения индуктивности в λ_k раз ток в последней секции каскада возрастает в i_k раз по сравнению с начальным. При этом поток в последней секции рассматриваемого каскада $\varphi_k = \varphi_k^0 i_k / \lambda_k$. Если коэффициент связи последней секции k -го каскада с первой секцией следующего обозначить через κ , то индуктивность, создаваемую первой секцией $(k + 1)$ -го каскада, пронизывает поток

$$(1.2) \quad \varphi_{k+1}^0 = \kappa \varphi_k \sqrt{l_{1k+1}} = \kappa (i_k / \lambda_k) \varphi_k^0 \sqrt{l_{1k+1}}.$$

шую индуктивность, вряд ли возможно и целесообразно, так как при высоких коэффициентах усиления энергии начальная индуктивность такого генератора вылилась бы в огромные величины, а известный из экспериментов рост потерь потока с возрастанием коэффициента перестройки индуктивности цепи с неизбежностью погубил бы самый лучший проект такого рода.

Среди возможных решений сформулированной задачи наиболее привлекательной

Именно он перехватывается в $(k + 1)$ -м каскаде и подвергается дальнейшей компрессии. Однако, прежде чем начнется компрессия, из-за перехвата происходит нежелательное, но неизбежное явление: в цепи $(k + 1)$ -го каскада возникает ток, поддерживающий захваченный поток φ_{k+1}^0 , который перераспределяется из индуктивности l_{1k+1} в большую индуктивность λ_{k+1} . Этот процесс сопровождается определенными потерями энергии, которая к началу компрессии в $(k + 1)$ -м каскаде становится равной

$$(1.3) \quad \varepsilon_{k+1}^0 = (\varphi_{k+1}^0)^2 / 2\lambda_{k+1}.$$

Из (1.1)—(1.3) нетрудно получить, что при срабатывании k -го каскада произошло увеличение энергии

$$(1.4) \quad \varepsilon_k = \varepsilon_{k+1}^0 / \varepsilon_k^0 = \kappa^2 l_{1k+1} (i_k)^2 / \lambda_k \lambda_{k+1}$$

и потока

$$(1.5) \quad \psi_k = \varphi_{k+1}^0 / \varphi_k^0 = \kappa i_k \sqrt{l_{1k+1}} / \lambda_k.$$

Существенной величиной в этих формулах является отношение i_k / λ_k , которое представляет собой остатки потока, сохраняющегося к концу работы в k -м каскаде. Опыт показывает, что при $\lambda_k \sim 100$ в самых лучших генераторах $i_k / \lambda_k \sim 0,2-0,4$ и падает с ростом λ [1—3]. Поэтому для получения хорошего увеличения энергии ε и усиления потока ψ надо остановиться на умеренных значениях λ и достигнуть как можно больших значений κ . Из технологических соображений производства описанного генератора целесообразно собирать его из одинаковых каскадов, обеспечив конструктивную возможность посадки спирали первой секции последующего каскада в последнюю предыдущего. Секционирование же с целью оптимизации генератора и уменьшения потерь в нем следует производить путем расщепления витков при переходе от одной секции к следующей [1].

Рассмотрим несколько вариантов каскада при расщеплении витка на два. При одном расщеплении $n = 2$, $l_1 = 4$, $l_2 = 1$, $\lambda = 5$. При $\kappa = 0,9$ и отсутствии потерь ($i/\lambda = 1$) расчеты в соответствии с формулами (1.4) и (1.5) дают $\psi = 1,8$ и $\varepsilon = 3,24$, что не очень велико. Уменьшив фактор потерь потока i/λ до 0,6, получаем $\psi = 1,08$ и $\varepsilon = 1,166$. При двух расщеплениях $n = 3$, $l_1 = 16$, $l_2 = 4$, $l_3 = 1$, $\lambda = 21$. Для $\kappa = 0,9$, $i/\lambda = 1$ усиление потока и энергии составит $\psi = 3,6$, $\varepsilon = 12,96$ и даже уменьшение i/λ до 0,6 оставляет их очень хорошими ($\psi = 2,16$; $\varepsilon = 4,67$).

Третье расщепление дает $n = 4$, $l_1 = 64$, $l_2 = 16$, $l_3 = 4$, $l_4 = 1$, $\lambda = 85$ — перестройка цепи слишком велика, чтобы надеяться на хорошее значение показателя сохранения потока в каскаде i/λ . Дальнейшее увеличение количества секций вряд ли целесообразно из-за роста потерь потока в каскаде. Расщепление более чем на два витка улучшает пространственную геометрию поля и, наверно, положительно для уменьшения потерь потока, но ведет к более резким скачкам индуктивности при переходе от секции к секции в пределах каскада. Эти два фактора противоположно сказываются на качестве работы генератора, и возникающая проблема может быть решена лишь после соответствующих экспериментов.

Модель потерь потока. Потери потока в спиральных многовитковых генераторах обычно намного превосходят потери в генераторах простейшей геометрии типа плоских шин. Если исключить возможность грубых ошибок при изготовлении генератора типа несоосности спирали и движущейся арматуры, то останутся утечка потока в проводник и контактные потери. Из-за концентрации магнитного поля в зоне соударения арматуры со спиралью контактные потери могут оказаться определяющими. Возрастают контактные потери содействуют также струйные и плазменные явления в зоне соударения. Предположив контактные потери основными, можно связать теряемый поток $\Delta\Phi$ с

отсекаемой в контакте индуктивностью $\delta L'$, записав уравнение потерь в виде

$$(1.6) \quad \Delta\Phi = -I\delta L'.$$

Ясно, что контактные потери происходят на некоторой доле площади δS , занимаемой витками спирали. Используя известную зависимость индуктивности соленоида от линейной плотности витков n и площади и учитывая, что за время Δt отсекается индуктивность с длиной вдоль образующей $D\Delta t$ (D — скорость детонации заряда ВВ), получим

$$(1.7) \quad \delta L' \sim \delta S n^2 D \Delta t.$$

С другой стороны, при работе спирального генератора изменение его индуктивности за то же время Δt составляет

$$(1.8) \quad \Delta L \sim -(S - S_0) n^2 D \Delta t.$$

Здесь S — эффективное поперечное сечение спирали; S_0 — начальное сечение арматуры с зарядом ВВ. Из (1.7) и (1.8) с учетом знака изменения индуктивности генератора находим $\delta L' \sim -\delta S \Delta L / (S - S_0)$ или $\delta L' = -\alpha \Delta L$, где относительно подгоночного по своей сути параметра α можно утверждать, что он во всяком случае пропорционален отношению площади, занимаемой витками спирали, к сечению свободного пространства генератора.

Сделанные предположения позволяют записать (1.6) в виде уравнения

$$(1.9) \quad d\Phi = \alpha I dL,$$

которое просто интегрируется и дает изменение потока при работе генератора

$$\varphi = \Phi / \Phi_0 = (l/\lambda)^\alpha$$

и усиление тока

$$(1.10) \quad i = I/I_0 = \Phi L_0 / \Phi_0 L = (\lambda/l)^{1-\alpha}.$$

Рациональное профилирование и электрические напряжения. Так как при работе описанного многокаскадного генератора поток должен возрасти и к концу работы при большой индуктивности нагрузки может достигнуть больших значений, то скорость изменения потока и связанные с ней электрические напряжения могут оказаться решающим препятствием для осуществления задуманного генератора. Для уменьшения опасности электрического пробоя следует выбрать подходящий закон вывода индуктивности от времени $l(t)$. Понятно, что оптимальным будет генератор, создающий постоянное в течение всего времени работы напряжение V_0 , гарантирующее отсутствие электрических пробоев. Это значит, что должно выполняться условие $L(t) dI/dt = V_0 = \text{const}$, используя которое получим из уравнения электрической цепи (1.9)

$$(1 - \alpha) I dL/dt = -V_0$$

или в безразмерном виде, когда индуктивность нормирована на индуктивность нагрузки L_f , ток на начальный ток I_0 и время на время компрессии t_1 ,

$$(1.11) \quad (1 - \alpha) i dl/d\tau = -V_0 t_1 / L_f I_0 = -V_0 t_1 \lambda / \Phi_0.$$

Подстановка в (1.11) зависимости (1.10) приводит к уравнению

$$(1.12) \quad (1/l^{1-\alpha}) dl/d\tau = -V_0 t_1 \lambda^\alpha / \Phi_0 (1 - \alpha),$$

решение которого должно удовлетворить сразу двум условиям:

$$(1.13) \quad l(0) = \lambda \text{ при } \tau = 0, \quad l(1) = 1 \text{ при } \tau = 1.$$

Удовлетворив первому из них, получаем (1.12) в виде $l = \lambda(1 - V_0 t_1 \alpha \tau / \Phi_0 (1 - \alpha))^{1/\alpha}$.

Второе из условий (1.13) позволяет определить закон вывода индуктивности в зависимости от параметров α и λ и времени

$$l = \lambda [1 - \tau(1 - 1/\lambda^\alpha)]^{1/\alpha}$$

и напряжение в генераторе $V_0 = (\Phi_0/t_1)(1 - 1/\lambda^\alpha)(1 - \alpha)/\alpha$. При отсутствии потерь ($\alpha \rightarrow 0$) эти формулы преобразуются к известному степенному закону вывода индуктивности

$$l = \lambda^{1-\tau}$$

и

$$(1.14) \quad V_0 = (\Phi_0/t_1) \ln \lambda.$$

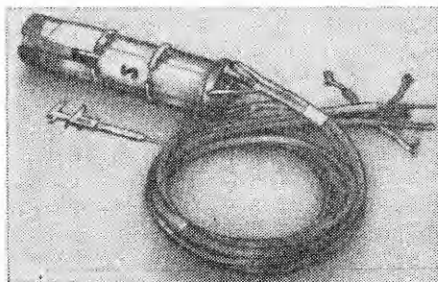
Отметим, что секционирование по методу расщепления витков позволяет приблизительно удовлетворить степенному закону, а рабочее напряжение превышает характерную величину ЭДС индукции Φ_0/t_1 , как минимум, в $\ln \lambda$ раз.

Другие ограничения. Помимо электрического пробоя катастрофические отклонения в работе спирального генератора могут возникнуть из-за механических подвижек или разрушений спирали под действием больших магнитных давлений. Чтобы предупредить такие нежелательные явления, необходимо предусмотреть и осуществить увеличение механической прочности спирали против как осевых, так и радиальных напряжений. Обычно это достигалось применением внешней обмотки из стеклоткани и пропитки ее эпоксидной смолой. Как показал эксперимент, важную роль играет выбор диаметра проводников, из которых изготовлялись спирали, их изоляции и специальной межвитковой изоляции.

2. Конструкция генератора и результаты экспериментов. В соответствии с изложенными соображениями изготовлены и испытаны несколько различных секционированных небольших спиральных генераторов (один из них показан на рис. 2), основные конструктивные особенности которых описаны в табл. 1. Испытанные генераторы отличались изоляцией витков, межвитковой изоляцией, диаметром проволоки, используемой для создания спирали, и числом заходов в секциях. Механическая прочность конструкции обеспечивалась обмоткой спирали стеклотканью, пропитанной эпоксидной смолой. Проведенные эксперименты отличались также способом запитки генераторов: в опытах 1—5 они прямо подсоединялись к конденсаторной батарее, в опытах 6—8 запитка производилась от батареи через трансформатор, имитирующий передачу и перехват потока из одного каскада в другой. Цель экспериментов состояла в определении потерь и энергетического усиления в одном каскаде генератора.

В экспериментах регистрировались электротехнические показатели генератора посекционно и в целом, параметры запитки и результаты компрессии. На рис. 3 приведена осциллограмма сжатия потока в трехсекционном генераторе при выжимании магнитного поля из первых двух секций в третью. Верхний луч регистрировал ток в последней секции генератора, нижний — производную этого тока. Осциллограмма опыта с четырехсекционным генератором представлена на рис. 4, где на обоих лучах регистрировался ток в последней секции, но с усилением, отличающимся в 10 раз. Частота меток времени на обеих осциллограммах 100 кГц.

Полная сводка экспериментальных результатов дана в табл. 2 (использованы общепринятые обозначения, индекс нуль относится к начальным условиям, f — к концу работы генератора). Опыты 1—3 следует считать неудачей из-за исключительно высоких потерь потока и связанной с этим потерей возможности увеличивать электромагнитную энергию.



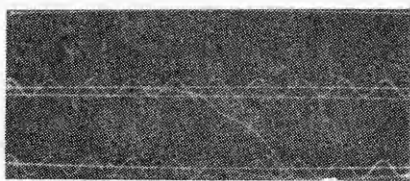
Р и с. 2

Таблица 1

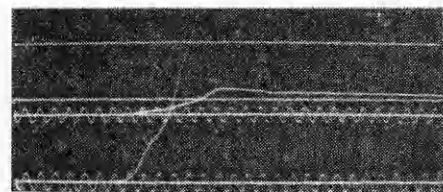
Номер опыта	Номер секции	Число заходов	Число витков секции	Общее число витков спирали	Длина секции	Шаг витков	Диаметр провода	Изоляция провода	Расстояние между заходами	Диаметр спирали	Длина спирали	Диаметр внутреннего токопровода	Толщина стенки внутреннего токопровода	Пробойное напряжение, кВ
1—3	1	4	16	28	86	4	1,0	0,01	0,02	60	258	30	2	Не более 5
	2	8	8		86	8	1,0	0,01						
	3	16	4		86	16	1,0	0,01						
4—5	1	3	16	28	100	6	2,0	0,01	0,02	67	300	30	2	Не более 5
	2	6	8		100	12	2,0	0,01						
	3	12	4		100	24	2,0	0,01						
6	1	4	20	35	172	8,6	1,9	0,01	0,02	60	444	30	2	Не более 5
	2	8	10		140	13,8	1,9	0,01						
	3	16	5		132	26,6	1,9	0,01						
7	1	2	16	24	108	6,4	2,0	0,2	1,0	60	324	30	2	Более 10
	2	6	6		108	18	2,0	0,2	0,6					
	3	18	2		108	54	2,0	0,2	0,6					
8	1	2	21	38	153	7,0	2,5	0,01	1,0	60	600	30	2	Не более 5
	2	4	10		170	16	2,5	0,01	1,5					
	3	8	5		170	32	2,5	0,01	1,5					
	4	16	2		130	60	3,0	0,1	0,2					

Анализ деталей экспериментов и дополнительные контрольные опыты показали, что полный провал опытов 1—3 связан с механическим разрушением тончайшего слоя лаковой изоляции, покрывающей витки спирали, и отсутствием специальной межвитковой изоляции. Более тщательная пропитка эпоксидной смолой и увеличение диаметра проволоки, используемой для намотки спирали, привели в опытах 5—6 к росту коэффициента сохранения потока ϕ до 0,44. Введение специальной межвитковой изоляции в опыте 6 подняло ϕ до приемлемого значения 0,63. Покрытие проводников дополнительной, довольно прочной и толстой изоляцией ($\sim 0,2$ мм) в опыте 7 существенно увеличило электрическую прочность генератора и практически не сказалось на сохранении потока и усилении энергии в каскаде. Попытка форсировать каскад введением четвертой секции и увеличением коэффициента перестройки цепи несколько снизила показатель сохранения потока, но не настолько, чтобы при увеличившемся коэффициенте перестройки снизить коэффициент усиления энергии. Наоборот, в этом опыте значение ϵ достигло наибольшего среди полученных.

Недостаток экспериментов состоит в том, что в них не измерялось электрическое напряжение. Для оценки его воспользуемся формулой (1.14), учтя в ней потери потока путем замены Φ_0 на Φ_f . Такая оценка дает для опытов 7 и 8 напряжение не менее 6,4 и 13 кВ соответственно.



Р и с. 3



Р и с. 4

Таблица 2

Номер опыта	L_0	L_f	I_0	I_f	E_0	E_f	η	ε	Φ_0	Φ_f	φ
	мкГн		кА		кДж				мВб		
1	8,66	0,141	65,0	28	18,3	$55,3 \cdot 10^{-3}$	1,5	$3 \cdot 10^{-3}$	562	4,0	0,007
2	8,55	0,232	65,0	162	18,3	3	2,5	0,16	562	37,0	0,067
3	9,97	0,380	60,0	120	17,9	2,7	2,0	0,15	598	45,0	0,076
4	9,40	0,480	50,0	400	11,7	40,0	8,1	3,42	460	200,0	0,43
5	9,28	0,440	50,0	461	11,6	46,8	9,2	4,03	464	203,0	0,44
6	9,40	0,416		249	1,4	13		9,30	165	103,4	0,63
7	7,42	0,304		396	2,7	23,8		8,82	200	120,4	0,60
8	9,68	0,132		1376	8,7	125		14,36	410	181,6	0,44

Переход к последовательному соединению каскадов увеличит напряжения на переходах из каскада в каскад и приведет к некоторому уменьшению из-за неидеальности трансформаторной связи энергетических характеристик и к увеличению общего потока в соответствии с изложенным в п. 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский А. И., Людаев Р. З. Магнитная кумуляция // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики/Под ред. А. П. Александрова.— Л.: Наука, 1984.
2. Snare E. C., Kaye R. I., Cowan M. An explosive generator of cascaded helical stages // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение/Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова.— М.: Наука, 1984.
3. Degan J. H., Baker W. L. Test of 10 megajoule electrical output magneto-cumulative generator // Ibid.
4. Cowan M. Large explosive generators high-risk research // II Всесоюз. конф. «Лаврентьевские чтения». Программа.— Киев, 1985.
5. Chernyshev V. K., Davydov V. A. Generation of the magnetic flux by multicascade capture // Megagauss physics and technology/Ed. P. J. Turchi.— N. Y.; L.: Plenum Press, 1980.
6. Pavlovskii A. I., Lyudaev R. Z. et al. Magnetic cumulation generator parameters and means to improve them // Ibid.

Поступила 25/VII 1986 г.

УДК 533.6.011.8

ВРЕМЯ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ АЗОТА В АРГОНЕ

А. Е. Беликов, И. Ю. Соловьев, Г. И. Сухинин,
Р. Г. Шарафутдинов
(Новосибирск)

Для описания вращательной релаксации при малых отклонениях от равновесия может быть использовано простейшее релаксационное уравнение [1]

$$(1) \quad \frac{\partial E_R}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial E_R}{\partial \mathbf{x}} = -(E_R - E_t)/\tau_R,$$

где E_R , E_t — энергия вращательных степеней свободы в неравновесных и равновесных условиях; τ_R — время вращательной релаксации; t — время; \mathbf{u} — скорость газа; \mathbf{x} — координата. Малые отклонения от равновесия имеют место при распространении ультразвука в молекулярном газе [2], течении многоатомных газов в капиллярах [3], в слабых ударных волнах [4]. Расчет коэффициентов переноса выполняется в приближении малых отклонений от равновесия [5]. В свободных струях или при расширении газов из сопел возможно получение различных значений отклонений от равновесия, в том числе и малых. При интерпретации экспериментов, выполненных в свободных струях, часто используется уравнение (1), хотя, как показано в [6], время вращательной релаксации зависит от вида распределения заселенностей уровней и степени отклонения от равновесия и заранее неизвестно, при каком значении отклонения может быть использовано уравнение (1).

Обычно определение времени вращательной релаксации или же отношения его ко времени поступательной релаксации $Z_R = \tau_R/\tau_t$ производится подбором при срав-