

и уже при  $B_0 \geq 0,75$  Т плазмод разрушается из-за резкого уменьшения поверхностной плотности частиц  $N_\alpha(\theta, t)$  в местах перегибов до момента его полного торможения.

При увеличении отношения  $R_K/R_B$  до 0,925 для защиты первой стенки реактора уже требуется более слабое поле  $B_0 \sim 0,2-0,3$  Т. При этом возмущения поверхности плазменной оболочки растут менее интенсивно (см. фиг. 5, 6), а при  $B_0 \leq 0,2$  Т вообще не имеют места. Это обстоятельство является важным при проектировании реакторов цилиндрической геометрии гибридного типа с магнитной защитой первой стенки, так как уже при  $R_K/R_B \leq 0,5$  Т (большой объем занимает бланкет) поле с индукцией  $B_0 < 0,75$  Т неспособно затормозить термоядерные  $\alpha$ -частицы, вылетающие из зоны реакции до тепловых скоростей, а более сильное поле разрушает плазмод еще задолго до ее полного торможения.

Поступила 27 XI 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Frank T., Feidwald D., Merson T., Devaney J. A laser fusion reactor concept utilizing magnetic fields for cavity wall protection.— In: Proc. of 1st Top. Meeting and the Technol. Control. Nuclear Fusion and Power Division Amer. Nuclear Soc., San Diego California, 1971.
2. Кролл Н., Трайвеллис А. Основы физики плазмы. М., «Мир», 1975.
3. Райзер Ю. П. О торможении и превращении энергии плазмы, расширяющейся в пустом пространстве, в котором имеется магнитное поле.— ПМТФ, 1963, № 6.
4. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.
5. Башилов Ю. А., Покровский С. В. Тейлоровская неустойчивость тонкой цилиндрической оболочки.— «Письма в ЖЭТФ», 1976, т. 23, вып. 8.
6. Иногамов Н. А. Модельный анализ тейлоровской неустойчивости оболочек.— «Письма в ЖЭТФ», 1977, т. 3, вып. 7.
7. Милл-Томсон Л. М. Теоретическая гидродинамика. М., «Мир», 1964.
8. Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырский П. И. Вычислительные методы высшей математики. Т. 2. Минск, «Высш. школа», 1972.

УДК 621.365.91

### ВЗРЫВОМАГНИТНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПЛАЗМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

*И. И. Диевов, Н. И. Зотов, О. П. Карпов,  
Б. Г. Клоков, Б. Д. Христофоров  
(Москва)*

Взрывомагнитные генераторы (ВМГ) [1—6], позволяющие с помощью взрыва получать большие импульсные токи и магнитные поля, перспективны и в качестве мощных источников электрической энергии для питания различных электрофизических установок. В последние годы появились работы, посвященные вопросу согласования ВМГ с активно-индуктивной нагрузкой, однако большинство из них имеет характер предварительных оценок, экспериментальные исследования пока немногочисленны [4—7]. Эффективная передача энергии осуществлена лишь в индуктивную нагрузку [6], а в экспериментах с плазменной и активной нагрузкой переданная в нее энергия не превосходила энергии запитки самого ВМГ. Так, в [4], где нагрузка в виде фольги из тантала включалась непосредственно в контур ВМГ, в фольгу передано 320 Дж при энергии запиточной

батареи конденсаторов 2 кДж. В [5] ВМГ с согласующим трансформатором использовался для нагрева плазмы газового разряда. Энергия 10 кДж, введенная в разряд, составила 50% от энергии запитки ВМГ. В [7] на омическую нагрузку через согласующий трансформатор и быстродействующий размыкатель передано 5—6 кДж при энергии запитки 8 кДж.

Отношение переданной в нагрузку энергии к энергии запитки является существенным критерием, определяющим эффективность и полезность применения ВМГ.

В данной работе использовался ВМГ, подобный описанному в [6], с незначительно измененными геометрическими размерами и уменьшенным в  $\sim 2$  раза весом взрывчатого вещества. Как показали контрольные опыты, эти изменения не сказались на величине генерируемой энергии.

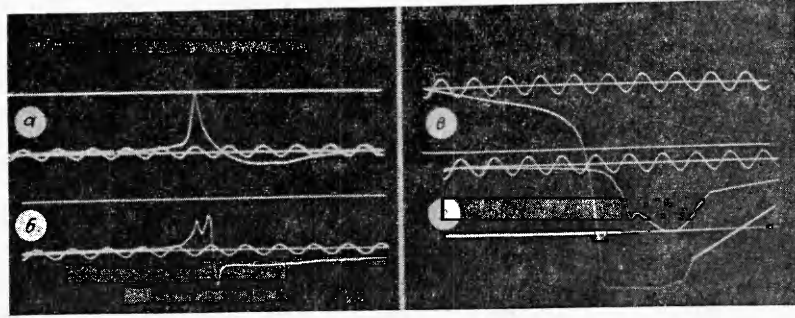
Контур ВМГ состоял из профилированных медных шин, кассеты, заполненной пластическим взрывчатым веществом толщиной 10 мм, и одновиткового соленоида диаметром 0,16 м и длиной 0,33 м, являющегося первичной обмоткой согласующего трансформатора. Начальная индуктивность ВМГ  $L_0 = 1,9$  мкГ, индуктивность соленоида  $L_1 = 65$  нГ, вес заряда взрывчатого вещества 2,5 кг. Энергия запитки ВМГ во всех опытах была одинаковой ( $W_0 = 60 \pm 5$  кДж).

Вторичная обмотка согласующего трансформатора представляла собой 7-витковую однослойную катушку, намотанную медной лентой сечением  $40 \times 1,5$  мм<sup>2</sup> на каркасе из диэлектрика. Коэффициент связи с соленоидом ВМГ  $k = 0,9-0,95$ . Соединение нагрузки со вторичной обмоткой осуществлялось 20 параллельными кабелями ФПК длиной 6 м. Во всех опытах суммарная индуктивность вторичного контура, включающая в себя индуктивность обмотки трансформатора  $L_2 = 3,2$  мкГ, кабелей  $L_K = 0,3$  мкГ и нагрузки  $L_H = 0,1-0,5$  мкГ, оставалась примерно одинаковой и равной  $L = L_2 + L_K + L_H = 3,6-4,0$  мкГ, изменялось лишь активное сопротивление нагрузки. В воздухе нормальной плотности разряд инициировался электровзрывом фольг различного размера. При давлении  $10^{-2}$  мм рт. ст. в качестве нагрузки ВМГ использовался разряд эрозионного типа между разделенными диэлектриком коаксиальными электродами. Изменение сопротивления нагрузки достигалось варьированием геометрических размеров фольги и числа разрядных промежутков.

Применялись алюминиевые фольги толщиной 0,02 мм, площадью  $20 \times 10$ ;  $40 \times 15$ ;  $80 \times 15$  см<sup>2</sup> с начальным сопротивлением соответственно 3,0; 4,0;  $8,0 \times 10^{-3}$  Ом. Фольга зажималась между плоскими электродами с обратным токопроводом в виде двойной симметричной рамки из медной полосы шириной 10 см. Достигаемая таким образом симметрия контура относительно фольги позволяла уравновесить действие на нее пондеромоторных сил отталкивания противоположно направленных токов. Индуктивность рамки с фольгой для указанных выше размеров фольг составляла соответственно 0,33; 0,33 и 0,49 мкГ.

В опытах с помощью поясов Роговского и омических делителей определялись токи и напряжения в цепи запитки ВМГ и в нагрузке; индуктивным датчиком измерялась напряженность магнитного поля в соленоиде; фотодиодами регистрировались спектральные потоки и энергии излучения разряда в видимой и инфракрасной области спектра. Интегральный выход энергии излучения определялся с помощью установленных на различных расстояниях от оси разряда калориметра ИМО-2 двух термопарных и пироэлектрического [8] датчиков.

Методом скоростной фоторегистрации исследовались динамика развития разряда и пространственно-временные распределения яркостной температуры плазмы в разрядном промежутке (результаты фоторегистрации в данном сообщении не приводятся).



Фиг. 1

На фиг. 1 для электроразряда, инициированного взрывом фольги, приведены некоторые характерные осциллограммы тока и напряжения в цепи нагрузки ВМГ (фиг. 1, а, б) и напряженности магнитного поля в соленоиде при различающихся в  $\sim 7$  раз чувствительностях входов осциллографа (фиг. 1, в, г). Период масштабной синусоиды на всех осциллограммах равен 100 мкс. Сжатие магнитного потока в контуре ВМГ начинается примерно на 240 мкс и заканчивается на 540 мкс. На начальной стадии работы ВМГ вкладываемая в фольгу энергия идет на ее нагревание, плавление и испарение. При этом сопротивление разрядного промежутка растет, и рост тока сопровождается увеличением напряжения на электродах. Характерный провал на осциллограмме напряжения совпадает по времени с моментом появления сигналов с датчиков, регистрирующих излучение, и соответствует пробое разрядного промежутка и зажиганию разряда в воздухе и парах металла. Развитие ионизационных процессов приводит к уменьшению сопротивления разрядного промежутка, вследствие чего напряжение некоторое время убывает, несмотря на рост тока. Моменту максимального сжатия магнитного потока  $t_m = 540$  мкс соответствуют резкие максимумы на осциллограммах тока и напряженности магнитного поля. Во всех опытах наблюдался сдвиг по фазе импульсов тока относительно импульса напряжения, характерный для активно-индуктивной цепи с малым активным сопротивлением. Максимум тока отстает от максимума напряжения на 5—15 мкс. При  $t > t_m$  магнитная энергия, запасенная в индуктивностях, выделяется в виде тепла на активных сопротивлениях первичного контура ВМГ и нагрузки. В отличие от опытов с индуктивной нагрузкой [6] импульс тока в данных опытах имеет отрицательную фазу, амплитуда и длительность которой зависят от геометрических размеров фольги.

Основные результаты опытов приведены в таблице, где использованы следующие обозначения:  $I_{10}$ ,  $I_{20}$  — токи в первичном контуре ВМГ и в нагрузке в момент начала сжатия магнитного потока;  $I_{2m}$ ,  $U_{2m}$ ,  $H_m$  — максимальные значения тока и напряжения в нагрузке и напряженности магнитного поля в соленоиде;  $I_{1m} = Nk_1I_{2m} + hk_2H_m$  — максимальный ток в соленоиде ( $N = 7$  — число витков во вторичной обмотке трансформатора,  $h = 0,33$  м — длина обмоток,  $k_1$ ,  $k_2$  — коэффициенты, близкие к единице, характеризующие геометрию обмоток [9]);

$$W_m = \frac{L_1 I_{1m}^2}{2} + \frac{L_2 I_{2m}^2}{2} - M I_{1m} I_{2m}$$

— максимальная магнитная энергия ВМГ ( $M$  — коэффициент взаимной индукции);  $E_m = \int_0^{\infty} I_2 U_2 dt$  — энергия, выделившаяся в нагрузку к кон-

Параметры нагрузки	Фольги				Эрозионный разряд			$R_H=0$ [6]
	20×10	20×10	40×15	80×15	6	7	8	
Номер опыта	2	3	4	5	6	7	8	16
$I_{10}$ , кА	235	264	253	256	254	256	260	303
$I_{20}$ , кА	23	22	23	19	0	0	0	31
$H_m$ , кЭ	52	62	65	66	64	75	54	60
$U_m$ , кВ	8,9	9,0	6,8	10,3	6,4	6,2	10,3	13,0
$I_{1m}$ , МА	6,3	7,2	7,1	4,8	7,4	7,2	7,7	8,4
$I_{2m}$ , кА	614	689	662	343	700	650	705	860
$W_m$ , кДж	340	430	440	260	500	515	500	780
$E_m$ , кДж	70	86	160	240	99	89	150	0
$J \cdot 10^{-6}$ , А <sup>2</sup> ·с	12,3	16,4	14,7	4,40	13,6	10,6	18,5	22,2
$R_* \cdot 10^3$ , Ом	5,7	5,1	11	54	7,3	8,4	8,2	0
$\varepsilon$ , кДж	37	47	82	130	18	18	36	0
$I_-$ , кА	65	131	130	95	184	181	68	—
$\tau_-$ , мкс	160	210	365	360	240	240	230	—

цу импульса тока;  $J = \int_0^{\infty} I^2 dt$  — интеграл тока;  $\bar{R}_* = E_m/J$  — «среднее»

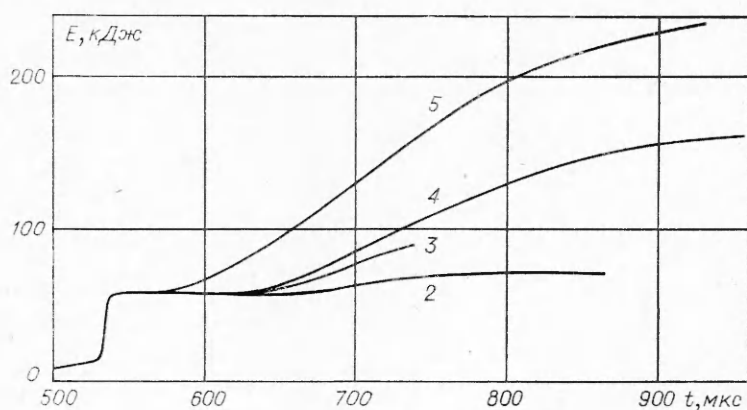
сопротивление нагрузки;  $\varepsilon$  — энергия, излученная разрядом (в области прозрачности воздуха для опытов с фольгами и кварца для опытов с эрозионными разрядами);  $I_-$  и  $\tau_-$  — амплитуда и длительность отрицательной фазы импульса тока в нагрузке. Для сравнения в таблице приведены также результаты опыта с чисто индуктивной нагрузкой из [6].

Опыты показали возрастание энергии, вкладываемой в разряд (и излученной разрядом), с увеличением геометрических размеров фольги. Поскольку, как указывалось выше, суммарная индуктивность цепи нагрузки менялась незначительно, изменение энерговклада в разряд естественно связать с изменением его сопротивления. Качественно ясно, что малое по сравнению с индуктивным активное сопротивление цепи нагрузки не должно влиять на величину токов и магнитной энергии (опыты 2—4), и

активная энергия  $E_m = \int_0^{\infty} I^2 R dt$  должна расти с увеличением сопротивле-

ния до тех пор, пока оно не скажется существенно на потерях магнитного потока ВМГ. Дальнейшее увеличение сопротивления приведет к снижению тока (опыт 5), следовательно, зависимость выделяемой в нагрузке энергии от сопротивления должна иметь максимум. По результатам данных опытов определить положение максимума затруднительно, так как сопротивление разряда само зависит от вкладываемой энергии и меняется за время импульса в пределах  $10^{-3}$ — $10^{-1}$  Ом. Тем не менее приведенные в таблице отношения энергии к интегралу тока можно рассматривать как «средние» сопротивления нагрузки при сравнении результатов отдельных опытов.

Как видно из таблицы, в опытах с фольгами энергия возросла от 70 до 240 кДж при изменении «среднего» сопротивления от 5 до  $50 \times 10^{-3}$  Ом. При наибольшем значении сопротивления резко снизились токи  $I_{1m}$ ,  $I_{2m}$  и магнитная энергия, а активная энергия оказалась наибольшей. При этом почти вся магнитная энергия, запасаемая к моменту максимального сжатия потока в ВМГ, выделилась в нагрузке. По-видимому, это значение сопротивления близко к оптимальному при заданных параметрах ВМГ и согласующего трансформатора.



Ф и г. 2

На фиг. 2 показаны зависимости выделяемой в активной нагрузке энергии от времени  $E(t) = \int_0^t I_2 U_2 dt - \frac{L_{II} I_2^2}{2}$  (цифрами указаны номера опытов).

Видно, что к моменту максимального сжатия потока энергия во всех опытах одинакова и равна  $\sim 60$  кДж. Увеличение энергии с ростом сопротивления достигается за счет отрицательной фазы импульса тока.

Энергия излучения разряда также возрастала с увеличением сопротивления, составляя около 50% от введенной в плазму энергии. Наибольшее значение излученной энергии (опыт 5) равно 130 кДж.

Заметим, что доля излученной энергии оказалась большей по сравнению с известными работами по электровзрыву проволок и фольг. Возможно, что в условиях данных опытов при сравнительно медленном энерговыделении и значительной площади фольг в общем балансе энергии нужно учитывать экзотермическую реакцию окисления паров алюминия в воздухе.

Дополнительные данные о влиянии параметров нагрузки на эффективность отбора энергии от ВМГ были получены в опытах с эрозионным разрядом. До момента возникновения разряда ток во вторичной обмотке трансформатора отсутствовал и ВМГ работал в режиме «холостого хода». В опытах 6—7 разряд возникал в результате самопробоя разрядного промежутка при напряжении на электродах  $\sim 20$  кВ за 30 мкс до момента максимального сжатия потока ВМГ. В опыте 8 два последовательно соединенных разрядных промежутка инициировались внешним поджигающим импульсом на 70 мкс раньше при существенно меньшем напряжении  $\sim 2$  кВ. После возникновения разряда характер осциллограмм аналогичен приведенным на фиг. 1. Максимальные значения токов и магнитной энергии были примерно одинаковыми во всех трех опытах. Наибольшая активная энергия  $E_m = 150$  кДж получена в опыте с последовательно соединенными разрядными промежутками. Вклад отрицательной фазы импульса тока в энергию незначителен. По аналогии с опытами с фольгами можно ожидать роста энергии при возрастании сопротивления путем дальнейшего увеличения числа разрядных промежутков.

Проведенные опыты показали возможность передачи значительной части энергии ВМГ в плазменную нагрузку с активным сопротивлением  $10^{-2}$ — $10^{-1}$  Ом через согласующий трансформатор без дополнительного размыкателя типа [7], применение которого связано с большими потерями энергии на размыкание.

Количественное объяснение полученных экспериментальных результатов дает анализ работы в ВМГ на основе эквивалентной схемы, показанной на фиг. 3. Изменение индуктивности ВМГ задавалось функцией

$$L_r = \begin{cases} (L_0 - L_1) \left(1 - \frac{t}{t_m}\right) & \text{при } t \leq t_m, \\ 0 & \text{при } t > t_m. \end{cases}$$

Остальные параметры схемы считались не зависящими от времени. Потери магнитного потока в контуре ВМГ учитывались сопротивлением  $R_1$ , величина которого в численных расчетах на ЭВМ задавалась такой, чтобы максимальные значения токов  $I_{1m}$  и  $I_{2m}$  совпали с экспериментальными при  $R_H = 0$  (опыт 16,  $R_1 = 1,4 \times 10^{-3}$  Ом). Значения  $R_H$ ,  $L_2$  и  $L_H$  варьировались.

При  $R_1 \neq 0$  и  $t > t_m$  для расчетной зависимости тока в нагрузке от времени характерно наличие отрицательной фазы импульса, наблюдавшейся в экспериментах. В зависимости от сопротивления нагрузки отношение  $I_-/I_{2m}$  имеет максимум порядка единицы при  $R_H = \sim [(L_2 + L_H)/L_1]R_1$ . В случае очень «малых» или очень «больших»  $R_H$  отношение  $I_-/I_{2m}$  близко к нулю. Такая зависимость от параметров цепи объясняет, в частности, тот факт, что отрицательная фаза не была зарегистрирована в ранее опубликованных экспериментах.

Форма импульса тока в нагрузке связана с перераспределением энергии, запасенной в виде энергии магнитного поля к моменту максимального сжатия потока. В случае  $R_1 = 0$  из аналитического решения электротехнических уравнений цепи следует, что основная доля энергии, запасенная в индуктивностях трансформатора, остается в первичном контуре. На сопротивлении вторичного контура при  $t > t_m$  выделяется лишь энергия, запасенная в индуктивности нагрузки, и отрицательная фаза отсутствует. В рассматриваемом более общем случае  $R_1 \neq 0$  в нагрузку передается и часть энергии первичного контура.

Расчеты показали, что зависимость энергии, выделившейся в нагрузку, от ее сопротивления имеет максимум, смещающийся в сторону больших значений  $R_H$  при увеличении индуктивности вторичной обмотки соответствующего трансформатора. Наибольшее значение энергии (240 кДж) было получено в опыте 5, в котором сопротивление близко к оптимальному расчетному  $R_{\text{опт}} \approx 10^{-1}$  Ом. Из расчетов следует возможность дальнейшего увеличения активной энергии при уменьшении индуктивности нагрузки, а при заданной  $L_H$  путем пропорционального увеличения  $L_2$  и  $R_H$ .

Авторы выражают благодарность П. В. Кевлишвили за ценные советы и поддержку работы.

Поступила 20 XI 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

- Сахаров А. Д. Взрывомагнитные генераторы.—УФН, 1966, № 88.
- Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.
- Биченков Е. И., Войтенко А. Е., Демчук А. Ф., Дерибас А. А., Куликов Б. И., Нестерихин Ю. Е., Соболев О. П. Эксперименты со взрывомагнитным генератором.—ДАН СССР, 1968, № 183.
- Конжер, Джонсон, Лонг и Паркс. Генерирование мощных электрических импульсов путем взрывного сжатия магнитного поля.—«Приборы для научных исследований», 1967, № 11.

5. Войтенко А. Е., Маточкин Е. П., Яблочников Б. А. Использование взрывомагнитного генератора для питания газового разряда.— ПТЭ, 1973, № 3.
6. Дивнов И. И., Гуськов Ю. А., Зотов Н. И., Карпов О. П., Христофоров Б. Д. Взрывомагнитный генератор с индуктивной нагрузкой.— ФГВ, 1976, № 6.
7. Азаркевич Е. И., Войтенко А. Е., Исаков В. П., Котов Ю. А. Взрывной электрический генератор.— ЖТФ, 1976, № 46.
8. Киселев Ю. Н., Крохин В. З. Малоинерционные пироэлектрические приемники для регистрации излучения в диапазоне 40—1100 нм.— ПМТФ, 1976, № 4.
9. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. Л., «Энергия», 1970.

УДК 533.6.071.08.632.57

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОМАССОБМЕНА АЭРОЗОЛЯ ПРИ СМЕШЕНИИ С ПОТОКОМ НЕРАВНОВЕСНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННОЙ СРЕДЫ

В. М. Кузнецов, М. М. Кузнецов

(Москва)

Использование смешения потоков колебательно-возбужденного азота и аэрозоля углекислоты с целью улучшения энергетических характеристик и увеличения однородности и объема активной инверсной среды было предложено в работах [1, 2]. Предполагалось, что на начальном этапе ввод твердой фазы  $\text{CO}_2$  в сверхзвуковой поток азота может быть произведен механическим путем без использования механизмов ламинарной и турбулентной диффузии, за счет которых обычно и осуществляется перемешивание дозвуковых и сверхзвуковых потоков. Тогда за счет скрытой теплоты сублимации твердой фазы можно достичь дополнительного снижения поступательно-вращательной температуры азота и симметричных и деформационных колебательных степеней свободы молекул  $\text{CO}_2$  при заданной степени расширения основного потока. Очевидно, что при этом способе может быть также повышена температура торможения и давления азота в форкамере и, таким образом, инверсия населенностей увеличивается как за счет роста колебательной температуры верхнего уровня, так и вследствие снижения температуры нижних уровней. С целью реализации этих возможностей необходимо всесторонним образом проанализировать процессы взаимодействия аэрозоля с колебательно-возбужденным газом.

В данной работе рассмотрена задача о смешении на основе использования уравнений сохранения. Определены необходимые условия осуществления «мгновенного» смешения аэрозольных частиц с потоком колебательно-возбужденной среды. Даны конечные оценочные формулы для определения времени жизни частиц и глубины их проникновения для сплошносредного, переходного и свободномолекулярного режимов течения на смешении.

1. Проанализируем процесс смешения, основываясь на уравнениях сохранения массы, импульса и энергии при течении в канале постоянного поперечного сечения. Запишем их в следующем виде [1], полагая для определенности, что носителем твердой фазы является углекислота, которая смешивается с азотом:

$$(1.1) \quad \frac{m_p v_p^2}{2} + \frac{m_g v_g^2}{2} + c_p^{(g)} m_g T_g + c_p^{(p)} m_p T_p = \frac{(m_p + m_g) v^2}{2} + c_p^{(g)} \left( \frac{m_p}{\mu_p} \mu_g + m_g \right) T + q m_p,$$

$$\frac{m_p}{\mu_p} \frac{RT_p}{v_p} + m_p v_p i + \frac{m_g}{\mu_g} \frac{RT_g}{v_g} + m_g v_g = \left( \frac{m_p}{\mu_p} M_g + m_g \right) \frac{RT}{v_g} + (m_p + m_g) v,$$