

Пористый генератор макрочастиц термоядерного топлива

© И.В. Виняр, А.Н. Шляхтенко

Лаборатория ПЕЛИН, 212125 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 21 июня 1999 г.)

Разработана модель формирования макрочастиц из твердых изотопов водорода в оригинальном пористом генераторе для периодической инжекции в плазму термоядерных установок. Показано, что частота формирования водородных, дейтериевых и тритиевых макрочастиц размером 3 мм может достигать соответственно 2, 1.3 и 1 Hz. Представлены результаты испытаний генератора.

Введение

Инжекция в плазму макрочастиц, сформированных из твердых изотопов водорода, завоевала широкое признание как способ поддержания термоядерной реакции [1]. Многие термоядерные установки оснащены инжекторами макрочастиц, которые наряду с клапанами напуска газа составляют основу их топливной системы. Чаще всего применяются пневматические инжекторы, в которых макрочастицы ускоряются сжатым газом, как снаряды в стволе, до 1–3 km/s и инжектируются в плазму. Проблема заключается в разработке генератора, способного в стационарном режиме формировать твердые макрочастицы из изотопов водорода при температуре около 10 K с частотой более 1 Hz и надежностью свыше 95%.

Предложено несколько генераторов макрочастиц [2–7]. В генераторе Замбони [2] газ непрерывно намораживался на обод вращающегося диска и получавшийся лед периодически срезался. Однако этот генератор обеспечивал в стационарном режиме частоту формирования макрочастиц не более 0.2 Hz. Генератор с тремя поочередно работающими поршневыми экструдерами [3], выдавливающими ледяной стержень с последующим нарезанием из него макрочастиц, содержит большой запас топлива, что небезопасно, особенно при работе с тритием. Более перспективными представляются генераторы, использующие "газовый" или шнековый экструдер [4,5]. Недостатком первого из них является высокое давление газа (10 МПа), необходимое для экструзии льда, а во втором запас топлива может достигать нескольких граммов, что нежелательно при работе с тритием. Недавно был предложен новый генератор [6], в котором макрочастицы формируются за счет плавления небольшого объема топлива, непрерывно замораживаемого в пористой втулке, являющейся по сути коротким участком ствола инжектора, с последующим проникновением жидкости в ствол и замерзанием там. Первые испытания показали [7], что макрочастицы твердого водорода диаметром 3 мм могут формироваться с частотой 0.1 Hz, а для увеличения частоты необходимо разработать модель формирования макрочастиц в генераторе и оптимизировать его конструкцию, чему и посвящена данная работа.

Модель формирования макрочастиц

Прежде чем оценить минимальное время формирования макрочастицы в генераторе, определим максимальный радиус ствола, при котором жидкая капля топлива не будет растекаться вдоль его поверхности. Рассмотрим жидкую каплю, находящуюся в круглом горизонтальном стволе в статическом равновесии. Ортогональные оси x, y направим нормально к оси ствола, соответственно горизонтально и вертикально вниз, как показано на рис. 1. Обозначим давление насыщенных паров в стволе и давление в капле в точке $y = R$ соответственно P_s и P_R , где R — радиус ствола. Свободную поверхность жидкости будем описывать функцией $u(x, y)$. Уравнение статики в данном случае будет представлять собой баланс сил тяжести и поверхностного натяжения [8]

$$\sigma_2 \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u(x, y)}{\sqrt{1 + [\nabla u(x, y)]^2}} \right) = \rho_2 g(R - x) + (P_R - P_s), \quad (1)$$

где ρ_2 и σ_2 — плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости, g — ускорение свободного падения; здесь и далее индексы 1–3 будут относиться к твердой, жидкой и газообразной фазам топлива соответственно.

Проинтегрировав (1) по всему поперечному сечению ствола $x^2 + y^2 \leq R^2$ и воспользовавшись теоремой Остроградского–Гаусса, получим

$$2\sigma_2 \cos \varphi = \rho_2 g R^2 + (P_R - P_s)R,$$

где φ — угол смачивания жидкостью стенок ствола.

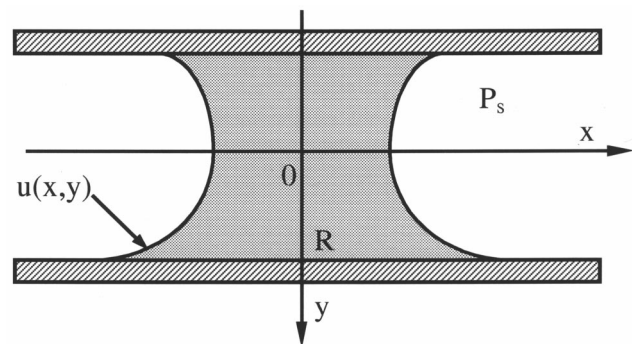


Рис. 1. Схема расположения жидкой капли топлива в стволе.

Отсюда

$$R = \sqrt{\frac{2\sigma_2 \cos \varphi}{\rho_2 g} + \left(\frac{P_R - P_s}{2\rho_2 g}\right)^2} - \frac{P_R - P_s}{2\rho_2 g}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что максимальный радиус капли достигается при $P_R = P_s$. Учитывая, что жидкий водород практически полностью смачивает поверхность ствола, окончательное выражение для максимального радиуса ствола R_{\max} , в котором капля не будет растекаться вдоль стенок, получим в виде

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{2\sigma_2}{\rho_2 g}}. \quad (3)$$

Расчеты по формуле (3) для значений ρ_2 и σ_2 , приведенных в [9], показывают, что силы поверхностного натяжения будут удерживать от растекания капли водорода, дейтерия и трития в стволах радиусами менее 2,8, 2,1 и 1,85 мм соответственно. Ясно, что жидкость можно заморозить и в стволе большего радиуса, но в этом случае часть жидкости будет растекаться по стволу, испаряться и вновь конденсироваться на слое льда, образующемся на стенках ствола. Длительность такого процесса делает его малоприменимым для периодической инжекции топлива.

Сущность новой идеи формирования макрочастиц заключается в том, чтобы в импульсном режиме нагреть и расплавить топливо в порах генератора, которое под действием силы тяжести и давления будет засасываться сквозь поры в вакуумируемый ствол инжектора и замерзать там [6]. Поскольку при такой технологии необходимо периодически нагревать генератор с топливом

всего на 5–10 К, то время формирования макрочастицы должно быть существенно меньше, чем при обычном замораживании порции газа в стволе, при котором топливо охлаждается от 290 до 10 К. Более того, как видно из рис. 2, при движении макрочастицы 1 в стволе 2 пневматического инжектора ускоряющий газ при комнатной или более высокой температуре проходит по трубке 3 от клапана 4 сквозь генератор частиц 5, содержащий макрочастицу и имеющий температуру около 10 К, и нагревает его. Поэтому если под действием тепла от газа твердое топливо расплавится и проникнет в ствол сквозь пористую втулку 6, то весь процесс формирования макрочастиц будет происходить самостоятельно без применения приводов и механизмов, что обеспечит высокую надежность и простоту конструкции и эксплуатации генератора. По мере остывания генератора за счет его постоянного охлаждения жидким гелием, циркулирующим по теплообменнику 7, жидкое топливо будет замерзать как внутри ствола, так и в пористом генераторе. При этом объем пористой втулки, освобожденный при напуске в ствол жидкой капли, будет быстро наполняться новой порцией топлива, которая конденсируется на развитой поверхности пор.

Целью разработки модели является оценка минимального времени формирования макрочастицы в зависимости от характеристик топлива и конструктивных параметров генератора.

Нагрев генератора ускоряющим газом можно оценить, взяв в качестве первого приближения зависимость числа Нуссельта Nu при стабилизированном турбулентном течении газа в круглой трубе от чисел Рейнольдса Re и Прандтля Pr [10],

$$Nu = 0.023Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}. \quad (4)$$

Локальные числа Рейнольдса и Прандтля рассчитываются по средним в данном сечении параметрам газа с учетом его адиабатического расширения в ствол из объема внутри стреляющего клапана, равного 6 см³. Будем полагать, что энтальпия газа мало меняется, несмотря на теплоотдачу в стенки ствола. Время вылета газа из ствола t^* приближенно можно оценить по формуле [11]

$$t^* = \frac{S}{8a_3} \left(\frac{P_0}{P_3}\right)^{1/7} \left[3 + 2\left(\frac{P_0}{P_3}\right)^{2/7} + 3\left(\frac{P_0}{P_3}\right)^{4/7}\right], \quad (5)$$

где P_0 и P_3 — соответственно начальное и конечное давление газа в стволе, a^3 — скорость звука в невозмущенном газе, S — здесь и далее длина ствола вместе с трубкой подвода ускоряющего газа из клапана.

Будем предполагать, что тепло, передаваемое от ускоряющего газа в ствол и в трубку для подвода газа, в установившемся режиме работы отводится системой охлаждения инжектора таким образом, что в генератор проникает тепло только от небольших примыкающих к нему участков ствола 2 и трубки 3 и от поверхности самого генератора, непосредственно омываемой газом

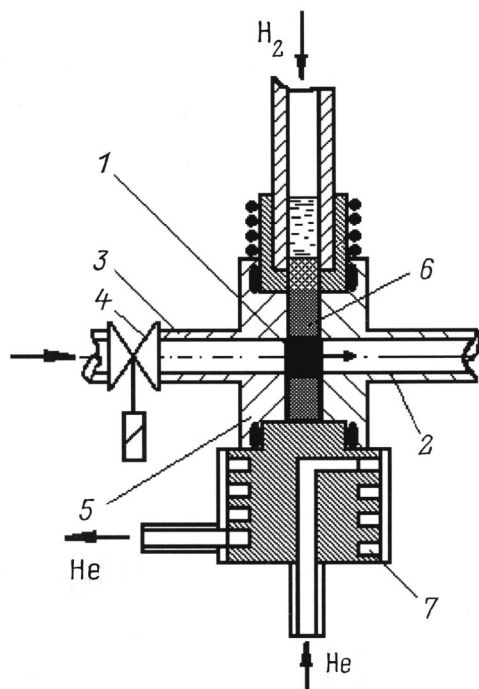


Рис. 2. Схема конструкции пористого генератора.

(рис. 2). Для определенности положим, что длина макрочастицы, толщина пористой втулки и диаметр канала ствола равны, а площадь теплообмена генератора с газом в 2 раза больше площади поверхности макрочастицы. В этих предположениях тепло, переданное генератору от газа при выстреле, можно рассчитать, выражая коэффициент теплоотдачи $\alpha_g(t)$ из числа Нуссельта (4), а температуру газа — из формулы (5). Будем предполагать, что основной теплообмен происходит за время, в течение которого давление ускоряющего газа (гелия) падает в стволе от 5 МПа до 10 кПа, а длина ствола вместе с трубкой подвода газа равна $S = 460R$.

В порах генератора должно расплавиться топливо, равное массе жидкой макрочастицы вместе с массой насыщенного пара в стволе, необходимого для равновесия капли. Если принять линейное распределение температуры вдоль ствола от комнатной T_0 до температуры генератора T , то масса расплавившегося твердого топлива m^* должна быть не менее

$$m^* = \pi R^2 \left[2R\rho_2 + S\rho_s \frac{T}{T_0 - T} \ln \left(\frac{T_0}{T} \right) \right], \quad (6)$$

где ρ_2 и ρ_s — плотность жидкого топлива и его насыщенных паров при температуре плавления.

Чтобы часть топлива могла замерзнуть в порах, ограничивая проникновение в ствол новых порций, масса топлива в порах должна несколько превышать рассчитанную по зависимости (6)

$$m = nm^*. \quad (7)$$

Для оценки минимального времени, необходимого для формирования новой макрочастицы, полагаем в расчетах $n = 1.2$. Оценку времени нагрева и охлаждения пористого генератора с содержащимся в нем твердым топливом получим из уравнений энергии для генератора, для твердого и жидкого топлива внутри его пор и для макрочастицы, замораживаемой в стволе. Будем считать, что поры сферические и равномерно распределены по объему. Предположим, что температура медной пористой втулки из-за высоких значений коэффициента теплопроводности одинакова во всех точках. Тогда для генератора, охлаждаемого паром жидкого гелия с коэффициентом теплоотдачи α_{He} , можно записать уравнение

$$q_g + q_w + q_c - q_p - q_m - \alpha_{He}(T - T_{He})F = Mc \frac{dT(t)}{dt}, \quad (8)$$

где q_g , q_w , q_c , q_p и q_m — соответственно тепловые потоки от ускоряющего газа и от дополнительного нагревателя, постоянный теплоприток, поток тепла в твердое / жидкое топливо в порах и в макрочастицу, замораживаемую в стволе; T_{He} — постоянная температура гелия в теплообменнике генератора; F — площадь теплообмена; M и c — масса и теплоемкость собственно генератора без учета топлива в порах.

Постоянный уровень теплопритоков к генератору можно снизить до уровня менее 0.1 W, так что им

можно пренебречь по сравнению с другими слагаемыми в уравнении (8). Поток тепла в поры q_p определим как

$$q_p = 4\pi r_p^2 N \lambda_i \frac{\partial \Theta_i(r, t)}{\partial r} \quad \text{при } r = r_p, \\ N = \frac{3m}{4\pi r_p^3}. \quad (9)$$

Здесь $\Theta_i(r, t)$ — температура i -й фазы топлива в поре; N — условное количество пор в формователе, равное отношению массы топлива в порах к объему одной поры со средним радиусом r_p ; λ_i — теплопроводность топлива, $i = 1, 2$ (для твердой и жидкой фаз соответственно).

Пусть r_s — радиальная координата сферической поверхности, разделяющей твердую и жидкую фазу внутри поры. Уравнения энергии для обеих фаз имеют вид

$$\rho_i c_i \frac{\partial \Theta_i(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i r^2 \frac{\partial \Theta_i(r, t)}{\partial r} \right), \quad (10)$$

где c_i — удельная теплоемкость топлива при постоянном давлении.

Будем полагать, что температура генератора не превышает температуры кипения топлива, так что парообразования на границе металл–топливо не происходит. Тогда граничные условия

$$\Theta_i = T \quad \text{при } r = r_p, \quad \frac{\partial \Theta_i}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0, \\ \Theta_1 = \Theta_2 = T_s \quad \text{при } r = r_s,$$

а условие Стефана на границе фазового перехода

$$\lambda_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial r} - \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial r} = \rho_1 L \frac{dr_s}{dt} \quad \text{при } r = r_s, \quad (12)$$

где T_s и L — температура и теплота плавления топлива.

По мере плавления топливо проникает сквозь поры в ствол. Если топливо замерзнет в порах в момент, когда в стволе окажется количество жидкости, равное m^* , то время замерзания макрочастицы будет минимально, а пористая втулка будет играть роль клапана-дозатора для подачи жидкости в ствол.

Для оценки времени втекания расплавленного топлива в ствол необходимо рассматривать динамику течения жидкости сквозь пористую среду. Ясно, что нелинейность уравнений Навье–Стокса, а также невозможность определения положения поверхностей, на которых могут быть заданы граничные условия, не позволят получить точные решения для скоростей движения. Однако при небольших числах Рейнольдса влияние сил инерции становится пренебрежимо малым по сравнению с вязкими силами, и в этом случае можно показать [12], что с достаточной степенью точности течение жидкости в пористых телах описывается следующим уравнением:

$$U = \frac{1}{K\mu} \frac{\varepsilon^2 \Delta P}{A^2 h}, \quad (13)$$

где U — средняя скорость фильтрации жидкости сквозь пористую среду, $K = 5.0$ — эмпирический коэффициент

Козени, μ — коэффициент динамической вязкости жидкости, ε — отношение суммарного объема пор к объему пористой втулки генератора, A — суммарная удельная внутренняя поверхность пор (на единицу объема), ΔP — движущий перепад давления, h — высота пористой втулки над осью канала ствола.

Используя (13), получим время, необходимое для стока требуемого количества топлива в ствол

$$t_f = \frac{1}{4} K \mu \left(\frac{A}{\varepsilon R} \right)^2 \frac{hm^*}{\rho_2 \Delta P}$$

или после преобразований

$$t_f = \frac{9K\mu}{n} \left(\frac{h}{r_p} \right)^2 \frac{1}{\Delta P}. \quad (14)$$

Завершается цикл формирования макрочастицы ее замерзанием в стволе. Этот процесс начинается сразу, как только температура генератора станет ниже температуры плавления топлива, и будет происходить одновременно с охлаждением и замерзанием топлива в порах. Расчет необходимого для этого времени основан на решении задачи Стефана с граничными условиями 3-го рода, аналогичной задаче замерзания топлива в порах. Для каждой фазы топлива в канале ствола имеем

$$\rho_i c_i \frac{\partial \Psi_i(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i r \frac{\partial \Psi_i(r, t)}{\partial r} \right). \quad (15)$$

Граничные условия такие:

$$\begin{aligned} \Psi_i &= T \quad \text{при} \quad r = R, \\ \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} &= 0 \quad \text{при} \quad r = 0, \\ \Psi_1 &= \Psi_2 = T_s \quad \text{при} \quad r = r_c, \end{aligned} \quad (16)$$

условие Стефана на границе фазового перехода

$$\lambda_2 \frac{\partial \Psi_2}{\partial r} - \lambda_1 \frac{\partial \Psi_1}{\partial r} = \rho_1 L \frac{dr_c}{dt} \quad \text{при} \quad r = r_c \quad (17)$$

Здесь r_c — радиальная координата цилиндрической поверхности, разделяющей твердую и жидкую фазу внутри ствола. Система уравнений (4), (5), (8)–(12), (15)–(17) и уравнение (14) решались численно. Масса меди и количество пор подбирались так, чтобы суммарная теплоемкость генератора не позволила ему нагреться до точки кипения топлива, предотвращая нежелательное парообразование, а тепла, поглощенного от ускоряющего газа, хватило бы для расплавления всего топлива в порах.

На рис. 3 сплошными кривыми показаны результаты расчетов времени нагрева и охлаждения пористого генератора, содержащего в порах водород или его изотопы, а штриховыми кривыми — зависимости температуры на оси макрочастицы от времени. Расчеты проведены для генератора с порами диаметром 0.06 мм и массой 30 г, в котором формируются макрочастицы диаметром и длиной 3 мм, представляющие практический интерес для

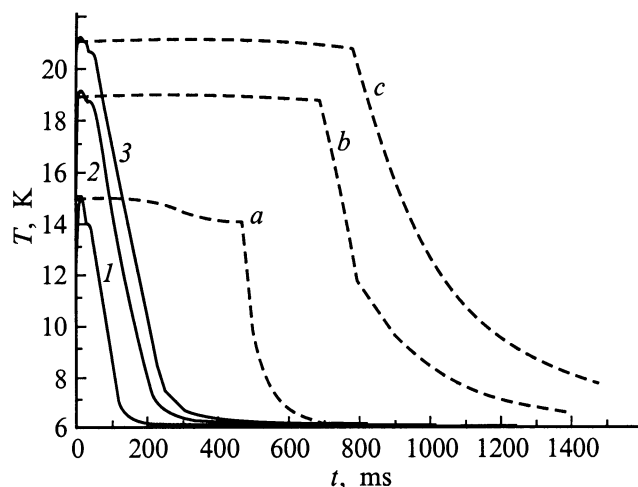


Рис. 3. Зависимости температур генераторов, поры которых заполнены водородом, дейтерием и тритием (соответственно 1–3), и температур на оси сформированных в них соответствующих макрочастиц (a–c) от времени.

термоядерных установок JET (Англия), LHD (Япония), Tore-Supra (Франция). В расчетах температура гелия полагалась равной 6 К, площадь теплообмена 10 cm^2 , а коэффициент теплоотдачи гелия рассчитывался исходя из расхода жидкого гелия, равного 10 l/hour . Видно, что нагрев генератора вместе с твердым топливом в порах происходит за время 20–30 мс, что приблизительно соответствует времени вылета ускоряющего газа из ствола. Охлаждение генератора до уровня температур перед выстрелом (10, 16 и 19 К для каждого изотопа соответственно) происходит в 3 раза медленнее из-за менее мощного теплоотвода в жидкий гелий и слабо зависит от рода топлива. Наиболее длительным при формировании является процесс затвердевания макрочастицы в канале ствола, который составляет для водорода, дейтерия и трития соответственно около 0.45, 0.70 и 0.80 с. Еще около 50 мс требуется для охлаждения затвердевшего топлива на 4–5 К ниже точки затвердевания.

Расчеты и рис. 3 показывают, что время затвердевания макрочастицы в стволе превышает время плавления и затвердевания топлива в порах, если их диаметр меньше 0.2 мм. Однако чем крупнее поры, тем быстрее жидкое топливо проникает в ствол и труднее обеспечить дозированный напуск жидкости только за счет быстрого охлаждения пористой втулки. Колебания давления газа на выходе в генератор или давления пара в стволе легко нарушают условия равновесия жидкой капли (1) и в ствол проникает избыточное количество жидкого топлива. Это увеличивает время формирования макрочастицы и нарушает стабильность работы генератора. Поэтому размеры пор следует выбирать исходя из времени стекания жидкого топлива в ствол.

По результатам численного моделирования время стекания объема жидкой макрочастицы в ствол при радиусах пор от 0.01 до 0.05 мм оказалось приблизительно равно

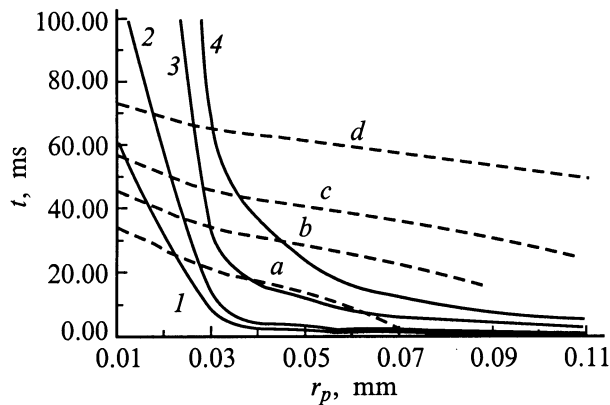


Рис. 4. Зависимости времени стекания жидкого водорода массой m^* в ствол (1–4) и времени открытого состояния пористой втулки (a–d) от радиуса пор при различных давлениях топлива на входе в генератор (1 — 0.1, 2 — 0.05, 3 — 0.02, 4 — 0.01 МПа) и мощностях дополнительного нагрева (a — 0, b — 5, c — 10, d — 20 W).

времени, при котором температура генератора превышала температуру плавления топлива. Последнее время было названо временем открытого состояния пористой втулки. На рис. 4 показаны зависимости времени стекания в ствол жидкого водорода объемом, равным объему макрочастицы (кривые 1–4) и времени открытого состояния пористой втулки (кривые a–d) от радиуса пор и мощностей дополнительного нагрева генератора. Высота пористой втулки принималась равной 25 мм. Из рис. 4 видно, что для повышения стабильности и управляемости процесса формирования макрочастиц желательнее, чтобы время открытого состояния пористой втулки, т.е. время стекания жидкого топлива в ствол, было достаточно продолжительным (десятки миллисекунд), а мощность дополнительного нагрева была минимальной, но достаточной для полного расплавления топлива в порах. Мощность дополнительного нагрева сильно влияет на время открытого состояния пористой втулки, поэтому она наряду с давлением топливного газа может использоваться для регулирования процессов плавления и стока жидкого топлива в ствол.

Анализ результатов расчетов показал, что для достижения минимального времени формирования макрочастиц размером менее 4 мм необходимо соблюдать следующие условия: масса генератора $M < 50$ г, радиус пор $r_p < 0.05$ мм, суммарный объем пор не должен превышать четырехкратного объема макрочастицы, мощность охлаждения должна быть максимальной (не менее 7 W на уровне 4.2 K). Например, в генераторе массой 20 г и радиусом пор 0.03 мм, количеством запасенного топлива $n = 2.0$ и мощностью охлаждения 7 W время формирования твердородной макрочастицы размером 3 мм составит 0.5 с, а в случае использования дейтерия и трития в том же формирователе — соответственно 0.8 и 1.0 с.

Экспериментальные результаты

Цель экспериментов состояла в определении минимального времени формирования макрочастицы и сравнении его с рассчитанным по разработанной модели. Эксперименты проводились с генератором массой 77 г, установленным в инжекторе [13], оснащенном программируемым контроллером. Последовательность рабочих импульсов, вырабатываемых этим контроллером в цикле формирования и инжекции макрочастиц, приведена на рис. 5. Цикл начинался импульсом, открывавшим клапан с ускоряющим газом. Спустя 10 ms после открытия клапана на 0.4–0.8 с включался дополнительный нагреватель. Через 10–80 ms закрывался шиберный затвор. Твердый водород плавился в порах и стекал внутрь ствола. В течение всего времени эксперимента газообразный водород под давлением 0.1 МПа подавали во входной патрубок пористого генератора. Конструкция инжектора позволяла вести визуальное наблюдение за каналом ствола, в который сквозь пористую втулку проникал жидкий водород. Менее чем за 0.5 с после начала цикла водород плавился в порах и заполнял канал ствола. Далее в течение 6–7 с водород замерзал в стволе и шиберный затвор открывался. Спустя 1 с после этого производился очередной выстрел. Ускоряющий газ и газ, образовавшийся от удара и испарения макрочастицы о фланец диагностической камеры, откачивались насосом, и цикл повторялся. В установившемся режиме инжекции время формирования макрочастиц оказалось равным 8 с. Попытки уменьшить это время показали, что генератор способен формировать макрочастицы с интервалом в 6 с, однако в этих случаях видеозапись макрочастиц в полете часто регистрировала вдоль их оси мутный, видимо снежный, след. Надежность инжекции неразрушенных макрочастиц при этом снижалась с 80 до 50%.

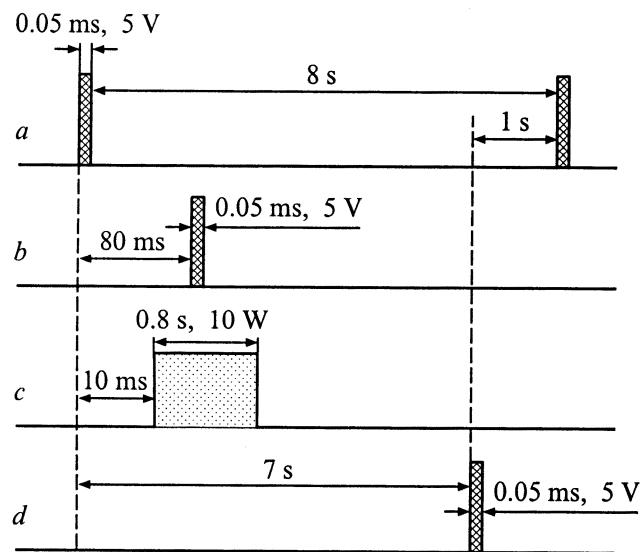


Рис. 5. Последовательность импульсов в цикле формирования и инжекции макрочастиц: a — открытие стреляющего клапана, b — закрытие шиберного затвора, c — дополнительный нагрев, d — открытие шиберного затвора.

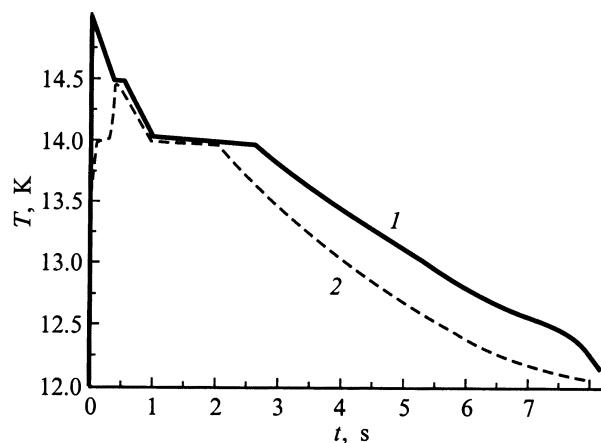


Рис. 6. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости температур генератора от времени в цикле формирования и инжекции водородных макрочастиц.

На рис. 6 приведены зависимости температуры генератора от времени в течение цикла. Кривой 1 показано изменение температуры, зарегистрированное датчиком, установленным вблизи пористой втулки, а кривой 2 — температурная зависимость, рассчитанная для данного генератора. Обе зависимости близки друг к другу, что доказывает допустимость применения разработанной модели для описания процессов в пористых генераторах и минимизации времени формирования макрочастиц. Зарегистрированная датчиком форма температурной зависимости генератора повторялась от выстрела к выстрелу, что свидетельствовало о стабильности его работы, а видеозапись макрочастиц в полете позволяла оценить их качество, размеры и скорость. Макрочастицы представляли собой столбики прозрачного льда без заметных трещин или сколов. Их диаметр равнялся 2.4 мм, а длина колебалась от 3 до 4 мм. Некоторое снижение диаметра макрочастицы по сравнению с внутренним диаметром ствола, равным 2.7 мм, объясняется трением и сублимацией с боковой поверхности во время движения в стволе и хорошо согласуется как с экспериментами на других инжекторах [3], так и с модельными расчетами [14]. Свыше тысячи макрочастиц было сформировано и ускорено в течение нескольких серий инжекции. Скорости частиц оценивались по их месту расположения относительно линейки, размещенной в кадре видеокамеры, и по задержке времени между вспышкой и моментом пересечения макрочастицей лазерного луча, сфокусированного на фотодетектор. Скорости колебались между 1.1 и 1.2 км/с при ускорении гелием и давлении 7 МПа.

Заключение

Завершен первый этап испытаний нового типа генераторов, обеспечивающих формирование, в установившемся периодическом режиме неограниченного числа макрочастиц термоядерного топлива. Генераторы названы пористыми, поскольку основным их элементом является

пористая втулка, заполненная твердым термоядерным топливом. В генераторе массой 77 г в стационарном режиме формировались твердородородные макрочастицы диаметром 2.4 мм и длиной 3–4 мм с частотой 0.125 Hz. Для увеличения частоты инжекции разработана модель расчета пористых генераторов, которая позволяет целенаправленно уменьшать время формирования макрочастиц за счет правильного выбора конструктивных параметров генератора. Представленные расчеты показывают, что в генераторе массой менее 50 г, содержащем поры диаметром менее 0.1 мм, частота формирования макрочастиц может достигать 1–2 Hz. На втором этапе планируются испытания генераторов массой около 40 и 30 г.

Достоинством новых генераторов является то, что в каждый момент времени в них находится топливо только в объеме нескольких макрочастиц, что делает эти генераторы более привлекательными для работы с тритием, чем применение экструдеров, содержащих сотни макрочастиц. Кроме того, в генераторе нет движущихся элементов, что повышает его надежность и позволяет рассматривать в качестве приемлемого технологического устройства для системы ввода топлива в длительно работающие термоядерные установки.

Авторы выражают свою признательность S. Sudo (NIFS) за поддержку и внимание к данной работе, а также за предоставленную возможность проведения ряда испытаний генератора в Национальном институте термоядерного синтеза (Япония).

Список литературы

- [1] Milora S., Houlberg W., Lenguel L., Mertens V. // Nucl. Fusion. 1995. Vol. 35. P. 657–754.
- [2] Combs S. // Rev. Sci. Instrum. 1993. Vol. 64. P. 1679–1698.
- [3] Combs S., Foust C., Qualls A. // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. P. 4012–4013.
- [4] Виняр И.В., Кутеев Б.В., Скобликов С.В. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 167–175.
- [5] Виняр И.В., Скобликов С.В., Кобленц П.Ю. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 5. С. 117–120.
- [6] Виняр И.В. // Патент РФ № 1611139. Открытия. Изобретения. 1997. Т. 15. С. 223.
- [7] Viniar I., Sudo S. // Rev. Sci. Instrum. 1997. Vol. 68. P. 1444–1447.
- [8] Фин П. // Равновесные капиллярные поверхности. М.: Мир, 1989. 312 с.
- [9] Souers P.C. // Hydrogen Properties for Fusion Energy. Berkeley: University of California Press, 1986. P. 391.
- [10] Теория теплообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. 495 с.
- [11] Газодинамические основы внутренней баллистики / Под ред. К.П. Станюковича. М.: Оборониздат, 1957. 354 с.
- [12] Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. М.: Химия, 1968. 512 с.
- [13] Viniar I., Umov A., Sudo S. // Plasma Devices and Operations. 1998. Vol. 6. N 1–3. P. 219–228.
- [14] Виняр И.В., Шляхтенко А.Н. // Изв. АН РФ. МЖГ. 1999. № 1. С. 3–11.