

## Шнековый экструдер твердого водорода

© И.В. Виняр, А. Я. Лукин

Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 21 мая 1998 г.)

Впервые создан и успешно испытан шнековый экструдер для непрерывного формирования твердородных макрочастиц, инжектируемых в плазму термоядерных установок. Разработана модель неизотермического течения водорода в канале шнека и рассчитаны зависимости производительности экструдера от его конструктивных параметров. Представлены расчеты и экспериментальные результаты по экструзии  $500 \text{ cm}^3$  твердого водорода из экструдера с рабочим объемом  $8 \text{ cm}^3$  и производительностью  $63 \text{ mm}^3/\text{s}$ . Показано, что в диапазоне температур от 10 до 13 К твердый водород ведет себя как бингамовское тело, и получены зависимости его вязкости и сдвиговой прочности от температуры.

### Введение

Пополнение топливом плазмы термоядерных установок производится как путем напуска газа, так и с помощью инъекции макрочастиц из отвержденных изотопов водорода. В стационарно работающие реакторы необходимо вбрасывать макрочастицы с частотой 1–10 Hz [1]. Для этого наряду с недавно предложенным инжектором с периодическим формированием макрочастиц за счет быстрого замораживания жидкой капли, поступающей в ствол сквозь пористую втулку [2,3], разрабатывается инжектор, в котором поочередно работают три поршневых экструдера, выдавливающие предварительно замороженный водород в виде стержня, из которого затем нарезаются макрочастицы [4]. Однако высокие требования к надежности системы инъекции макрочастиц в реактор ИТЭР, которая должна быть на уровне 99% [5], заставляют искать наиболее простые и надежные способы формирования макрочастиц. Разработанный в 1990–1994 гг. способ экструзии термоядерного топлива под действием давления того же топлива в газовой фазе [6] позволил накопить экспериментальные данные для разработки нового способа формирования макрочастиц на основе шнекового экструдера, описанного в этой работе.

### Описание и математическая модель экструзии

В обычных шнековых экструдерах рабочее тело поступает в канал шнека в твердом виде и по мере сдавливания и перемещения к экструзионной головке его температура повышается, а сдвиговая прочность и вязкость снижаются, обеспечивая экструзию. При экструзии водорода его температура, наоборот, должна снижаться по мере приближения к экструзионной головке для того, чтобы обеспечить конденсацию и затвердевание водорода в канале шнека. Снижение температуры ведет к увеличению прочности и вязкости водорода, однако при сжатии твердого водорода до давления свыше 5 МПа, необходимого для экструзии [3,6], происходит значительное тепловыделение. Оно часто вызывает нагрев и плавление

водорода в локальной зоне, что приводит к прекращению экструзии [7,8]. Поэтому в математической модели экструзии необходимо учитывать неизотермичность течения и сжатия твердого водорода, а также температурные зависимости его вязкости и напряжения сдвига.

Для определения реологических характеристик твердого водорода воспользуемся данными работы [6], в которой водород продавливался сквозь тонкий сужающийся канал. Анализ многочисленных моделей неньютоновских жидкостей показал, что течение пластичного водорода в интервалах температур от 10 до 13 К под давлением от 2.5 до 10 МПа можно описать на основе модели вязкопластичного тела Бингама. В этой модели материал является абсолютно жестким, если сдвиговое напряжение  $\tau$  ниже некоторого предельного значения  $\tau_0$ , и вязкой жидкостью, если напряжение выше этого предельного значения,

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{при} \quad \tau \leq \tau_0, \quad \mu \dot{\gamma} = \tau - \tau_0 \quad \text{при} \quad \tau > \tau_0.$$

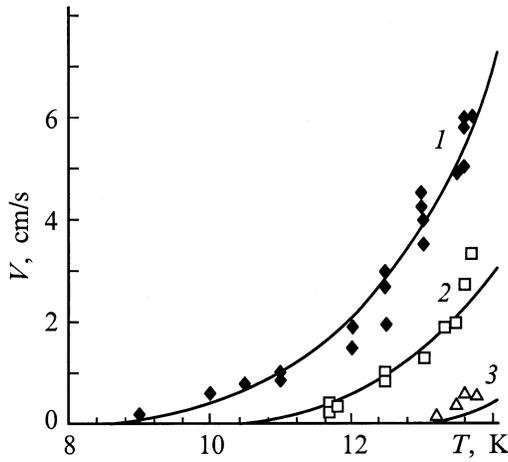
Здесь и далее  $\dot{\gamma}$  — скорость сдвиговой деформации,  $\mu$  — пластическая вязкость,  $\tau_0$  — начальное напряжение сдвига. Воспользуемся уравнением для изотермического установившегося течения вязкопластичной среды в прямой трубе с радиусом  $R$  вдоль оси  $z$

$$\frac{dP}{dz} = \frac{1}{r} \frac{d(r\tau_{rz})}{dr}. \quad (1)$$

Здесь  $P$  — давление в некотором сечении  $z$ , одинаковое по радиусу трубы  $r$ ;  $\tau_{rz}$  — компонента тензора деформаций. В предположении малой конусности используем уравнение (1) во всех точках трубы с текущим значением радиуса  $R$ ; выражая  $dP/dz$  через постоянный вдоль трубки расход  $Q$  и численно интегрируя по  $z$ , находим зависимость между  $P$  и  $Q$ . В случае трубки постоянного сечения интегрирование приводит к известной формуле Бекингема [9]

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{l} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{2\tau_0 l}{R\Delta P} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{2\tau_0 l}{R\Delta P} \right)^4 \right]. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta P$  — перепад давления на длине  $l$ . Воспользовавшись результатами экспериментов по экструзии водо-



**Рис. 1.** Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости скорости экструзии водорода от температуры: 1 — 10, 2 — 5.5, 3 — 2.5 МПа.

рода [6], представленными на рис. 1 в виде точек, можно последовательными итерациями получить расчетные зависимости начального напряжения сдвига  $\tau_0$  и вязкости  $\mu$  от температур. В расчетах начальное приближение для  $\tau_0$  определяется давлением, при котором скорость экструзии равна нулю, а для  $\mu$  — данными с максимальным расходом. Дальнейшие итерации приводят к следующим аппроксимациям для напряжения сдвига и вязкости:

$$\tau_0 = 0.026 \exp[0.28(T_s - T)] \text{ МПа},$$

$$\mu = 0.0027 \exp[0.44(T_s - T)] \text{ МПа} \cdot \text{с}, \quad (3)$$

где  $T$  и  $T_s$  — соответственно температуры водорода в интервале от 10 до 13 К и в тройной точке.

Расчетные зависимости скорости экструзии от температуры и давления показаны на том же рис. 1 сплошными линиями. Хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных доказывает, что течение твердого водорода при экструзии в диапазоне температур от 10 до 13 К удовлетворительно описывается моделью бингамовского тела с указанными параметрами. Следует заметить, что значения начального напряжения сдвига, рассчитанные по зависимости (3), практически совпадают с пределом текучести твердого водорода в диапазоне температур от 10 до 12 К и превышают его на 30% при температуре 13 К [10]. Те же соотношения (3) впервые дают значения коэффициента пластической вязкости твердого водорода, до сих пор в литературе не приводившиеся [10,11].

Используя полученные зависимости  $\tau_0$  и  $\mu$ , проведем моделирование течения водорода в шнековом экструдере. Описание процесса будем вести в системе координат, связанной со шнеком. В этой системе неподвижный шнек расположен внутри вращающегося в обратную сторону цилиндра, так что водород движется вдоль винтового канала к экструзионной головке. Канал шнека представим в виде развертки, пренебрегая его кривизной.

Положение точки в канале будем характеризовать следующими координатами (рис. 2):  $x$  и  $y$  — координаты в поперечном сечении винтового канала;  $0 \leq x \leq w$ ;  $0 \leq y \leq h$ ;  $w$  — ширина винтового канала;  $h$  — его глубина в данном сечении;  $z$  — координата, отсчитываемая вдоль канала. Как известно [12], для шнека диаметром  $D = 2R$  при  $h \ll Dw$  вполне удовлетворительные результаты могут быть получены без учета эффектов на краях канала и его кривизны. В этом случае движение вещества в канале шнека эквивалентно течению между двумя плоскостями, движущимися относительно друг друга. Уравнение движения и граничные условия к ним, записанные в предположении равенства нулю  $v_y$  по всему сечению канала, имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial z} \quad \text{при } 0 < x < w, \quad 0 < y < h,$$

$$\mu \dot{\gamma}_{xy} = \tau_{xy}(1 - \tau_0/\tau), \quad \mu \dot{\gamma}_{yz} = \tau_{yz}(1 - \tau_0/\tau) \quad \text{при } \tau > \tau_0,$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{при } \tau \leq \tau_0, \quad \tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2},$$

$$v_x = \int_0^y \dot{\gamma}_{xy} dy, \quad v_z = \int_0^y \dot{\gamma}_{yz} dy,$$

$$v_x(h) = \bar{\omega} R \sin \varphi, \quad v_z(h) = \bar{\omega} R \cos \varphi. \quad (4)$$

Здесь и далее  $\bar{\omega}$  — угловая скорость вращения шнека,  $\varphi$  — угол намотки шнека. Производительность или объемный расход экструдера  $Q$  записывается в виде

$$Q = \frac{w}{\sin \varphi} (q_z \sin \varphi - q_x \cos \varphi),$$

$$q_x = \int_0^h v_x dy, \quad q_z = \int_0^h v_z dy. \quad (5)$$

Здесь и далее  $q_x$  и  $q_z$  — компоненты потока водорода сквозь единицу ширины канала шнека  $w$ . В отсутствие утечек сквозь зазор между ребрами шнека и цилиндром поток  $q_x$  равен нулю и давление, развиваемое каждым витком шнека, может быть рассчитано из системы уравнений (4), (5). Рассматривая перепад давления между ближайшими витками, поток утечки можно приближенно определить из уравнений

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial x} \quad \text{при } w < x < w + s, \quad h - \delta < y < h,$$

$$\mu \dot{\gamma}_{xy} = \tau_{xy}(1 - \tau_0/\tau) \quad \text{при } \tau > \tau_0,$$

$$q_{x\delta} = \int_{h-\delta}^h v_x dy, \quad v_x = \int_{h-\delta}^h \dot{\gamma}_{xy} dy,$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{при } \tau \leq \tau_0. \quad (6)$$

Здесь  $s$  — ширина ребра шнека;  $\delta$  — высота зазора между шнеком и цилиндром, которая обычно составляет  $(0.001-0.002)R$  [13]. Компонента потока вдоль оси  $z$  в

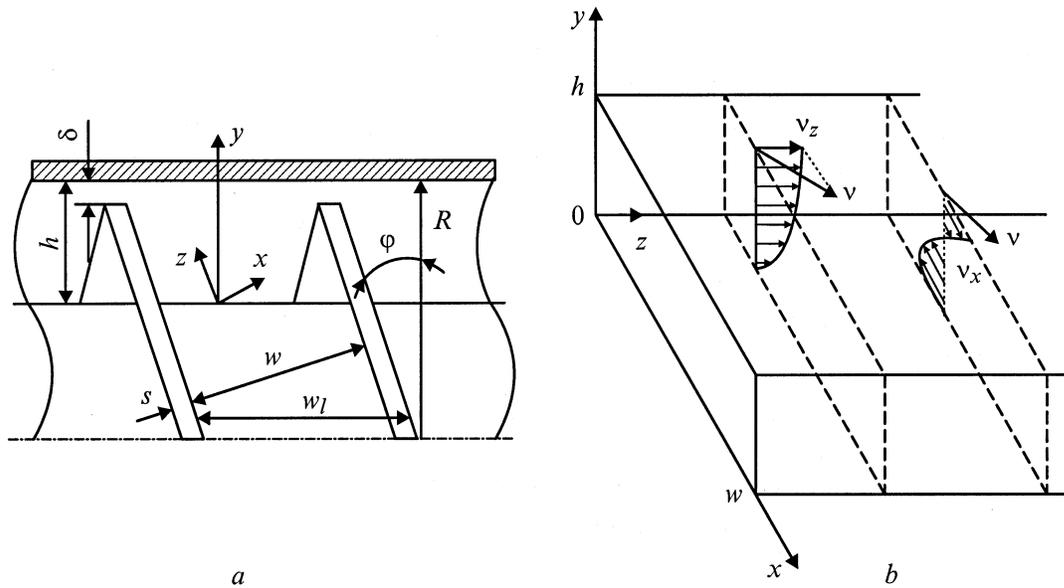


Рис. 2. Схема экструдера (а) и развертки канала шнека с эпюрами проекций скоростей (b).

зазоре  $\delta$  не дает существенного вклада в поток утечки и ею можно пренебречь. Для учета потока утечки в расчете производительности экструдера поток  $q_x = q_{x\delta}$  должен быть использован вместо потока  $q_x = 0$  в уравнении (5).

Уравнения (4)–(6) дают зависимость между  $Q$  и  $dP/dz$ . Характерные распределения скоростей  $v_x$  и  $v_z$  по высоте  $y$  показаны на рис. 2, b. В силу особенностей среды Бингама область течения содержит неподвижное или движущееся как единое целое ядро, в котором  $\tau < \tau_0$ , и одну или две зоны вязкого трения.

При движении вязкопластичной среды в области пластической деформации выделяется тепло, локальная мощность тепловыделения при этом равна

$$W = \mu [(\dot{\gamma}_{xy})^2 + (\dot{\gamma}_{yz})^2]. \quad (7)$$

Охлаждение экструдера осуществляется потоком гелия с температурой  $T_1$ , коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$  и массовым расходом  $g = c_p G$ , где  $G$  и  $c_p$  — массовый поток и удельная теплоемкость гелия при постоянном давлении. Так как цилиндр экструдера тонкостенный и изготовлен из меди, будем предполагать, что температура цилиндра одинакова по сечению цилиндра и равна температуре водорода в этом сечении. В свою очередь температура водорода по оси  $y$  также одинакова из-за интенсивного перемешивания. Уравнения теплового баланса, учитывающие теплопроводность по материалу экструдера, перенос энтальпии потоком водорода и теплообмен имеют вид

$$\frac{d}{dl} \left( -S\lambda \frac{dT}{dl} + \rho QH \right) = 2\pi R \left[ \int_0^h W dy + \alpha(T_1 - T) \right],$$

$$\frac{d}{dl} (gT_1) = 2\pi R \alpha (T - T_1). \quad (8)$$

Здесь  $S$  — площадь сечения стенки цилиндра;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала цилиндра;  $\rho$  — плотность водорода;  $H$  — энтальпия водорода, учитывающая теплоту кристаллизации;  $T$  — температура цилиндра в некотором сечении. Предполагается, что водород поступает в экструдер в жидком состоянии при температуре кристаллизации.

Решение системы уравнений (4)–(8) позволяет определить зависимость производительности экструдера от его размеров и параметров процесса.

## Результаты расчетов и экспериментов

Основной характеристикой экструдера является зависимость между его производительностью и развиваемым шнеком давлением. На рис. 3 кривыми 1–4 представлены характеристики экструдера при различных скоростях вращения шнека. В расчетах в качестве параметров зафиксированы радиус шнека  $R = 6$  mm, глубина канала шнека  $h = 2$  mm, шаг винтовой нарезки  $w_l = 12$  mm, расход жидкого гелия  $g = 5$  l/h, температура гелия на входе в охлаждающей экструдер теплообменник  $T_1 = 5$  K, зазор между шнеком и цилиндром  $\delta = 0.05$  mm, толщина ребра шнека  $s = 2$  mm. Видно, что с увеличением скорости вращения шнека от 10 до 25 rpm максимальная производительность экструдера возрастает, но одновременно уменьшается давление водорода, развиваемое шнеком. Если диаметр отверстия экструзионной головки на выходе экструдера равен внутреннему диаметру цилиндра экструдера, то  $P = 0$  и производительность экструдера достигает  $160$  mm<sup>3</sup>/s. По мере уменьшения отверстия развиваемое шнеком давление растет и при малых  $Q$  достигает 25–60 МПа. Рабочая точка экструдера определяется сопротивлением экструзионной головки, которое можно приближенно рассчитать из

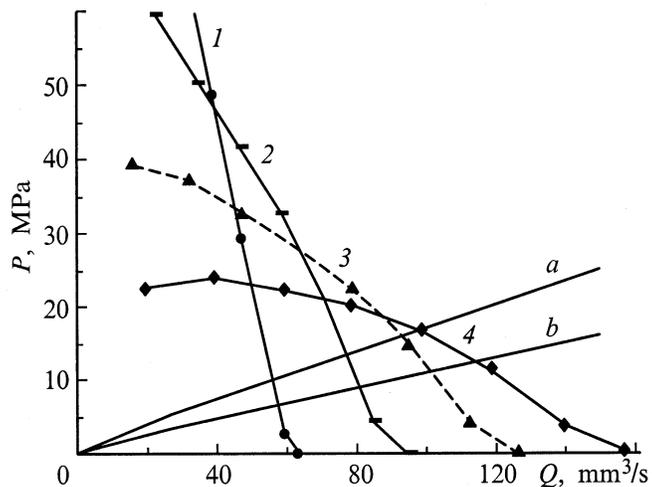


Рис. 3. Характеристики экструзионной головки ( $a$  и  $b$ ) и экструдера (1–4) при  $\omega$ , грт: 1 — 10, 2 — 15, 3 — 20, 4 — 25 и температуре водорода в головке 10 ( $a$ ) и 11 К ( $b$ ).

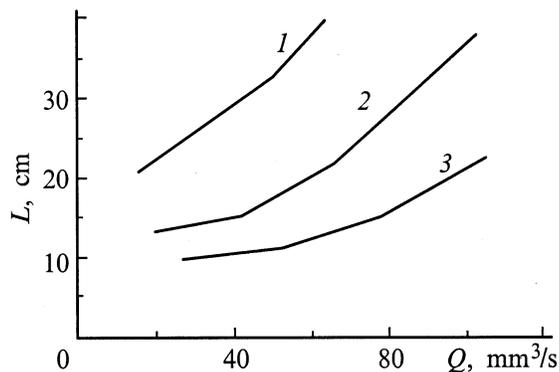


Рис. 4. Рабочая длина экструдера  $L$  в зависимости от производительности  $Q$  и скорости вращения шнека: 1 — 15, 2 — 20, 3 — 25 грт.

уравнения (2). На рис. 3 и далее кривыми  $a$  и  $b$  представлены характеристики головки с диаметром отверстия 2 мм и длиной канала 4 мм с температурами 10 и 11 К соответственно. Точки пересечения этих характеристик с характеристиками экструдера определяют производительность экструдера с данной головкой и давление в водороде, развиваемое шнеком. Поскольку для экструзии водородного льда при температуре 10–11 К необходимо сжимать его до давления, превышающего 10 МПа [6], то параметры рабочего режима экструдера следует выбирать из точек пересечения характеристик, лежащих выше этого значения. Видно, что стабильный режим экструзии с производительностью от 60 до 115  $\text{mm}^3/\text{s}$  твердого водорода можно получить при вращении шнека со скоростями от 10 до 25 грт и варьировании температуры головки от 10 до 11 К. При вращении с большей скоростью экструзия замедляется и прекращается. Это происходит потому, что при быстром вращении шнека

водород нагревается сильнее вследствие интенсивного перемешивания, вязкость его уменьшается и давление, развиваемое шнеком, снижается. Выделяющееся тепло отводится к гелию, который быстрее нагревается и не способен охладить то же количество водорода в экструдере от температуры плавления до температуры головки. Если под рабочей длиной экструдера понимать расстояние, на котором водород по мере перемещения к головке успевает охладиться от температуры плавления до температуры головки, то при повышении скорости вращения уменьшаются рабочая длина экструдера и число витков шнека, сжимающих твердый водород, как видно из рис. 4. Эти витки шнека не создают достаточного давления для поддержания экструзии, а жидкий водород, заполняющий часть экструдера выше рабочих витков шнека, может привести к его неустойчивой работе.

Пример влияния мощности охлаждения на производительность экструдера при вращении шнека со скоростью 15 грт показан на рис. 5. Видно, что увеличение расхода гелия через теплообменник сдвигает рабочие точки экструдера в сторону большей производительности. При этом увеличивается развиваемое шнеком давление водорода, что обеспечивает устойчивость экструзии в более широких интервалах.

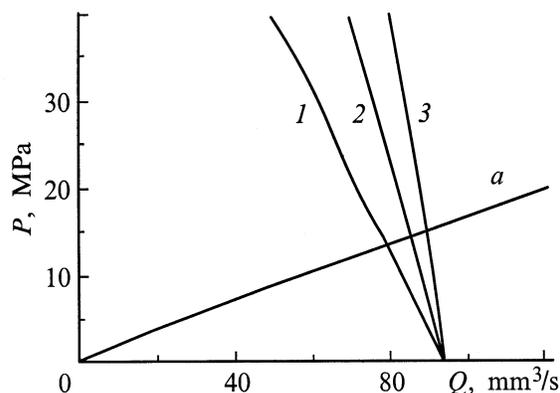


Рис. 5. Характеристики головки ( $a$ ) и экструдера (1–3). Поток жидкого гелия через теплообменник: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15 л/чур.

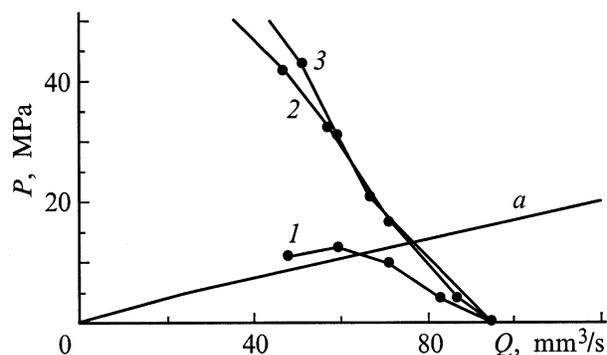


Рис. 6. То же, что на рис. 5, при различных глубинах канала шнека: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3 мм.

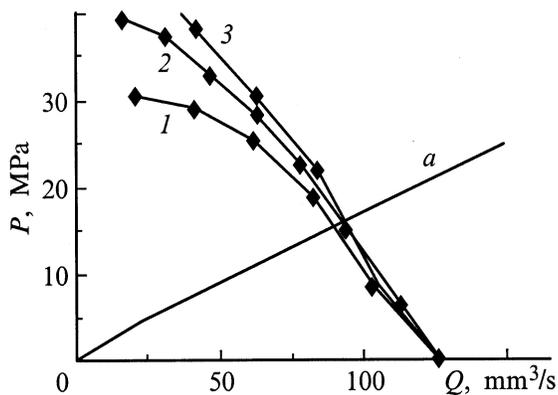


Рис. 7. То же, что на рис. 5, при различных радиусах шнека: 1 — 5, 2 — 6, 3 — 7 mm.

Влияние глубины канала и радиуса шнека на характеристики экструдера представлено на рис. 6 и 7. Для сопоставимости расчетов при разных глубинах  $h$  произведение  $h\bar{\omega}$  поддерживалось постоянным и равным  $3 \text{ mm}^2/\text{s}$ , а для разных радиусов шнека  $R$  произведение  $w_l R \bar{\omega}$  выбиралось постоянным и равным  $36 \text{ mm}^2/\text{s}$ , причем  $w_l = 2R$ . При изотермической экструзии развиваемое шнеком давление увеличивается при уменьшении глубины его канала. В реальном неизотермическом процессе уменьшение глубины канала шнека приводит к резкому увеличению тепловыделения, что вызывает уменьшение вязкости водорода и рабочей длины экструдера и приводит к снижению давления. Из рис. 6 видно, что при производительности  $Q = 75 \text{ mm}^3/\text{s}$  примерно одинаковое давление шнек развивает при глубине канала 2 и 3 mm, но с точки зрения однородности температуры по высоте канала и уменьшению количества водорода (а в будущем и трития) в экструдере выгоднее использовать шнек с меньшей глубиной канала.

Увеличение радиуса шнека улучшает теплоотдачу от водорода в гелий и приводит к повышению давления в экструдере, как видно из рис. 7. Это повышает устойчивость режима его работы.

Исходя из проведенных расчетов для экструзии твердородородного стержня диаметром 2 mm со средней скоростью  $20 \text{ mm/s}$ , был сконструирован экструдер со следующими параметрами: радиус шнека  $R = 6 \text{ mm}$ , глубина канала шнека  $h = 2 \text{ mm}$ , шаг нарезки  $w_l = 12 \text{ mm}$ , длина экструдера  $L = 150 \text{ mm}$ , зазор между шнеком и цилиндром экструдера  $\delta = 0.05 \text{ mm}$ , толщина ребра шнека  $s = 2 \text{ mm}$ , диаметр отверстия головки 2 mm, длина головки 4 mm, температура головки 10–11 K, производительность  $Q = 60\text{--}115 \text{ mm}^3/\text{s}$ , давление экструзии  $P = 10\text{--}20 \text{ MPa}$ , скорость вращения шнека  $\bar{\omega} = 10\text{--}25 \text{ rpm}$ , объем водорода в экструдере  $< 8 \text{ cm}^3$ . Пар жидкого гелия, охлаждающий экструдер с твердым водородом, использовался в дополнительном теплообменнике для превращения газообразного водорода в жидкий перед подачей в экструдер. Конструкция экструдера

и методика экспериментов описаны в предыдущей работе [14]. В экспериментах экструзия прекращалась и возобновлялась без задержек при выключении/включении мотора, вращающего шнек. В течение всего времени эксперимента температура экструдера поддерживалась на уровне 10–11 K. Водород постоянно поступал из баллона в камеру экструдера, замерзал там, после экструзии испарялся и откачивался форвакуумным насосом. Длительность непрерывной экструзии составляла более часа и ограничивалась только объемом камеры ( $100 \text{ cm}^3$ ), в которую поступал твердый водород после экструзии. Поэтому периодически в эту камеру производился импульсный напуск гелия при комнатной температуре, который ускорял испарение уже выдавленного водорода и увеличивал объем камеры для приема новой порции водорода. Экструдированный стержень водорода имел прозрачный вид, что свидетельствует о хорошем качестве льда. Всего более  $500 \text{ cm}^3$  водородного льда было экструдировано в непрерывном режиме без видимого ухудшения качества льда. Поскольку одномоментно объем водорода в экструдере не превышал  $8 \text{ cm}^3$ , то можно говорить о достижении стационарного непрерывного режима замораживания и экструзии водорода.

Время от времени из экструдированного стержня острым торцом тонкостенной трубки в периодическом режиме нарезались макрочастицы, которые затем ускорялись сжатым гелием, подаваемым внутрь этой же трубки. Несколько тысяч макрочастиц размером около 2 mm были сформированы с частотой от 1 до 5 Hz и ускорены до  $0.3\text{--}0.6 \text{ km/s}$  таким способом. Частицы фотографировались после ускорения в диагностической камере, и никакого ухудшения со временем качества экструдированного льда или сформированных частиц обнаружено не было.

На рис. 8 точками показаны экспериментально измеренные значения скорости экструзии. Там же сплошной линией показана расчетная зависимость скорости экструзии от угловой скорости вращения шнека при температуре водорода на выходе из экструдера 10 K. Видно, что при увеличении скорости вращения свыше

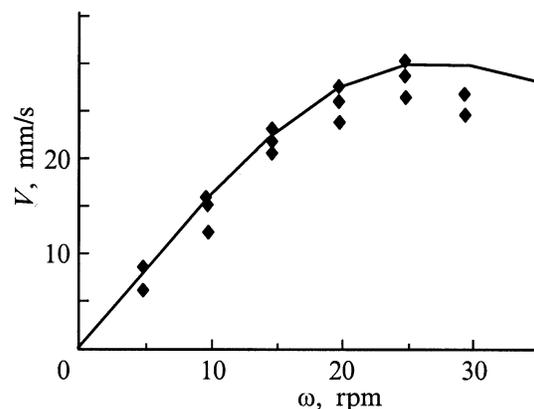


Рис. 8. Зависимость скорости экструзии от скорости вращения шнека.

25 грп происходят замедление роста и даже снижение скорости экструзии стержня. Это еще раз подтверждает существенное влияние тепловыделения при сжатии водорода на развиваемое шнеком давление и скорость экструзии.

Наиболее устойчиво экструдер работал при скорости вращения шнека 15 грп. Скорость экструзии водорода составляла при этом  $20 \pm 4$  мм/с, что соответствует средней производительности  $63 \pm 13$  мм<sup>3</sup>/с. Из рис. 3 видно, что эта производительность лежит в области расчетных параметров экструдера.

## Заключение

Разработанный способ формирования топливных макрочастиц на основе шнекового экструдера может использоваться во всех типах инжекторов для подпитки топливом термоядерных установок. Разработанная модель экструдера позволяет рассчитывать его конструктивные параметры исходя из заданных размеров и частоты формирования макрочастиц. Продемонстрировано хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными по экструзии водородного стержня диаметром 2 мм из шнекового экструдера с производительностью 63 мм<sup>3</sup>/с.

Авторы выражают признательность за поддержку и полезные обсуждения М. Gouge (Ок-Риджская национальная лаборатория, США), а также С. Скобликову и П. Кобленцу (Санкт-Петербургский государственный технический университет) за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке LIRAL Group (Canada).

## Список литературы

- [1] Milora S., Houlberg W., Lenguel L., Mertens V. // Nucl. Fusion. 1995. Vol. 35. P. 657–754.
- [2] Виняр И.В. А.с. № 1611139 РФ. БИ. 1997. № 15. С. 223.
- [3] Viniar I., Subo S. // Rev. Sci. Instrum. 1997. Vol. 68. P. 1444–1447.
- [4] Combs S. // Rev. Sci. Instrum. 1993. Vol. 64. P. 1679–1698.
- [5] Gouge M., Onge K., Milora S. et al. // Fusion Engineering and Design. 1992. Vol. 19. P. 53–72.
- [6] Виняр И.В., Кутеев Б.В., Скобликов С.В. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 167–175.
- [7] Towle L. // J. Phys. Chem. Solids. 1965. Vol. 26. P. 659–663.
- [8] Rahman H., Ruden E., Strohmaier et al. // Rev. Sci. Instrum. 1996. Vol. 67. P. 3533–3536.
- [9] Лойцянский Л. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
- [10] Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение / Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. М.: Химия, 1989. 672 с.
- [11] Souers P. Hydrogen Properties for Fusion Energy. Berkeley: University of California Press, 1986. 596 p.
- [12] Рябинин Д., Лукач Ю. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей. М.: Машиностроение. 1965. 363 с.
- [13] Оборудование предприятий по переработке пластмасс / Под ред. В.К. Завгороднего. Л.: Химия, 1972. 464 с.
- [14] Виняр И.В., Скобликов С.В., Кобленц П.Ю. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 5. С. 117–120.