

УДК 621.3; 539.1

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ БЕЗ ОКОН

В.-Ф. Ян<sup>\*,\*\*</sup>, В.-П. Дэн<sup>\*</sup>, С.-Я. Чзан<sup>\*,\*\*</sup>

\* Институт современной физики Академии наук Китая, 730000 Ланьчжоу, Китай

\*\* Школа ядерной физики и технологии Университета Академии наук Китая,  
10049 Пекин, Китай

E-mails: yangwf@impcas.ac.cn, dengwp@impcas.ac.cn, zhxy@impcas.ac.cn

Приводятся результаты экспериментального и численного исследования характера течения со свободной поверхностью в жидкометаллической мишени без окон, являющейся основной частью ускоряемых систем. Эксперименты выполнены с использованием замкнутого цикла для жидкого галлия, численное моделирование проведено с помощью пакета ANSYS CFX на основе трехмерной модели мишени. Рабочие параметры мишени измерялись в эксперименте и затем использовались в краевых условиях при численном моделировании. Показано, что определенная при численном моделировании высота, на которой расположена свободная поверхность, соответствует экспериментальным данным. С увеличением скорости входного потока и уменьшением давления на выходе высота, на которой расположена свободная поверхность, уменьшается. В результате численного моделирования установлено, что ниже выходного отверстия внутренней трубки мишени образуются зоны стагнации, представляющие собой большие вихри, и области обратного течения.

Ключевые слова: ускоряемые системы, жидкий металл, мишени без окон, свободная поверхность, зоны застоя.

DOI: 10.15372/PMTF20200312

**Введение.** При длительном использовании ядерной энергии, а также при разработке эффективных способов захоронения отработавшего топлива и ядерных отходов, образующихся на атомных электростанциях, необходимо максимально снизить потенциальные риски, обусловленные наличием высокоактивных и долгоживущих нуклидов [1]. В настоящее время с целью уменьшения рисков при обращении с ядерными отходами широко применяются ядерные системы, управляемые ускорителем (acceleration driven system (ADS)). С использованием результатов исследований работы таких систем можно создавать усовершенствованные системы, управляемые ускорителем [2]. ADS состоят из трех основных систем: ускорителя интенсивного пучка протонов, мощной расщепляемой мишени и докритического реактора. В ADS докритический реактор приводится в действие и поддерживается в нормальном режиме для осуществления трансмутации ядерных отходов

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 11505258) и в рамках Программы стратегических исследований Академии наук Китая (грант № XDA03030300).

© Ян В.-Ф., Дэн В.-П., Чзан С.-Я., 2020

Таблица 1

Физические параметры жидкого галлия при  $T = 323$  К [9]  
и свинцово-висмутовой эвтектики при  $T = 673$  К [10]

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>		$\mu \cdot 10^3$ , Па·с		$\sigma$ , Н/м	
	Выражение	Значение	Выражение	Значение	Выражение	Значение
Галлий	$6077 - 0,611 \times (T - 302,914)$	6065	$10^{-0,4465+204,03/T}$	1,532	$715,3 - 0,09 \times (T - 302,92)$	0,713
Свинцово-висмутовая эвтектика	$11\,096 - 1,3236T$	10 205	$0,494 e^{754,15/T}$	1,515	$0,437 - 6,6 \cdot 10^{-5}T$	0,393

экзогенными отщепленными нейтронами, которые генерируются протонным пучком, разрушающим мишень, изготовленную из тяжелых металлов. Следовательно, ADS обеспечивает необходимую степень защиты [3]. Расщепляемая мишень является одним из основных элементов ADS, связывающих ускоритель и реактор. От типа мишени зависит мощность всей системы.

В последнее время проводятся интенсивные исследования жидких мишеней как с окнами, так и без окон. Жидкие мишени выполняют две функции, являясь, с одной стороны, материалом, в котором происходит реакция расщепления, с другой — охлаждающей средой [4]. Использование жидких мишеней без окон для увеличения мощности ADS более перспективно, поскольку в этом случае не требуется выбирать материал для окон. Управляя внутренним потоком в мишенях без окон, можно формировать свободную поверхность, которая поддерживает высокий вакуум внутри ускорителя. Поскольку падающий луч проникает в мишень через свободную поверхность, результаты исследований структуры течения со свободной поверхностью имеют большое значение при проектировании жидкометаллических мишеней. Не менее важным является изучение характеристик течения, влияющих на процесс переноса тепла в жидкой мишени.

В работах [5–7] представлены результаты исследований мишеней без окон, имеющих кольцевой канал и сопло.

В данной работе экспериментально и численно изучается течение со свободной поверхностью в жидкокристаллической мишени без окон со стандартными геометрическими размерами.

**1. Эксперименты.** В настоящее время в ускоряемых системах в качестве материала расщепляемой мишени широко используется свинцово-висмутовая эвтектика [8]. Однако при проведении экспериментов со свинцово-висмутовой эвтектикой в жидком состоянии необходимо строго соблюдать как условия экспериментов, так и требования к используемому оборудованию. Модельные эксперименты, как правило, проводятся с веществами, для которых не требуется строгое выполнение указанных условий. Одно из таких веществ — галлий, имеющий низкую температуру плавления ( $29,78$  °С), высокую температуру кипения ( $2403$  °С) и не являющийся токсичным. В экспериментах, результаты которых приведены ниже, вместо свинцово-висмутовой эвтектики, нагретой до температуры  $400$  °С, использовался галлий, нагретый до температуры  $50$  °С. В табл. 1 приведены значения плотности  $\rho$ , вязкости  $\mu$  и поверхностного натяжения  $\sigma$  для жидкого галлия и жидкой свинцово-висмутовой эвтектики.

Согласно проектной схеме V0.10 ускорителя XT-ADS с расщепляемой мишенью без окон (прототип мишени) [11] диаметр внутренней трубки мишени составляет приблизительно  $917$  мм (эта величина используется в качестве характерной длины  $L_p$ ), средняя

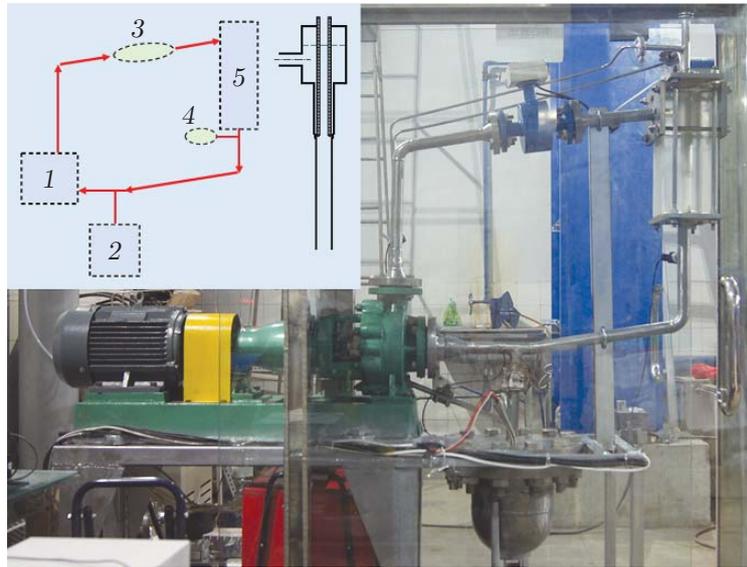


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) экспериментального контура:

1 — центробежный насос, 2 — накопительная емкость, 3 — электромагнитный скоростемер, 4 — датчик давления, 5 — мишень

скорость на входе  $v_p$  (используется в качестве характерной скорости) для мишени из жидкой свинцово-висмутовой эвтектики составляет приблизительно 0,81 м/с, при этом максимальная скорость не превышает 2 м/с. Поскольку в случае мишени без окон сила тяжести играет существенную роль в процессе расщепления, выбор критерия подобия Фруда при конструировании модели мишени имеет большое значение. Число Фруда  $Fr$  (безразмерная величина), характеризующее подобие Фруда, определяется следующим образом:

$$Fr = v / \sqrt{gL}.$$

Здесь  $v$  — скорость жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения;  $L$  — характерная длина. Критерий подобия Фруда означает, что числа Фруда для мишени и ее прототипа равны:

$$v_p / \sqrt{gL_p} = v_m / \sqrt{gL_m}$$

(индекс  $p$  соответствует прототипу мишени, индекс  $m$  — модели мишени). При конструировании модели мишени была выбрана характерная длина  $L_m = 220$  мм, поэтому средняя скорость жидкого галлия на входе в экспериментальную мишень составляла  $v_m = 0,44$  м/с, максимальная скорость жидкого галлия не превышала 1,1 м/с.

Мишень помещалась в уменьшенный экспериментальный замкнутый контур жидкого металла (рис. 1). Замкнутый контур и мишень помещались в термостат, температура внутри которого приближенно равна 50 °С. Основными элементами мишени являются внутренняя трубка и внешний контейнер. В зависимости от рабочих параметров свободная поверхность образуется либо во внутренней трубке, либо ниже ее выходного отверстия. Канал в мишени, по которому течет галлий, состоит из трех секций: верхней секции, являющейся буферной емкостью, средней секции, состоящей из кольцевого канала и переходной трубки, и нижней секции, представляющей собой прямолинейную трубку (секции выходящего потока).

Сначала твердый галлий плавится путем нагревания в буферной емкости, затем жидкий галлий впрыскивается в замкнутый контур и мишень. Под высотой  $h$  свободной поверхности понимается расстояние от свободной поверхности жидкого галлия во внутренней трубке мишени до ее выходного отверстия. Начальная высота свободной поверхности

Таблица 2  
Экспериментальные значения параметров мишени без окон

Вариант рабочих параметров	$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$p_{out}$ , кПа	$h$ , мм
I	0,25	23,4	168
II	0,50	22,5	145
III	0,76	20,8	112
IV	1,02	18,8	72
V	1,26	16,9	19
VI	1,37	16,5	5
VII	1,45	16,2	2

$h_0 = 177$  мм. На свободной поверхности поддерживается постоянное давление, равное 1 атм  $\approx 101,325$  кПа. Центробежный насос предназначен для прокачивания жидкого галлия по замкнутому контуру. Скорость потока в замкнутом контуре регулируется скоростью вращения центробежного насоса. В зависимости от скорости потока рассматриваются семь вариантов рабочих параметров мишени (варианты I–VII). Значения основных параметров мишени (начального расхода потока  $Q$ , давления на выходе  $p_{out}$ , высоты свободной поверхности  $h$ ), измеренных при установившемся течении, приведены в табл. 2. Из экспериментальных данных следует, что высота свободной поверхности непрерывно уменьшается при изменении начального расхода от варианта I к варианту VII.

**2. Метод численного моделирования.** С использованием пакета ANSYS CFX 16.1 выполнено численное моделирование течения двухфазного потока газ — жидкость в экспериментальной мишени без окон для семи вариантов рабочих параметров. Газовая фаза представляла собой воздух, температура которого равна 25 °С, жидкая фаза — галлий, температура которого составляет 50 °С. В эксперименте число Рейнольдса для мишени находилось в интервале значений  $Re = 10^4 \div 10^5$ . Следовательно, течение в мишени было полностью турбулентным. При численном моделировании для описания турбулентного течения использовалась  $(k-\varepsilon)$ -модель турбулентности. Достоверность результатов численного моделирования развитого турбулентного течения, полученных с использованием  $(k-\varepsilon)$ -модели, подтверждается экспериментальными данными [12, 13]. При моделировании течения двухфазного потока использовался подход Эйлера — Эйлера [14]. Для вычисления силы межфазного сопротивления, входящей в уравнения движения, применялся алгоритм, предложенный в [15].

В данной работе индексом  $\alpha = L$  отмечены величины, соответствующие жидкой фазе,  $\alpha = G$  — величины, соответствующие газовой фазе. Время обозначено через  $t$ . Пространственным координатам  $x, y, z$  соответствуют индексы  $i = 1, 2, 3$ . Использовались следующие основные гидродинамические величины: компоненты вектора скорости  $u_{\alpha,i}$ , объемная доля фаз  $r_\alpha$  ( $r_L + r_G = 1$ ), давление  $p_\alpha$ , кинетическая энергия турбулентного течения  $k_\alpha$ , скорость диссипации энергии  $\varepsilon_\alpha$ . Движение жидкой и газовой фаз описывают следующие уравнения гидродинамики:

— уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i} (r_\alpha \rho_\alpha u_{\alpha,i}) = 0; \quad (1)$$

— уравнение сохранения объема

$$\frac{1}{\rho_L} \left( \frac{\partial}{\partial t} (r_L \rho_L) + \frac{\partial}{\partial x_i} (r_L \rho_L u_{L,i}) \right) + \frac{1}{\rho_G} \left( \frac{\partial}{\partial t} (r_G \rho_G) + \frac{\partial}{\partial x_i} (r_G \rho_G u_{G,i}) \right) = 0; \quad (2)$$

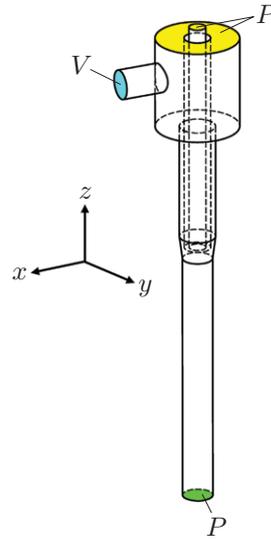


Рис. 2. Модель экспериментальной мишени

— уравнение движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha u_{\alpha,i}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (r_\alpha \rho_\alpha u_{\alpha,i} u_{\alpha,j}) = \\ = -r_\alpha \frac{\partial p_\alpha}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ r_\alpha (\mu_\alpha + \mu_{t,\alpha}) \left( \frac{\partial u_{\alpha,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{\alpha,j}}{\partial x_i} \right) \right] + S_{b,\alpha,i} + F_\alpha + M_{\alpha,i}^D; \end{aligned} \quad (3)$$

— уравнение изменения кинетической энергии турбулентности

$$\frac{\partial (r_\alpha \rho_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial (r_\alpha \rho_\alpha u_{\alpha,j} k_\alpha)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ r_\alpha \left( \mu_\alpha + \frac{\mu_{t,\alpha}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_\alpha}{\partial x_j} \right] + r_\alpha (P_{k,\alpha} - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha); \quad (4)$$

— уравнение для скорости диссипации энергии

$$\frac{\partial (r_\alpha \rho_\alpha \varepsilon_\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial (r_\alpha \rho_\alpha u_{\alpha,j} \varepsilon_\alpha)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ r_\alpha \left( \mu_\alpha + \frac{\mu_{t,\alpha}}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial x_j} \right] + r_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_{1\varepsilon} P_{k,\alpha} - C_{2\varepsilon} \rho_\alpha \varepsilon_\alpha). \quad (5)$$

В уравнениях (1)–(5)  $\mu_t$  — турбулентная вязкость;  $S_b$  — сила плавучести;  $F$  — сила поверхностного натяжения;  $M^D$  — сила межфазного сопротивления;  $P_k$  — генерируемая кинетическая энергия турбулентности;  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$  — постоянные.

В соответствии с геометрическими размерами экспериментальной мишени для проведения численного моделирования разработана упрощенная трехмерная модель мишени (рис. 2). На входе задавалась скорость потока  $V$ , на выходе и межфазных (жидкость — газ) поверхностях формулировались краевые условия для давления  $P$ . Расход жидкости на входе и давление на выходе задавались равными величинам, измеренным в эксперименте. Давление на межфазных поверхностях полагалось постоянным и равным 1 атм  $\approx 101,325$  кПа.

С использованием расчетных сеток различного размера вычислены характеристики течения при значениях рабочих параметров мишени, соответствующих варианту V. Результаты численного моделирования приведены в табл. 3 ( $N$  — число ячеек расчетной сетки,  $h$  — высота свободной поверхности,  $v_c$  — скорость потока,  $p_c$  — относительное давление). Все величины соответствуют точке с координатами  $x = 12,5$  мм,  $y = 0$  на выходе из кольцевой секции внутренней трубки. При числе ячеек расчетной сетки, большем

Таблица 3  
Результаты численных экспериментов

$N$	$h$ , мм	$v_c$ , м/с	$p_c$ , кПа
456 373	26	1,084	3,993
1 036 596	22	1,094	3,983
2 044 540	21	1,099	3,987
3 571 853	20	1,088	4,022
4 926 152	20	1,091	4,008

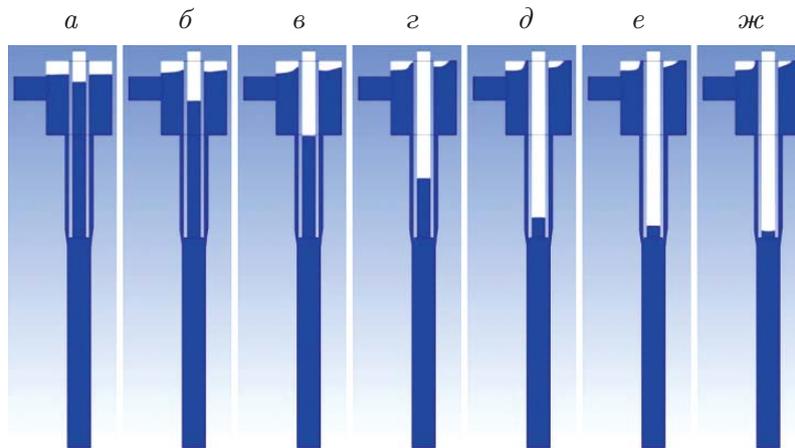


Рис. 3. Распределение газа и жидкости в  $(x, z)$ -сечении мишени при различных вариантах рабочих параметров:  
 $a$ – $ж$  — варианты I–VII соответственно

$3,5 \cdot 10^6$ , результаты расчетов практически не меняются. Поэтому при численном моделировании использовалась расчетная сетка, содержащая приблизительно  $3,5 \cdot 10^6$  ячеек.

**3. Результаты исследования и их обсуждение.** На рис. 3 приведено распределение газа и жидкости в  $(x, z)$ -сечении мишени при различных вариантах рабочих параметров. При изменении рабочих параметров мишени от варианта I к варианту VII высота свободной поверхности во внутренней трубке постепенно уменьшается, а в накопительной емкости — увеличивается. Несмотря на то что расход жидкости в кольцевой сужающейся области, находящейся вблизи выходного отверстия внутренней трубки, увеличивается, давление в этой области уменьшается. Вследствие этого жидкость постепенно вытекает из внутренней трубки и высота свободной поверхности в ней уменьшается. Вытекшая из внутренней трубки жидкость переносится по замкнутому контуру в накопительную емкость. Таким образом, рабочие параметры мишени оказывают существенное влияние на процесс образования свободной поверхности.

Согласно экспериментальным данным основными параметрами, влияющими на работу мишени, являются расход жидкости и давление на выходе из мишени. Экспериментальные и полученные в результате численного моделирования нелинейные зависимости высоты свободной поверхности от расхода жидкости приведены на рис. 4,  $a$ . Эти зависимости хорошо согласуются, что подтверждает достоверность результатов численного моделирования. При  $Q > 1,3 \text{ м}^3/\text{ч}$  скорость убывания величины  $h$  существенно уменьшается. Помимо расхода жидкости на процесс формирования свободной поверхности существенно влияет давление на выходе. На рис. 4,  $b$  приведена зависимость высоты свободной поверхности от давления на выходе. Зависимость  $h(p_{out})$  является линейной, поэтому для

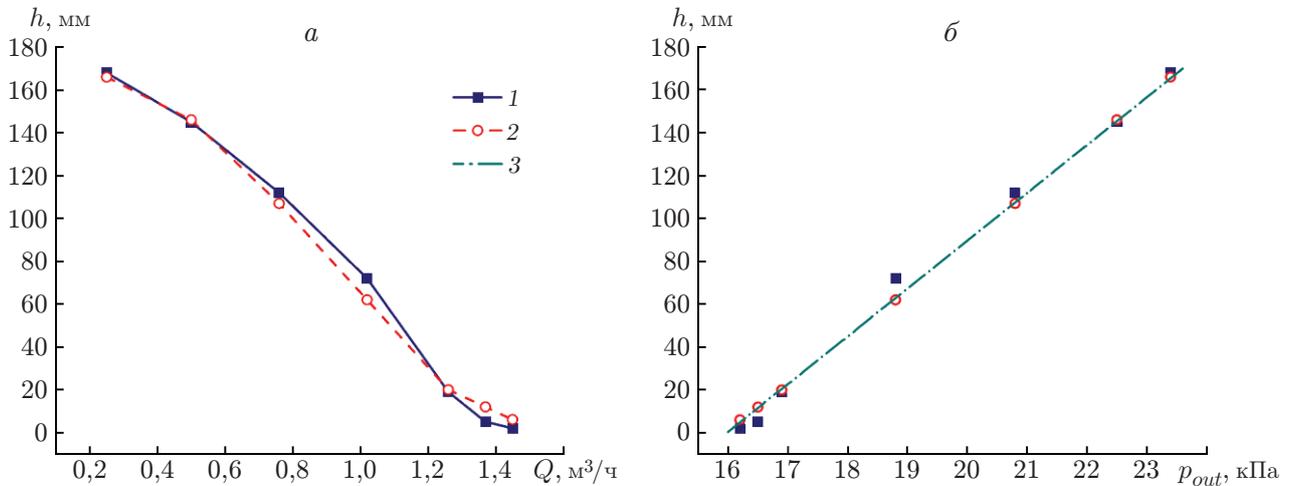


Рис. 4. Зависимости высоты свободной поверхности от расхода жидкого металла (*а*) и давления на выходе (*б*):

1 — эксперимент, 2 — численное моделирование, 3 — аппроксимирующая кривая

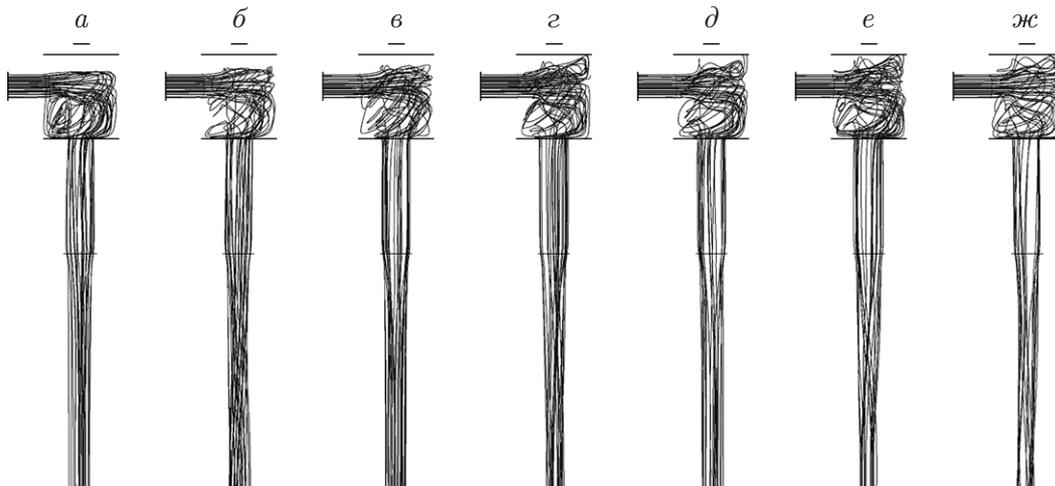


Рис. 5. Линии тока в мишени при различных вариантах рабочих параметров:

*а-ж* — варианты I–VII соответственно

управления высотой свободной поверхности необходимо поддерживать заданное давление на выходе. Давление на выходе мишени зависит в основном от расхода жидкости на входе. Таким образом, необходимо одновременно регулировать расход жидкости на входе и давление на выходе. Более предпочтительными являются схемы конструкций, в которых используются двухприводные насосы [16].

В экспериментальной установке для хранения жидкости, поддержания ее начального уровня и контроля потока используется накопительная емкость. Для того чтобы поддерживать начальный уровень жидкости, ее общее количество в замкнутом контуре сохраняется. Жидкость постоянно поступает в накопительную емкость из боковой трубки. В результате перемешивания жидкости в накопительной емкости происходят флуктуации уровня жидкости и образуются крупные вихри. В эксперименте наблюдается усиление флуктуаций свободной поверхности при увеличении расхода жидкости. На рис. 5 показаны линии тока в трехмерном пространстве, полученные в результате численного моделирования

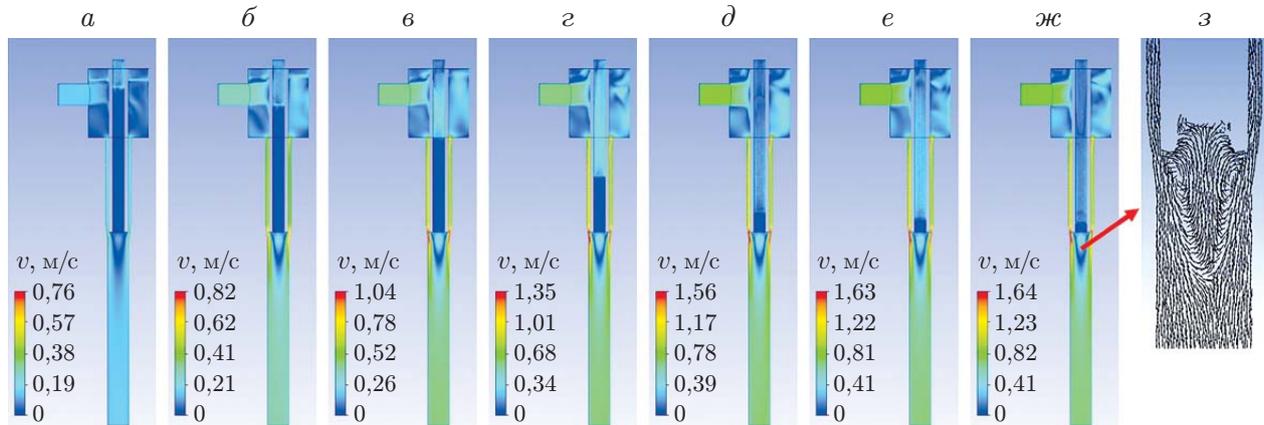


Рис. 6. Изолинии скорости жидкого галлия в  $(x, z)$ -сечении мишени при различных вариантах рабочих параметров:

*а-ж* — варианты I–VII соответственно, *з* — увеличенный фрагмент течения, соответствующий варианту VII

при рабочих параметрах мишени, соответствующих вариантам I–VII. Вследствие наличия больших вихрей в накопительной емкости возникает сложная картина линий тока. При увеличении расхода жидкости флуктуации свободной поверхности увеличиваются. В кольцевом зазоре линии тока соответствуют линиям тока в относительно устойчивом потоке, что обусловлено буферизацией и перераспределением жидкости в накопительной емкости.

В мишени без окон луч ударяет непосредственно по свободной поверхности, в результате чего под ней образуется область, в которой невозможно четко выделить границу между лучом и мишенью. Поскольку характеристики течения вблизи свободной поверхности оказывают существенное влияние на процесс переноса тепла во всей мишени расщепления, необходимо их более тщательное исследование. На рис. 6 приведены изолинии скорости жидкого галлия в  $(x, z)$ -сечении мишени для рабочих параметров, соответствующих вариантам I–VII. Во всех рассмотренных случаях жидкость во внутренней трубке находится практически в состоянии стагнации, а ниже выходного отверстия внутренней трубки образуется зона застоя в форме перевернутого конуса. В верхнем сечении образуется однородный поток. С увеличением расхода жидкости положение и размеры зоны застоя меняются незначительно. На рис. 6, *ж, з* видно, что на выходе из внутренней трубки образуется кольцевой поток, при этом возникают крупные вихри и обратное течение. Вследствие наличия зон застоя жидкость не вытекает полностью из внутренней трубки. Наличие неустранимых зон застоя затрудняет проектирование мишени без окон. Кроме того, вблизи стенок внутренней трубки формируется течение с практически однородным распределением скорости, что свидетельствует о наличии осесимметричного течения в кольцевом зазоре.

Жидкость течет от входного отверстия к выходному преимущественно в направлении оси  $z$ . Поэтому осевая компонента вектора скорости  $v_z$  существенно больше радиальных компонент  $v_x$  и  $v_y$ . Осевая составляющая вектора скорости  $v_z$  является важной характеристикой поля течения. Обратное течение и зоны застоя возникают в областях, где  $v_z > 0$ . На границах и в зонах застоя  $v_z = 0$ . Для того чтобы проанализировать распределение скоростей в зонах застоя, через центр внутренней трубки проведем две линии: горизонтальную линию  $AA'$  и вертикальную линию  $BB'$ . На рис. 7 приведены распределения осевой компоненты скорости  $v_z$  вдоль прямых  $AA'$  и  $BB'$ . Следует отметить, что длина зоны застоя

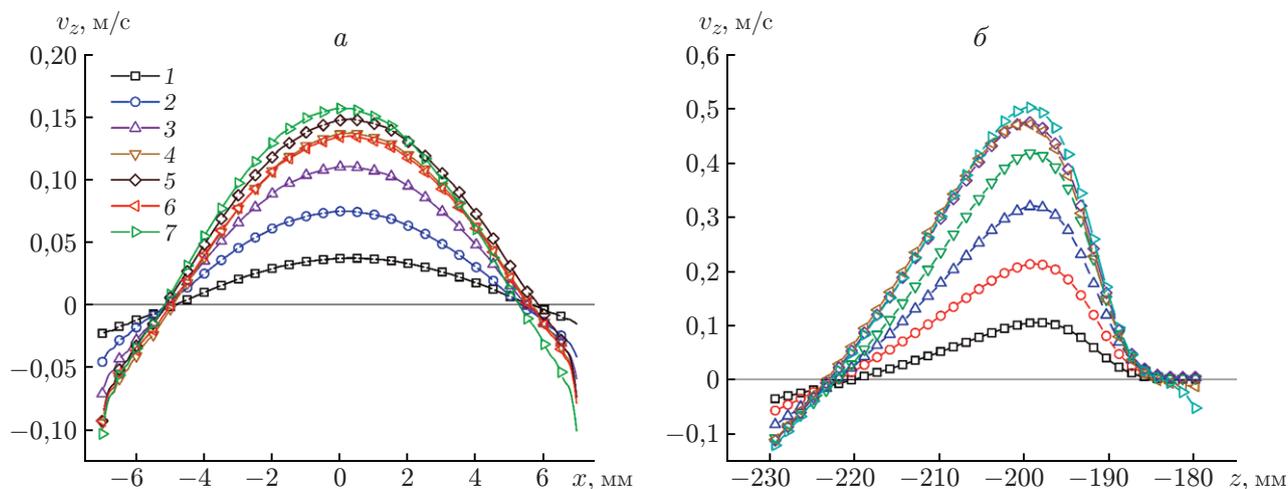


Рис. 7. Распределения осевой компоненты вектора скорости  $v_z$  вдоль прямой  $AA'$  (а) и прямой  $BB'$  (б) при различных вариантах рабочих параметров мишени: 1–7 — варианты I–VII соответственно

в поперечном направлении составляет приблизительно 11 мм, в продольном направлении — приблизительно 41 мм. Скорость обратного течения увеличивается с увеличением расхода жидкости на входе, при этом увеличиваются флуктуации свободной поверхности. При различных значениях рабочих параметров мишени размер зоны застоя практически одинаков и в основном определяется геометрией мишени.

**Заключение.** Экспериментально и численно исследовано течение со свободной поверхностью в модели жидкометаллической мишени без окон. Получены следующие основные результаты.

С использованием экспериментальных данных в краевых условиях численно определены параметры свободной поверхности. Высота свободной поверхности уменьшается с увеличением расхода жидкого металла на входе и уменьшением давления на выходе. Зависимость высоты свободной поверхности от расхода жидкости является нелинейной, от давления на выходе — линейной. Основными факторами, от которых зависит высота свободной поверхности, являются расход металла на входе и давление на выходе.

Зоны застоя, состоящие из больших вихрей и потоков обратного течения, образуются в потоке ниже выходного отверстия внутренней трубки мишени, что препятствует полному вытеканию жидкости из внутренней трубки. Наличие этих зон оказывает влияние на устойчивость свободной поверхности. Размер зоны застоя несущественно зависит от рабочих параметров мишени, поэтому не удастся ликвидировать все зоны застоя, что затрудняет проектирование мишени без окон.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании жидкометаллической мишени без окон.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Abu-Khader M. M.** Recent advances in nuclear power: A review // Progress Nuclear Energy. 2009. V. 51. P. 225–235.
2. **Yan X., Yang L., Zhang X., Zhan W.** Concept of an accelerator-driven advanced nuclear energy system // Energies. 2017. V. 10. P. 1–13.
3. **Nema P. K.** Application of accelerators for nuclear systems: Accelerator driven system (ADS) // Energy Procedia. 2011. V. 7. P. 597–608.

4. **Bauer G. S.** Overview on spallation target design concepts and related materials issues // J. Nuclear Materials. 2010. V. 398. P. 19–27.
5. **Jeanmart H., Bricteux L., Van Tichelen K., Dierckx M.** Characterisation in water experiments of a ‘detached flow’ free surface spallation target // J. Nuclear Materials. 2011. V. 415. P. 385–395.
6. **Su G. Y., Gu H. Y., Cheng X.** Experimental and numerical studies on free surface flow of windowless target // Ann. Nuclear Energy. 2012. V. 43. P. 142–149.
7. **Batta A., Class A. G., Litfin K., et al.** Experimental and numerical investigation of liquid-metal free-surface flows in spallation targets // Nuclear Engng Design. 2015. V. 290. P. 107–118.
8. **Gromov B. F., Belomitcev Y. S., Yefimov E. I., Leonchuk M. P.** Use of lead-bismuth coolant in nuclear reactors and accelerator-driven systems // Nuclear Engng Design. 1997. V. 173. P. 207–217.
9. **Assael M. J., Armyra I. J., Brillo J., et al.** Reference data for the density and viscosity of liquid cadmium, cobalt, gallium, indium, mercury, silicon, thallium, and zinc // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2012. V. 41. 033101.
10. **Sobolev V.** Thermophysical properties of lead and lead-bismuth eutectic // J. Nuclear Materials. 2007. V. 362. P. 235–247.
11. **Class A. G., Angeli D., Batta A., et al.** XT-ADS windowless spallation target thermohydraulic design & experimental setup // J. Nuclear Materials. 2011. V. 415. P. 378–384.
12. **Liu J., Pan C. Z., Tong J. F., Lu W. Q.** Theoretical analysis of recirculation zone and buffer zone in the ADS windowless spallation target // Ann. Nuclear Energy. 2015. V. 77. P. 444–450.
13. **Batta A., Class A.** Numerical investigations on geometrical designs of the windowless XT ADS spallation target // Proc. of the Intern. congress advances nuclear power plants (ICAPP 2007), Nice (France), 13–18 May 2007. S. 1., 2007. Paper 7479.
14. **Mahmud T., Haque J. N., Roberts K. J., et al.** Measurements and modelling of free-surface turbulent flows induced by a magnetic stirrer in an unbaffled stirred tank reactor // Chem. Engng Sci. 2009. V. 64. P. 4197–4209.
15. **Guyot M. K., Ormiston S. J., Soliman H. M., et al.** Numerical analysis of two-phase flow from a stratified region through a small circular side branch // Intern. J. Multiphase Flow. 2016. V. 87. P. 175–183.
16. **Litfin K., Fetzer J. R., Batta A., et al.** High-power spallation target using a heavy liquid metal free surface flow // J. Radioanal. Nuclear Chem. 2015. V. 305. P. 795–802.

*Поступила в редакцию 17/V 2019 г.,  
после доработки — 28/XI 2019 г.  
Принята к публикации 23/XII 2019 г.*

---