

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОКАЧКИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. А. Ю. Виноходов^{a,c,*}, А. А. Якушкин^{a,c}, О. Ф. Якушев^{a,c}, М. С. Кривокорытов^{a,b,c},
В. Н. Кривцун^{a,b,c}, В. В. Медведев^{a,b,c}, А. А. Лаш^{a,c}, К. Н. Кошелев^{a,b,c}

^a ООО “ЭУФ Лабс” (EUV Labs)

Россия, 108840, Москва, Троицк, Сиреневый бульвар, 1

^b Институт спектроскопии РАН

Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Физическая, 5

^c ООО РнД-ИСАН

Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Промышленная, 1-А

*e-mail: avinokhod@gmail.com

Поступила в редакцию 30.07.2018 г.

После доработки 30.07.2018 г.

Принята к публикации 19.08.2018 г.

Описана герметичная компактная система на основе двух включенных последовательно кондукционных магнитогидродинамических насосов для прокачки жидких металлов с рабочей температурой до 450°C. Система разработана для получения струи жидкого лития, используемой в качестве возобновляемой мишени в импульсно-периодическом источнике экстремального ультрафиолетового (э.у.ф.) излучения на основе лазерной плазмы. Система обеспечивает напор 2 бар и производительность до 80 см³/с, характеризуется надежностью, простотой конструкции, отсутствием подвижных деталей, удобством управления, способностью прокачивать агрессивные токопроводящие жидкости. Система легко поддается масштабированию как по давлению, так и по производительности. Продемонстрирована долговременная работа системы в составе источника э.у.ф.-излучения на основе лазерной плазмы, где она обеспечила скорость струи до 22 м/с.

DOI: 10.1134/S0032816219010270

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель данной работы – создание возобновляемой мишени в импульсно-периодическом источнике экстремального ультрафиолетового (э.у.ф.) излучения на основе лазерной плазмы, в котором в качестве мишени используется струя жидкого лития. Литий в источнике циркулирует по герметичному замкнутому контуру. Скорость струи должна быть достаточной для обновления поверхности мишени при каждом лазерном импульсе (максимальная частота следования импульсов ~30 кГц), при этом она должна превышать скорость распространения капиллярных волн на поверхности (до 15 м/с). Учитывая требуемую скорость струи, ~20 м/с, и площадь ее поперечного сечения, ~1 мм², для выполнения данных требований необходим насос с напором ~2 бар при расходе ~20 см³/с. Кроме того, насос должен быть компактным, его рабочая температура должна превышать температуру плавления лития (180.5°C), контактирующие с жидким литием материалы насоса должны быть коррозионностойкими к нему.

Рынок не предлагает промышленных насосов, отвечающих вышеупомянутым требованиям.

На первом этапе исследований для прокачки лития мы использовали центробежный насос, разработанный нами для прокачки жидкого олова [1]. Однако, учитывая низкую плотность Li, использование центробежного насоса для достижения необходимых параметров струи не представляется оптимальным решением с точки зрения ресурса работы и массогабаритных параметров. Наилучшим решением, удовлетворяющим всем требуемым параметрам, является использование магнитогидродинамического (м.г.д.) насоса.

Магнитогидродинамические насосы нашли широкое применение при прокачке электропроводящих жидкостей (расплавленных металлов, расплавов и растворов солей, включая морскую воду) как в различных отраслях промышленного производства (в системах охлаждения атомных установок [2–4], в металлургии [5–7], химической и биомедицинской промышленности [8, 9]), так и в научных исследованиях [10, 11]. Среди

преимуществ м.г.д.-насосов следует отметить простоту и компактность их конструкции, отсутствие подвижных деталей, а значит, большую надежность по сравнению с механическими насосами, возможность работы при высоких температурах прокачиваемой жидкости, полную герметичность, легкость масштабирования и регулировки параметров.

Существенной особенностью м.г.д.-насосов является неоднородное распределение поля скоростей по поперечному сечению канала прокачки [12, 13] и связанная с этим потеря эффективности преобразования электрической энергии в механическую. Эффективность м.г.д.-насосов сильно зависит от геометрии активного канала: при больших зазорах канала она может достигать 45%, при малых (несколько миллиметров) — не более 5% [14], что связано как с ростом гидравлических потерь, так и с зависимостью доли шунтирующего тока металлическими стенками активного канала от величины зазора.

В данной работе мы исследовали компактную систему на основе двух включенных последовательно м.г.д.-насосов кондукционного типа, предназначенную для прокачки жидкого лития в замкнутом контуре и получения высокоскоростной стабильной струи в вакуумной камере. Хотя данная система прокачки разрабатывалась, прежде всего, для э.у.ф.-источника излучения на основе лазерной плазмы, она может быть использована для прокачки других жидких металлов и сплавов с рабочей температурой до 450°C.

1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОНДУКЦИОННОГО М.Г.Д.-НАСОСА

Электрическая энергия источника питания м.г.д.-насоса, наряду с полезным преобразованием ее в механическую работу, расходуется на омические потери в шинах, активном канале, стенках трубопровода и на преодоление гидравлического сопротивления активного канала (вязкое трение). При этом следует различать силы магнитной вязкости (индукционное торможение) и силы вязкого трения в отсутствие магнитного поля. Соотношение между ними характеризуется числом Гартмана [12]

$$Ha = Bh(\sigma/\eta)^{0.5}, \quad (1)$$

где B — индукция магнитного поля в активном канале; h — характерный линейный размер активного канала (высота); σ и η — соответственно электропроводность и динамическая вязкость жидкости. Важнейшей гидродинамической характеристикой активного канала является гидравлическое сопротивление ξ , которое зависит от соотношения чисел Рейнольдса Re и Гартмана Ha . При отсутствии магнитного поля (течение

Пуазеля) ξ полностью определяется числом Рейнольдса, равным для ламинарного и турбулентного течений соответственно [15]:

$$\xi = 96/Re, \quad (2)$$

$$\xi = 0.3164/Re^{0.25}. \quad (3)$$

В присутствии магнитного поля (течение Гартмана) гидравлическое сопротивление будет определяться выражением [15]

$$\xi = (32Ha^2/Re)[th(Ha)/(Ha - th(Ha))]. \quad (4)$$

Выражение (4) справедливо для ламинарного и турбулентного течений при больших значениях Ha/Re , когда, согласно [15], большое магнитное поле подавляет турбулентность. При относительно небольших значениях Ha гидравлическое сопротивление прямоугольного канала с увеличением этого числа будет уменьшаться, начиная от ξ , соответствующего турбулентному течению без магнитного поля (3), до значений, соответствующих ламинарному течению, согласно (2).

Таким образом, наличие магнитного поля подавляет турбулентность течения. Чем больше значение Ha , тем в большей степени профиль скоростей течения по высоте активного канала будет становиться более плоским в центральной части по отношению к профилю течения Пуазеля и тем больший градиент скорости будет наблюдаться в пристеночных областях, что приводит к увеличению гидравлических потерь [14, 15]. В работах [12, 13] в условиях неоднородно распределенного магнитного поля по длине активного канала при значениях $Ha = 28.5$ и 400 и при широком интервале значений Re ($500 < Re < 1600$) как экспериментально, так и теоретически было показано, что по ширине активного канала формируется профиль скорости потока в виде буквы M , т.е. поток жидкости ускоряется около боковых стенок. Толщину пристеночного слоя для ламинарного и турбулентного течений можно оценить соответствующими выражениями [16]: $\delta \sim Na^{-1}h/2$ и $\delta \sim (h/2) \times \exp(-4 \cdot Na^2/Re)$. Причем, если в течении Пуазеля потери за счет вязкого трения происходят по всему сечению активного канала, то в течении Гартмана основные диссипативные потери будут происходить в пристеночном слое.

Основными характеристиками любого насоса, в том числе и м.г.д., являются напор (перепад давления между входом и выходом м.г.д.-канала) и производительность. Перепад давления Δp создается силой Лоренца: $F = IBb$, где I — сила тока через активный канал, b — ширина активного канала. Тогда Δp равен

$$\Delta p = F/S = IB/h, \quad (5)$$

где S — площадь сечения активного канала.

С одной стороны, из (5) следует, что чем меньше высота активного канала h , тем больше созда-

ваемое насосом давление при фиксированной силе тока. С другой стороны, уменьшение высоты канала приводит к уменьшению поперечного сечения канала и, как следствие, к увеличению требуемой скорости втекающей жидкости (при заданном расходе). При прокачке лития, имеющего низкую удельную плотность, 0.53 г/см^3 , гравитационного давления столба лития, составляющего несколько десятков сантиметров, не хватает для обеспечения необходимой производительности в вакуумных условиях. Поэтому нами была использована система из двух м.г.д.-насосов, включенных последовательно. Первый (подпорный) м.г.д.-насос имел относительно большую площадь активного канала, достаточную для создания требуемого потока лития за счет гравитационного давления. Этот насос развивал давление, достаточное для нужной производительности второго м.г.д.-насоса (напорного), который обеспечивал требуемое давление на выходе системы прокачки. При прокачке более тяжелых жидкостей, например расплавленного олова, подпорный насос, видимо, не понадобится.

3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ

Наиболее критичным элементом м.г.д.-насоса является активный канал. Доля шунтирующего активный канал тока зависит от соотношения геометрических размеров активного канала: его высота во многом обеспечивает создаваемое системой давление, а ширина вместе с высотой — производительность. Шунтирование будет тем меньше, чем больше высота и длина активного канала и меньше его ширина. В то же время небольшое отношение длины к ширине будет способствовать большему шунтированию тока активного канала, так как при увеличении ширины возрастает электрическое сопротивление активного канала, а сопротивление подводящих трубопроводов остается неизменным.

В нашем случае размеры активного канала составляли: длина 110 мм, ширина 10.5 мм, высота напорного и подпорного насосов соответственно 1 и 3 мм, ширина электровводов 40 мм и была несколько меньше длины используемых магнитов (размер магнитов $50 \times 10 \times 10 \text{ мм}$), что уменьшало краевые эффекты, вызванные суперпозицией электрического и магнитных полей. Сверху и снизу активного канала размещались ленточные нагревательные элементы, которые обеспечивали стартовый разогрев канала до рабочих температур. Мощность, поступающая от нагревательных элементов, компенсировала потери тепла, уходящего через электровводы, за счет теплопроводности. Температурный режим канала при отсутствии протока лития задавался балансом теплопроводности и выделения джоулева тепла на примыкаю-

щих к каналу вставках с повышенным тепловым и электрическим сопротивлением. Во время штатной работы насоса основным стабилизирующим фактором для поддержания температурного режима насоса являлась прокачиваемая через насос рабочая жидкость.

Из соображений минимального ослабления индукции магнитного поля, а также уменьшения шунтирования рабочего тока толщина стенок канала должна выбираться как можно меньше (0.2 мм в нашем случае), материал стенок должен быть немагнитным и иметь большое удельное электрическое сопротивление (желательно, много большее, чем у жидкости). Кроме того, материал стенок канала должен быть коррозиестойким (в нашем случае к литию) при рабочих температурах. В наибольшей степени материалом, удовлетворяющим всем вышперечисленным требованиям, является нержавеющая сталь 12X18H10T. Коррозионная стойкость сталей в жидких металлах определяется в основном содержащимися в стали примесями.

Ресурс работы кондукционного м.г.д.-насоса во многом определяется процессами, происходящими в переходной области электрод—жидкость. Хорошая смачиваемость литием стенки канала из нержавеющей стали позволяет максимально увеличить площадь контакта электрод—жидкость и минимизировать области локального перегрева и эрозию стенок канала. Ресурс активного канала может быть значительно увеличен при использовании систем очистки лития.

Магнитное поле в активном канале создавалось постоянными магнитами из NdFeB, размещенными по обе стороны канала и соединенными магнитопроводом из магнитомягкой стали. Магнитная индукция в зазоре подпорного м.г.д.-насоса составляла 0.7 Тл, напорного — 0.8 Тл.

Максимальная рабочая температура насосов ограничена максимальной рабочей температурой аустенитных сталей, составляющей $\sim 550^\circ\text{C}$. Рабочая температура тракта должна быть на $\sim 50^\circ\text{C}$ выше температуры плавления рабочей жидкости, так как всегда имеют место холодные области тракта, на которых может происходить кристаллизация. Температура всех элементов контура прокачки поддерживалась на уровне 230°C . Размеры каждого из насосов составляли $200 \times 100 \times 50 \text{ мм}$.

4. УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Замкнутый контур прокачки жидкого лития в составе источника э.у.ф.-излучения включал в себя два последовательно включенных м.г.д.-насоса, трубопроводную систему, 2-ступенчатый механический фильтр с тонкостью фильтрации 25 мкм, сопло и приемный коллектор с гасителями брызг. Последние два элемента были расположены в ва-

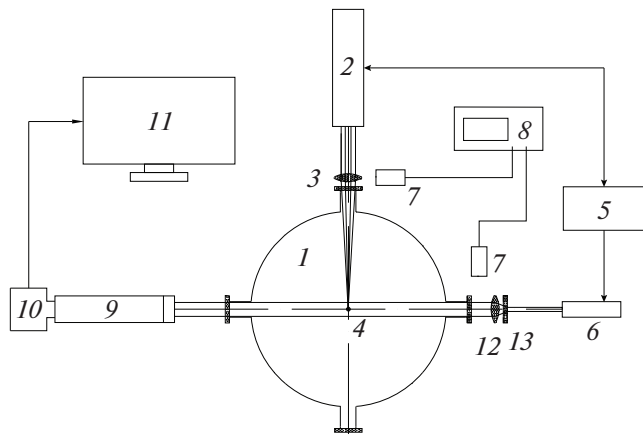


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента по измерению скорости струи. 1 – вакуумная камера; 2 – Nd-YAG-лазер; 3, 12 – линзы; 4 – струя (вектор скорости направлен перпендикулярно плоскости рисунка); 5 – многоканальный генератор; 6 – диодный (подсвечивающий) лазер; 7 – фотодиоды; 8 – осциллограф; 9 – микроскоп; 10 – CCD-камера; 11 – компьютер; 13 – оптический диффузор.

куумной камере, откачиваемой до 10^{-4} мбар. Производительность насоса (скорость струи) измерялась оптическим методом, который использовался нами в работе [17].

На рис. 1 показана оптическая схема эксперимента по измерению скорости струи. Сопло располагалось по центру вакуумной камеры 1. Вектор скорости струи направлен перпендикулярно плоскости рисунка. Излучение Nd-YAG-лазера 2 фокусировалось линзой 3 на поверхность струи 4 на расстоянии ~ 20 мм от сопла. Через фиксированную задержку относительно импульса Nd-YAG-лазера, задаваемую генератором 5, струя подсвечивалась импульсным излучением диодного лазера 6 с длиной волны 850 нм и длительностью импульса 30 нс, излучение которого направлено под углом 90° к оптической оси Nd-YAG-лазера. Лазерные импульсы измерялись фотодиодами 7 и регистрировались осциллографом 8.

Импульс лазера 2 генерировал на поверхности струи плазму, вызывал возмущения поверхности и возникновение капель лития, летящих навстречу лазерному лучу. Эти капли и поверхностные возмущения, теневое изображение которых проецировалось микроскопом 9 (DistaMax Model K2) на матрицу CCD-камеры 10 (Manta MG-145B), смешались со скоростью струи и через фиксированную задержку посредством CCD-камеры передавались на компьютер 11. Выдержка кадра определялась длительностью импульса диодного лазера.

Очевидно, что за время импульса диодного лазера возмущения на поверхности струи фактически не успевали сместиться. Временные ворота открытия камеры выбирались таким образом,

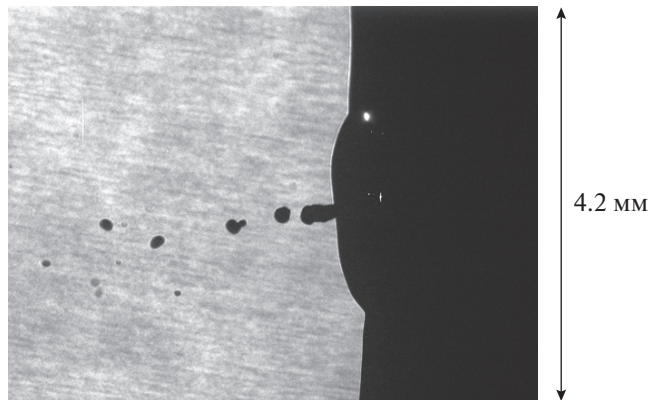


Рис. 2. Теневая фотография струи лития диаметром 4 мм, полученная через 300 мкс после воздействия импульса Nd-YAG-лазера. Лазерное излучение распространяется слева направо. Светлое пятно – излучение плазмы.

чтобы в один кадр попадало изображение как плазмы, так и возмущений с разлетающимися каплями. По полученному изображению с учетом увеличения микроскопа измерялось расстояние, на которое смешались возмущения, и, зная установленную задержку, вычислялась скорость струи лития. Положительная линза 12 и оптический диффузор 13 с углом рассеяния 20° использовались для обеспечения однородности поля засветки.

На рис. 2 показана теневая фотография струи лития диаметром 4 мм, полученная через $\Delta t = 300$ мкс после воздействия лазерного излучения. Поле зрения CCD-камеры, при котором осуществлялось фотографирование, составляло 4.8×4.2 мм. Лазерное излучение распространялось слева направо. Светлое пятно на фотографии – свечение плазмы в момент $\Delta t = 0$, ниже можно наблюдать выброс капель лития и возмущение поверхности струи в момент $\Delta t = 300$ мкс, смещенные относительно свечения плазмы из-за движения струи. Давление, создаваемое в системе, измерялось на расстоянии 1 м от напорного насоса с помощью специально разработанного и откалиброванного индуктивного нагреваемого датчика давления на основе сильфона.

Оценки, основанные на реальной геометрии активных каналов обоих насосов, показывают, что доля тока, текущего через литий, для подпорного насоса будет составлять $\eta = 94\%$, для напорного – 75% . Тогда, согласно (5), при максимальном токе источников питания насосов 300 А подпорный насос должен обеспечивать давление 0.49 бар, а напорный насос – 1.77 бар, что в сумме дает 2.26 бар.

Для определения напорно-расходных характеристик м.г.д.-системы были использованы несколько сопел, имеющих различное гидравлическое сопротивление ($0.2 \leq \xi \leq 0.6$), которое зави-

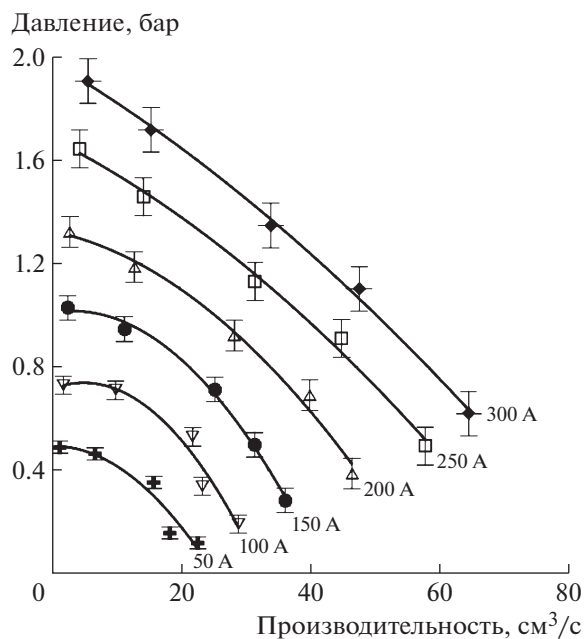


Рис. 3. Напорно-расходная характеристика системы двух м.г.д.-насосов для жидкого лития при токах напорного насоса: 50, 100, 150, 200, 250 и 300 А.

село от площади поперечного сечения, формы и длины выходного канала. Всего было использовано 5 сопел с различной геометрией выходного канала. На рис. 3 приведены напорно-расходные характеристики системы прокачки, включающей в себя два м.г.д.-насоса, полученные при различной силе тока напорного м.г.д.-насоса. Они близки к характеристикам напорного насоса, так как другие элементы контура прокачки имеют незначительное гидравлическое сопротивление по сравнению с аналогичным параметром использованных сопел и активного канала напорного насоса.

Согласно рис. 3, максимальное давление, развиваемое системой, составляет ~2 бар, что близко к приведенным выше оценкам, а максимальный расход при контуре с минимальным гидравлическим сопротивлением равен ~80 см³/с. При максимальной производительности насоса средняя скорость потока в активном канале напорного насоса составляет ~8 м/с, а максимальное давление достигается при скоростях менее 1 м/с. В первом случае поток будет турбулентным ($Re = 8000$), во втором – ламинарным ($Re < 1000$). Для течения Паузеля гидравлическое сопротивление активного канала можно оценить по выражениям (2) и (3) соответственно как 0.033 и 0.1. Согласно (1), число Гартмана для нашего случая будет равняться 12, тогда по (4) полное гидравлическое сопротивление активного канала будет составлять соответственно 0.052 и 0.416. Таким образом, для режима работы насоса с максимальной производительностью вклад магнитной вязкости в гидравлическое

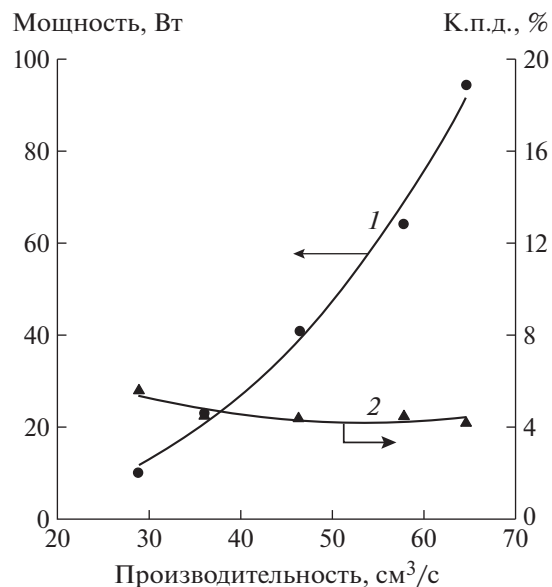


Рис. 4. Зависимость потребляемой мощности (1) и к.п.д. (2) напорного м.г.д.-насоса от производительности для сопла с $\xi = 0.2$.

сопротивление канала будет составлять 36.5%, тогда как для режима работы насоса с максимальным напором – 76%. Для оценки к.п.д. насосов было измерено общее падение напряжения на подводящих шинах, включающих тепловые мосты. Исходя из оцененной выше доли тока, текущего непосредственно через жидкий литий, к.п.д. напорного насоса составит 4.6%, а подпорного – 1.2%. На рис. 4 показаны зависимости потребляемой мощности и к.п.д. напорного м.г.д.-насоса от производительности (расхода) для контура с минимальным гидравлическим сопротивлением. Полезная мощность системы определялась произведением развиваемого насосом давления на его производительность. Согласно рис. 4, полученные значения к.п.д. напорного насоса (~4.2%) объясняются в основном омическими потерями в шинах и шунтированием тока стенками канала. В то же время гидравлические потери вносят относительно небольшой вклад. Небольшое увеличение к.п.д. в области малой производительности можно объяснить влиянием подпорного насоса, мощность которого не учитывалась при построении графиков из-за ее незначительного влияния на характеристики системы.

На рис. 5 приведены зависимости скорости струи лития от давления для сопла с малым (кривая 1) и большим (кривая 2) гидравлическим сопротивлением. Максимальные скорости струи наблюдаются при максимальном перепаде давления на сопле, т.е. на сопле, обладающем максимальным гидравлическим сопротивлением. Максимальная скорость струи будет определяться выражением

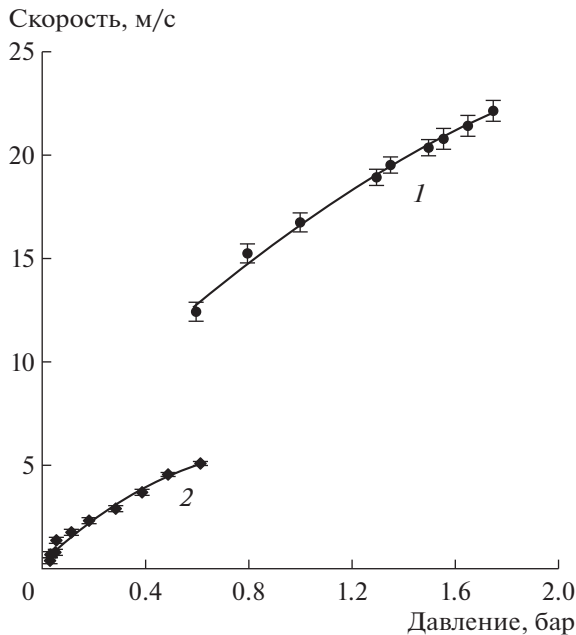


Рис. 5. Зависимость скорости струи жидкого лития от давления, обеспечиваемого системой м.г.д.-насосов. 1 – сопло с $\xi = 0.6$, 2 – сопло с $\xi = 0.2$.

$$v = [2\eta IB/(hp)]^{0.5}, \quad (6)$$

где ρ – плотность лития.

При $h = 1$ мм скорость струи, согласно (6), должна равняться 30 м/с, а ее максимальное измеренное значение для сопла с большим гидравлическим сопротивлением – 22 м/с. Несовпадение скоростей объясняется гидравлическими потерями в контуре прокачки, в частности сопротивлением фильтра тонкой очистки. Из (6) следует, что для более тяжелых жидкостей, например расплавленного олова, скорость струи при тех же параметрах насоса будет в $(\rho_{Sn}/\rho_{Li})^{1/2} = 3.7$ раза меньше.

Параметры созданной системы прокачки легко можно масштабировать и мультиплицировать. Для системы прокачки с большим напором последовательно устанавливаются три и более м.г.д.-насосов. Если же увеличивать производительность без повышения напора, то можно увеличить ширину м.г.д.-канала или установить несколько м.г.д.-насосов параллельно. Однако увеличение ширины канала приведет к большему шунтированию тока и снижению к.п.д., что не даст повышения производительности пропорционально увеличению ширины канала.

Эксплуатация системы в контуре прокачки жидкого лития в источнике э.у.ф.-излучения на основе лазерной плазмы показала, что ресурс системы составляет, по крайней мере, несколько тысяч часов. Как нам представляется, основной причиной, ограничивающей ресурс работы си-

стемы, является постепенное загрязнение рабочего вещества продуктами, выделяющимися при прохождении тока на границе “стенка канала – жидкий литий”. Понятно, что при использовании рабочих жидкостей разной степени агрессивности ресурс будет также различным. Для жидких металлов эта проблема может быть решена включением в контур прокачки on line очистки рабочей жидкости методом ректификации. Такая система установлена нами в контур прокачки лития источника э.у.ф.-излучения на основе лазерной плазмы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для использования в импульсно-периодическом источнике э.у.ф.-излучения на основе лазерной плазмы разработана и успешно испытана герметичная компактная система прокачки жидких металлов, состоящая из последовательно включенных двух кондукционных м.г.д.-насосов. Система способна прокачивать по замкнутому контуру жидкие металлы с рабочей температурой до 450°C. Максимальное давление, развиваемое системой, составило 2 бар, производительность прокачиваемой среды – 80 см³/с (0.3 м³/ч). Система характеризуется компактностью, простотой конструкции, легкостью управления, надежностью, возможностью масштабирования напора и производительности и большим ресурсом работы. Система успешно эксплуатируется в составе источника э.у.ф.-излучения на основе лазерной плазмы в течение длительного времени, обеспечивая скорость прокачки литиевой струи 22 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушев О.Ф., Виноходов А.Ю., Кошелев К.Н., Кривцун В.Н. // ПТЭ. 2015. № 5. С. 1. doi 10.7868/S0032816215050146
2. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных установках. М.: Атомиздат, 1974.
3. Kwak J., Kim H.R. // Journal of Nuclear Science and Technology. 2017. V. 54. Issue 12. P. 1292. doi 10.1080/00223131.2017.1365020
4. Takeuchi J., Satake S., Miraghaie R., Yuki K., Yokomine T., Kunugi T., Morley N.B., Abdo M.A. // Fusion Eng. Des. 2006. V. 81. P. 1082. doi 10.1016/j.fusengdes.2005.09.014
5. Branover H., Unger Y. Metallurgical technologies, energy conversion, and magnetohydrodynamic flows. V. 148. AIAA, 1993.
6. Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К., Дубоделов В.И. Магнитодинамические насосы для жидких металлов. Киев: Наукова думка, 1989.
7. Верте Л.А. МГД-технология в производстве черных металлов. М.: Металлургия, 1990.
8. Boissonneau P., Thibault J.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. V. 32. № 18. P. 2387. doi 10.1088/0022-3727/32/18/310

9. *Qian S., Bau H.H.* // Mech. Res. Commun. 2009. V. 36. P. 10. doi 10.1016/j.mechrescom.2008.06.013
10. *Sheikholeslami M., Bandpy M., Ellahi R., Zeeshan A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2014. V. 369. P. 69. doi 10.1016/j.jmmm.2014.06.017
11. *Malvandi A., Ganji D.D.* // J. Magn. Magn. Mater. 2014. V. 369. P. 132. doi 10.1016/j.jmmm.2014.06.037
12. *Andreev O., Kolesnikov Yu., Thess A.* // Physical of Fluids. 2006. V. 18. P. 065108. doi 10.1063/1.2213639
13. *Nedeltcho KandeV, Val Kagan, Ahmed Daoud* // FDMP. 2010. V. 6. № 3. P. 291. doi 10.3970/fdmp.2010.006.291
14. *Kim H.R.* // Annals of Nuclear Energy. 2014. V. 73. P. 162. doi 10.1016/j.anucene.2014.06.048
15. *Генин Л.Г.* Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. М.: МЭИ, 2001.
16. *Тананаев А.Б.* Течение в каналах МГД-устройств. М.: Атомиздат, 1979.
17. *Виноходов А.Ю., Кривокорытов М.С., Сидельников Ю.В., Кривцун В.Н., Медведев В.В., Кошелев К.Н.* // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 3. С. 473. doi 10.1070/QEL16019