

СПЕЦИФИКА ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ РЕАКТОРНЫХ КОНТУРОВ СО СВИНЦОВЫМ И СВИНЕЦ-ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

**А.В. Безносков, М.А. Анотоненков, П.А. Боков, В.С. Баранова,
М.С. Кустов**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,
г. Нижний Новгород*



Представлены результаты анализа влияния специфических свойств свинцового и свинец-висмутного теплоносителей на особенности их течения в проточной части главных и вспомогательных циркуляционных насосов энергетических контуров с этими теплоносителями. Показана невозможность возникновения кавитации (в традиционном ее понимании) в проточной части лопастных насосов, перекачивающих свинцовый и свинец-висмутный теплоносители. Представлены результаты экспериментальных исследований разрыва столба тяжелого жидкометаллического теплоносителя и рассмотрены условия возникновения газовой кавитации в потоке теплоносителя.

Обоснована неправильность расчета циркуляционных насосов, перекачивающих свинцовый и свинец-висмутный теплоносители, не смачивающие ограничивающие поток стенки по традиционным методам для водных и натриевых теплоносителей.

ВВЕДЕНИЕ

Насосное оборудование составляет важную и существенную долю в составе реакторных контуров энергетических установок. Специфические особенности свинцового и свинец-висмутного теплоносителей в значительной мере определяют конструкции и условия работы средств их циркуляции. Высокая плотность тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ), на порядок превышающая плотность водяного теплоносителя, натрия и других щелочных металлов, определяет специфику силовых воздействий и напряженно-деформированного состояния элементов насосов и оказывает влияние на их конструктивные схемы. Высокая рабочая температура этих теплоносителей в реакторных контурах (250–500°C для эвтектики Pb-Bi и 400–550°C для Pb) представляет повышенные требования к материалам конструкций оборудования контуров.

Вследствие значительной коррозионной активности ТЖМТ при рабочих условиях по отношению к сталям и чугунам необходимо формирование и доформирование в составе контуров защитных покрытий на поверхностях конструкций насосов, контактирующих с теплоносителем. Малая вязкость таких теплоносителей, несмачиваемость ими поверхностей подшипниковых узлов насосов и невозмож-

ность применения традиционных смазочных материалов делают неосуществимой работу гидродинамических подшипников в среде ТЖМТ, поэтому необходимо повышенное внимание к созданию и эксплуатации подшипниковых узлов в этих теплоносителях.

Особенности конструктивного выполнения и условий работы реакторных контуров энергоблока АЭС с ТЖМТ, в отличие от транспортных установок, обуславливают применение в них главных циркуляционных насосов погружного типа с осевыми рабочими колесами. Вследствие интенсивного химического взаимодействия с кислородом воздуха с образованием оксидов теплоносителя и недопустимости выхода радиоактивных газов в окружающую среду необходимо превышение давления в системе защитного газа жидкометаллического контура над давлением атмосферного воздуха (на небольшую величину) и формирование специфических требований к узлам уплотнения вращающегося вала насоса.

Низкое давление насыщенных паров свинца и висмута при рабочих температурах и высокие температуры кипения (в отличие от натрия) практически исключают массоперенос паров ТЖМТ и их конденсацию на «холодных» поверхностях насосов и другого оборудования контура.

Специфическими особенностями свинцового и свинец-висмутового теплоносителей является низкое давление насыщенных паров ($10^{-7} - 10^{-10}$ Па) в диапазоне рабочих температур. Трудно представить снижение статического давления в какой-либо точке проточной части насоса реакторного контура с ТЖМТ до указанных величин. В отличие от насосов для перекачки водяного и натриевого теплоносителей традиционная кавитация в насосах с ТЖМТ с вскипанием и последующей конденсацией в кавернах в потоке паров свинца и эвтектики свинец-висмута невозможна. Традиционный подход к проектированию прочной части насосов для перекачки ТЖМТ без учета указанной специфики свинцового и свинец-висмутового теплоносителей неправилен.

В потоке тяжелых жидкометаллических теплоносителей содержится некоторое количество инертных к нему газов и паров (аргон, вода и др.), пузырьки которых имеют размер порядка 10^{-9} м (что подтверждено исследованиями с использованием ультразвука). Эти пузырьки, поступая с потоком в область пониженного давления, начинают расти, в том числе и за счет их агломерации. Поступая с потоком в область повышенного давления, такие пузырьки уменьшаются в размерах вследствие сжимаемости газа. При этом возможно, что достигнув минимальных размеров, пузырьки начнут снова расти, совершая несколько циклов затухающих колебаний.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Нижегородском техническом университете были проведены экспериментальные исследования с целью определения условий разрыва столба ТЖМТ за счет агломерации газовой фазы из объема ТЖМТ. На рисунке 1 показана схема экспериментального стенда.

Сущность эксперимента заключалась в следующем. Жидкий металл (расплав свинца) передавливался газом через трубу $14,0 \times 2,0$ мм из нижней емкости в верхнюю. Затем в зоне «А» замораживалась «пробка» металла, после чего давление газа в полости нижней емкости снижалось ступенями с контролем давления газа. В случае разрыва столба жидкого металла фиксировался сигнал от электроконтактного подвижного сигнализатора свободного уровня ТЖМТ в нижней емкости.

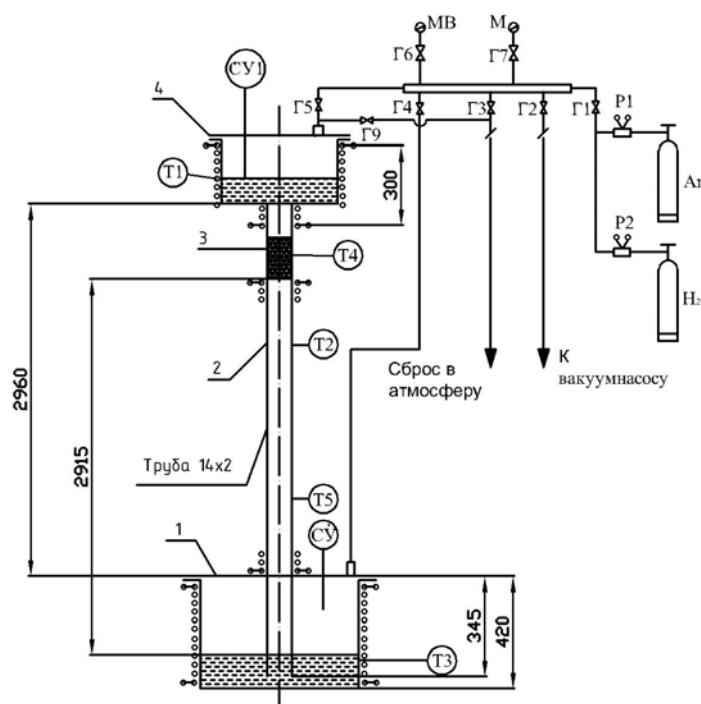


Рис. 1. Схема стана: 1 – нижняя емкость; 2 – экспериментальный участок; 3 – «пробка» застывшего свинца (зона «А»); 4 – верхняя емкость

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Отстоявшийся в среде водорода при $T = 400^\circ\text{C}$ свинец за счет избыточного давления газа (аргона) из нижней емкости давлением $3,44 \text{ кг/см}^2$ (ати) был выдавлен в верхнюю емкость, периодически сообщаемую с атмосферой. После выдержки в течение 0,5 ч отключением соответствующей секции электронагревателей была организована «пробка» застывшего свинца при $T \sim 270^\circ\text{C}$ на высоте $H = 2915 \text{ мм}$ от нижнего обреза трубки. После этого давление в нижней емкости снижалось ступенями по $0,08 \text{ кг/см}^2$ с выдержкой времени 30 сек на каждой ступени. При давлении газа $1,88 \text{ кг/см}^2$ в нижней емкости произошло замыкание электрода электроконтактного сигнализатора уровня, установленная на 1–2 мм над свободным уровнем свинца. Электрод датчика был поднят на 2–3 мм над свободным уровнем. При дальнейшем снижении давления до $1,64 \text{ кг/см}^2$ (ати) произошло повторное замыкание электрода поверхностью ТЖМТ.

Результаты другой серии показали следующее. Была организована и поддерживалась «пробка» застывшего свинца при $T \sim 265^\circ\text{C}$ на высоте $H = 2915 \text{ мм}$ от нижнего обреза трубки. После этого давление в нижней емкости снижалось ступенями по $0,08 \text{ кг/см}^2$ с выдержкой времени 30 с на каждой ступени. Электрод электроконтактного сигнализатора уровня, установленный на 1–2 мм над свободным уровнем, замкнулся теплоносителем при давлении газа $1,64 \text{ кг/см}^2$. Электрод датчика был также поднят на 2–3 мм над свободным уровнем. При дальнейшем снижении давления до $1,36 \text{ кг/см}^2$ (атм) повторно «зажглась» нижняя «свечка» – произошло замыкание электрода поверхностью ТЖМТ.

На рисунках 2 и 3 представлен внешний вид нижнего участка «пробки» застывшего ТЖМТ в месте отрыва от нее жидкого металла. Поверхность свинца в районе металла покрыта кавернами – следами газовых пузырей на поверхности отрыва



Рис. 2. Внешний вид поверхности застывшего ТЖМТ в зоне отрыва (I серия)

расплавленного металла от застывшего. Полученные результаты однозначно свидетельствуют о постепенном опускании и последующем «разрыве» столба свинца в трубке за счет расширения объема газа, находившегося в виде пузырей (каверн) между твердым и жидким свинцом.

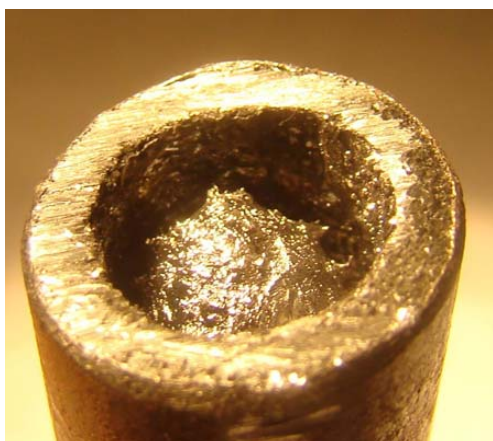
Газ мог поступать в этот объем за счет следующих факторов или их комбинации:

- агломерация и сепарация микропузырей из жидкого свинца;
- поступление газа из застывающего свинца;
- поступление пузырей газа из пристенной области между поверхностью оксидированной стали и несмачивающей его поверхностью расплава свинца.

Давление разрыва и постепенного опускания свинца в столбе в трубке 14×2.0 мм произошло при давлении, на много порядков превышающем расчетно-теоретическое давление насыщенных паров.

Экспериментально полученная отрицательная величина давления «разрыва» – с опусканием столба ($\sim -0,2 \text{ кг/см}^2$ (ати) $\approx 200 \text{ мм}$ столба свинца), во много раз меньше, чем давление, при котором произошла бы кавитация при расчете проточ-

а)



б)



Рис. 3. Внешний вид поверхности застывшего ТЖМТ в зоне отрыва (II серия)

ной части насосов по традиционным методикам.

Условия эксперимента существенно отличаются от условий в проточной части насосов в контуре ТЖМТ и могут рассматриваться лишь как их достаточно грубое приближение. Несмотря на это полученные экспериментальные данные свидетельствуют о практической невозможности возникновения газовой кавитации в проточной части насосов, перекачивающих ТЖМТ.

В НГТУ созданы и успешно эксплуатируются конструкции центробежных насосов, работающих в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей с температурой до 500°C и более. Многолетний опыт эксплуатации этих насосов никогда не показывал наличие кавитационных процессов, тогда как по традиционным расчетам они находились в области кавитации. Многократные разборки и ревизии насосов после проведения экспериментов в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей с температурой до 500°C всегда показывали отсутствие следов кавитационной эрозии на поверхности элементов прочностной части насосов.

Из изложенного следует, что традиционный подход к проектированию проточной части насосов для перекачивания ТЖМТ без учета невозможности возникновения кавитации в проточной части насоса неправомерен и может привести к неоправданному снижению быстроходности насосов, увеличению их габаритов и стоимости.

Работоспособность конструкционных материалов проточной части насосов для перекачивания свинца и эвтектики свинец-висмут может быть обеспечена только при условии формирования поддержания на их поверхностях защитных покрытий. При наличии таких покрытий теплоноситель не смачивает поверхность твердого металла, при этом краевой угол смачивания Θ составляет 110–130°C. Слой жидкого металла, контактирующий с не смачиваемой им поверхностью, имеет поверхностные свойства (поверхностное сгущение энергии и др.), аналогичные поверхностным свойствам слоя ТЖМТ, контактирующего с газом. В потоке поверхностный слой жидкого металла прижат к стенке конструкции за счет давления в пристенном слое теплоносителя. При понижении давления в локальной точке контакта возможен «отрыв», «отход» от несмачиваемой стенки участка поверхности жидкого металла с образованием полости разрежения, заполненной разреженным газом. При перемещении этой области в область повышенного давления возможны динамические эффекты с нормальной составляющей скорости ТЖМТ к ограничивающей стенке, приводящие к интенсивному эрозионному износу поверхности стали. В водяном и натриевом теплоносителях, смачивающих ограничивающие их стенки, такие процессы невозможны.

При создании главных циркуляционных насосов отечественных транспортных реакторных установок макетные и опытные образцы отработывались первоначально на воде, а затем проходили испытания на натуральной среде – свинец-висмутовом теплоносителе. При испытаниях на воде поверхность проточной части покрывалась специальным лаком, разрушение слоя этого лака рассматривалось как следствие кавитационного износа, который устранялся путем доводки геометрии проточной части. Значения основных выходных характеристик проточных частей на эвтектике свинец-висмут, как правило, были близки к аналогичным значениям, получаемым на воде (с учетом разницы значений плотностей сред). При этом неоднократно фиксировались случаи, при которых проточные части насосов, успешно прошедшие все испытания на воде, интенсивно разрушались при испытаниях на эвтектике свинец-висмут. Это требовало доводки проточных частей насосов на ТЖМТ путем поэтапных последовательных испытаний конструкций опытным пу-

тем с последующими испытаниями в среде ТЖМТ. Наряду с этим имели место случаи, при которых положительные испытания на воде совпадали с последующими положительными испытаниями проточных частей на ТЖМТ без следов какого-либо изнашивания после испытаний на натурной среде. Аналогичные процессы отмечались при создании подводов и отводов насосов.

ВЫВОДЫ

При создании лопастных насосов для циркуляции свинцового и свинец-висмутового теплоносителей для реакторных контуров необходимо учитывать такие специфические свойства этих теплоносителей как невозможность возникновения кавитации в потоке ТЖМТ при рабочих температурах, несмачиваемость теплоносителями конструкционных материалов и др. Учет специфики свойств теплоносителя обуславливает неприменимость традиционных расчетных методов (в части кавитации и др.), используемых для расчета насосов, перекачивающих водяной и натриевый теплоносители.

Поступила в редакцию 03.03.2009

condensation mode in the event of the beyond design basis accident has been carried out at the GE2M-PG large-scale facility. The tests were carried out under conditions of natural circulation, both in primary (condensing steam) and in the secondary (boiling water) circuits of the facility at primary circuit steam pressures P_{s1} : 0.21, 0.36, 0.77 MPa. The empirical correlations for prediction of the thermal capacity of heat-exchange apparatus working in the mode of steam condensation from pressure difference between circuits were obtained.

УДК 621.039.53

VVER-1000 Fuel Irradiation in the MIR Reactor under Conditions Simulating II and III Stage of the Design-Basis «Large-leak» Accident \A.V. Alekseev, A.V. Goryachev, V.V. Kalygin, I.V. Kiseleva, V.N. Shulimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 5 illustrations. – References, 2 titles.

Presented are the testing procedure and results of a VVER-1000 fuel assembly fragment incorporating 19 fuel elements in the MIR reactor channel under conditions of the second and third stage of the «Large Leak» accident. In the experiment the final stage of the accident was simulated which takes place under non-compensatory escape of coolant from the primary cooling circuit as a result of rupture of the pipe having maximum diameter. The main purpose of the test is obtaining data on the cladding deformation of fuel elements with different fuel burnup under the above conditions.

УДК 621.039.7:546

Determination of Radiation Heterogeneity and Damaged Volume of Multiphase Actinide Compositions \A.A. Kozar; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 5 illustrations. – References, 12 titles.

The quantitative determination of radiation heterogeneity is proposed for multiphase actinide compositions. This parameter gives possibility to compare them radiation stability degree relative to a self-irradiation by heavy charged particles without the detailed description of these systems. The matrixes radiation heterogeneity is determined depending on diameter of included actinide microspheres and microcylinders. The calculation of matrixes damaged volume is made for different concentrations of included actinide microspheres and microcylinders depending on them diameter. It is shown, that increase of actinide phase size enables to increase its contents in a matrix without rise of dose load on a frame.

УДК 621.039.526:621.039.54

Investigation of Properties of Modified Oxides Structured by Nanotechnology \I.S. Kurina, O.V. Serebrennikova, V.N. Rumyantsev, A.M. Dvoryashin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 17 titles.

Research results on the $\text{PuO}_2 + \text{MgO}$ fuel composition with CeO_2 as a PuO_2 simulator are presented. The water nanotechnology for the production of oxide ceramic materials, developed in IPPE, is used for fabrication of powders and pellets. This technology includes obtaining precipitate, consisting of particles of different sizes as well as of nanoparticles, which is further calcinated, pressed and sintered. It results in modifying structure of the sintered pellets. Modified pellets have anomalously high thermal conductivity measured by the axial thermal current method.

УДК 621.039.534

Specificities of Reactor Coolant Pumps Units with Lead and Lead-Bismuth Coolant \A.V. Beznosov, M.A. Anotonenkov, P.A. Bokov, V.S. Baranov, M.C. Kustov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 3 illustrations.

The results of analysis of the impact of specific properties of lead and lead-bismuth coolant in the characteristics of their flow in the flow of the main circulating pumps and auxiliary power units with these coolants. The impossibility of cavitation (in its traditional sense) in a flow of impeller pumps, pumping lead and lead-bismuth coolants. The results of experimental studies discontinuities of the heavy liquid metal coolant and discussed conditions for the occurrence of cavitation in the flow of gas coolant. Is substantiated miscalculation of circulation pumps, pumping lead and lead-bismuth coolants, wetting the walls restricting the flow of traditional methods for water and sodium coolant.