

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ДРОССЕЛЕЙ В ПОТОКЕ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ВОДЫ

**А.В. Безносков, М.А. Антоненков, Т.А. Бокова, М.В. Ярмонов,
К.А. Махов**

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



Проведено экспериментальное исследование и сравнение гидравлических характеристик потоков воды и высокотемпературного ($T = 400\text{--}500^\circ\text{C}$) расплава свинца в дросселях $d_0 = 3,0\text{ мм}$, $l_0 = 5,0\text{ мм}$; $d_0 = 4,0\text{ мм}$, $l_0 = 5,0\text{ мм}$; $d_0 = 6,0\text{ мм}$, $l_0 = 5,0\text{ мм}$; $d_0 = 4,0\text{ мм}$, $l_0 = 3,0\text{ мм}$; $d_0 = 4,0\text{ мм}$, $l_0 = 7,0\text{ мм}$ при средних скоростях потока в суженных сечениях от 1 до 30 м/с при содержании кислорода в свинцовом теплоносителе, близком к насыщению.

Подобные дроссели применяются в подшипниках скольжения (определяя их работоспособность) главных циркуляционных насосов контуров инновационных реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями, в эжекционных устройствах системы очистки этих теплоносителей и др.

Полученные результаты показывают, что гидравлические характеристики свинцового теплоносителя в дросселях при определенных условиях (противодавление за дросселем, геометрия дросселей) существенно отличаются от гидравлических характеристик потока воды и соответствующих значений, полученных расчетным путем. Это делает недопустимым использование существующих расчетных формул для проектирования конструкций гидростатических подшипников на свинцовом и, вероятно, свинцово-висмутовом теплоносителях.

Ключевые слова: гидродинамика, свинец, дроссель, эксперимент, гидравлические характеристики, гидростатический подшипник, давление, коэффициент местного сопротивления.

Key words: hydrodynamics, lead, throttle, experiment hydraulic characteristics, hydrostatic bearing, the pressure coefficient of local resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты и расчетно-теоретические исследования показывают, что при определенных условиях гидродинамика потоков тяжелых жидкометаллических теплоносителей существенно отличается от гидродинамики потоков воды и натрия [1]. Это объясняется существенными различиями физических свойств этих теплоносителей:

© А.В. Безносков, М.А. Антоненков, Т.А. Бокова, М.В. Ярмонов, К.А. Махов, 2011

- несмачиваемость свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем стенок ограничивающих каналов;
- низкое давление (10^{-10} – 10^{-18} атм) насыщенных паров и высокая температура кипения этих теплоносителей в реакторных условиях;
- плотность, на порядок большая по сравнению с водой и натрием;
- различие в величинах поверхностной энергии и др.

Доказано, что в потоках тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных условиях невозможно возникновение такого традиционного для воды и натрия явления, как паровая и паро-газовая кавитация.

Гидравлические характеристики дросселей и щелевых зазоров являются определяющими при расчете и проектировании гидростатических подшипников скольжения – одного из важнейших элементов, определяющих работоспособность насосов реакторных контуров со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Основное назначение этих дросселей – создание перепада давления, обеспечивающего возврат вала в осевое положение при его отклонении за счет перепада давления в камерах гидростатического подшипника. Для подшипников, работающих в жидкометаллических теплоносителях, минимальный диаметр выбирается из условия его незабивания частицами примесей, циркулирующих совместно с потоком теплоносителя. Традиционно для свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей минимальный диаметр проходных отверстий в условиях реакторного контура назначается 2,0–3,0 мм. Максимальный диаметр проходных отверстий определяется расчетом.

В процессе эксплуатации гидростатического подшипника на поверхностях его элементов, в том числе и проточных поверхностях дросселей, формируются защитные оксидные покрытия, которые могут изменить шероховатость этих поверхностей, микрорельеф и гидравлическое сопротивление канала дросселя, что требует экспериментального подтверждения.

Целью работы было экспериментальное определение характеристик дросселей применительно к условиям гидростатических подшипников главных циркуляционных насосов реакторных контуров со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Конечная цель комплекса работ, составной частью которых является настоящее исследование, – разработка новой методики расчета гидростатических подшипников для тяжелых жидкометаллических теплоносителей или введение в существующие методики корректирующих коэффициентов, либо подтверждение отсутствия различий в работе подшипников в среде традиционных (вода, натрий) и тяжелых жидкометаллических теплоносителей.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВ

Эксперименты проводились с одними и теми же дросселями сначала на водяном стенде, затем на стенде со свинцовым теплоносителем.

В состав стенда с водяным теплоносителем входят циркуляционный электронасос; набор дросселей; расходомер водяной; система измерения давления до и после дросселя; трубопроводы воды d_y25 с прямолинейными участками (350 мм до дросселя и 150 мм после дросселя); трубопроводы газа d_y10 ; компрессор газа; арматура; манометры.

В состав стенда с высокотемпературным свинцовым теплоносителем входят циркуляционный электронасос; емкость насоса диаметром 309 мм, высотой 725 мм; мерная емкость объемом 3 дм³ с двумя электроконтактными сигнализаторами уровня свинца; система защитного газа с баллонами с аргоном и водородом; трубопроводы контура свинцового теплоносителя d_y25 с участками стаби-

лизации (350 мм до дросселя и 150 мм после дросселя); отжимные бачки для замера давления до и после дросселя с электроконтактными сигнализаторами уровня свинца; трубопроводы системы газа; арматура; манометры.

Все оборудование и трубопроводы со свинцовым теплоносителем имеют электрообогрев, выполненный в виде электронагревательных спиралей из нихромовой проволоки З-НП-3,2-200, мощностью по 3,2 кВт. В качестве электроизоляции проволоки используются кордиеритовые бусы. Все оборудование и трубопроводы со свинцовым теплоносителем имеют теплоизоляцию в виде матов из стеклоткани.

В состав системы управления и регулирования параметров стенда входят подсистема автоматического и ручного дистанционного управления электронагревательными спиралями; подсистема управления электродвигателем циркуляционного насоса свинцового теплоносителя; органы управления потоками расплава свинца и газа.

Система сбора, обработки и представления информации включает в себя следующие основные элементы: первичные преобразователи (термопары тип ТХКП, микротермопреобразователи, датчик содержания кислорода в свинце и др.); вторичные преобразователи (дифференциальный усилитель термоЭДС, токовый преобразователь и др.); ЭВМ, укомплектованная АЦП (12 разр., 400 кГц); источники электропитания; вторичные и показывающие приборы; кабели, коммутационную аппаратуру; система измерения перепада давления на дросселе при прохождении потока свинца, включающая в себя два отжимных бачка, содержащих объемы жидкого металла и газа с электроконтактными сигнализаторами положения свободного уровня свинца (объем свинца подключен к штуцерам перед и после дросселя; газовый объем подключен к линиям газа высокого давления и сброса газа и к манометру)

В экспериментах определялись гидравлические характеристики дросселей, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики дросселей

Номер образца дросселя	Характеристики дросселя			
	Диаметр суженной части d_v , мм	Длина суженной части l_v , мм	Отношение площадей суженной части и подводящего (отводящего) участка $d_{j25} F_j/F_1$	l_v/d_0
1	3	5	0,0144	1,67
2	4	5	0,0256	1,25
3	6	5	0,0576	0,83
4	4	3	0,0256	0,75
5	4	7	0,0256	1,75

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Испытания проводились на воде (при следующих условиях: температура воды $\sim 20^\circ\text{C}$, давление, близкое к атмосферному, скорость потока воды в суженной части $w_0 = 4,0\text{--}20,0$ м/с), затем в два последовательных этапа на расплаве свинца. В процессе испытаний измерялись расход воды и соответствующий перепад на дросселе. По результатам экспериментов определялись

- число Рейнольдса в отводящем трубопроводе

$$\text{Re}_1 = \frac{w_1 \cdot d_1}{\nu},$$

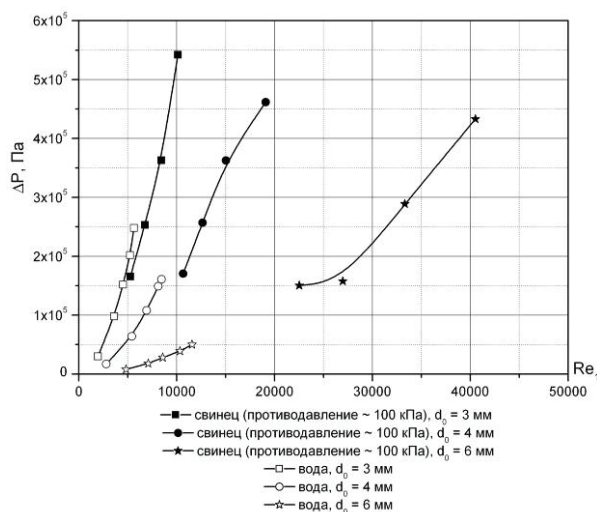


Рис. 1. Зависимость $\Delta P = f(Re)$ ($d_0 = \text{var}$; $l_0 = \text{const}$ (5 мм)) при содержании кислорода в свинце $a = 10^{-1} - 10^0$

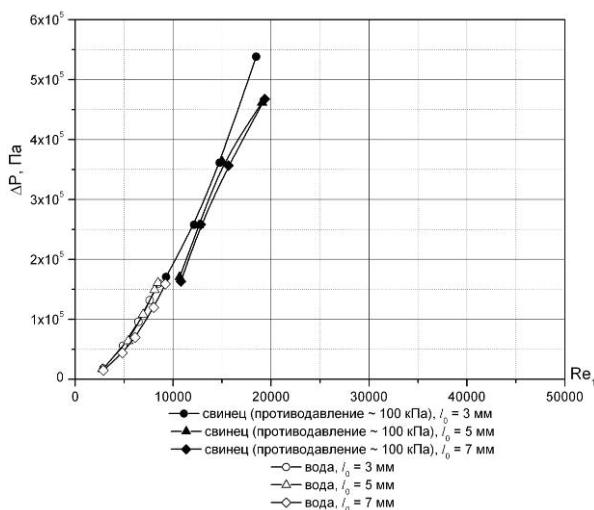


Рис. 2. Зависимость $\Delta P = f(Re)$ ($d_0 = \text{const}$ (4 мм), $l_0 = \text{var}$) при содержании кислорода в свинце $a = 10^{-1} - 10^0$

где w_1 – скорость потока в отводящем трубопроводе, м/с; d_1 – внутренний диаметр отводящего трубопровода, м; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

• коэффициент местного сопротивления

$$\xi_1 = \frac{2 \cdot \Delta P_0}{\rho \cdot w_1^2},$$

где ΔP_0 – перепад давления на дросселе, Па; ρ – плотность среды, кг/м³.

Испытания на свинцовом теплоносителе проводились в два этапа при следующих условиях: температура теплоносителя 400–450°C; скорость потока свинца через дроссель от 1,0 до 30,0 м/с, число оборотов вала электронасоса 700, 850, 1000, 1200, 1500 об/мин; величина объемного среднего расхода свинца от 0,1 до 1,0 м³/ч; содержание кислорода в свинце – на линии насыщения; продолжительность испытаний одного образца дросселя – около 24 ч.

На первом этапе испытания проводились на той же гидравлической трассе, как и при испытаниях на воде; противодействие на выходе из дросселя было неустойчивым близким к атмосферному (≈ 100 кПа) с периодическим незначительным вакуумом.

На втором этапе испытания проводились при тех же условиях, но при последовательно изменяемом противодействии на выходе из дросселя: 110, 120, 220 кПа.

Обработка результатов испытаний проводилась по формулам, аналогичным при испытаниях на воде.

После проведения серий испытаний производится осмотр состояния поверхностей дросселей и измерение диаметра суженной части в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ. СРАВНЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ДРОССЕЛЕЙ НА СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ И НА ВОДЕ

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости перепада давления на дросселях от числа Рейнольдса.

Общим для всех результатов является то, что для рассматриваемых условий характер зависимости $\Delta P = f(Re)$ на дросселях на воде и свинцовом теплоносителе имеет конгруэнтный характер.

В пределах испытаний диаметр дросселя влияет на ход зависимости $\Delta P = f(Re)$, а его длина (в исследуемом диапазоне длин) практически не влияет.

Зависимости коэффициентов местного сопротивления испытанных дросселей от числа Рейнольдса для испытаний на воде незначительно отличаются от аналогичных испытаний на свинце (рис. 3, 4).

Из рисунков 3 и 4 видно, что коэффициенты гидравлического сопротивления на свинце в 1,5–2 раза превосходят коэффициенты сопротивления на воде при приблизительно равных числах Re . Режим течения воды в дросселях автомоделный турбулентный, при котором практически отсутствует влияние числа Рейнольдса на коэффициент сопротивления. Исследования на свинце показывают, что рассматриваемые зависимости соответствуют переходному режиму с наклонной линией в координатах $\lg(\xi_1) = f(\lg(Re_1))$ на горизонтальную.

В процессе испытаний на втором этапе обнаружена зависимость гидравлических характеристик исследуемых дросселей от противодавления на их выходе, испытанных на воде и на свинце (рис. 5–7).

Зависимости коэффициента сопротивления от режима течения (рис. 5–7) для вариантов испытанных дросселей можно разбить на две группы:

- для испытаний на воде и на свинце при противодавлении, близком к атмосферному, минимальном (100 кПа) и максимальном (220 кПа);
- для испытаний на свинце при противодавлениях 110 и 120 кПа.

Расхождение между соответствующими величинами гидравлического сопротивления между этими группами составляет около порядка, а между результатами испытаний на воде и на свинце – до полупорядка.

В качестве возможного объяснения полученных экспериментальных данных

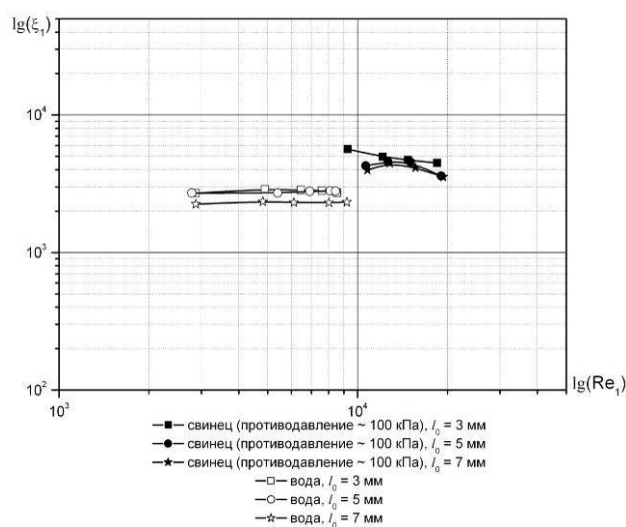


Рис. 3. Зависимость $\xi_1 = f(Re_1)$ ($d_0 = \text{const}$ (4 мм), $l_0 = \text{var}$)

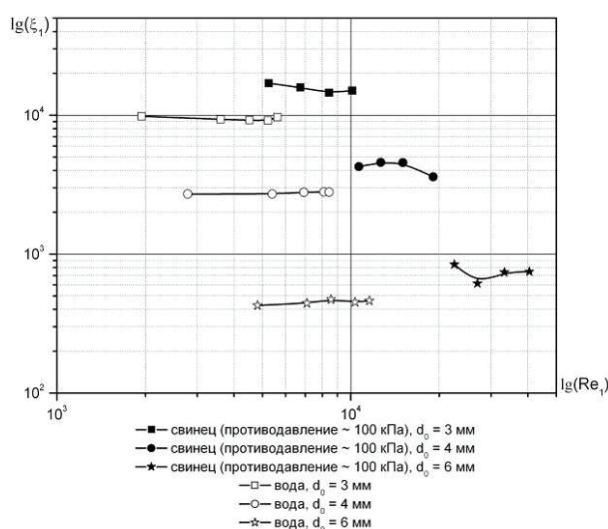


Рис. 4. Зависимость $\xi_1 = f(Re_1)$ ($d_0 = \text{var}$, $l_0 = \text{const}$ (5 мм))

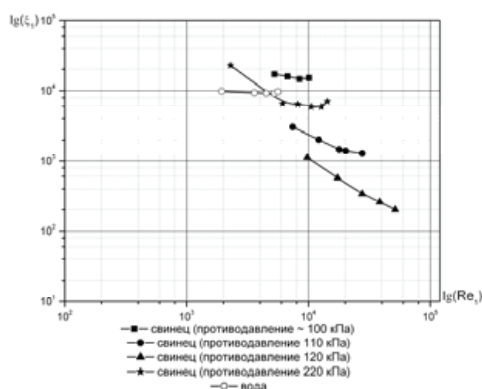


Рис. 5. Зависимость $\xi = f(Re)$ для дросселя с $d_0 = 3$ мм, $l_0 = 5$ мм

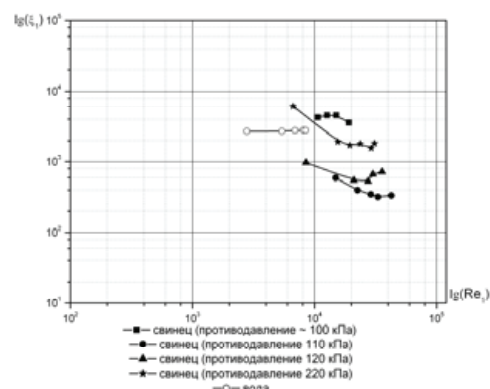


Рис. 6. Зависимость $\xi = f(Re)$ для дросселя с $d_0 = 4$ мм, $l_0 = 5$ мм

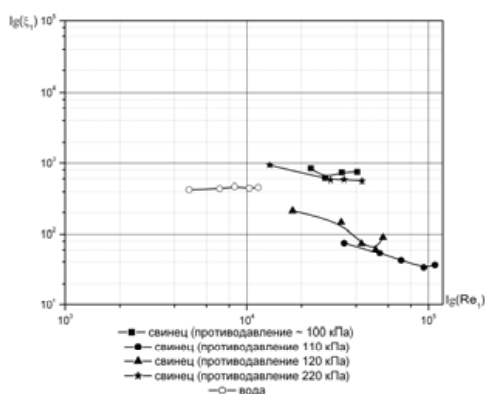


Рис. 7. Зависимость $\xi = f(Re)$ для дросселя с $d_0 = 6$ мм, $l_0 = 5$ мм

авторы предполагают следующее. Специфической особенностью течения свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей в реакторных условиях является несмачивание им стенок каналов со сформированными на них защитными оксидными покрытиями. При увеличении расхода свинца через дроссельную шайбу и средней скорости потока и снижения в нем статического давления уменьшается величина нормального давления со стороны потока на несмачиваемую им стенку. При уменьшении этой величины до нуля возможны «отход» внешней поверхности потока

от стенки канала и стягивание поверхности за счет сил поверхностного натяжения (за счет поверхностной энергии). На свободной поверхности отошедшей от стенки ее участка образуются поверхностные волны. При увеличении средней скорости потока в суженной части дросселя и уменьшении статического давления амплитуда поверхностных волн может увеличиваться с образованием в потоке газопаровых пузырей. Гидравлическое сопротивление потока в начальный момент отхода его поверхности от стенки может уменьшаться из-за отсутствия потерь на трение при взаимодействии со стенкой. В дальнейшем при уменьшении статического давления гидравлическое сопротивление потока может увеличиваться за счет образования двухкомпонентного потока и соответствующей диссипации энергии при пульсациях объема газовой фазы и др. При этом на выходе из суженной части интенсифицируется образование возвратных течений (вихрей).

Статическое давление в потоке, условия отхода его поверхности от стенки, увеличение его гидравлического сопротивления существенно зависят от противодействия на выходе из дросселя. Очевидно, что можно обеспечить прижатие и контакт поверхности потока теплоносителя при любой разумной скорости путем увеличения давления в контуре циркуляции до технически небольших величин (несколько метров столба жидкости). Повышение статического давления в потоке до величины, при которой не происходит отхода поверхности жидкого металла от стенки канала, является эффективным средством, исключающим локальную эрозию поверхностей конструкций под действием потока свинцового теплоносителя.

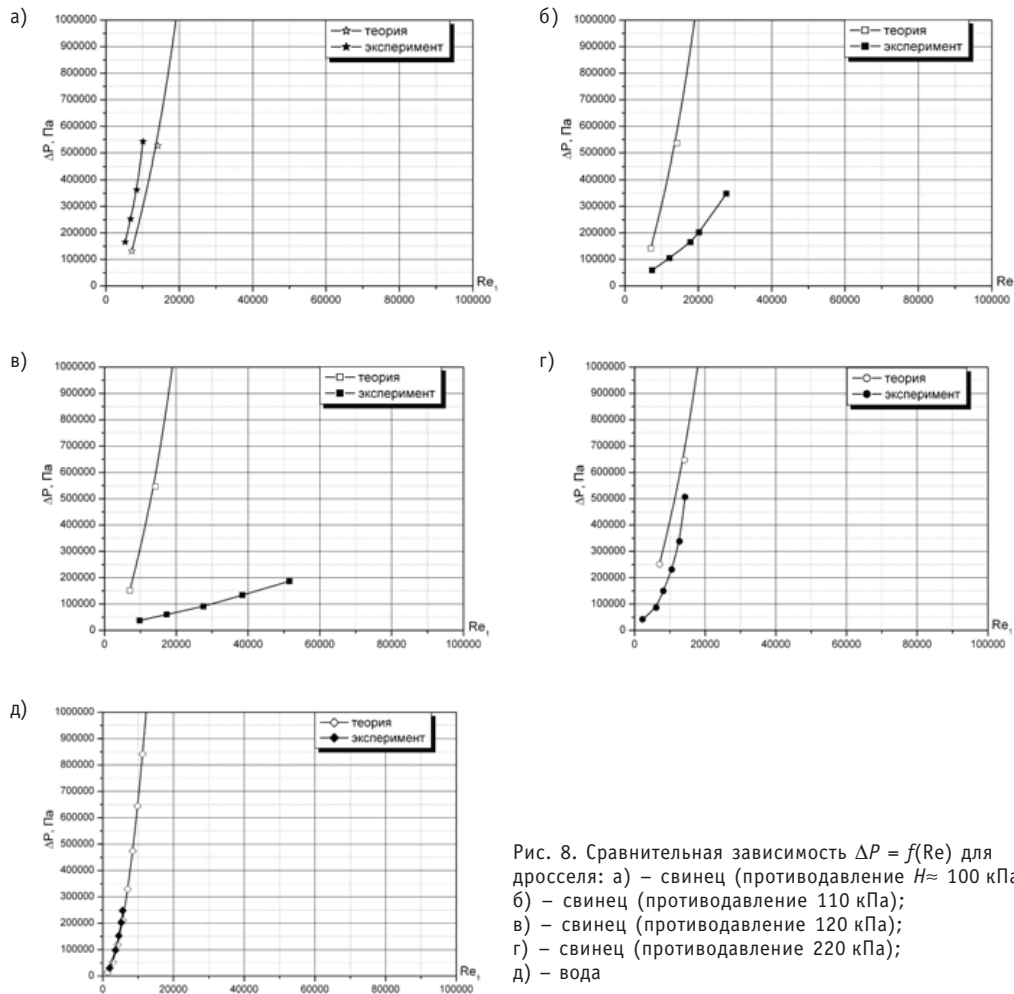


Рис. 8. Сравнительная зависимость $\Delta P = f(Re)$ для дросселя: а) – свинец (противодавление $H \approx 100$ кПа); б) – свинец (противодавление 110 кПа); в) – свинец (противодавление 120 кПа); г) – свинец (противодавление 220 кПа); д) – вода

ля, т.к. при этом возможно исключение течений с нормальными возвратными к стенке канала составляющими скорости ранее оторвавшегося от стенки участка потока жидкого металла. Это предположение наглядно подтверждается рис. 5 и 6.

Результаты сравнения расчетно-теоретических характеристик дросселя $d_0 = 3$ мм, $l_0 = 5$ мм на свинце и на воде, определенных по методике [2], с полученными экспериментально (рис. 8) показывают наличие области противодавления за дросселем, в которой результаты расчетов существенно отличаются от экспериментов.

Для испытанных дросселей с другими размерами характер сравнительных зависимостей аналогичен приведенному на рис. 8.

Для всех испытанных на свинце дросселей при противодавлениях 110 и 120 кПа фиксируются аномально низкие значения ΔP , качественно отличающиеся от результатов расчетов по известной методике. Результаты испытаний на свинцовом теплоносителе при противодавлениях 100 и 220 кПа близки к расчетным, но существенно отличаются от результатов испытаний на воде.

Представленная на рис. 9 зависимость изменения абсолютного давления вдоль оси дросселя показывает, что при противодавлении ≈ 100 кПа на выходе из суженной части дросселя фиксируется отрицательное избыточное давление, при противодавлении 110 и 120 кПа на дросселе имеем меньший перепад давления, чем

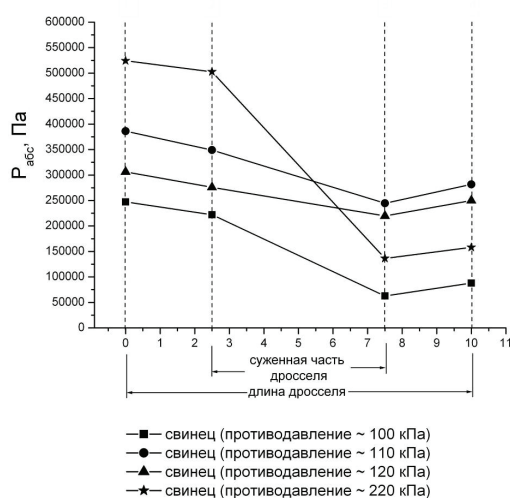


Рис. 9. Зависимость изменения абсолютного давления вдоль оси дросселя ($d_0 = 6$ мм, $l_0 = 5$ мм)

свинце при аналогичных условиях показали переходный режим, в котором нарушается линейная зависимость $\lg(\xi) = f(\lg(Re))$.

3. Испытания показали, что различия в характеристиках дросселей гидростатических подшипников на воде и на свинцовом теплоносителе могут различаться настолько существенно, что это делает недопустимым использование известных, применяемых для воды, методик для расчета характеристик дросселей и гидростатических подшипников в целом.

Работа проводилась в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Литература

1. Безносков А.В. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике/А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАТ, 2006. – 370 с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – 3-е изд. перераб. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

при противодавлении потока на выходе из дросселя 220 кПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Вследствие особенностей физических свойств свинцового (свинцово-висмутового) теплоносителя по сравнению с традиционными (вода, натрий) при определенных условиях гидравлические характеристики этих потоков при течении в дросселях могут существенно различаться.

2. При проведенных испытаниях дросселей на воде режим течения в дросселях соответствовал автомодельному турбулентному, при котором практически отсутствует влияние числа Рейнольдса на коэффициент сопротивления.

Испытания тех же дросселей на

Поступила в редакцию 8.12.2010

УДК 504.064.36:574

Comparative assesment of radiation risk in regions of the location of Novovoronezh, Balakovo and Leningrad Nuclear Power Plants \ M.A. Dmitrieva, A.I. Kryshev, K.D. Sanina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 3 tables, 1 illustration. – References, 14 titles.

Radiation monitoring data of environment near reference objects – Novovoronezh Nuclear Power Plant (NVAES), Balakovo Nuclear Power Plant (BALAES) and Leningrad Nuclear Power Plant (LAES) are summarized in this work (study). Methodology of risk analysis concerning radiation contamination of environment is approved. Results of statistic analysis of radiation monitoring data from different exposure pathways of population, resident in regions of the location NPP are given in this paper. There are also guidelines (recommendations) for optimization of radiation monitoring.

УДК 504.064

Comparative Environmental Impacts of Energy Generating Technologies and Ecological Incentives for the Nuclear Power Development \ V.I. Usanov, V.S. Kagramanayan, E.N. Rachkova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 5 titles.

The model of comparative environmental impacts of energy generating technologies is discussed in the paper. It allows making quantitative assessment of the related impacts and exploring advantages and weak points of the energy generating source under consideration. The model is used for the comparative analysis of the full-energy-chain electricity production options with normalization to natural resources of Russia. The study shows that use of coal and oil fuel cycles give the highest ecological impact; gas fuel cycle and wind take intermediate position; solar and nuclear energy sources were found to be the most ecologically clear options. Under normal operation, the centre of the nuclear fuel cycle environmental impact is displaced to the domain of non-organic resources while other cycles impact biosphere more directly. It's an important result since one can expect more strict impact limitations in the future just in respect of biosphere. The study concludes that health and environment protection are important incentives for development of nuclear power.

УДК 621.039.534

An Experimental Study of Throttles Hydrodynamics in the Mediums of Circulating Water and Lead Coolants \ A.V. Beznosov, M.A. Antonenkov, T.A. Bokova, M.V. Iarmonov, K.A. Makhov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 1 table, 9 illustrations. – References, 2 titles.

The implemented experimental study and comparison of water and high temperature ($T=400 - 500^{\circ}\text{C}$) liquid metal flows hydraulic characteristics for throttles $d = 3,0 \text{ mm}$, $l = 5,0 \text{ mm}$; $d = 4,0 \text{ mm}$, $l = 5,0 \text{ mm}$; $d = 6,0 \text{ mm}$, $l = 5,0 \text{ mm}$; $d = 4,0 \text{ mm}$, $l = 3,0 \text{ mm}$; $d = 4,0 \text{ mm}$, $l = 7,0 \text{ mm}$ for the average stream speed in narrow sections from 1 to 30 m/s with the saturating of lead coolant with oxygen.

Such types of throttles are used in hydrostatic journal bearings (for its operability estimation) in the leading circulating pumps for innovative fast nuclear reactors that are cooled with heavy liquid metals, or in ejection system for HLHC refinement etc.

Results that are received shows that hydraulic characteristics of lead coolant in throttles in certain cases (back-supporting pressure after a throttle, the throttles geometry) differs considerably from those of water stream and its values that are received by the theoretical estimation. It makes for inadmissibility to use existing design formulas for hydrostatic journal bearings designing concerning lead and probably lead-bismuth coolants.

УДК 621.039.553

Calculation of the Conjugated Heat Transfer in Pipe by CFD-Method \ A.A. Kazantsev, V.R. Anisonyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 4 illustrations. – References, 22 titles.

The results of 3D calculations with use of computational fluid dynamics are presented. Comparison of the results is carried out on the basis of program package OpenFOAM applied to the standard