

# Тема 1

Основные свойства жидкометаллических теплоносителей, достоинства и недостатки. Технологические особенности жидких щелочных металлов. Тяжелые жидкометаллические теплоносители (ТЖМТ), свинец и сплавы на его основе. Области применения. Реакторные установки с жидкометаллическими теплоносителями и направления их развития.

# Введение

Непрозрачные жидкости с высокой теплопроводностью и электропроводностью (более  $10E5$  См/м). Ж. м. являются расплавы *металлов*, их сплавов, ряда *интерметаллических соединений*, *полуметаллов* и некоторых *полупроводников*.

Большую часть теплового потока в Ж. м. переносят электроны, а решёточная (фононная) теплопроводность мала. Количеств. оценка электро- и теплопроводности ж. м. затруднена, т. к. теория кинетич. электронных процессов в *жидкостях* имеет качеств. характер и ещё не завершена.

Существуют элементы, которые приобретают свойства металлов только в жидком состоянии, например кремний и германий (полупроводники). Более 70 элементов классифицированы как металлы. В жидком металле, как в любой жидкости среднее расстояние между атомами составляет 2-3 ангстрема (0,1 нм), средняя скорость движения атомов около 1 км/с.

Жидкие металлы подчиняются тем же гидродинамическим закономерностям, что и другие нереологические жидкости, например, вода.

ЖМТ – это высокотемпературные теплоносители ( для сравнения: газы, соли, органика, вода).

В ядерной энергетике преимущественно используются жидкие щелочные металлы (ЩМ) и тяжелые жидкометаллические теплоносители (ТЖМТ) на основе свинца.

Na – БН

Na-K – ЯЭУ космического назначения

Li – термоядерные установки и космического назначения

Pb – БРЕСТ

Pb-Bi – СВБР

# Введение

		Группа																2																																																									
		IA												III A	IV A	VA	VI A	VII A	He																																																								
1	1	1	2											5	6	7	8	9	10																																																								
	1	3	4											13	14	15	16	17	18																																																								
	2	11	12											31	32	33	34	35	36																																																								
	3	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																								
	4	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																																																								
	5	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																																																								
	6	87	88	89																101	102	103																																																					
	7			<table border="1"> <tr> <td>58</td><td>59</td><td>60</td><td>61</td><td>62</td><td>63</td><td>64</td><td>65</td><td>66</td><td>67</td><td>68</td><td>69</td><td>70</td><td>71</td> </tr> <tr> <td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>90</td><td>91</td><td>92</td><td>93</td><td>94</td><td>95</td><td>96</td><td>97</td><td>98</td><td>99</td><td>100</td><td>101</td><td>102</td><td>103</td> </tr> <tr> <td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lw</td> </tr> </table>																58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																																														
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																																														
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																																														
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw																																																														

Рис. 1. Большинство элементов — металлы, находящиеся при нормальных давлениях в твердом состоянии (клетки с одинарной штриховкой). Клетками с двойной штриховкой обозначены те элементы, которые становятся металлами только в расплавленном состоянии. Некоторые другие элементы (включая водород, фосфор, углерод и бор) могут превращаться в металлы при высоких давлениях. Для каждого элемента указаны химический символ и атомный номер (число положительных зарядов в его ядре или число связанных электронов).

# Области применения

- ядерная энергетика
- тепловые трубы
- обогрев химических реакторов
- установки крекинга нефти
- специальные печи
- пресс-формы горячего прессования
- охлаждение оборудования металлургического производства
- мощные прокатные станы и др. ВТУ
- Ga и сплавы Ga-In применяются в качестве вакуумных затворов при получении высокого *вакуума*.

Имеются работы по коррозии конструкционных материалов и в ряде других жидких металлов: алюминии, олове, индии, галлии, теллуре и его сплавах с висмутом, цезии и его сплавах с теллуrom.

Работы по жидкометаллическим тепловым трубам расширяют этот список за счёт таких экзотических теплоносителей, как серебро и золото, а также меди, галлия, германия.

Наиболее дешёвым из жидких металлов является натрий, затем свинец и калий. Поскольку объём теплопередающей системы обычно относительно невелик, а перезарядка производится редко, затраты на теплоноситель незначительны.

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей, достоинства и недостатки

Идеальный теплоноситель должен обладать следующими свойствами:

- термической стабильностью;
- устойчивостью к облучению;
- малым сечением захвата нейтронов;
- нетоксичностью;
- малой наведённой активностью;
- чистотой и малой агрессивностью;
- низкой вязкостью;
- высокой теплопроводностью и теплоемкостью;
- совместимостью с топливными и конструкционными материалами;
- удобством и безопасностью в обращении;
- доступностью и экономичностью производства;
- на его прокачку должно затрачиваться минимум энергии.

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей, достоинства и недостатки

## Основные технологические требования

- низкая температура плавления и высокая температура кипения
- высокая теплопроводность и теплоемкость
- низкая коррозионная активность к используемым КМ

Жидкие металлы имеют малую упругость паров. Давление в системе определяется только потерей напора в контуре, которое обычно меньше 7 атм. Низкое давление существенно упрощает конструкцию и эксплуатацию как реактора, так и вспомогательного оборудования станции.

Высокая [температура кипения](#) жидких металлов обеспечивает большую гибкость в работе. Допустимые тепловые потоки практически не ограничены критическими тепловыми нагрузками. Реактор с натриевым контуром имеет тепловые потоки до  $2,3 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>·ч и удельную объёмную напряжённость 1000 кВт/л.

Высокая [электропроводность](#) жидких [щелочных металлов](#) позволяет полностью использовать герметизированные электронасосы (постоянного и переменного тока). По расходу энергии на прокачивание жидкие металлы лишь немногим уступают воде. Из жидких металлов лучшие характеристики по расходу энергии на прокачивание имеют щелочные металлы. Если, например, расход энергии на прокачивание жидкого натрия принять за единицу, то для ртути это будет 2,8, а для висмута 4,8.

В отличие от других жидких металлов, Na и Na—K оказывают малое [коррозионное](#) коррозионное и [эрозионное](#) коррозионное и эрозионное воздействие на конструкционные материалы. Для натрия и [эвтектики](#) Na—K можно применять многие из обычных материалов.

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей, достоинства и недостатки.

## Недостатки

- Щелочные металлы обладают большой химической активностью. Наибольшую опасность представляет реакция с водой. Поэтому в системах с пароводяными циклами должны быть предусмотрены устройства, обеспечивающие взрывобезопасность.
- Натрий и Na—K являются пожароопасными теплоносителями.
- Необходимо избегать окисления металла, соприкосновение его с воздухом должно быть исключено, так как окись Na нерастворима в жидком Na и Na—K, а включение окислов может привести к закупорке отдельных каналов. Наличие в жидком Na и Na—K окислов натрия ухудшает также коррозионные свойства теплоносителей.
- Активация теплоносителя приводит к необходимости устраивать для наружной части контура теплопередающей системы биологическую защиту. Решение этой проблемы усложняется при  $\gamma$ -излучении высокой энергии. Изотопы Na и K имеют малые периоды распада, но при загрязнении металла активными примесями с большим периодом распада задача защиты от активности усложняется, и требуется создание такой конструкции, которая позволяла бы выводить весь жидкий металл из системы при ее ремонте. Это вынуждает предъявлять повышенные требования к химической чистоте жидких металлов.
- Свинец является токсичным веществом. Теплоносители на его основе в определенных условиях обладают высокой коррозионной активностью. При попадании значительного количества кислорода в свинец происходит закупорка проходных сечений каналов.
- Дополнительные устройства, применение которых необходимо в связи с использованием жидкометаллических теплоносителей, значительно усложняют технологическую схему ядерно-энергетической установки. Такими дополнительными устройствами являются:
  - установка для плавления и передавливания жидкого металла в контур (для Na—K-эвтектики плавильный бак не требуется);
  - устройство для удаления окислов. Через это устройство, включенное параллельно основному контуру, устанавливается небольшой расход жидкого металла; таким образом, осуществляется непрерывная очистка теплоносителя от окислов;
  - контурные нагреватели.

# Характеристики жидких металлов – кандидатов в теплоносители ЯЭУ

Жидкий металл	Распространенность, % вес.	Стоимость*, руб./кг	Химическая активность	Коррозионная активность	Токсичность
Литий (Li)	0,005	60-100	Менее активен, чем Na и K	Более активен, чем Na и K	Более токсичен, чем Na и K
<b>Натрий (Na)</b>	<b>~2,4</b>	<b>1–3</b>	<b>Высокая</b>	<b>Низкая</b>	<b>Низкая</b>
Калий (K)	~2,4	~4	Высокая	Низкая	Низкая
Ртуть (Hg)	$\sim 5 \cdot 10^{-4}$		Низкая	Высокая	Высокая
Свинец (Pb)	0,016	~1	Низкая	Высокая	Высокая
Висмут (Bi)	$\sim 10^{-5}$	40-50	Низкая	Высокая	Высокая
Na–K		3–5	Высокая	Низкая	Низкая
Pb–Bi		25–30	Низкая	Высокая	Высокая
Cs	$6,5 \cdot 10^{-4}$	30-3000	Значительная	Низкая	Низкая

# ЯЭУ с ЖМТ

Тепло-носитель	Использование в энергетике, параметры					
	Реализованные			Проекты		
	Установки	Т <sub>max</sub> , К	Ресурс, годы	Установки	Т <sub>max</sub> , К	Ресурс, годы
Li	Тепловые трубы	1500	30 час	Эльбрус-40 0/200	1600	20
Na	БР-5(10)* БОР-60 БН-350* БН-600 Феникс Рапсодия* Супер-Феникс* PFR* ЕВР-II* Тепловые трубы БН-800	773 (743) 783 (818) 773/713(703) 823 (823) 833 (833) 818 (783) 818 (815) 823 (823) 755 (746) 1000 823 (817)	45 30/40 20→25 30/40 >30 >30 >20 >35 40 50000 час 40	ЕFR (БН-1800) БН-1200 БН КЗГТУ-300 /100	823 (818) 823 (848) 823 (823) 883	60 40 45
К	Тепловые трубы	900	10000 час			
Na-К	БУК ТОПАЗ	988 803	6 мес 12 мес	ЯЭУ-50 (100)	873 (973)	5-7→ 10

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей

**НЬЮТОНА ЗАКОН ТРЕНИЯ** в гидромеханике - эмпирич. ф-ла, выражающая пропорциональность [напряжения](#) трения между двумя слоями прямолинейно движущейся вязкой жидкости относительной скорости скольжения этих слоев, т. е. отнесённому к единице длины изменению скорости по нормали к направлению движения. Предложена И. Ньютоном в 1687. В соответствии с этим законом напряжение трения  $\tau$ , действующее на поверхности элементарного объёма жидкости или газа, пропорц. градиенту скорости  $du/dy$ , где  $u$  - составляющая скорости жидкости вдоль поверхности, а  $y$  - координата, нормальная поверхности:

$$\tau = \eta(du/dy). \quad (1)$$

Коэф. пропорциональности  $\eta$  наз. коэф. внутр. трения жидкости или динамич. коэф. вязкости (иногда просто [вязкостью](#)).  
Перенос теплоты [теплопроводностью](#) в жидкости (газе) обусловлен теми же молекулярными процессами, что и вязкость. Аналогичная закону (1) ф-ла

$$q = \lambda(\partial T/\partial n), \quad (2)$$

где  $q$  - кол-во теплоты, проходящее через единицу площади поверхности в единицу времени,  $T$  - абс. темп-ра,  $n$  - направление нормали к поверхности выделенного элементарного объёма жидкости или газа, наз. ф-лой или законом Фурье. Коэф. пропорциональности в ф-ле (2) наз. коэф. теплопроводности  $\lambda$  (или просто [теплопроводностью](#)).

$$\Delta P_{mp} = h_{n,mp} \rho g = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho w^2}{2} = \zeta_{mp} \frac{\rho w^2}{2} \quad (5)$$

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей

## Уравнения Навье — Стокса

- [уравнения движения](#),
- [уравнения неразрывности](#).

В векторном виде для несжимаемой жидкости они записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0,$$

где  $\nabla$  — [оператор набла](#),  $\Delta$  — [векторный оператор Лапласа](#),  $t$  — время,  $\nu$  — коэффициент [кинематической вязкости](#),  $\rho$  — [плотность](#),  $p$  — [давление](#),  $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$  — векторное поле скоростей,  $\vec{f}$  — векторное поле [массовых сил](#). Неизвестные  $p$  и  $\vec{v}$  являются функциями времени  $t$  и координаты  $x \in \Omega$ , где  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ,  $n = 2, 3$  — плоская или трёхмерная область, в которой движется жидкость.

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей

## Уравнение энергии

Дифференциальное уравнение энергии устанавливает связь между пространственным и временным изменением температуры в любой точке движущейся жидкости:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_{\tau}}{c_p \rho} = a \nabla^2 t + \frac{q_{\tau}}{c_p \rho}.$$

Составляющие плотности теплового потока  $q_{\nu}$  записывается в виде

$$q_{\nu} = q_{x, \text{лок}} + q_{x, \text{конв}}$$

где  $q_{x, \text{лок}}$  и  $q_{x, \text{конв}}$  - плотности теплового потока, входящего в рассматриваемый при выводе уравнения энергии параллелепипед путем теплопроводности (локальное изменение температуры) и конвективного переноса вдоль оси  $x$ .

На основе законы Фурье имеем

$$q_{x, \text{лок}} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}.$$

Конвективная составляющая равна

$$q_{x, \text{конв}} = \rho c_p w_x t$$

где  $w_x$  - составляющая скорости потока вдоль оси  $x$ .

Следовательно,

$$q_x = \rho c_p w_x t - \lambda \frac{\partial t}{\partial x}.$$

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей

Диффузионно-конвективное уравнение переноса примеси

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - v \nabla C,$$

где  $C$  – концентрация, кг/кг;

$D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$v$  – скорость, м/с;

$t$  – время, с.

$$\frac{\partial C^n \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial C^n u_k \varepsilon}{\partial x_k} - \sum_{p=1}^N J^{np} \varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_k} D^n \varepsilon \frac{\partial C^n}{\partial x_k} \quad (1)$$

Where:  $u_k$  - components of velocity vector;  $c^n$  - concentration of impurity component  $n$ ;

$D^n$  - diffusivity factor of component  $n$  in the coolant;  $\varepsilon$  - volumetric porosity of medium.

Porosity of medium is a spatially dependent function which varies in time due to deposition of solid phase of impurity on the surfaces of the loop. The mass source  $J^{np}$  can be represented as volumetric source  $J_v^{np}$  and surface source  $J_s^{np}$ .

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей

Continuity Equation:

$$\nabla \cdot \rho V = 0 \quad (4)$$

Momentum Equation:

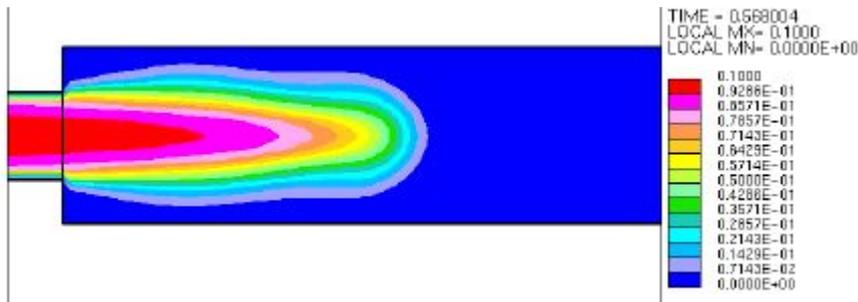
$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 V \quad (5)$$

Energy Equation:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \mu \Phi_V \quad (6)$$

Species Transport Equation:

$$\frac{DC}{Dt} = D_{coeff} \nabla^2 C + R \quad (7)$$



Narain Armbya, Guanjun Li, Yitung Chen, Samir Moujaes  
Mechanical Engineering Dept.  
University of Nevada Las Vegas

Для трёхмерного евклидова пространства в прямоугольной декартовой системе координат (ПДСК)<sup>11</sup> оператор набла определяется следующим образом:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  — единичные векторы по осям  $x, y, z$  соответственно.

Если умножить вектор  $\nabla$  на скаляр  $\phi$ , то получится вектор

$$\nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \vec{k} = \text{grad } \phi$$

который представляет собой градиент функции  $\phi$ .

Если вектор  $\nabla$  скалярно умножить на вектор  $\vec{a}$ , получится скаляр

$$\nabla \cdot \vec{a} = \nabla_x a_x + \nabla_y a_y + \nabla_z a_z = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} = \text{div } \vec{a}$$

то есть дивергенция вектора  $\vec{a}$ .

Если  $\nabla$  умножить на  $\vec{a}$  векторно, то получится ротор вектора  $\vec{a}$ :

$$\nabla \times \vec{a} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ a_x & a_y & a_z \end{vmatrix} = \left( \frac{\partial a_z}{\partial y} - \frac{\partial a_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left( \frac{\partial a_x}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left( \frac{\partial a_y}{\partial x} - \frac{\partial a_x}{\partial y} \right) \vec{k} = \text{rot } \vec{a}$$

Соответственно, скалярное произведение  $\nabla \cdot \nabla = \nabla^2$  есть скалярный оператор, называемый оператором Лапласа. Последний обозначается также  $\Delta$ . В декартовых координатах оператор Лапласа определяется следующим образом:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Поскольку оператор набла является дифференциальным оператором, то при преобразовании выражений необходимо учитывать как правила векторной алгебры, так и правила дифференцирования. Например:

$$\text{grad}(\phi\psi) = \nabla(\phi\psi) = \psi \nabla \phi + \phi \nabla \psi = \psi \text{grad } \phi + \phi \text{grad } \psi$$

$$\text{div}(\text{grad } \phi) = \nabla \cdot (\nabla \phi) = (\nabla \cdot \nabla) \phi = \nabla^2 \phi = \Delta \phi$$

То есть производная выражения, зависящего от двух полей, есть сумма выражений, в каждом из которых дифференцированию подвергается только одно поле.

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей

Классическим определением энергии Гиббса является выражение

$$G = U + PV - TS,$$

где  $U$  — внутренняя энергия,  $P$  — давление,  $V$  — объём,  $T$  — абсолютная температура,  $S$  — энтропия.

Дифференциал энергии Гиббса для системы с постоянным числом частиц, выраженный в собственных переменных — через давление  $p$  и температуру  $T$ :

$$dG = -S dT + V dP.$$

Для системы с переменным числом частиц этот дифференциал записывается так:

$$dG = -S dT + V dP + \mu dN.$$

Здесь  $\mu$  — химический потенциал, который можно определить как энергию, которую необходимо затратить, чтобы добавить в систему ещё одну частицу.

Существует полезное соотношение, связывающее изменение свободной энергии Гиббса  $\Delta G$  в ходе химической реакции с её константой равновесия  $K$ :

$$\Delta G = -RT \cdot \ln K_p,$$

где  $K_p$  - равновесная константа по давлению (только в атмосферах),

Вообще говоря, любая реакция может быть рассмотрена как обратимая (даже если на практике она таковой не является). При этом константа равновесия определяется как

$$K = \frac{k_1}{k_{-1}},$$

где  $k_1$  — константа скорости прямой реакции,  $k_{-1}$  — константа скорости обратной реакции.

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей

В [химической термодинамике](#) закон действующих масс связывает между собой равновесные активности исходных веществ и продуктов реакции, согласно соотношению:

$$K_a = \prod_{i=1}^n a_i^{\nu_i}$$

$a_i$  — [активность](#) веществ. Вместо активности могут быть использованы [концентрация](#) (для реакции в идеальном растворе), [парциальные давления](#) (реакция в смеси идеальных газов), [фугитивность](#) (реакция в смеси реальных газов);

$\nu_i$  — [стехиометрический коэффициент](#) (для исходных веществ принимается отрицательным, для продуктов — положительным);

$K_a$  — константа [химического равновесия](#). Индекс «а» здесь означает использование величины [активности](#) в формуле.

На практике в расчётах, не требующих особой точности, значения активности обычно заменяются на соответствующие значения концентраций (для реакций в растворах) либо парциальных давлений (для реакций между газами). Константу равновесия при этом

обозначают  $K_c$  или  $K_p$  соответственно.

Пример: для стандартной реакции



константа химического равновесия определяется по формуле

$$K_c = \frac{c^c(C) \cdot c^d(D)}{c^a(A) \cdot c^b(B)}$$

# Основные свойства жидкометаллических теплоносителей

## ТЕПЛООБМЕН В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ

Для расчета теплообмена в каналах с использованием полуэмпирических зависимостей используется безразмерный критерий Нуссельта

$$Nu = \alpha d / \lambda$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи из потока теплоносителя на стенку;  
 $d$  – диаметр канала;  
 $\lambda$  - коэффициент теплопроводности теплоносителя.

Средний стабилизированный коэффициент теплоотдачи в круглых длинных трубах в случае загрязненного теплоносителя рассчитывается с использованием критериальной зависимости

$$Nu = 3 + 0,014 (Re Pr)^{0,8}$$

Эта формула соответствует максимальному значению контактного термического сопротивления в условиях нагрева теплоносителя.

Для расчета теплоотдачи к чистым жидкометаллическим теплоносителям рекомендуется формула

$$Nu = 5 + 0,025 Pe^{0,8}$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь: } Re &= U d / \nu \\ Pr &= \nu / a \\ Pe &= U d / a \end{aligned}$$

$U$  – средняя скорость потока теплоносителя;  
 $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости теплоносителя;  
 $a$  – коэффициент температуропроводности.

Формулы справедливы для  $Re = 10^4 \dots 10^6$ ,  $Pr = 5 \cdot 10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-3}$ , тепловых нагрузок не более  $2 \cdot 10^6$  ккал/(м<sup>2</sup> ч), отношение  $l/d$  не менее 30. Последняя формула соответствует тепловому режиму  $q = \text{const}$ .

# ЗАДАЧИ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ И ТЕХНОЛОГИИ ЖМТ

Обеспечение:

- Теплогидравлических характеристик,
- Минимально возможной коррозии конструкционных материалов,
- Безопасности,
- Экологичности,
- Экономичности.

# Технологические особенности жидких щелочных металлов

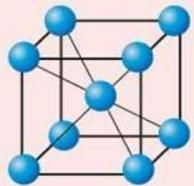
**1** МЕТАЛЛЫ  
**ЩЕЛОЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ**

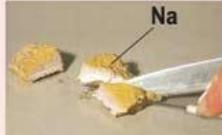
**ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ РАДИУСЫ АТОМОВ**

Li	2,3
Na	2,7
K	3,4
Rb	3,6
Cs	3,9
Fr	4,2

**РАДИУСЫ ИОНОВ**

Li <sup>+</sup>	1,0
Na <sup>+</sup>	1,4
K <sup>+</sup>	2,0
Rb <sup>+</sup>	2,2
Cs <sup>+</sup>	2,4
Fr <sup>+</sup>	2,6

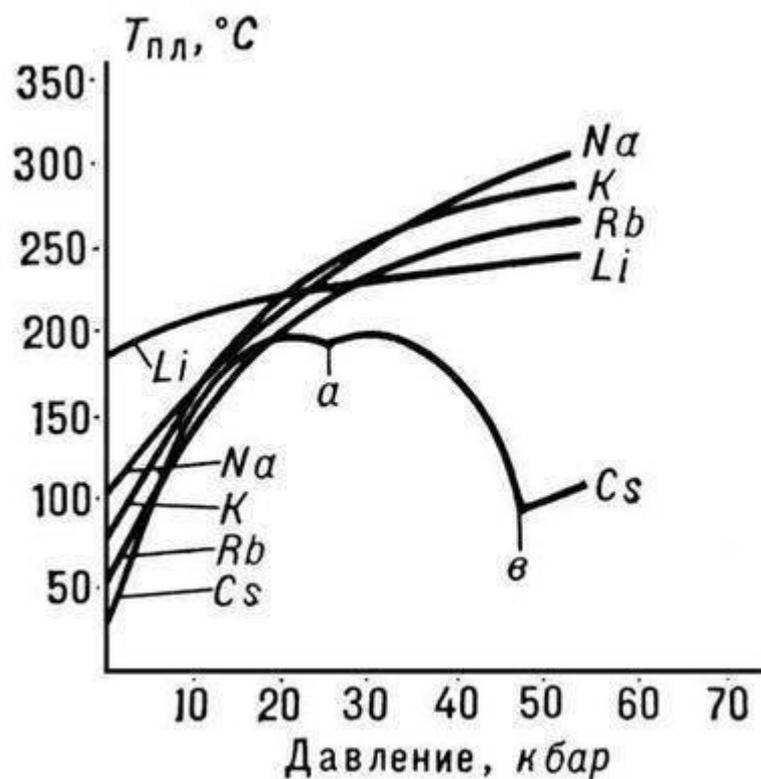
Li в масле  Объемноцентрированная кубическая структура 

Na в масле  

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

МЕТАЛЛЫ	Li	Na	K	Rb	Cs
$t_{пл}, ^\circ C$	179	97,8	63,6	38,7	28,5
$t_{кип}, ^\circ C$	1370	883	766	713	690
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,53	0,97	0,86	1,52	1,87
Твердость	0,6	0,4	0,5	0,3	0,2

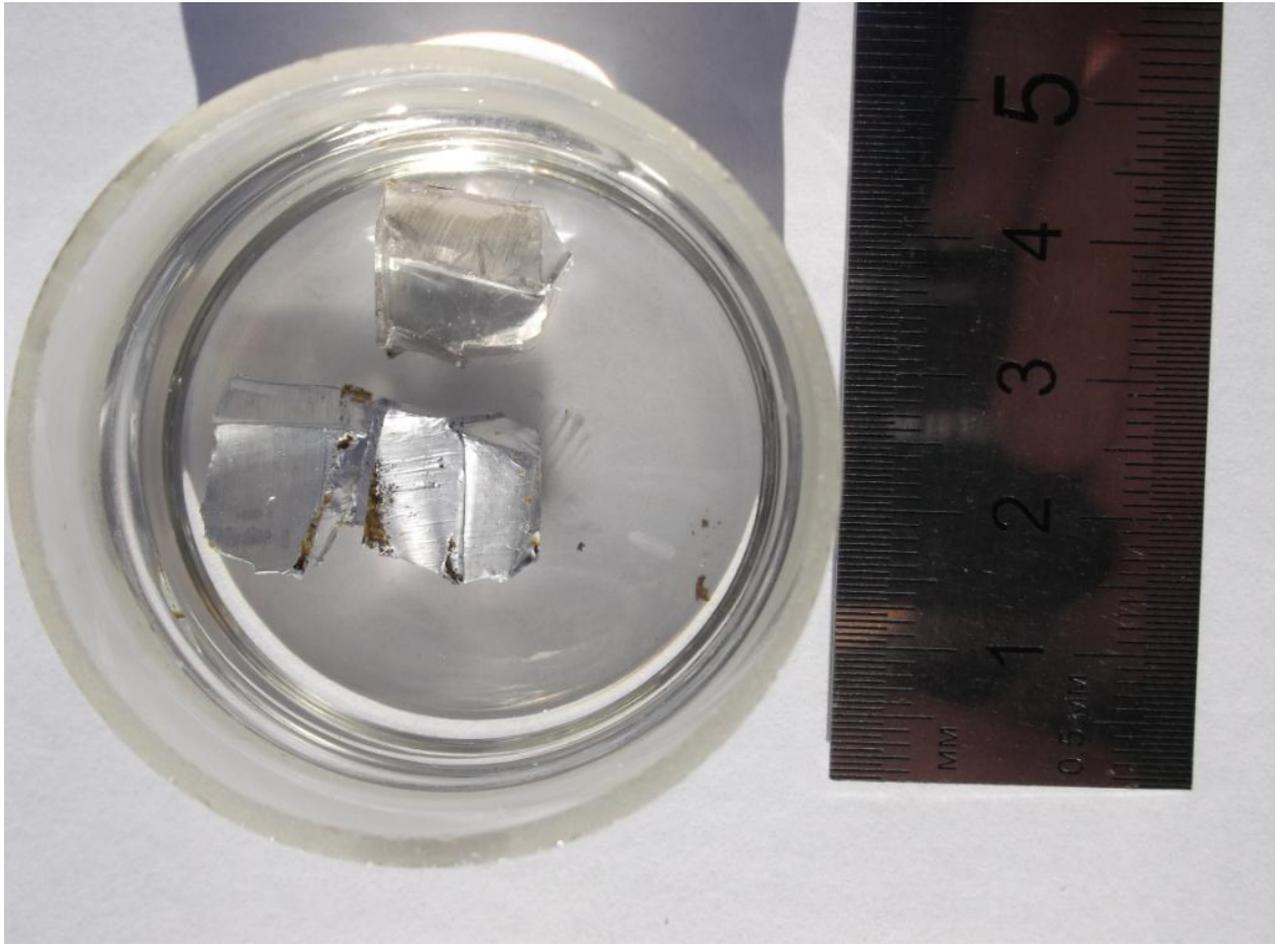
**ХИМИЯ EDUSTRONG**



# Технологические особенности жидких щелочных металлов

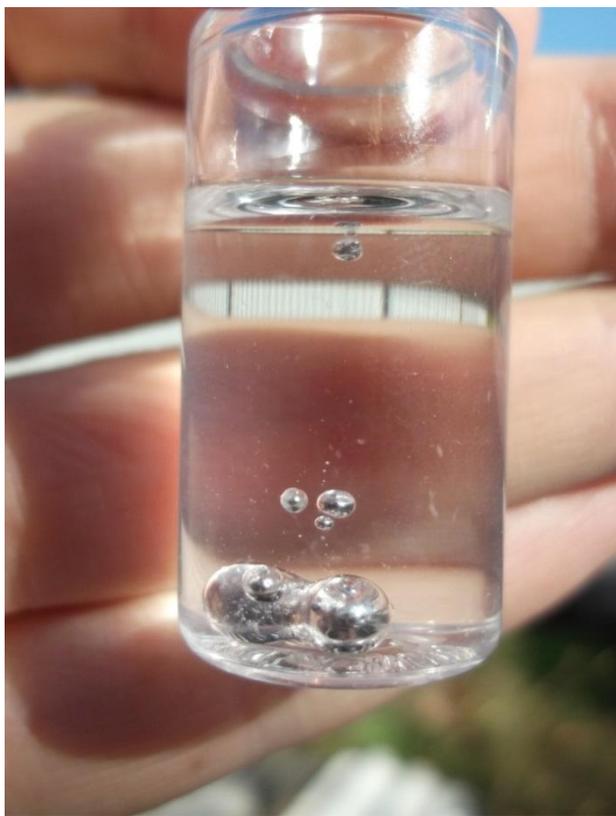
- В настоящее время принято считать наилучшими высокотемпературными жидкометаллическими теплоносителями щелочные металлы: натрий, литий, натрий-калиевые сплавы. Эти теплоносители можно применять до температур 800 – 1200 С. Как физические, так и химические свойства щелочных жидкометаллических теплоносителей довольно хорошо изучены. По отношению к конструкционным материалам жидкие щелочные металлы характеризуются умеренной коррозионной агрессивностью, которая в значительной степени связана с малой растворимостью конструкционных материалов в щелочных металлах. В то же время щелочные металлы обладают очень высокой химической активностью при взаимодействии с водой, паром, кислородом и некоторыми другими веществами.
- Калий и натрий заметно отличаются по цвету. Первый имеет сине-фиолетовый оттенок, второй желтоватый.
- Сплав натрия и калия, который содержит 40-90% калия (по массе), при комнатной температуре представляет собой серебристо-белую жидкость. Химическая активность подобных сплавов очень велика, на открытом воздухе они мгновенно окисляются, теряя свой блеск, самовоспламеняются при контакте с влажными поверхностями или при растирании на горючих материалах (вроде бумаги), при реакции с водой выделяющийся водород воспламеняется. В системе натрий - калий при температуре минус 12.5°С наблюдается эвтектическая точка, которая **соответствует содержанию калия 77.2% (по массе)**. В системе натрий - калий также установлено существование соединения Na<sub>2</sub>K плавящегося при 7°С.
- Сплавы щелочных металлов также способны к образованию легкоплавких эвтектик и могут быть отнесены к группе легкоплавких сплавов. Так сплавы системы [натрий](#) Сплавы щелочных металлов также способны к образованию легкоплавких эвтектик и могут быть отнесены к группе легкоплавких сплавов. Так сплавы системы натрий-[калий](#) Сплавы щелочных металлов также способны к образованию легкоплавких эвтектик и могут быть отнесены к группе легкоплавких сплавов. Так сплавы системы натрий-калий-[цезий](#) имеют рекордно низкую температуру плавления: *Советский сплав* плавится при -78 °С. Однако, применение этих сплавов затруднено из-за их высокой химической активности.

# Технологические особенности жидких щелочных металлов



Натрий и калий

# Технологические особенности жидких щелочных металлов



Сплав Na-K под слоем масла



Окисление сплава Na-K на воздухе (прошло 40 минут. Для наглядности капли раздавлены)

# Тяжелые жидкометаллические теплоносители (ТЖМТ), свинец и сплавы на его основе

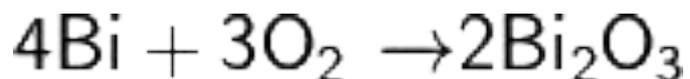
- Для энергетических ядерных реакторов и других целей являются перспективными такие высокотемпературные жидкометаллические теплоносители, как **свинец, висмут и их эвтектический сплав** (56,5 % Bi; 43,5 % Pb). Свинец, висмут и их сплавы относятся к тяжелым жидкометаллическим теплоносителям. В смысле коррозионно-эрозионного воздействия на конструкционные материалы они значительно агрессивнее, чем щелочные металлы (натрий, калий и др.). Но применение этих жидких металлов во многих случаях оправдывается тем, что они обладают, помимо общих для всех жидких металлов преимуществ, большой инертностью к воде и водным средам.
- Свинец обладает хорошими ядерно-физическими свойствами, имеет малое сечение захвата нейтронов, что позволяет применять его в качестве теплоносителя в реакторах, работающих на промежуточных и быстрых нейтронах. Свинец слабо активизируется в реакторных условиях, взрывобезопасен. Давление паров его мало, температура кипения высока ( $\sim 1750^{\circ}\text{C}$ ), что позволяет иметь низкое давление в I контуре реактора. Свинец сравнительно дешев и его можно производить в больших количествах.

# Свинец

- Тяжёлый металл серебристо-серого цвета с синеватым оттенком
- Свинец образует два простых оксида — [оксид свинца\(II\)](#) Свинец образует два простых оксида — оксид свинца(II)  $PbO$  и [оксид свинца\(IV\)](#)  $PbO_2$  — и один смешанный  $Pb_3O_4$  (свинцовый сурик), фактически являющийся [плюмбатов\(IV\) свинца\(II\)](#)  $Pb_2PbO_4$ .

Термодинамические свойства простого вещества	
<a href="#">Плотность</a> (при <a href="#">н. у.</a> )	11,3415 <sup>[2]</sup> г/см <sup>3</sup>
<a href="#">Температура плавления</a>	600,61 <a href="#">К</a> (327,46 °С, 621,43 °F) <sup>[3]</sup>
<a href="#">Температура кипения</a>	2022 <a href="#">К</a> (1749 °С, 3180 °F) <sup>[3]</sup>
<a href="#">Уд. теплота плавления</a>	4,77 кДж/моль
<a href="#">Уд. теплота испарения</a>	177,8 кДж/моль
<a href="#">Молярная теплоёмкость</a>	26,65 <sup>[2]</sup> Дж/(К·моль)
<a href="#">Молярный объём</a>	18,3 <a href="#">см<sup>3</sup>/моль</a>

# Висмут



С металлами способен образовывать [интерметаллиды](#) — висмутиды

## Термодинамические свойства простого вещества

<a href="#">Плотность</a> (при <a href="#">н. у.</a> )	9,79 г/см <sup>3</sup>
<a href="#">Температура плавления</a>	271,44 °С, 544,5 <a href="#">К</a>
<a href="#">Температура кипения</a>	1564 <a href="#">К</a>
<a href="#">Уд. теплота плавления</a>	11,30 кДж/моль
<a href="#">Уд. теплота испарения</a>	172,0 кДж/моль
<a href="#">Молярная теплоёмкость</a>	26,0 <sup>[2]</sup> Дж/(К·моль)
<a href="#">Молярный объём</a>	21,3 <a href="#">см<sup>3</sup>/моль</a>

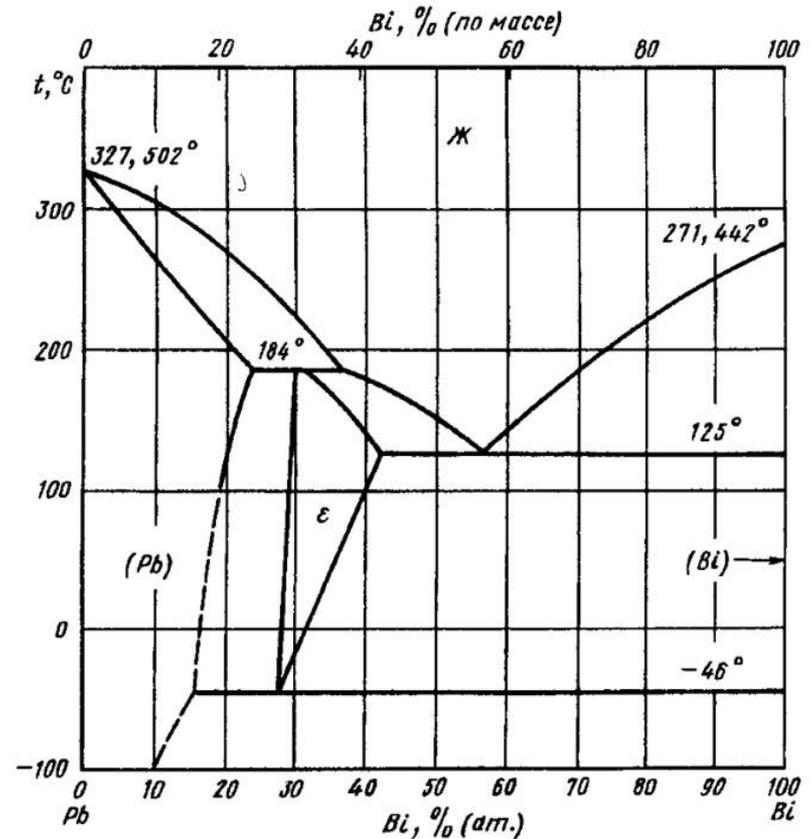
26,40 долларов за килограмм

# Сплав свинец-висмут

Растворимость Вi в Рb зависит от температуры. Максимальное значение 24 % (ат.) Вi при температуре перитектики 184 °С, 15 % при температуре 50 °С.

Фаза  $\epsilon$  образуется по перитектической реакции  $Ж + Pb \leftrightarrow \epsilon$  при температуре 184 °С и эвтектоидно распадается на (Вi) + (Рb) при температуре  $-46$  °С. Между  $\epsilon$ -фазой и (Вi) кристаллизуется эвтектика при температуре 125 °С и содержании -56 % (ат.) Вi.

Диаграмма состояния системы висмут-свинец (Bi-Pb)



# Тяжелые жидкометаллические теплоносители (ТЖМТ), свинец и сплавы на его основе

Одним из главных факторов, влияющих на интенсивность и направление физико-химических процессов, протекающих в I-ом контуре ЯЭУ, является количество кислорода в свинцовом теплоносителе. Избыток его приводит к образованию шлаков на основе  $PbO$  и нарушению тепловых и гидравлических характеристик I-го контура. Недостаток – к диссоциации защитных оксидных покрытий на конструкционных материалах и развитию коррозионных процессов. Поэтому для успешной эксплуатации ЯЭУ с точки зрения технологии теплоносителя необходимо:

- ограничить контакт теплоносителя и контура с кислородосодержащими средами, в частности, с воздухом;
- проводить очистку теплоносителя и контура от избыточного количества кислорода в случае осуществления такого контакта;
- регулировать качество теплоносителя, т.е. поддерживать оптимальное количество примесей (кислорода, оксидных композиций на основе конструкционных материалов).

Для предотвращения вышеуказанных нарушений (образование шлаков на основе  $PbO$ , нарушение герметичности контура вследствие коррозии) применяются следующие средства поддержания качества (методы технологии) теплоносителя и защитного газа, направленные на очистку теплоносителя и контура, а также на регулирование качества теплоносителя по содержанию растворенного кислорода:

- диспергатор газа, используемый для проведения водородной очистки теплоносителя от шлаков на основе  $PbO$ ;
- массообменный аппарат, используемый для регулирования растворенного кислорода при помощи твердофазного окислителя;
- датчик активности кислорода, применяемый для контроля содержания растворенного кислорода в свинцовом теплоносителе;
- фильтр очистки свинцового теплоносителя от твердых примесей;
- датчики контроля водорода и кислорода в газе;
- газовый фильтр;
- дожигатель водорода, увлажнитель газа, конденсатор.

# Реакторные установки с жидкометаллическими теплоносителями и направления их развития

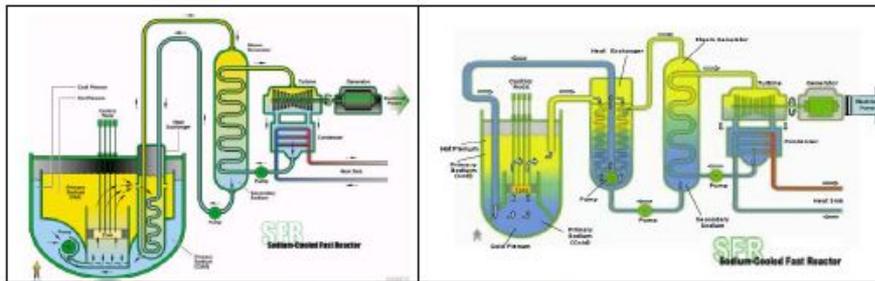
X: Signatory, MOU: Memorandum of Understanding

	 CAN	 FRA	 JPN	 ROK	 ZAF	 CHE	 USA	 EUR	 PRC	 RUS	 UK	 RFB	 ARG
<b>Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)</b>		X	X	X			X	X	X	X			
<b>Very High Temperature Reactor (VHTR)</b>		X	X	X		X	X	X	X				
<b>Gas-cooled Fast Reactor (GFR)</b>		X	X			X		X					
<b>Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR)</b>	X		X					X		X			
<b>Lead-cooled Fast Reactor (LFR)</b>			MOU					MOU		MOU			
<b>Molten Salt Reactor (MSR)</b>		MOU						MOU					

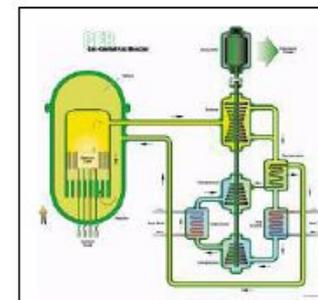
Fig. 1 Membership to GIF System Arrangements

# Реакторные установки с жидкометаллическими теплоносителями и направления их развития

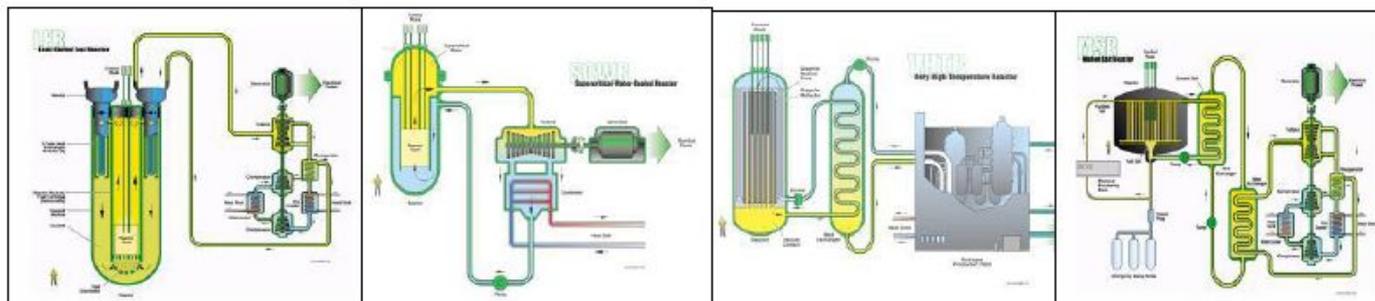
## Six Gen-IV systems



*Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)*



*Gas-cooled Fast Reactor (GFR)*



*Lead-cooled Fast Reactor (LFR)*

*Supercritical Water cooled Reactor (SCWR)*

*Very High Temperature Reactor (VHTR)*

*Molten Salt Reactor (MSR)*

# Реакторные установки с жидкометаллическими теплоносителями и направления их развития

## WORLDWIDE CLOSE TO 400 FR-YEARS CUMULATED OPERATION

### China

- CEFR (23 MWe) 2010

### India

- FBTR (13 MWe) 1985
- PFBR (500 MWe) 2010/11

### Japan

- Joyo (140 MWth) 1977
- Monju (280 MWe) 1994

### Russia (USSR)

- BR10 (8 MWth) 1958 – 2003
- BOR60 (12 MWe) 1968
- BN350 (130 MWe) 1972 – 99
- BN600 (600 MWe) 1980
- BN800 (870 MWe) 2012

### EU (D, F, UK)

- Rapsodie (40 MWth) 1967 – 83
- DFR (15 MWe) 1959 – 77
- KNK-II (20 MWe) 1972 – 91
- Phénix (250 MWe) 1973 – 2009
- PFR (250 MWe) 1974 – 94
- SNR300 (300 MWe) not started
- Superphénix (1200 MWe) 1986 – 98
- EFR Proj. (1580 MWe), cancelled 98

### USA

- EBR-I (a few 100s We) 1951 – 64
- EBR-II (20 MWe) 1961 – 1998
- FFTF (400 MWth) 1980 – 1996
- CRBR Proj. (380 MWe), cancelled 83

**БОР- 60**



**БН- 350**



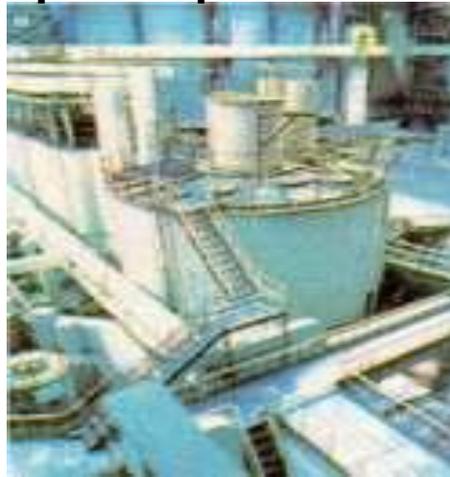
**БН- 600**



**стенд л. 67 (ФЭИ)**



**реактор БН- 350**

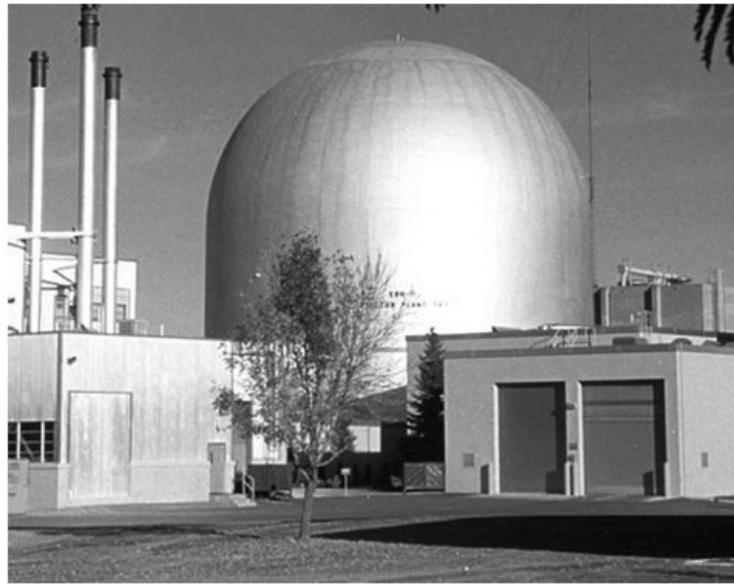


**реактор БН- 600**



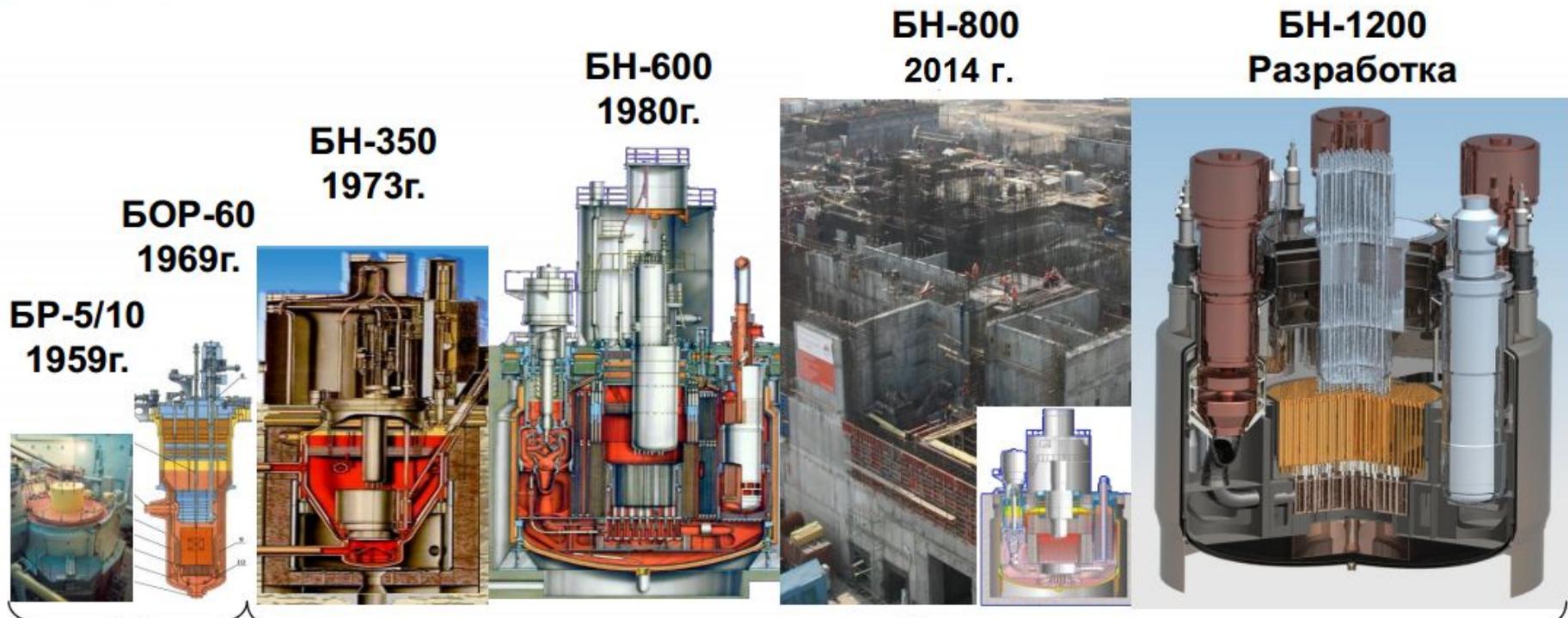
# Быстрые реакторы

*Первая страна, которая разработает реактор на быстрых нейтронах, получит конкурентное преимущество в использовании атомной энергии Энрико Ферми*



**Первым в мире реактором на быстрых нейтронах стала Клементина – опытный реактор мощностью 25 кВт с охлаждением ртутью, построенный на площадке в Лос-Аламосе (1949 г).**

# Эволюция быстрых реакторов в России



Экспериментальные реакторы

Энергетические реакторы

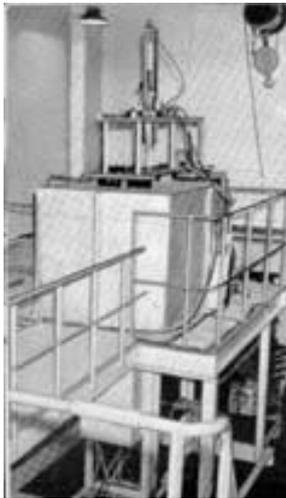
В конце 40-х годов прошлого столетия выдающиеся физики Э. Ферми и А.И. Лейпунский обосновали возможность создания ядерных реакторов на быстрых нейтронах, обладающих расширенным воспроизводством ядерного топлива.

# Первый быстрый реактор в России



## **Реактор БР-1 –**

первый, построенный в ФЭИ реактор нулевой мощности на быстрых нейтронах. На этом реакторе, введенном в эксплуатацию в 1955 г., проводились многочисленные исследования по физике реакторов на быстрых нейтронах, а также исследования по ядерной физике.



В 1956 году был создан реактор **БР-2** мощностью 100 кВт, способный производить теплотехническую энергию.



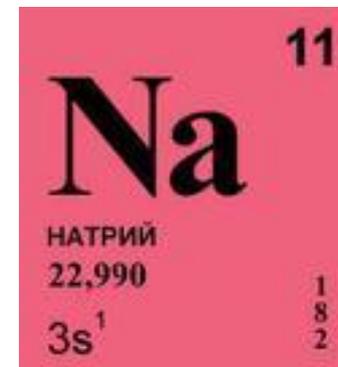
## БР5/БР10

Реактор на быстрых нейтронах **БР-5** тепловой мощностью 5 тыс. кВт с жидким натрием в качестве теплоносителя был сдан в эксплуатацию в январе 1959 г.

На реакторе БР-5, работающем с 1959 г., получены первые принципиальные данные по физике, технологии радиоактивного натрия, работоспособности твэлов и др., необходимые для разработки энергетических быстрых реакторов с натриевым охлаждением.

С 1973 г. после модернизации мощность реактора увеличена до 8 МВт, и он получил название **БР-10**.

*6 декабря 2002 г. в 10 часов 20 минут реактор БР-10 после 43-х лет безаварийной работы был остановлен.*

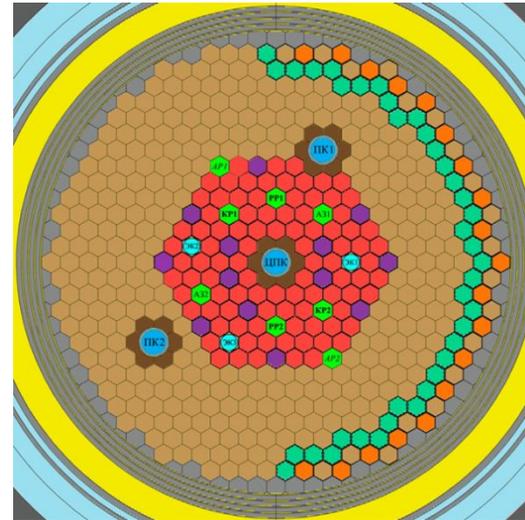
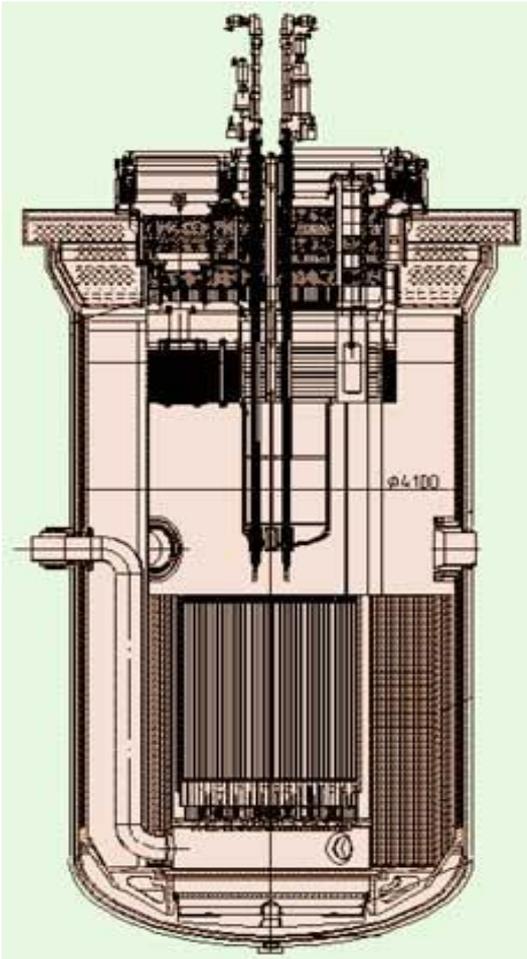


# БОР-60

Реактор **БОР-60** (г. Димитровград, 1969) используется для ресурсных испытаний топлива, тепловыделяющих сборок и новых активных зон, для испытаний моделей парогенераторов, для освоения новых технологий.



# МБИР



**МБИР** - многоцелевой быстрый исследовательский реактор предназначен для выполнения широкого спектра исследовательских и экспериментальных работ. Для этого в активной зоне и боковом экране реактора предусмотрены автономные петлевые каналы и большое число экспериментальных и материаловедческих сборок.

# БН-350

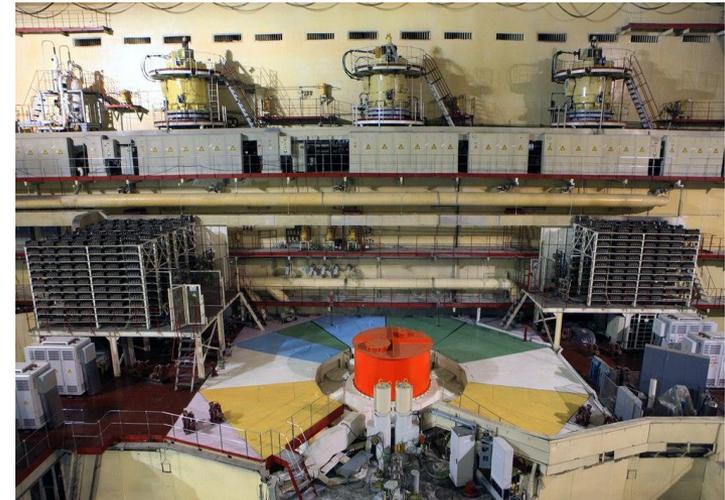


Реактор **БН-350** (г. Актау, 1972) - первый энергетический быстрый реактор. Дал большой опыт промышленного масштаба и, что не менее важно, явился экспериментальной базой для крупномасштабного освоения технологии натрия, физических исследований и испытаний топливных сборок, других элементов активной зоны, оборудования.



# БН-600

**БН-600** — энергетический реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, пущенный в эксплуатацию в апреле 1980 года в качестве 3-го энергоблока на Белоярской АЭС в Свердловской области близ города Заречный.



# БН-800



## **БН-800**

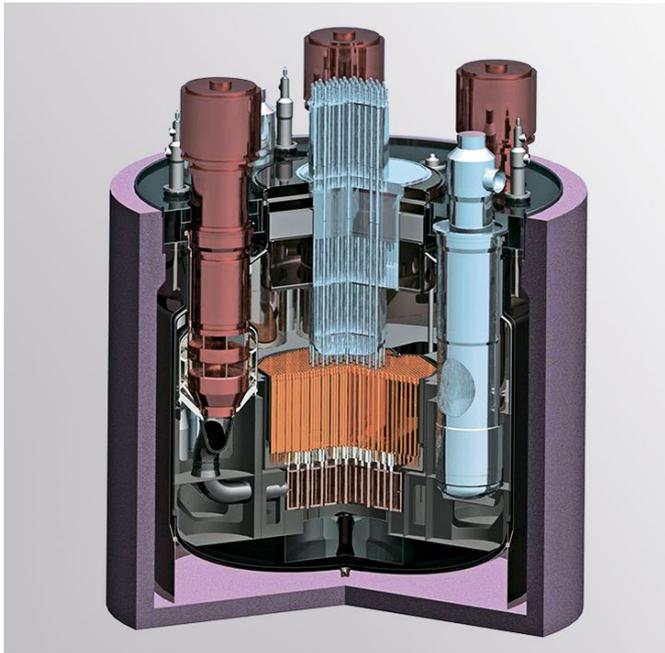
**31 октября 2016 был введен  
опытно-промышленную  
эксплуатацию.**

**В октябре 2016 года старейший  
американский журнал по  
энергетике «POWER» присудил  
четвёртому энергоблоку  
Белоярской АЭС с реактором  
БН-800 премию «Power Awards» за  
2016 год в номинации «Лучшие  
станции».**



# БН-1200

Строительство реактора на быстрых нейтронах **БН-1200** будет вестись на Белоярской атомной станции.



**БН-1200 реактор 4-го поколения.**

**БН-1200 является результатом эволюционного развития РУ с натриевым теплоносителем.**

# Реакторные установки с жидкометаллическими теплоносителями и направления их развития

## Развитие технологий быстрых натриевых реакторов

---

*Почему Концерн Росэнергоатом для обеспечения конкурентоспособности (за счет сокращения затрат на обращение с ОЯТ) рассматривает технологию натриевых реакторов как приоритетную?*

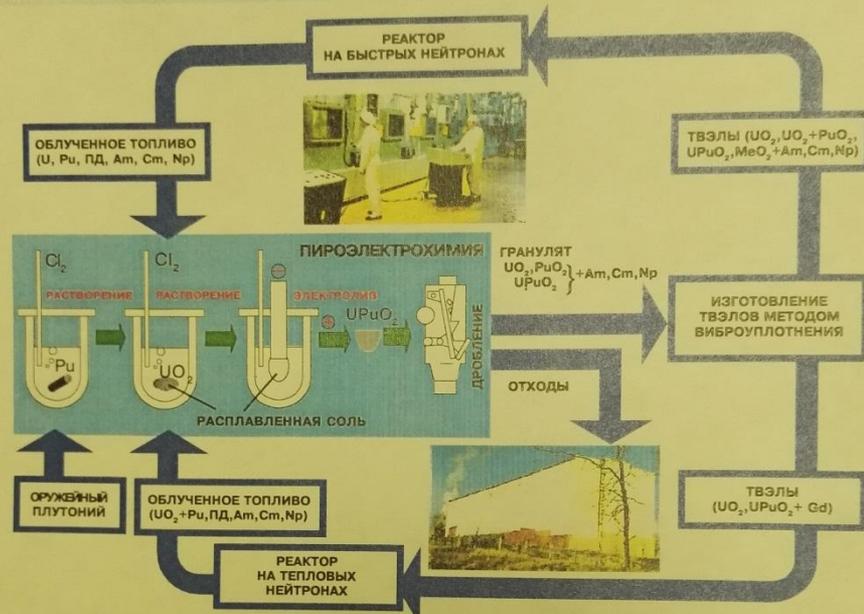
- 1. В ближайшей и среднесрочной перспективе отсутствует альтернатива внедрению в замкнутый ЯТЦ иной реакторной технологии, кроме технологии быстрых натриевых реакторов, обладающей необходимыми обоснованностью, технико-экономическими характеристиками, референтностью и опытом эксплуатации.**
- 2. Так как в замкнутом ЯТЦ эта технология предусматривает утилизацию в БН-реакторах плутония от переработки ОЯТ ВВЭР при том, что ВВЭР и БН используют МОКС-топливо.**
- 3. Имеется возможность замещения сооружения энергоблоков с ВВЭР в инвестиционной программе Госкорпорации «Росатом» на энергоблоки с БН-1200 при условии превышения затрат на их сооружение и эксплуатационных затрат по сравнению с технологией ВВЭР не более, чем на 15%, что является реально достижимым**

# ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ (DDP-Dimitrovgrad Dry Process)

## ПРЕИМУЩЕСТВА

ВВЕДЕНИЕ В ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ ВЫСОКОАКТИВНЫХ  
ДЕЛЯЩИХСЯ ИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ, U-233, Np, Am, Cm  
КОНВЕРСИЯ ОРУЖЕЙНОГО ПЛУТОНИЯ  
МИНИМАЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ОПЕРАЦИЙ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ

МИНИМАЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ОТХОДОВ  
КОМПАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО  
НИЗКАЯ СТОИМОСТЬ  
МАКСИМАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
МИНИМАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ



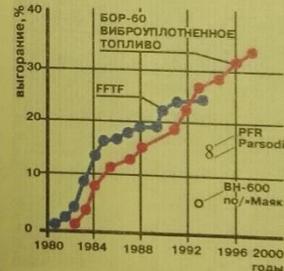
## ПРИНЦИПЫ

-СУХИЕ- ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ  
ТОПЛИВА  
ПОЛУЧЕНИЕ ТОПЛИВА В ВИДЕ  
ПЛОТНЫХ ЧАСТИЦ  
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТВЭЛОВ  
МЕТОДОМ ВИБРОУПЛОТНЕНИЯ  
ДИСТАНЦИОННО-УПРАВЛЯЕМЫЕ  
ПРОЦЕССЫ

Производство оксидного гранулированного  
топлива 4,7т, в том числе 2,1т МОХ-топлива  
Изготовление твэлов с  
виброуплотненным топливом

Вид топлива	Реактор	Количество ТВС	Количество твэлов
UPuO <sub>2</sub> (р.к.)	BOR - 60	386	15762
UPuO <sub>2</sub> (о.к.)	BN - 350	2	254
UO <sub>2</sub> (per.)	BN - 350	7	889
UO <sub>2</sub> (per.)	BN - 600	6	762
UPuO <sub>2</sub> (о.к.)	BN - 600	6	762
UPuO <sub>2</sub> (р.к.)	BN - 600	4	908
UPuO <sub>2</sub> (о.к. р.к.)	BFS	8	1016
UO <sub>2</sub> (per.)	BOR - 60	134	4858

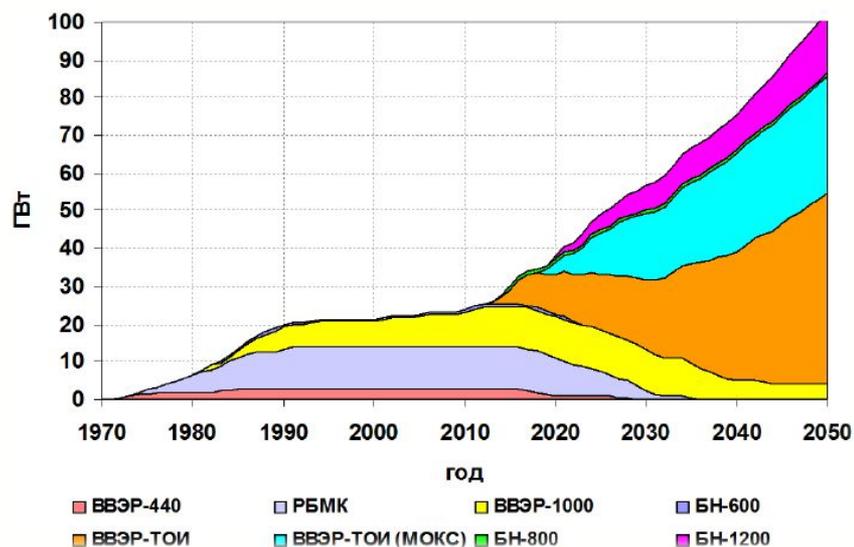
р.к. - Pu реакторного качества (высокообогащенный);  
о.к. - Pu оружейного качества (низкообогащенный);  
per. - продукт переработки облученного топлива на



РТ-1 МАКСИМАЛЬНОЕ ВЫГОРАНИЕ В ТВЭЛАХ  
С UO<sub>2</sub> В РАЗЛИЧНЫХ РЕАКТОРАХ

# Реакторные установки с жидкометаллическими теплоносителями и направления их развития

Установленные мощности; базовый сценарий (1й этап)  
ЯЭС с ВВЭР и БН в замкнутом ЯТЦ.



Реактор	ВВЭР-440	РБМК	ВВЭР-1000	БН-600	ВВЭР-ТОИ	ВВЭР-ТОИ (МОКС)	БН-800	БН-1200
Срок службы, лет	45	45	50	40	60	60	45	60

# Реакторные установки с жидкометаллическими теплоносителями и направления их развития

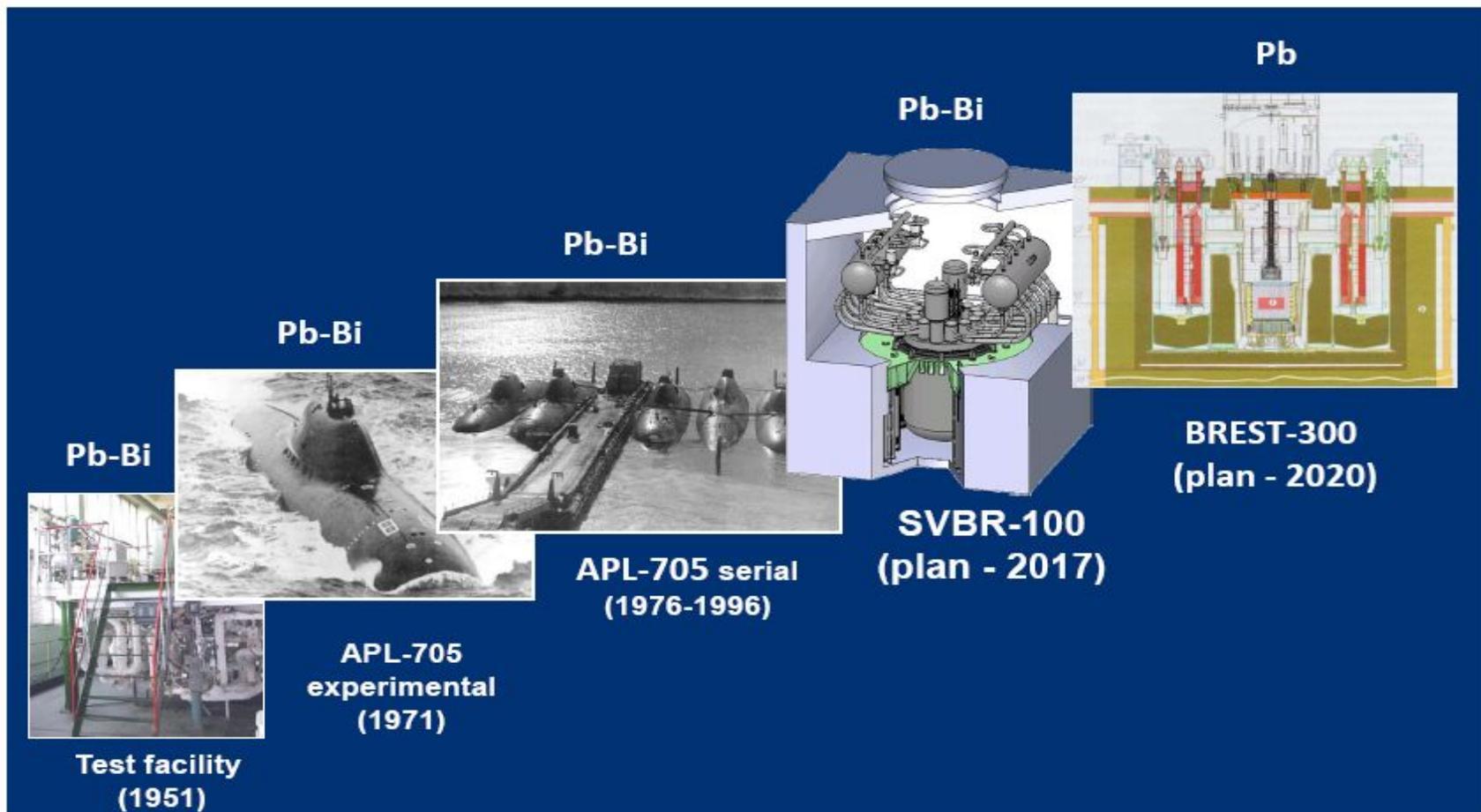
## Модернизация активной зоны БН-600



Дальнейшее повышение эффективности и экономичности использования ядерного топлива в реакторе БН-600 связано с разработкой новых перспективных активных зон и доведением максимальной глубины выгорания топлива в ТВС до 15 % т.а.

Для осуществления этой задачи потребуется решить ряд научно-технических проблем, основной из которых является разработка новых конструкционных материалов для оболочек ТВЭЛ.

# Реакторные установки с жидкометаллическими теплоносителями и направления их развития



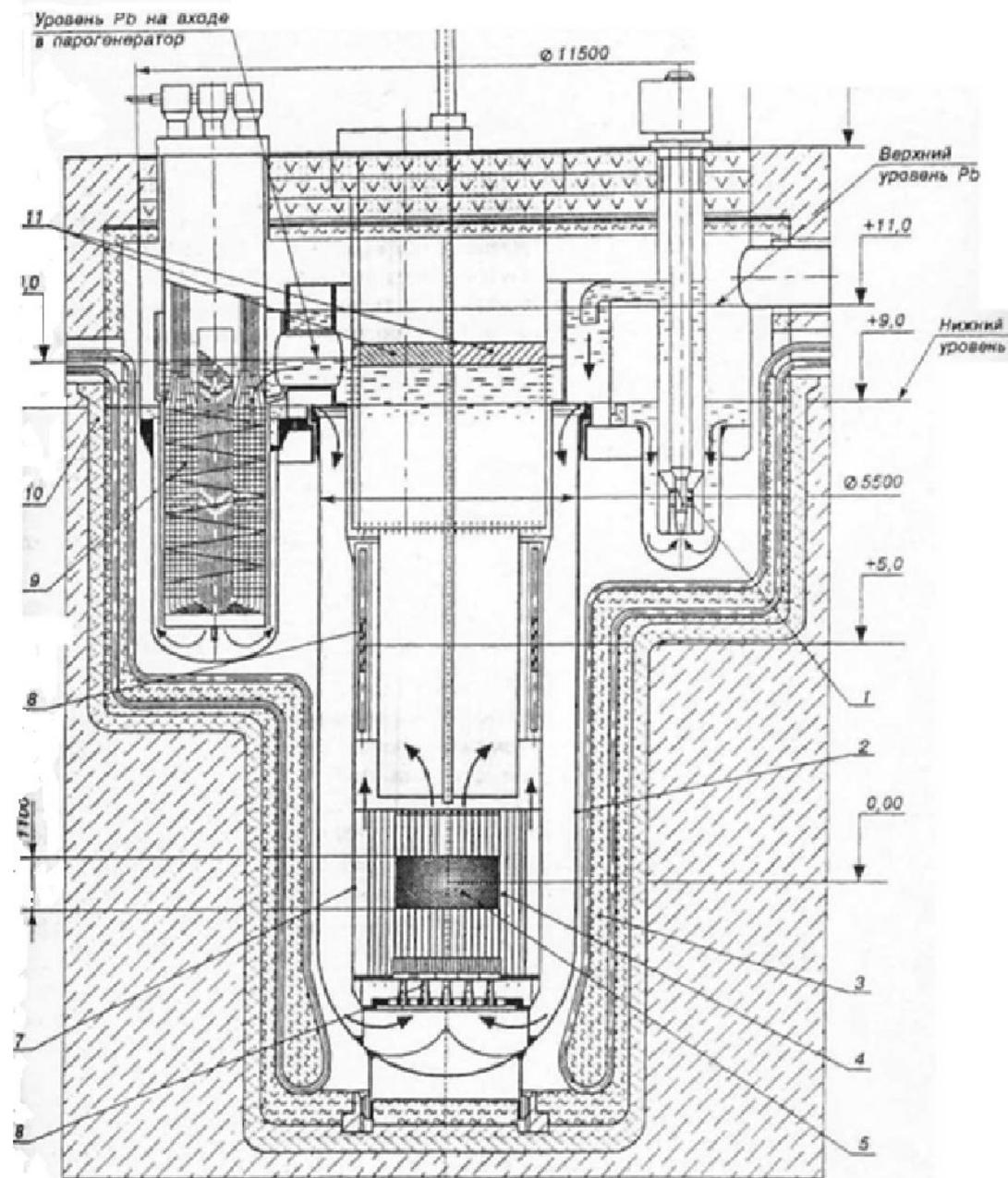
# Общая ситуация к моменту ввода в строй АПЛ второго поколения

- В начальный период освоения свинцово-висмутового теплоносителя были выявлены две основные проблемы его использования.
- Это проблема жидкометаллической коррозии сталей и проблема шлакования трактов циркуляции теплоносителя.
- Первоначально доминировала проблема шлакования контуров, а после разработки соответствующих методов их очистки и в целом повышения культуры обращения с теплоносителем на первый план выдвинулись проблемы обеспечения коррозионной стойкости сталей.



К моменту ввода в строй первых АПЛ проектов 705 и 705К обе эти проблемы были в основном решены. К этому же времени был достигнут и определённый уровень понимания протекающих в первом контуре физико-химических процессов

# Схема реактора БРЕСТ-300



- |         |          |               |       |                 |                           |                 |                 |                  |                      |     |
|---------|----------|---------------|-------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|-----|
| 1—насос | 2—корпус | 3—термозащита | 4—СУЗ | 5—активная зона | 6—разделительная обечайка | 7—хранилище ТВС | 8—парогенератор | 9—бетонная шахта | 10—поворотные пробки | 11— |
|---------|----------|---------------|-------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|-----|

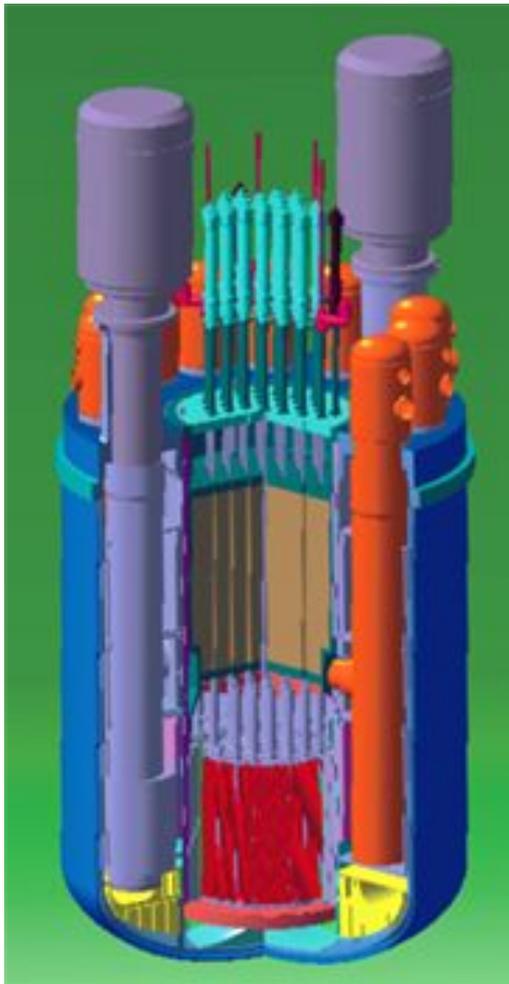


# БРЕСТ-300

Технические характеристики свинцовоохлаждаемого реактора мощностью 300МВт

ХАРАКТЕРИСТИКА	БРЕСТ-ОД-300
Тепловая мощность, МВт	700
Электрическая мощность, МВт	300
Число ТВС в активной зоне, шт.	185
Диаметр активной зоны, мм	2300
Высота активной зоны, мм	1100
Диаметр твэла, мм	9,7; 10,5
Шаг твэла, мм	13,6
Топливо активной зоны	UN+PuN
Топливная загрузка, (U+Pu)N, т	16
Кампания топлива, лет	5
Интервал между перегрузками, лет	1
КВА	~ 1
Доля запаздывающих нейтронов, ( $\beta_{эфф}$ %)	0,36
Температура входа/выхода свинца, °С	420/540
Максимальная скорость свинца, м/с	1,8
Температура пара на выходе из ПГ, °С	520
Расход свинца, т/с	40
Паропроизводительность 8 ПГ, т/с	0,43
КПД нетто энергоблока, %	43

# Новые задачи технологии и их связь с исследованиями в области физхимии ТЖМТ



- **Принципиально новым фактором** являются заявленные **существенные ресурсы работы новых установок**, которые на порядок и больше превышают ресурсы работы своих ближайших прототипов.
- **Следствием** таких повышенных ресурсов является **усиление роли долговременных массообменных процессов**, протекающих в первом контуре.
- Применительно к обоснованию таких длительных ресурсов появились **специфические трудности** временного характера:
  - существенно ограничены возможности обоснования режимов путем прямых ресурсных испытаний;
  - могут проявиться дополнительные эффекты;

## Способы преодоления данных трудностей:

- углубленное изучение реальных процессов, для повышения надежности долговременных прогнозов;
- выявление оптимальных условий эксплуатации РУ;
- разработка соответствующих адекватных моделей и расчетных методик;
- их подтверждение стендовыми испытаниями;
- разработка на этой основе рекомендаций и прогнозов на длительный период.

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ – ФУНДАМЕНТ ОБОСНОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖМТ В ЯЭУ

Особенно важно правильно использовать понятия:

Растворы

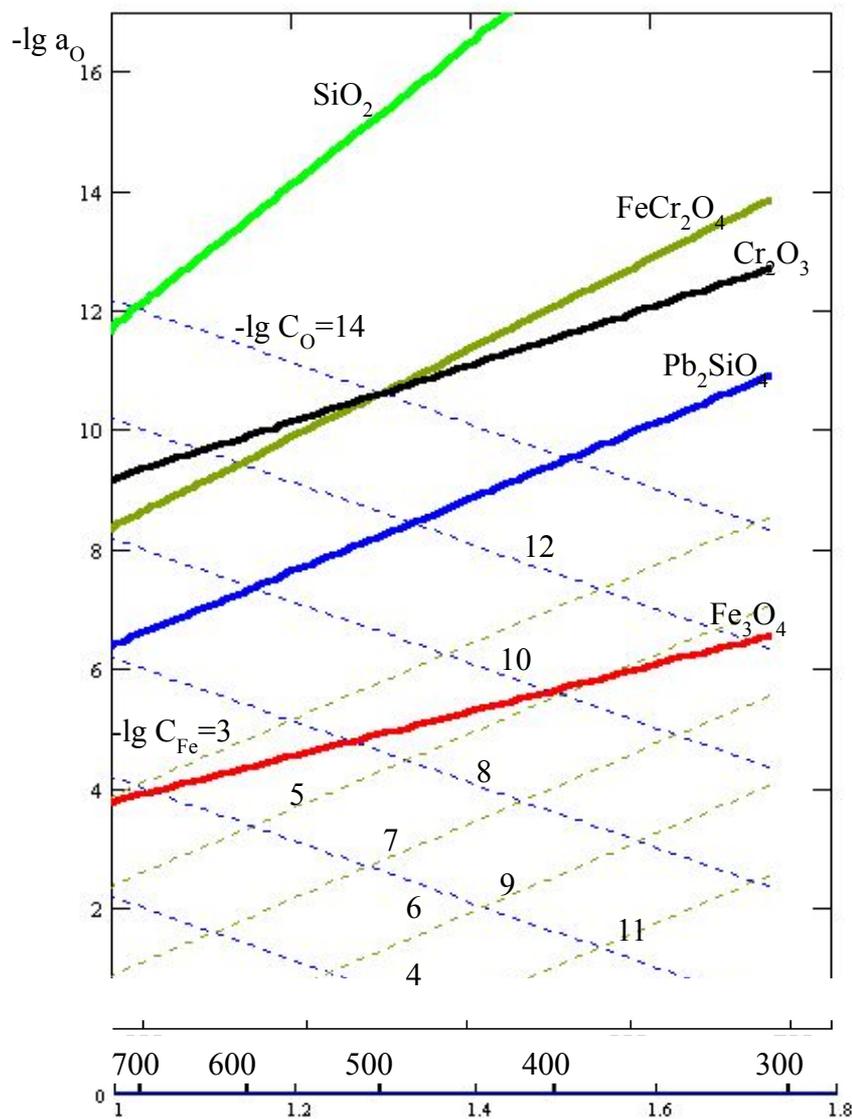
Характеристические функции

Равновесные, неравновесные и стационарные  
системы

Закон действующих масс, константа равновесия

Кинетика реакций

# Результаты расчета активностей кислорода в свинце, соответствующих равновесному состоянию оксидных соединений, а также изоконцентрациям ( $[C]=\%$ мас.) железа и кислорода



Активность кислорода в свинце, соответствующая равновесному состоянию оксидных соединений, а также изоконцентрациям железа и кислорода.

3, 5, 7, 9, 11 – линии изоконцентрации железа в свинце;

4, 6, 8, 10, 12 – линии изоконцентрации кислорода в свинце.