



Гибридный ядерно-термоядерный реактор как синергетический этап между разработками в области ядерной и термоядерной энергии

Minghuang Wang

Международная академия нейтронных наук (Чунцин), консорциум FDS



База в г. Чунцин

Цель - физика нейтронов и ядерная медицина
Международная академия нейтронных наук (Чунцин)

+ Guozhong Medical Technology (Chongqing) Co., Ltd. ...

База в г. Циндао

Цель - физика нейтронов и усовершенствованная ядерная энергетика
Международная академия нейтронных наук (Циндао)

+ Институт ядерной науки и технологий, Шаньдунский университет
+ SuperRay Technology Co., Ltd., Neutron Health Medical Technology Co., Ltd....

База в г. Нанкин

Цель - производство высококачественного оборудования для рентгенотерапии

+ SuperAccuracy Science & Technology Co., Ltd. ...

База в г. Хэфэй

Цель - физика нейтронов и промышленная безопасность
Международная академия нейтронных наук (Хэфэй)

+ Институт технологий ядерной безопасности INEST)
+ Thinking Neutron Technology Co., Ltd., SuperSafety Science & Technology Co., Ltd....

Другие строящиеся базы (Аньцин, Цзинань, Цзюцюань и др.)

- Консорциум FDS фокусируется на исследованиях и разработках усовершенствованных ядерных установок и применении ядерных технологий.
- Консорциум FDS зарегистрировал более 20 дочерних автономных юридических лиц и создал четыре научно-исследовательские базы, расположенные в Чунцине, Циндао, Нанкине и Хэфэе с дополнительными базами, строящимися в других крупных городах Китая.
- Консорциум FDS насчитывает более 600 сотрудников.

- IANS как пример представителя научно-исследовательских институтов
- Три филиала в Циндао, Чунцине и Хэфэе.
- Президент: академик профессор Икан ВУ

Филиал в Циндао

Международная академия
нейтронных наук (Циндао)

Генеральный директор:
Профессор Фан ВАН

- Институт ядерных материалов и оборудования
- Институт нейтронной радиографии
- Институт усовершенствованных ядерных энергетических технологий
- Нейтронный медицинский центр, больница Цилу Шаньдунского университета
- Институт ядерной науки и технологий Шаньдунского университета
- Шаньдунская ключевая лаборатория нейтронной науки и техники
- Ключевая лаборатория детектирования нейтронов Циндао

Филиал в Чунцине

Международная академия
нейтронных наук (Чунцин)

Генеральный директор:
Профессор Юнфэн ВАН

- Институт нейтронной физики
- Институт ядерной фармацевтики
- Институт ядерных батарей
- Институт нейтронной медицины
- Институт усовершенствованной ядерной энергетики

Филиал в Хэфэе

Международная академия
физики нейтронов (Хэфэй)

Генеральный директор:
Профессор Ликин ХУ

- Институт технологии ядерной безопасности
- Институт нейтронного каротажа
- Институт радиационной медицинской физики



Этап I 1980е~2003

Исслед группа проф. Икана ВУ

- Подразделение исследования гибридных реакторов деления-синтеза
- Цель - исследования термоядерной подкритической установки
- Программа «863»: Национальная высокотехнологичная научно-исследовательская программа Китая

Этап II 2003~2020

Команда FDS

- Совместные учреждения: Школа ядерной науки и технологий, USTC, INEST· CAS
- Цель - разработка ключевых технологий деления и синтеза
- Программы ITER/ADS/973

Этап III 2020~

Консорциум FDS

- Цель - НИОКР по ядерной науке, технологиям и областям применения при мощной поддержке правительства
- Создание нескольких научно-исследовательских организаций и серии высокотехнологичных предприятий

Фундаментальные и прикладные исследования

Исследования по физике нейтронов и нейтронные технологии

Ядерная информатика и приложения

Детектирование нейтронов и соответствующие области применения

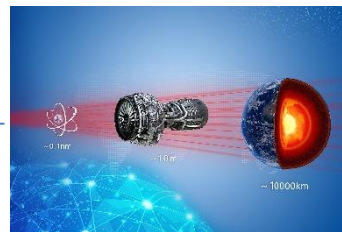
Перспективные источники ядерной энергии и безопасность

Радиационная медицина и соответствующие сферы применения

Ключевые технологии и продукты



Усовершенствованное ПО для объектов ядерной энергетики



Оборудование для детектирования нейтронов



Китайский свинцовый реактор (CLEAR)



Высокоточные установки для радиотерапии (KylinRay)

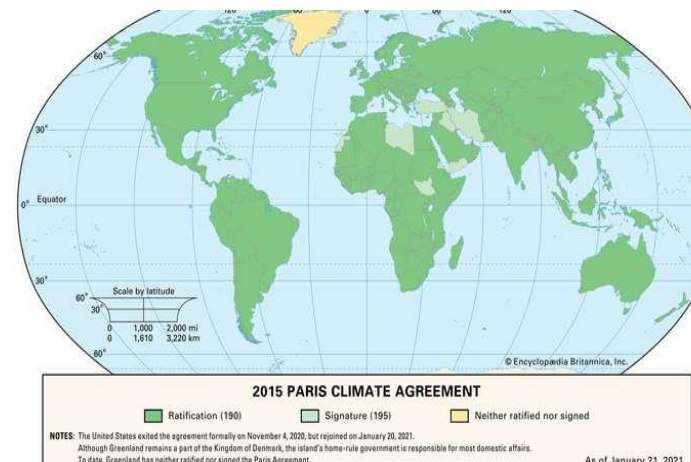
- I. Зачем разрабатывать гибридный реактор?**
- II. Почему создание гибридной технологии может стать синергетическим этапом?**
- III. Типовые концепции и предлагаемые направления развития**
- IV. Заключение**

1

Зачем разрабатывать гибридный реактор?

Потепление климата – общая проблема человечества

Парижское соглашение: Направлено на значительное сокращение выбросов парниковых газов **ограничение глобального повышения температуры в этом столетии до 2 °C** с обеспечением средств для еще большего ограничения повышения температуры (до 1,5 °C).



Китай стремится к достижению пиковых выбросов углерода к 2030 и углеродной нейтральности к 2060 г.

Президент Си Цзиньпин, 22 сентября 2020 г., Ассамблея ООН

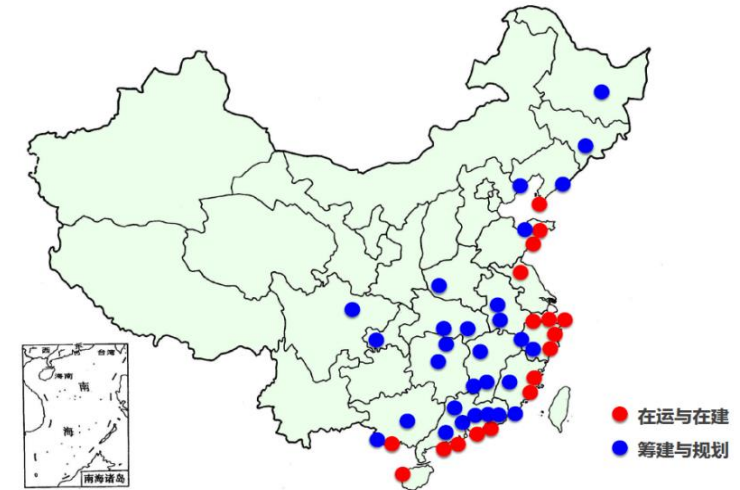
Государственный Совет, 24 октября 2021 г.:

“Создание экологически ориентированной, низкоуглеродной и круговой системы экономического развития,....., с целью обеспечить достижения пиковых выбросов углерода и углеродной нейтральности по графику”

Современное состояние ядерной энергетики в Китае

Ядерная энергетика в материковой части Китая по состоянию на июль 2023 г.:

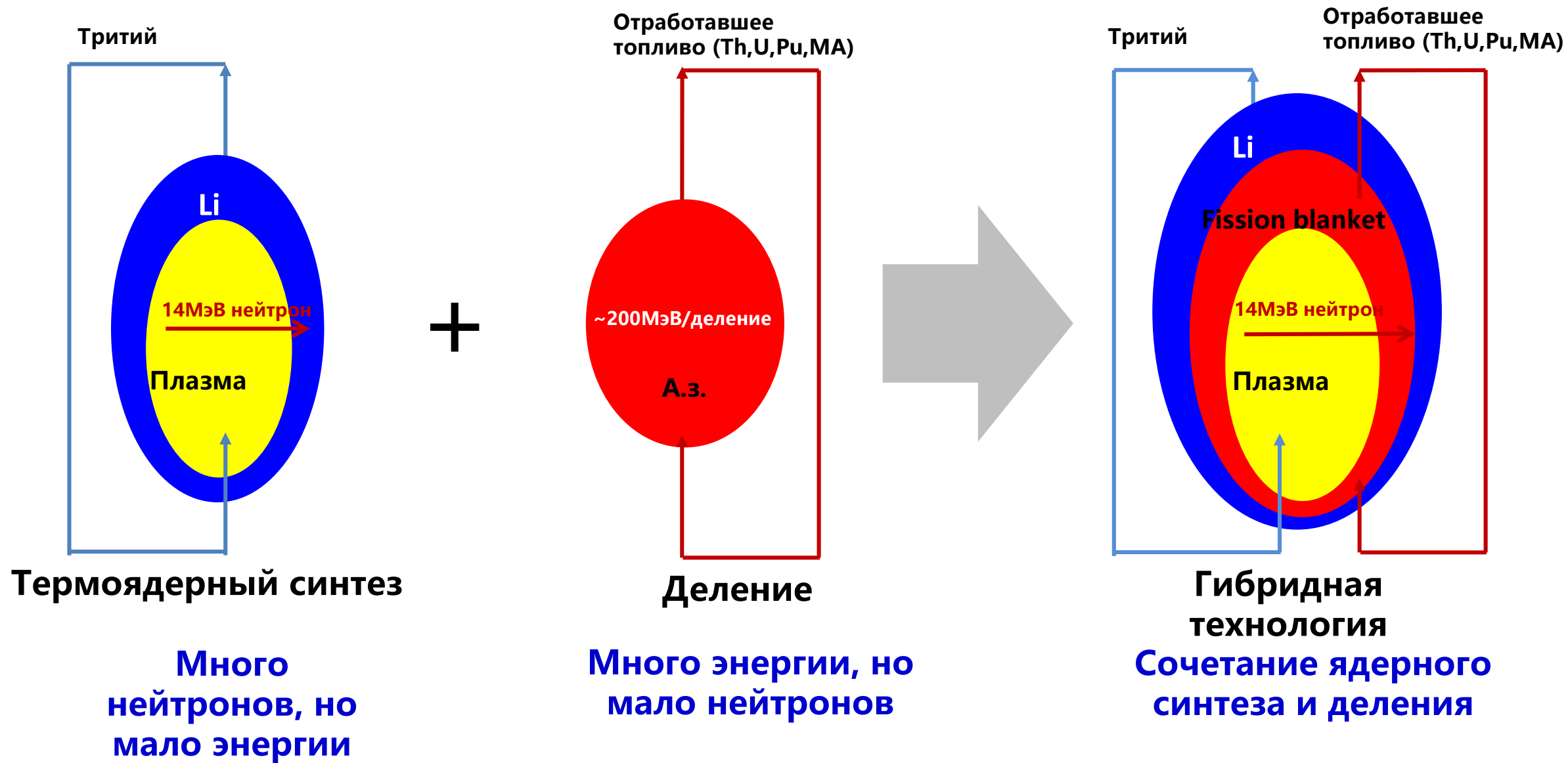
- 55 энергоблока в эксплуатации
- 24 энергоблока на этапе строительства
- 44 энергоблока запланированы
- 154 энергоблока предложены
- Включая реакторы поколения III+ (AP1000, EPR и т.д.)
- ЯЭ обеспечивает ~5% всей выработки



Государственный Совет, 24 октября 2021 г.:

“Развивать ядерную энергетику активно, безопасно и последовательно”

Принципы и особенности гибридного реактора



2

**Почему создание гибридной технологии
может стать синергетическим этапом?**

Функции гибридного реактора

Повысить уровень безопасности и возобновляемости энергии деления

Облегчить реализацию энергии термоядерного синтеза на ранних этапах



На основе жизнеспособных технологий деления и термоядерного синтеза

- Топливо
- Материалы
- Теплоносители.....

- Легкодостижимые параметры плазмы
- Более низкие требования к материалам
- Более высокий коэффициент воспроизводства трития
-

□ Преимущества с точки зрения деления и термоядерного синтеза

- **Преимущества гибридного реактора применительно к ядерному делению**
- **Преимущества гибридного реактора применительно к термоядерному синтезу**

□ Техническая осуществимость

- **На основе жизнеспособных технологий с использованием ядерного деления**
- **На основе жизнеспособных технологий с использованием термоядерного синтеза**

Критический реактор деления

❖ Критичность

- Риск аварии, связанной с надкритичностью
- Сильная отрицательная обратная связь

❖ Мощность и управление реактивностью

- Значительные колебания мощности с вводом положительной реактивности
- Регулирующий стержень

❖ Аварийный останов

- Ввод регулирующих стержней и стержней аварийной защиты
- Риск аварии с выбросом регулирующего стержня и «зависанием» стержня

Гибридный реактор

❖ Надкритичность

- Большие запасы критичности по мгновенным нейтронам
- Меньшая потребность в сильной отрицательной обратной связи

❖ Мощность и управление реактивностью

- Умеренное колебание мощности с вводом положительной реактивности
- Управление плазмой

❖ Аварийный останов

- Прекращение наработки нейтронов за счет термоядерной реакции

2. Гибрид обладает более экологичен

Критический реактор деления

❖ Использование урана

- Низкий коэффициент воспроизводства с низкой эффективностью использования урана

❖ Накопление отработавшего топлива

- Низкая эффективность трансмутации отработавшего топлива
- Большой объем накапливаемого отработавшего топлива

Гибридный реактор

❖ Использование урана

- Высокий коэффициент воспроизводства с высокой эффективностью использования урана

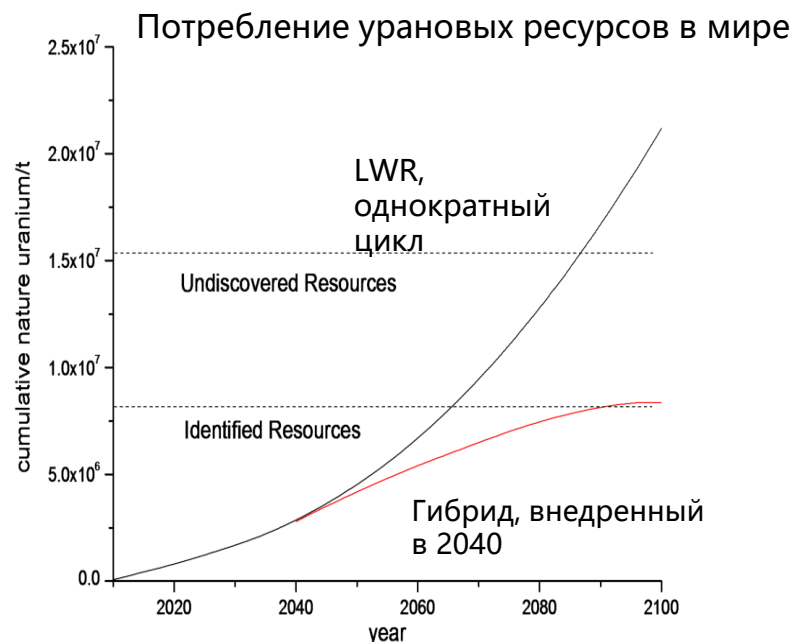
❖ Накопление отработавшего топлива

- Хорошие характеристики в точки зрения трансмутации
- Эффективное снижение количества накапливаемых отходов



Гибридный реактор обладает высоким КПД использования урана

	Реактор PWR	Реактор HWR HTGR	Реактор HBR ^[1]
Коэффициент использования	0.6%	2-7%	~60%



- [1] G.Kessler, 1983
[2] IAEA, 2010
[3] IAEA, 2014
[4] A.A.HARMS, 2002

❖ Допущение

- Прогноз МАГАТЭ по развитию ядерной энергетики ^[2]
- Внедрение гибридной технологии в 2040 г.
- Выявленные запасы составляют 7,6 Мт, а прогнозные запасы – 7,7 Мт ^[3]
- Коэффициент обеспечения воспроизводства в гибридном реакторе – 10 ^[4]

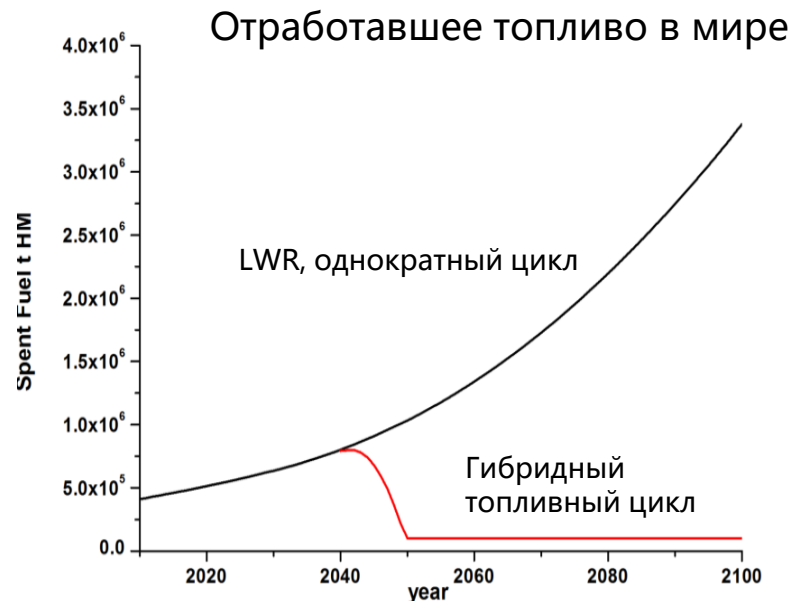
❖ Результаты расчетов

- **Выявленные запасы урана будут истощены в течение примерно 60 лет, при этом прогнозных запасов в XXI столетии при сценарии с однократным топливным циклом было бы также недостаточно**
- **Выявленные запасы урана могли бы удовлетворить спрос после внедрения гибридной технологии при сценарии с гибридным топливным циклом**

Гибридный реактор позволяет эффективно снижать объемы накапливаемых отходов

Коэффициент обеспечения трансмутации для реакторов

	Тепловой реактор ^[1-2]	Быстрый реактор ^[3]	Гибридный реактор ^[4-6]
МА	1-3	2-20	15-55
Низкоактивные ПД	>2	—	>10



❖ Допущение

- Прогноз МАГАТЭ по развитию ядерной энергетики ^[2]
- Внедрение гибридной технологии в 2040 г.
- Коэффициент обеспечения трансмутации в гибридном реакторе – 25

❖ Результаты расчетов

- **Накопленные объемы отработавшего топлива составляют 3.5 Мт (в 50 раз больше, чем емкость хранилища РО «Yucca Mountain») в XXI столетии в реакторе LWR при сценарии с однократным циклом**
- После внедрения гибридной технологии накопленные объемы отработавшего топлива будут быстро снижаться

[1] Bin Liu, 2014

[2] Bronwyn Hyland, 2011

[3] Wu Seung You, 2014

[4] B. G. Hong, 2014

[5] Muhammad Tariq, 2014

[6] Chao Yang, 2013

[7] IAEA, 2010

□ Преимущества с точки зрения деления и термоядерного синтеза

- **Преимущества гибридного реактора применительно к ядерному делению**
- **Преимущества гибридного реактора применительно к термоядерному синтезу**

□ Техническая осуществимость

- **На основе жизнеспособных технологий с использованием ядерного деления**
- **На основе жизнеспособных технологий с использованием ядерного деления**

❖ Многочисленные эффекты в термоядерном реакторе

Тепловые, химические, механические, электрические, магнитные, ядерные и синергетические эффекты

	ИТЭР ^[1]	FNSF ^[2]	СТФ ^[1]	Гибрид
Термоядерная энергия (МВт)	500	75	35-210	10-100 МВт
Нейтронная нагрузка на стенку (МВт/м ²)	0.57	1	0.5-3	0.5-1
Испытательный участок бланкетов (м ²)	~12	~50	~70	20-100

[1] M. Peng, 2006

[2] M. Peng, 2011

❖ Испытания материалов

Взаимодействие материала плазмы

Радиационные эффекты

Совместимость и коррозия

Задержка и проникновение трития

Нейтронно-физические характеристики

...

❖ Испытания и верификация технологии blankets

Размножение трития

Съем мощности

Радиационная защита...

❖ Разработка методики моделирования и верификация программ...

□ **Преимущества с точки зрения деления и термоядерного синтеза**

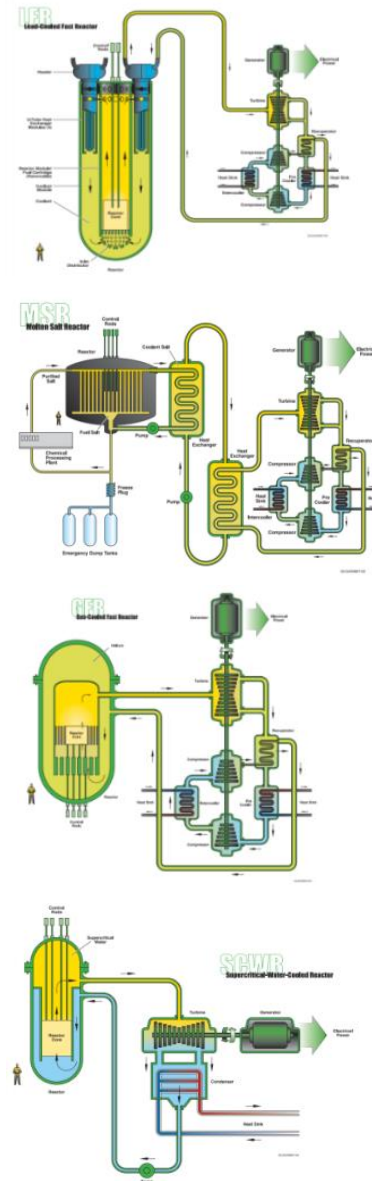
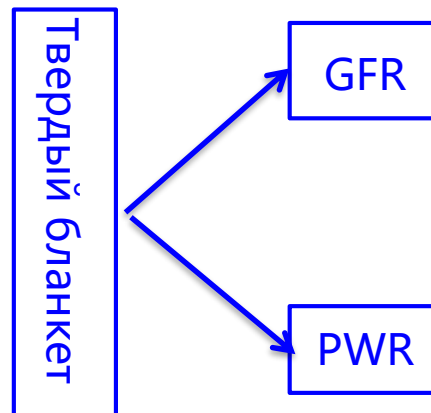
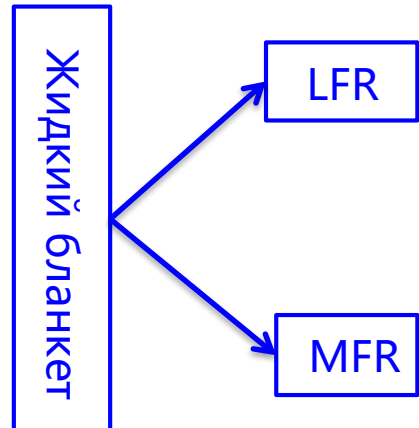
- Преимущества гибридного реактора применительно к ядерному делению
- Преимущества гибридного реактора применительно к термоядерному синтезу

□ **Техническая осуществимость**

- **На основе жизнеспособных технологий с использованием ядерного деления**
- На основе жизнеспособных технологий с использованием ядерного деления

1. Для гибридов доступно множество вариантов ядерного топлива

Установка	Обогащение				Доля тяжелых металлов	
	DU	NU	3%~5%	7%-20%	Pu	MA
PWR					<13% TM	-
HWR					-	-
LFR					-	<5% TM
GFR					-	<5% TM
SCWR					<13% TM	-
VHTR					<13% TM	-
SFR					-	<5% TM
Гибрид					100% TM	100% TM



❖ Li / PbLi

- материал для размножения трития
- теплоноситель

❖ Flibe / Flinabe

- материал для размножения трития
- теплоноситель

❖ Гелий

- теплоноситель

❖ Вода

- теплоноситель

□ Преимущества с точки зрения деления и термоядерного синтеза

- Преимущества гибридного реактора применительно к ядерному делению
- Преимущества гибридного реактора применительно к термоядерному синтезу

□ Техническая осуществимость

- На основе жизнеспособных технологий с использованием ядерного деления
- **На основе жизнеспособных технологий с использованием ядерного деления**

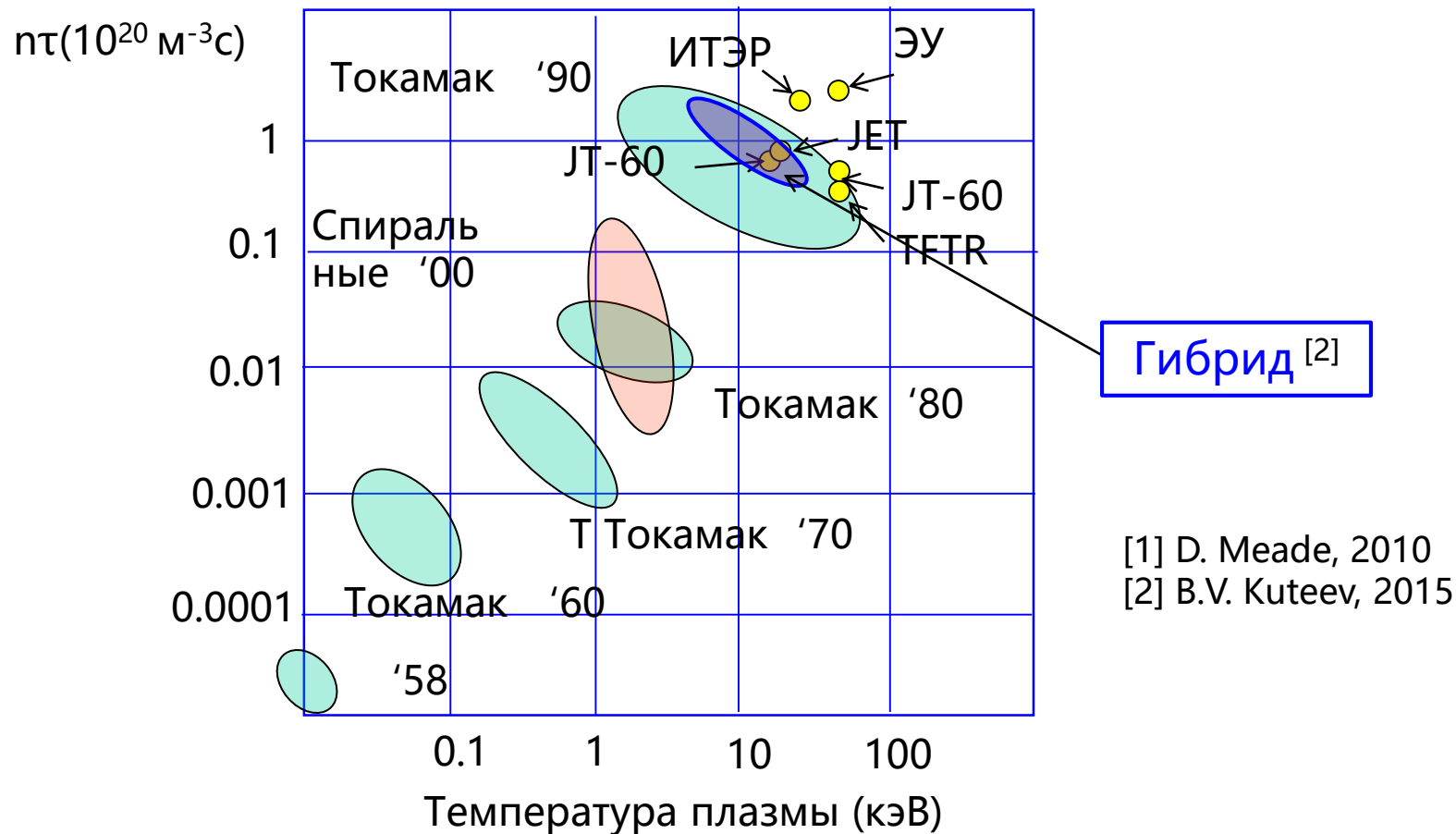
Устройство	Термоядерная мощность	Neutron wall loading	Q=термояд. мощность/ тепл. мощность ^[1]	Самодостаточность трития	Материалы
JET, JT-60U	16 МВт	0.2 МВт/м ²	~1	-	316L и др. ^[4]
Термояд. двигатель для гибрида	Десятки МВт	0.5-1 МВт/м ² ^[2]	~1	Легко достичь	316L, малоактивируемая ферр.-март. сталь и др.
ИТЭР	500 МВт	0.57 МВт/м ²	10	-	316L и др. ^[5]
Термояд. реактор	2000-3500 МВт	4-7 МВт/м ² ^[3]	10-30	Сложная задача	Малоактивируемая ферр.-март. сталь, сплавы ванадия, композиты SiC и др. ^[6]

[1] M. Kotschenreuther, 2009; [2] Y. Wu, 2002; [3] C.P.C. Wong, 2000

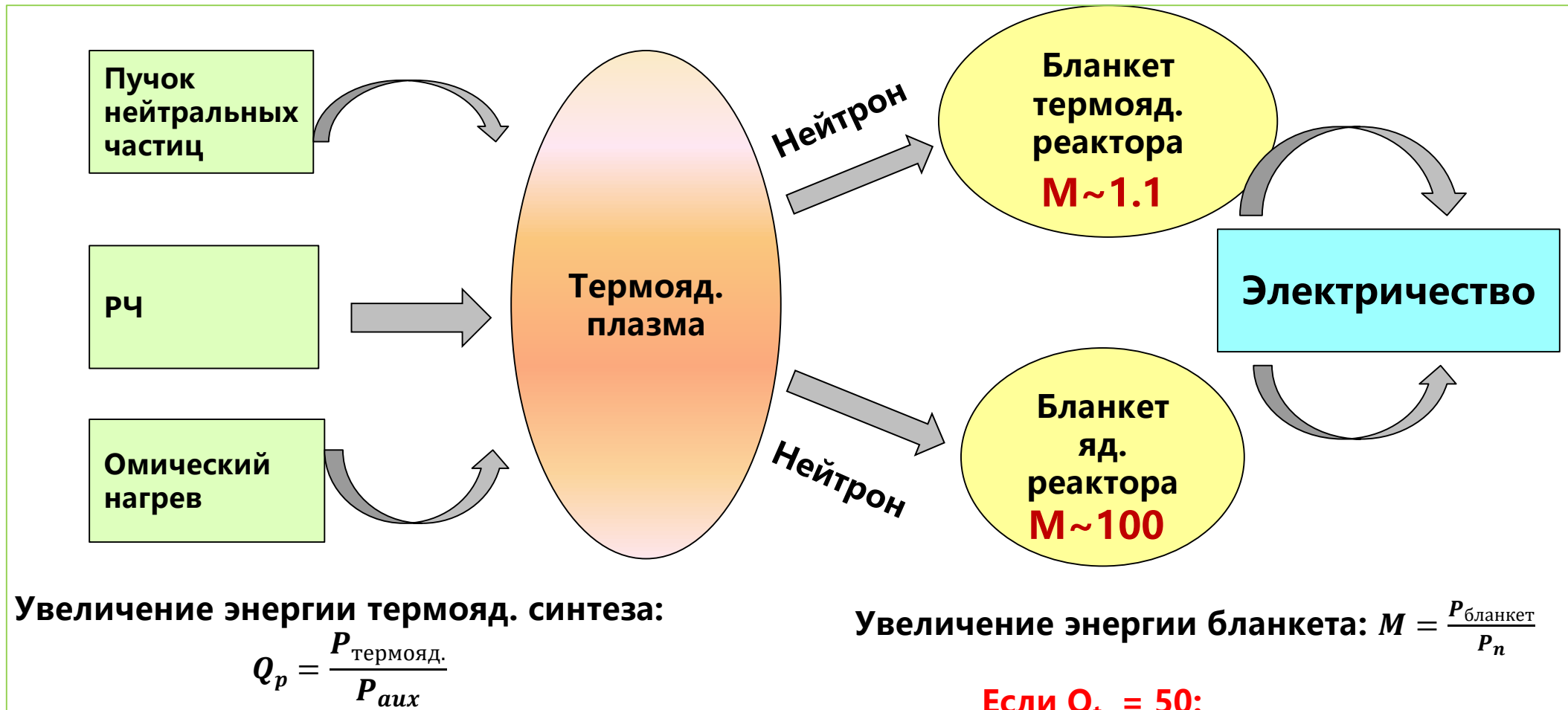
[4] K. Masaki, 2011; [5] V. Barabash, 2007; [6] S.J. Zinkle, 2008

Требования гибрида к термоядерному двигателю намного ниже, чем просто термоядерного реактора, и некоторые из них близки к имеющимся экспериментальным достижениям.

Условие тройного произведения гибридного реактора близко к имеющимся экспериментальным достижениям



Гибридный реактор может снизить требование к увеличению энергии

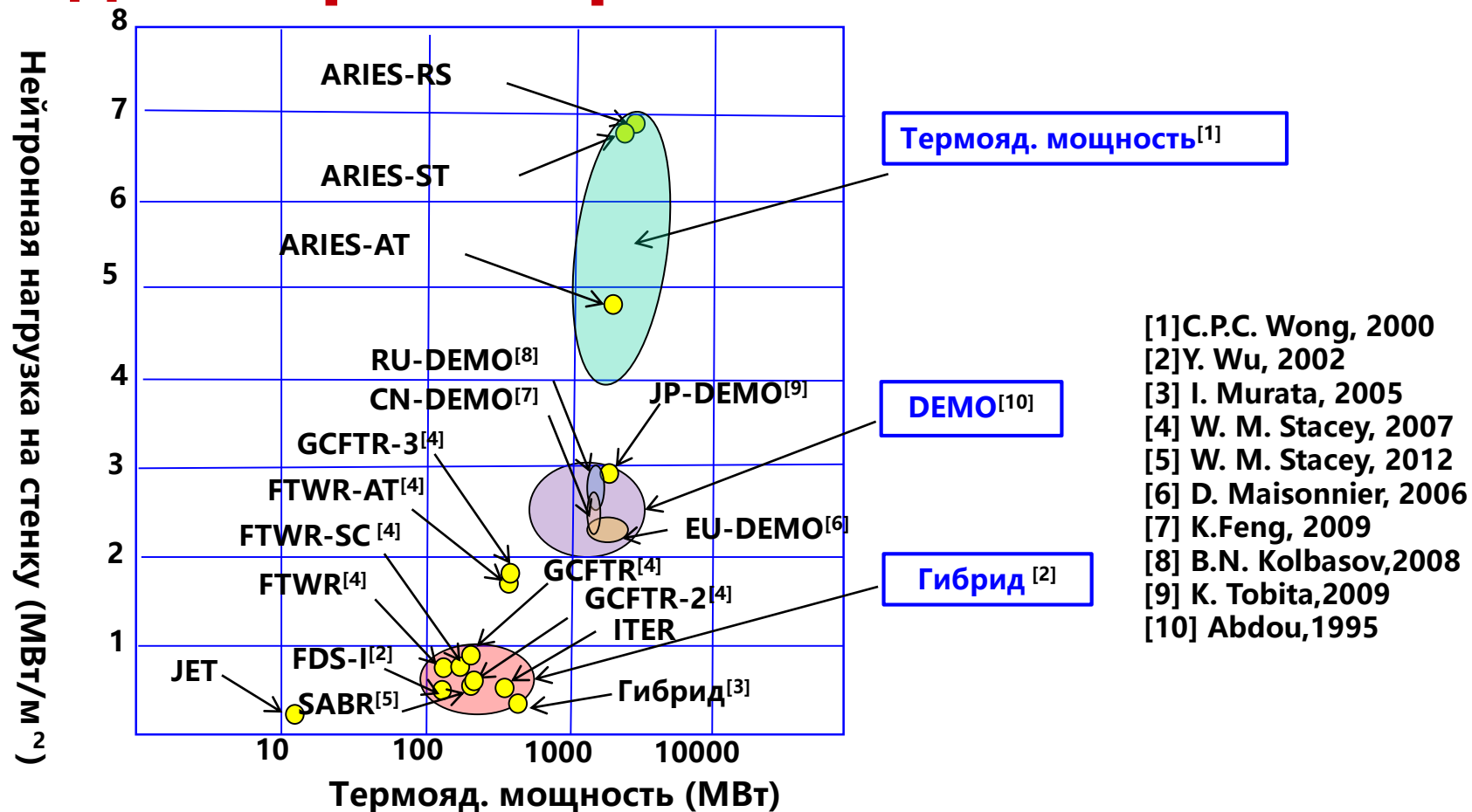


Сумм. увеличение энергии $Q_t = \frac{P_t}{P_{\text{aux}}}$

$\sim 1.1 Q_p$ для термояд. синтеза
 $\sim (1 + 0.8M) Q_p$ для гибрида

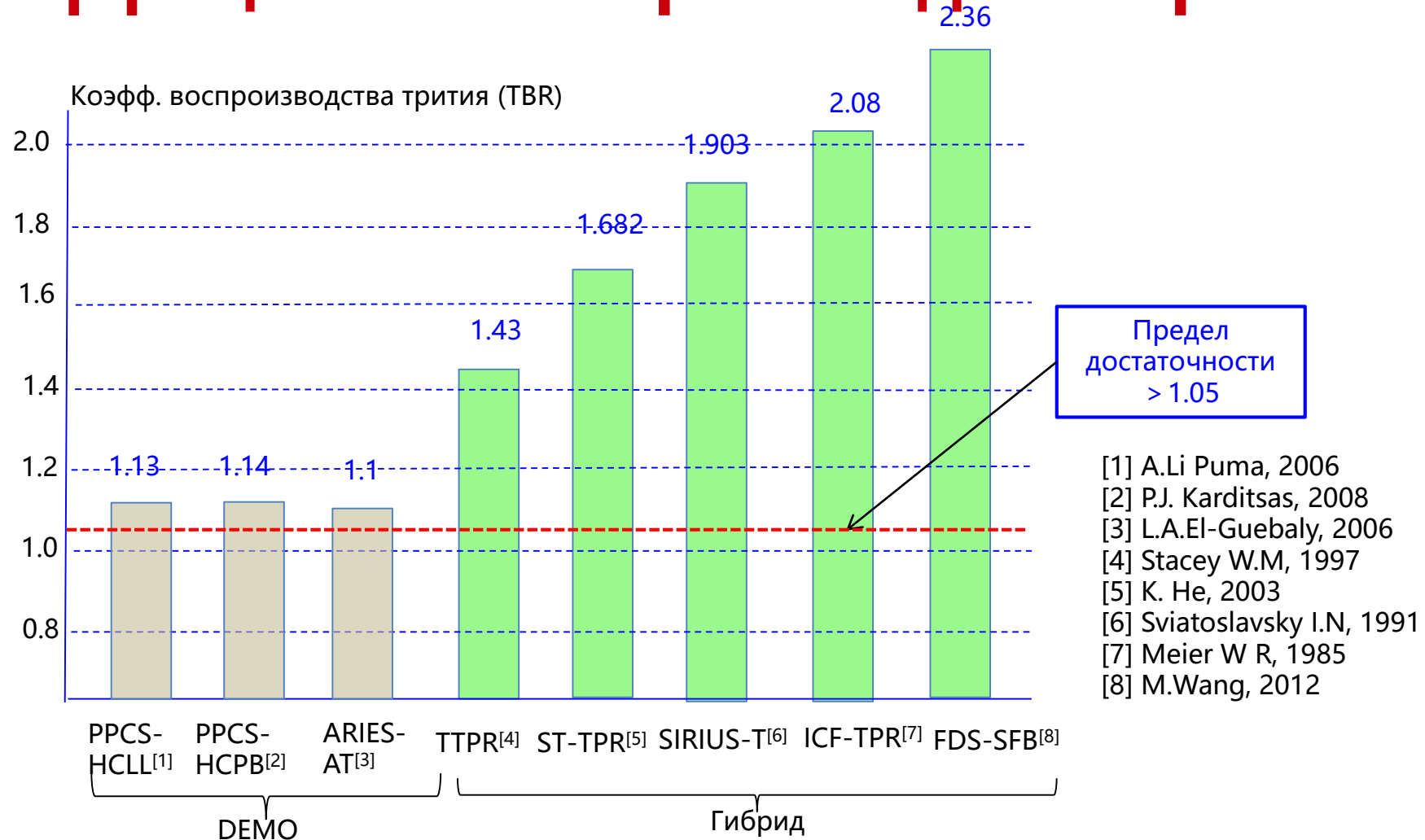
Термоядерный реактор: $Q_p \sim 45$
 Гибридный реактор: $Q_p \sim 0.6$

Очень низкая нейтронная нагрузка на стенку гибридного реактора



Нагрузка термоядерных нейтронов на стенку термоядерного реактора составляет 4-7 МВт/м², DEMO реактора - 2-3 МВт/м², а гибридного реактора – лишь 0.5-1 МВт/м²

Гибридный реактор может достичь большего коэффициента воспроизводства трития



TBR термоядерного реактора составляет почти 1,1 и его очень трудно улучшить. Гибридный реактор может достигать 1,4-2,4, и этот показатель легко улучшить.

3

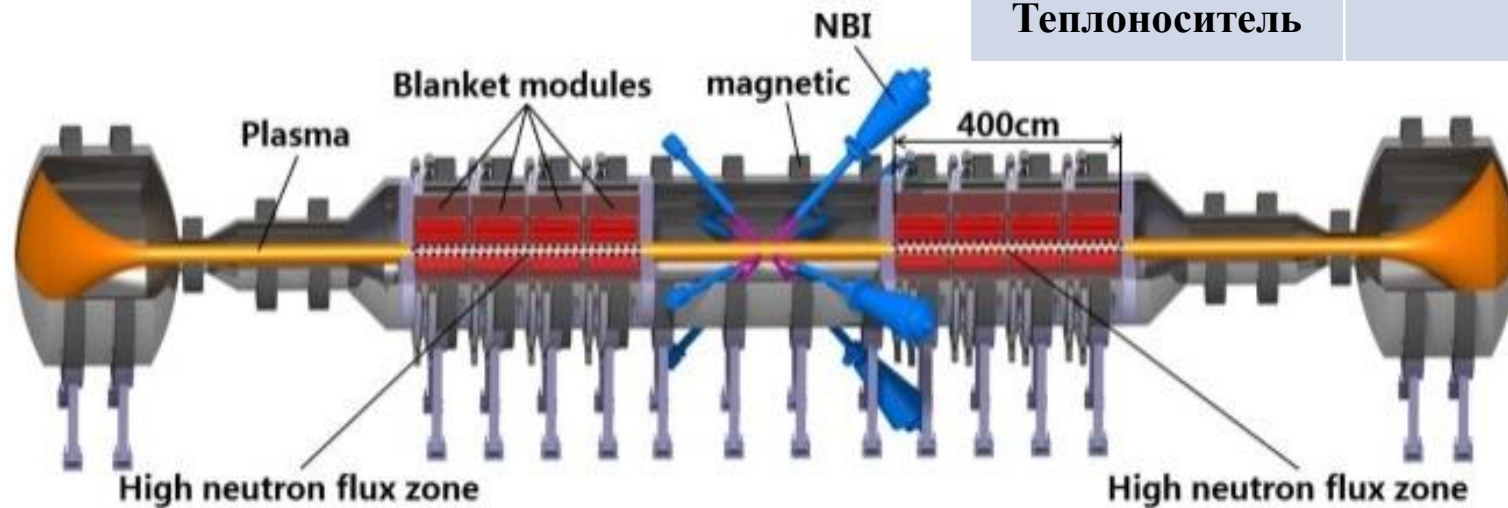
**Типовые концепции и предлагаемые
направления развития**

FDS-GDT: подкритический реактор с бегущей волной на основе газодинамической ловушки

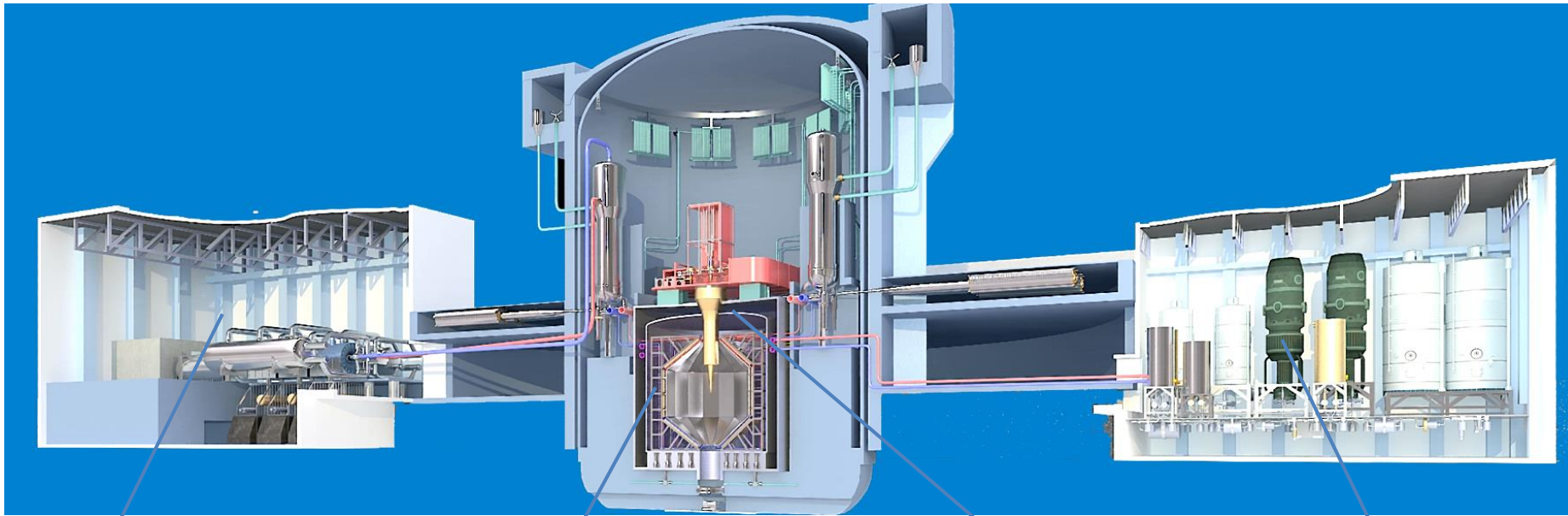
Цели FDS-GDT:

- Простота конструкции, компактность и экономичность установки;
- Использование газодинамической ловушки для blankets на бегущей волне, чтобы минимизировать образование ядерных отходов и максимально эффективно использовать топливо и т.д.

Параметры	Значение
Термояд. мощность	~15 МВт
Мощность установки	~500 МВт(тепл)
$K_{эфф}$	0.97~1
Топливо	UO ₂ /UZr
Теплоноситель	PbLi



Z-FFR: гибридная установка на основе Z-пинч



Электрогенерирующая
система

Подкритический
бланкет

Термояд. а.з.
на Z-пинч

Самодостаточная тритиевая
установка

Термоядерная мощность: ~150 МВт, 0.1 Гц, ~10 мг ледяного Д-Т топлива на таблетку, выгорание более 40%

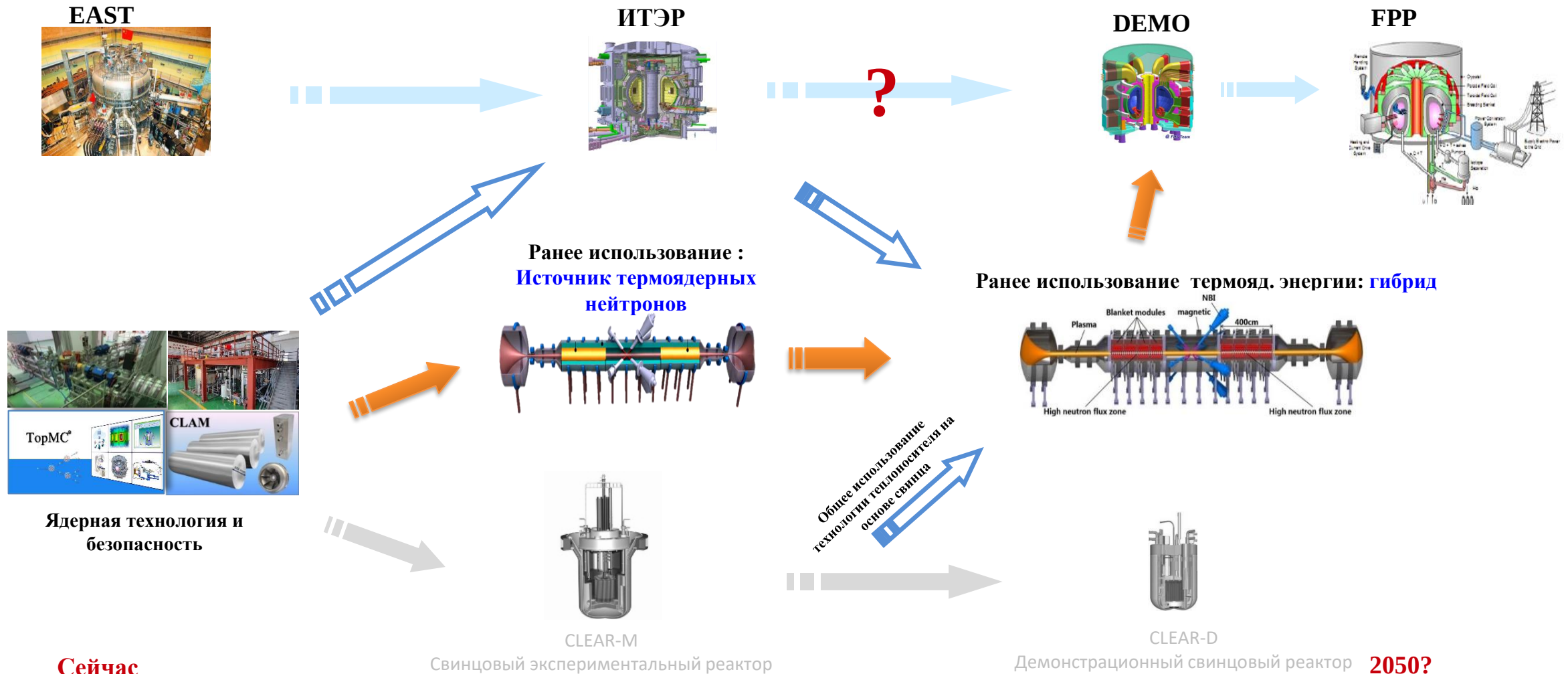
Подкритический бланкет: увеличение энергии в ~ 11 раз, ~830 т природного уранового топлива U-10Zr, перегрузка 5 т обедненного урана каждые 5 лет, теплоноситель 15.5 МПа H₂O и замедлитель как в реакторах LWR

Топливный цикл: глубокое выгорание, нехимическая переработка, удаление газообразных продуктов деления при 1700K/2600K

Самодостаточность трития: TBR ~ 1.17 в самом начале, увеличение на 10% после 3 лет без перегрузки или переработки, возможность достичь TBR ~ 1.5

Предлагаемые направления развития для деления, синтеза и гибрида

- Большой пробел между ИТЭР и Fusion DEMO, усложняющий реализацию термоядерной энергии до 2050 г.
- Предлагаются пути развития с исследованиями и разработками в области ядерной технологии и безопасности, чтобы восполнить пробел и реализовать раннее использование энергии синтеза



- Гибридный реактор – кросс-генерационная технология для традиционной ядерной энергетики деления.
- Гибридный реактор позволит с наибольшей вероятностью достичь раннего использования термоядерной энергии, и его разработка имеет решающее значение не только с точки зрения технологии термоядерного синтеза, но и для укрепления доверия правительства и общественности к развитию термоядерной энергии.
- Для реализации гибридного реактора в его основу могут быть заложены многочисленные жизнеспособные технологии деления и синтеза.



Better Technology, Better Life!

Спасибо за внимание!

Website: www.fds.org.cn
E-mail: contact@fds.org.cn

