

# Перспективы применения АСММ в российской электроэнергетике

Ф.В. Веселов, С.П. Филиппов

Институт энергетических исследований РАН

Научный семинар для подготовки Президиума НТС Госкорпорации «Росатом»  
по теме «Атомные станции малой мощности» (АСММ)

Москва, февраль 2023



# Основные тенденции в развитии SMR за рубежом (1)

(по состоянию на февраль 2023 г.)

- ❖ Расширение **верхнего предела** единичной установленной мощности SMR от 300 до 630 МВт(э) (МАГАТЭ).
- ❖ Упор на **модульность**, т.е. высокую заводскую готовность SMR, обеспечивающую снижение стоимости изготовления оборудования, его монтажа и пуско-наладочных работ.
- ❖ Смещение интереса в зону **малых мощностей** (microSMR) – 4-20 МВт(э) с целью
  - увеличения потенциальных масштабов применения расширением числа потребителей;
  - снижения стоимости оборудования за счет серийности производства;
  - реализации гибкой схемы наращивания мощности АЭС (добавлением новых модулей);
  - повышения надежности АЭС, что важно для применения их в изолированных районах, особенно с суровыми климатическими условиями и сложной транспортной доступностью.
- ❖ Реализация принципа модульности в **SMR 300-600 МВт(э)** позволяет обеспечить их конкурентоспособность с большими атомными энергоблоками в 1-1,5ГВт(э) за счет
  - приближения генерации к потребителям (сокращение затрат в сети);
  - сокращения потребного резерва в электроэнергетической системе;
  - повышения экономической эффективности путем использования низкопотенциального тепла на цели теплоснабжения (запуск АТЭЦ 650 МВт(э) в Китае в 2023 г.).

## Основные тенденции в развитии SMR за рубежом (2)

(по состоянию на февраль 2023 г.)

- ❖ Рост интереса к **«горячим» и «сухим» SMR** (HTGR, реакторам IV Generation) с высоким КПД и простой тепловой схемой в противовес «холодным» и «мокрым» реакторам (PWR) с низким КПД и сложной тепловой схемой.
- ❖ Безусловное обеспечение безопасности (приоритет реакторам с **естественной безопасностью**, подземная компоновка).
- ❖ Интерес к **«одноразовым» SMR** - без перезагрузки топлива («атомные батарейки» ) со сроком службы 20 лет и более с последующим выводом из эксплуатации и захоронением (требует применения топлива с обогащением до 20%).
- ❖ **Дистанционное управление**, малообслуживаемая эксплуатация (ежегодная инспекция).
- ❖ **Многоцелевое использование** (теплофикация, производство водорода электролизом).
- ❖ **Комплексные решения** по АЭС с учетом графиков электрических и тепловых нагрузок: работа SMR в базе, покрытие пиков аккумуляторами электроэнергии или топливными элементами на собственном водороде (водородный цикл).
- ❖ Существенное **сокращение число проектов SMR** при переходе от стадии предложения концепций к стадии проектирования (с сотни до десятка) из-за
  - сложности технической реализации предложенных концепций;
  - отсутствия потребителей (заказчиков).

# Условия применения АСММ на Дальнем Востоке (1)

## Численность населения, тыс. чел.

Субъект РФ	Сельская местность	Города с населением, тыс.чел. *							Всего
		до 10	10-20	20-50	50-100	100-250	250-500	500 и более	
Республика Якутия	328	135	48	81	60	0	341	0	992
Чукотский АО	14	21	15	0	0	0	0	0	50
Хабаровский край	231	59	95	61	0	239	0	613	1299
Магаданская область	5	41	0	0	91	0	0	0	138
<b>Всего</b>	<b>578</b>	<b>255</b>	<b>159</b>	<b>142</b>	<b>151</b>	<b>239</b>	<b>341</b>	<b>613</b>	<b>2479</b>

\* Включая поселки городского типа (ПГТ).

### Выводы:

1) Около половины населения проживает в сельской местности и малых городах (менее 50 тыс.чел.).

2) Города с численностью населения свыше 50 тыс. чел.:

- Якутск, Нерюнгри;
- Хабаровск, Комсомольск- на-Амуре;
- Магадан

## Условия применения АСММ на Дальнем Востоке (2)

### Требуемая суммарная установленная электрическая мощность, МВт

Субъект РФ	Сельская местность	Города с населением, тыс.чел							Всего
		до 10	10-20	20-50	50-100	100-250	250-500	500 и более	
Республика Якутия	656	269	97	161	119	0	682	0	1984
Чукотский АО	28	42	30	0	0	0	0	0	100
Хабаровский край	462	118	190	122	0	479	0	1227	2598
Магаданская область	11	82	0	0	183	0	0	0	276
Всего	1157	511	317	283	302	479	682	1227	4958
то же, в %	23,3	10,3	6,4	5,7	6,1	9,7	13,8	24,7	100,0

### Выводы:

- 23 % суммарно установленной электрической мощности находится в сельской местности;
- 22 % - в малых городах (численностью населения менее 50 тыс. чел.).

## Условия применения АСММ на Дальнем Востоке (3)

### Потенциальное количество электрогенерирующих установок (АСММ) .

Субъект РФ	Максимальная единичная мощность установки, МВт (эл)							
	0,5	2-3	5-10	15-20	35-40	85-90	180-200	350-400
Республика Якутия	1311	108	13	9	3	0	4	0
Чукотский АО	56	17	4	0	0	0	0	0
Хабаровский край	925	47	25	7	0	5	0	3
Магаданская область	21	33	0	0	5	0	0	0
Всего	2313	204	42	16	8	5	4	3
то же, в %	89,1	7,9	1,6	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1

### Выводы:

- 89,1 % приходится на установки единичной мощностью 0,5 МВт(эл) – **2313 шт.**;
- 7,9 % - на установки мощностью 2-3 МВт(эл) – **204 шт.**
- 2,2 % - на установки 5-20 МВт(эл) – **58 шт.**;
- 0,5 % - на установки 35-90 МВт(эл) – **13 шт.**;
- по 0,1% - на установки 180-200 МВт(эл) – **4 шт.** и 350-400 МВт(эл) – **3 шт.**
- **Реализация новых крупных инвестпроектов будет повышать спрос на АСММ.**

# Условия применения когенерационных АСММ на Дальнем Востоке

## Суммарная установленная мощность теплоисточников, МВт (т).

Субъект РФ	Котельные	ТЭЦ	в т.ч. мощностью, МВт(э)		Эл.котельные и прочие	Всего
			до 25	25 и более		
Республика Якутия	7827	2 423	83	2341	43	<b>10294</b>
Чукотский АО	360	464	79	385	143	<b>967</b>
Хабаровский край	10150	606	0	606	29	<b>10785</b>
Магаданская область	793	751	0	751	1	<b>1545</b>
<b>Всего</b>	<b>19130</b>	<b>4245</b>	<b>162</b>	<b>4083</b>	<b>216</b>	<b>23591</b>

## Соотношение требуемой тепловой и электрической мощности

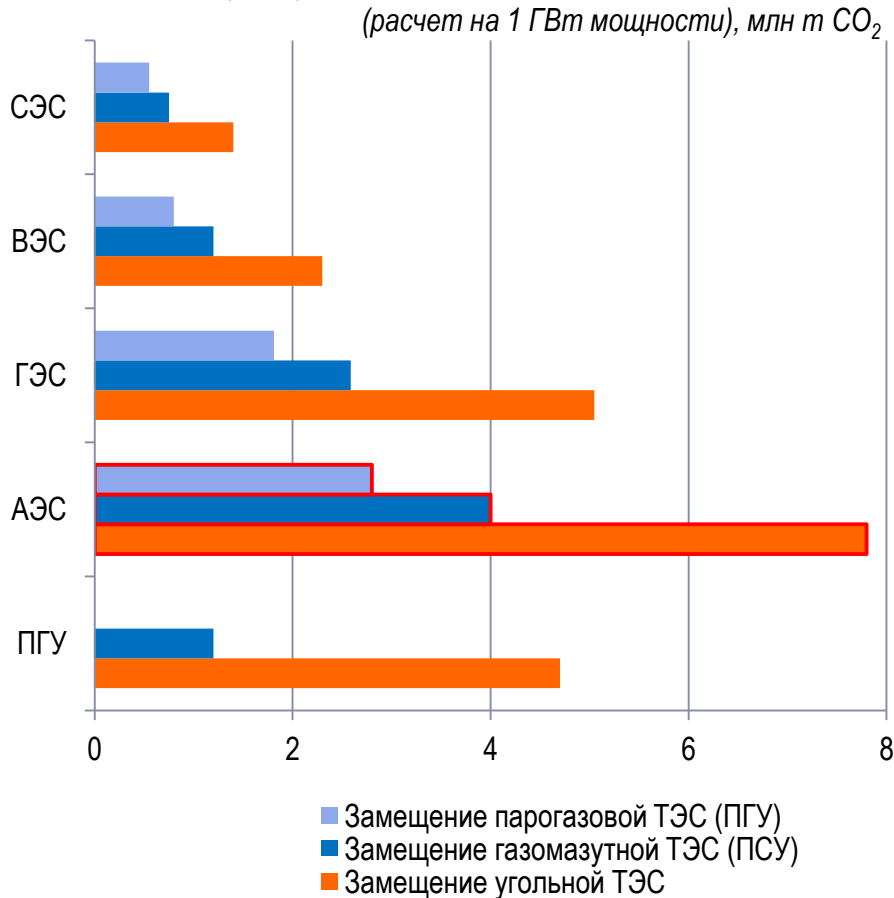
Субъект РФ	МВт(т)	МВт(э)	МВт(т)/ МВт(т)	Кол-во котлов, шт.	Ед.мощность котла, МВт (т)
Республика Якутия	10294	1984	<b>5,2</b>	3 435	2,3
Чукотский АО	967	100	<b>9,7</b>	212	1,7
Хабаровский край	10785	2598	<b>4,2</b>	1 688	6,0
Магаданская область	1545	276	<b>5,6</b>	253	3,1
<b>Всего</b>	<b>23591</b>	<b>4958</b>	<b>4,8</b>	<b>5 588</b>	<b>3,4</b>

### Выводы:

- Разбросанность тепловых нагрузок (малые ед. мощности применяемых котлов) будет препятствовать применению когенерационных АСММ в Дальневосточном ФО.

## Факторы привлекательности АСММ. Интенсивная декарбонизация

Вклад разных типов электростанций в снижение выбросов  $\text{CO}_2$  при замещении электроэнергии от тепловой электростанции (ТЭС)



Источник: расчеты ИНИ РАН

- На развитие электроэнергетики в мире все большее влияние оказывает климатическая повестка, национальные цели по сокращению выбросов парниковых газов, снижению углеродного следа в конечной (особенно - электроемкой) продукции и услугах
- За счет высокого КИУМ АЭС обеспечивают наибольшее удельное сокращение выбросов ПГ (на единицу мощности)
- Признав очевидную «высокую климатическую ценности» технологий атомной энергетики, Евросоюз включил АЭС в Таксономию по экологически устойчивой деятельности
- Все шире АЭС рассматриваются как эффективное направление декарбонизации (все чаще – не как альтернатива ВИЭ, а как вторая необходимая составляющая безуглеродной энергосистемы, обеспечивающую базовую нагрузку)



## Факторы привлекательности АСММ. Новые возможности для инвесторов

Проекты АСММ являются более приемлемыми и доступными (по объемам финансирования и рискам) для различных инвесторов в сравнении с более масштабными инвестициями в крупные электростанции.

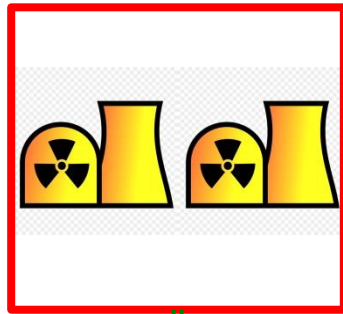
Возможные (потенциальные) преимущества для массовой реализации:

- Инвестиции и риски могут быть распределены между несколькими проектами, а не сконцентрированы в одном крупном
- Проекты могут реализовываться разным составом инвесторов и иметь разную структуру финансирования
- Проекты могут иметь разные стратегии продаж: на разных рынках и ориентироваться на разную структуру потребителей
- Проекты имеют более короткие сроки строительства и могут раньше начать генерировать поток выручки
- Объемы производства могут точнее и быстрее адаптироваться под приросты спроса за счет меньших приращений по мощности. Снижаются риски невостребованных вложений и переинвестирования
- За счет типизации проектов, серийного оборудования, модульности исполнения снижаются технологические риски, сокращается время и затраты на лицензирование и разрешения (площадка, строительство и т.д.)
- Снижаются затраты на интеграцию новых объектов генерации в энергосистему, которые частично могут быть включены в состав затрат проекта (например, схема выдачи мощности)

# Факторы привлекательности АСММ. Гибкие условия работы в энергосистеме (ЭЭС)

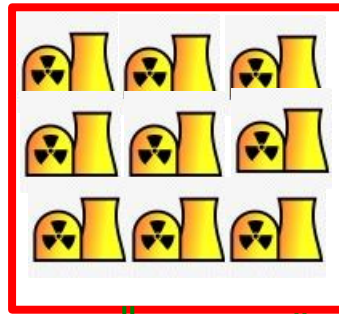
## Крупноблочная АЭС

АЭС с блоками 1000+ МВт,  
удаленная от центров  
нагрузки



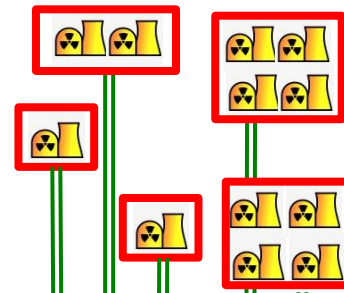
## Крупная АЭС на базе АСММ

Блоки АСММ на одной  
площадке, удаленные от  
центров нагрузки



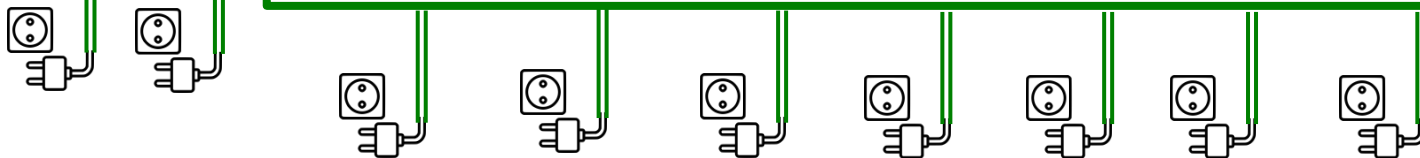
## Распределенные АСММ

Распределенные станции с  
небольшим количеством блоков,  
приближенные к центрам нагрузки



Магистральные электросети (ЛЭП 220-750 кВ)

Распределительные электросети (35-110 кВ)



# Факторы привлекательности АСММ. Гибкие условия работы в энергосистеме (ЭЭС)

В ряде случаев системные эффекты АСММ могут быть существенно ниже

	<b>Крупноблочная АЭС (блоки 1000+ МВт)</b>	<b>Крупная АЭС на базе АСММ (блоки ~50 МВт)</b>	<b>Распределенные АСММ (блоки ~50 МВт)</b>
Влияние на надежность ЭЭС	<ul style="list-style-type: none"> <li>В ЭЭС требуется резерв мощностей в объеме мощности блока (1000+ МВт)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Требуемый резерв в ЭЭС (и стоимость его обеспечения) снижается до ~50 МВт)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ниже риски системных аварий, выше надежность электроснабжения</li> </ul>
Влияние на развитие электрической сети	<ul style="list-style-type: none"> <li>Развитие магистральной сети для выдачи мощности на расстояния не менее 300-500 км</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Выдача на более короткое расстояние и более низком напряжении</li> <li>Усиление существующей распределительной сети с ростом присоединенных к ней блоков</li> </ul>
Влияние на гибкость управления режимами	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ограниченные возможности по величине и скорости снижения рабочей мощности и ее набору.</li> <li>Для балансирования АЭС с графиком нагрузки потребителей могут потребоваться дополнительные пиковые мощности, накопители, расширение пропускной способности сети или программ управления спросом (изменение профиля нагрузки)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Возможности более гибкого реагирования на изменения нагрузки потребителей</li> <li>Недостаточная гибкость для отклика на режим работы ВИЭ - потребуется дополнительная мощность накопителей.</li> <li>Более низкий КИУМ АСММ в режиме «следования з анагрузкой» будет негативно сказываться на их конкурентоспособности и потребует более высоких цен электроэнергии для окупаемости проектов.</li> </ul>	
Влияние на стоимости строительства	<ul style="list-style-type: none"> <li>Наименьший удельный CAPEX за счет эффекта от масштаба единичной мощности</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Снижение удельного CAPEX за счет экономии при размещении на одной площадке (мультипликатор размещения)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Наибольший удельный CAPEX</li> </ul>

# Факторы снижения стоимости АСММ



- Конкурентоспособный блок АСММ - массовый промышленный, платформенный продукт с высокой степенью модульности, адаптируемый под конкретный заказ
  - Если серийность крупных блоков АЭС сопоставима с серийностью ракет-носителей (единицы в год)
    - То серийность блоков АСММ может быть сопоставима с серийностью авиалайнеров (десятки в год)

## Факторы снижения стоимости АСММ

Уменьшение разрыва в капиталоемкости крупных и малых атомных станций (за счет совокупности инженерных и регуляторных решений) является наиболее важным вопросом для конкурентоспособности последних.

- Однако диапазон ожиданий (пока не инженерных и проектных обоснований!) практического удешевления АСММ остается крайне широким: от нескольких раз до десятков процентов

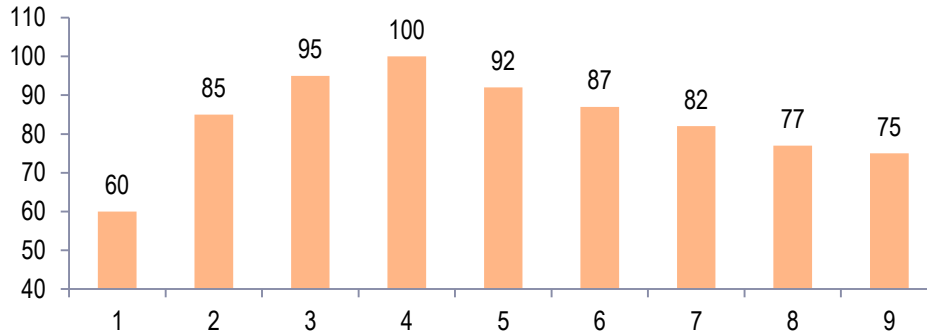
Показатели	Крупноблочная АЭС	АСММ
Состав блоков	2x1100МВт (AP1000)	12x50МВт (SMR)
Удельный CAPEX с затратами собственника, \$ 2020/кВт	6040	6190
То же без затрат собственника, \$ 2020/кВт - всего, в т.ч.	4159	4755
- Реакторная часть (nuclear island)	1145	1080
- Турбинная часть (conventional island)	640	700
- Прочее оборудование (balance of plant)	365	650

*Источник: Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies, U.S. Energy Information Administration, February 2020.*

- По наиболее оптимистичным оценкам (на примере США), основной вклад в рост удельного CAPEX АСММ, при условии их масштабного внедрения и реализации возможных направлений оптимизации, в сравнении с блоками 1000+ МВт вносит прочее оборудование (balance of plant). Также заметно ниже удельные затраты собственника (owner cost)

# Проблемы экономической оценки АСММ

**Характерная (условная) зависимость капиталовложений в блок/электростанцию от степени освоенности технологии (в % от CAPEX первого блока)**



- 1 — Упрощенная оценка затрат с неполными данными
- 2 — Готовность к выдаче коммерческих заказов
- 3 — Окончательная оценка затрат и строительство
- 4 — Начало коммерческой эксплуатации (ввод первого блока/станции)
- 5 — Ввод в эксплуатацию 2 блока/электростанции
- 6 — Ввод в эксплуатацию 3 блока/электростанции
- 7 — Ввод в эксплуатацию 4 блока/электростанции
- 8 — Ввод в эксплуатацию 5 блока/электростанции
- 9 — Выход на серийное строительство блоков/электростанций

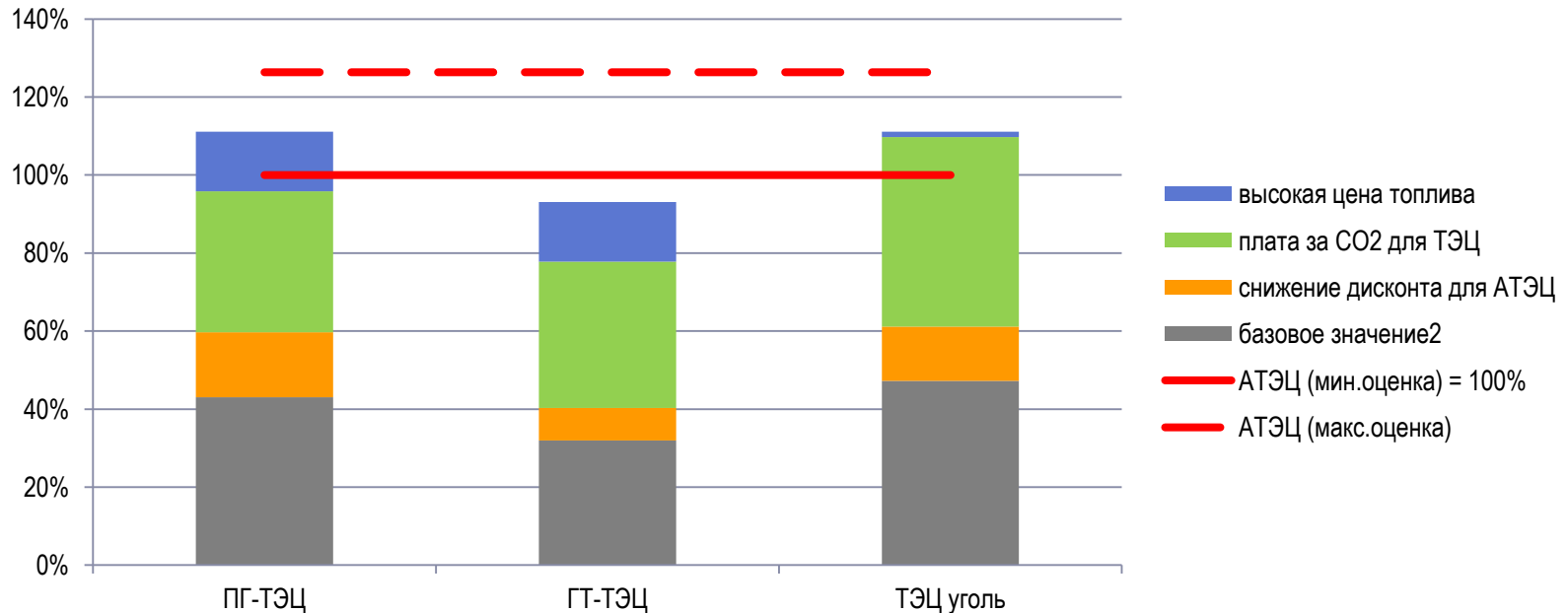
- Оценка эффективных масштабов развития АЭС (как большой, так и малой мощности) на долгосрочную перспективу опирается на показатели типовых, серийных блоков
  - В настоящее время большинство новых блоков АЭС представлено головными образцами и пилотными проектами
  - Применение ТЭП головных образцов в качестве показателей типовых блоков при оптимизации структуры генерирующих мощностей некорректно
- С учетом повышения роли АЭС в структуре производства электроэнергии, особенно в низкоуглеродных сценариях, критически важной является обоснованная инженерная оценка:
  - удешевления стоимости блоков при переходе к серийному производству оборудования и строительству; причем более значимым эффект серийности будет именно для АСММ
  - площадочного мультипликатора – удешевления при размещении нескольких блоков на одной площадке, также особенно выраженная для АСММ (где может размещаться 10+ и более блоков)

- **В «окраинных» энергосистемах с относительно небольшой установленной мощностью и слабыми связями с ЕЭС России (Кольская, Калининградская, Крымская), а также в ОЭС Востока:**
  - реализация всего 1 проекта 10-12 блоков АСММ мощностью ~50 МВт на одной площадке позволяет, не увеличивая существенно потребность в резервировании, достичь нескольких целей:
    - быстрее получить представительный объем референтных блоков
    - быстрее пройти стадию пилотирования и оптимизировать процессы проектирования и строительства
    - сформировать серийный промышленный заказ
    - получить оценки максимально возможного удешевления за счет всех составляющих при производстве оборудования, проектировании и строительстве, включая «площадочный мультипликатор»
  - реализация проекта такой же мощности в виде нескольких АСММ на 2-4 блока позволяет дополнительно отработать технологии управления распределенными источниками генерации, уточнить технические требования к гибкости режима АСММ.
- **В «основной» части ЕЭС России возможности развития АСММ крайне ограничены**
  - АСММ существенно уступают в прямой конкуренции крупноблочным АЭС,
  - однако при введении активного углеродного регулирования и стимулирования безуглеродных источников АТЭЦ на базе АСММ могут эффективно обеспечить замещение, как минимум, угольных ТЭЦ
- **В изолированных энергосистемах и зоне децентрализованного энергоснабжения**
  - конкуренция с традиционными дизельными, местными угольными и внешними газовыми ресурсами (СПГ), эффективность АСММ повышается при введении активного углеродного регулирования или целей пром.потребителя по снижению углеродного следа в своей продукции
  - развитие АСММ должно быть сбалансировано с прогнозной нагрузкой и учитывать требования по резервированию.

# Конкуренентоспособность АТЭЦ как источников комбинированного энергоснабжения

- Решающим фактором для конкурентоспособности ТЭЦ на базе АСММ является введение мер жесткого углеродного регулирования:
  - платы за выбросы CO<sub>2</sub> (не менее 50-100 долл/т CO<sub>2</sub>)
  - прямых ограничений на объемы эмиссии в теплоснабжении, наряду с производством электроэнергии, вынуждающих замещать ТЭЦ и котельные на органическом топливе
    - моделирование подобных сценариев показывает возможность ввода до 1,1 ГВт АТЭЦ к 2050 году
  - дополнительные факторы – льготные условия финансирования и более быстрый рост цен топлива

Сравнение АТЭЦ с типовыми ТЭЦ на газе и угле по удельной стоимости общего отпуска полезной энергии (электрической и тепловой) LCOQ



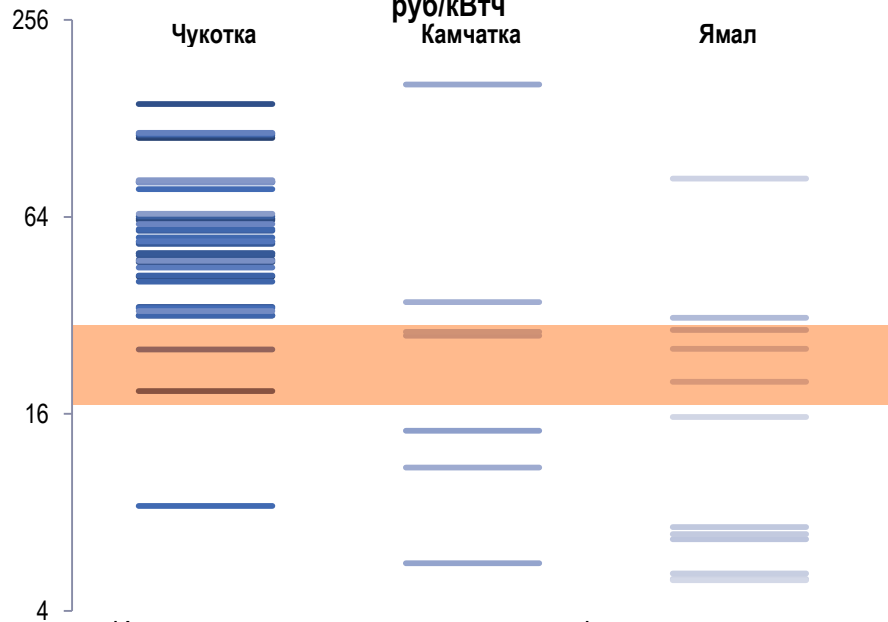
Источник: расчеты ИНЭИ РАН



# Конкуренентоспособность АТЭЦ как источников децентрализованного энергоснабжения

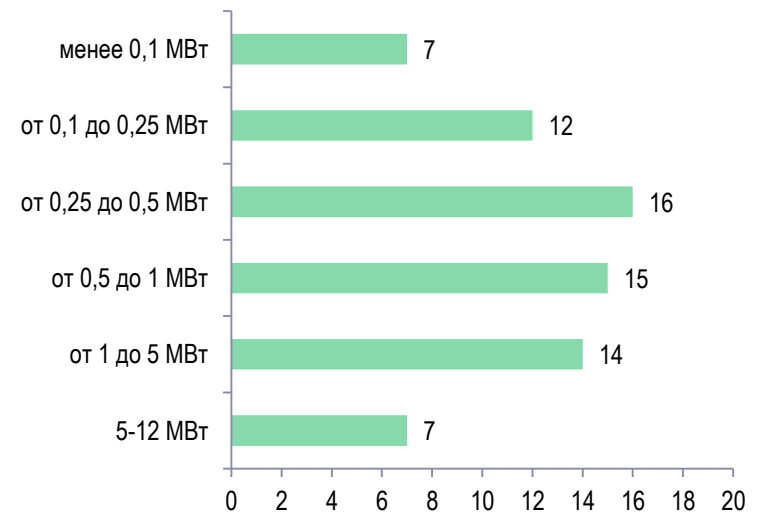
- Массовое применение АСММ в децентрализованной зоне, для распределенных нагрузок потребует блоков с меньшей единичной мощностью (в несколько МВт) - модульных, с длинным топливным циклом («одноразовый блок»), автоматизированных (вплоть до удаленного правления), с возможным использованием для теплоснабжения
- Требуется объективная оценка удорожания строительства АСММ в трудных климатических условиях
- Необходима проработка вариантов резервирования и работы АСММ в гибридной изолированной от ЕЭС энергосистеме (дизель, ВИЭ, накопитель)

Сравнение стоимости производства электроэнергии АСММ и цен в поселениях на севере страны, руб/кВтч



Источник: данные региональных тарифных органов, расчеты ИНЭИ РАН

Распределение планируемых объектов малой генерации в удаленных районах Якутии



Источник: Программа оптимизации локальной энергетики Республики Якутия (Саха).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Развитие АСММ, как массовой энергетической технологии, может стать важным «нишевым» технологическим направлением в электроэнергетике России, дополняя крупноблочную атомную энергетику.
- Рост капиталоемкости АСММ из-за эффекта масштаба может быть существенно снижен за счет: модульности и массовости производства, упрощения технических и строительных решений, поточного строительства на одной площадке (площадочный мультипликатор).
- Модульность и массовость производства является важным условием для более быстрого технологического обучения и снижения CAPEX и OPEX и повышения конкурентоспособности АСММ
- В общем случае потенциальная привлекательность проектов АСММ определяется несколькими факторами:
  - проекты АСММ (как и крупноблочных АЭС) за счет высокого КИУМ обеспечивают наибольший объем снижения выбросов CO<sub>2</sub> при замещении тепловых электростанций
  - проекты АСММ меньше по объемам финансирования, имеют более короткие сроки окупаемости, более низкие технологические риски при более массовом производстве оборудования, проектировании и строительстве
  - проекты АСММ наиболее привлекательны для некрупных энергосистем, где фактор дискретности мощности энергоблоков критичен для резервирования и планирования сетевых решений
- В электроэнергетике России видится потенциал развития АСММ в нескольких «нишах»
  - в «окраинных» энергосистемах ЕЭС России небольшой мощности, где отсутствуют балансовые условия для блоков 1000+ МВт; при этом могут быть рассмотрены варианты многоблочной АСММ на одной площадке или распределенных АСММ
  - в остальной части ЕЭС России – как АТЭЦ, замещающие ТЭЦ на угле и газе при введении жесткого углеродного регулирования
  - в децентрализованной зоне, для обеспечения распределенных нагрузок, предпочтительны блоки с меньшей единичной мощностью (0,5-5 МВт) - модульные, с длинным топливным циклом («одноразовый блок»), автоматизированные (вплоть до удаленного правления), с возможным использованием для теплоснабжения

**Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences**

[www.eriras.ru](http://www.eriras.ru)

[info@eriras.ru](mailto:info@eriras.ru)

**Thank you for attention!**