

Влияние возобновляемых источников энергии на перспективы атомной энергетики

Авторы: Д.В. Парамонов, Е.В. Тутунина

Поводом написания данной статьи послужило заявление Международного энергетического агентства (IEA, МЭА) от 25 октября 2016 г. о повышении на 13% своего пятилетнего прогноза роста для возобновляемых источников энергии, который был сделан только в прошлом году. Это связано с тем, что в 2015 году, впервые в истории, ввод новых энергетических мощностей, работающих на возобновляемых источниках, составил 153 Гигаватта, что соответствует около 55 % всех введенных мировых энергетических мощностей. Важно понять, какие перспективы стоят перед атомной энергетикой в условиях трансформирующихся глобальных энергетических рынков.

Введение

Какие из способов получения электроэнергии будут доминировать, учитывая современные тенденции развития общества? На сегодняшний день основными источниками мирового (глобального) производства электрической энергии являются (Рис.1):

1. Тепловая энергетика (61%), в основном уголь (39%) и газ (22%);
2. Гидроэнергетика (Энергия водных потоков) (17%);
3. Ядерная энергетика (11%).

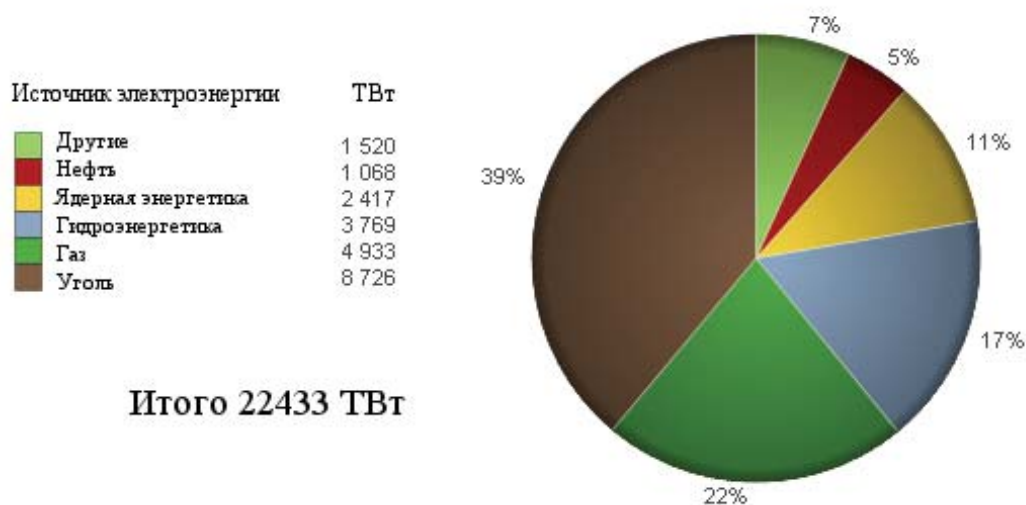


Рис.1 Производство электроэнергии в мире от существующих источников энергии в 2014 г. (ТВт) [1]

Наибольший вклад в величину глобальной установленной мощности вносят энергосистемы Китая (21,5%), США (19,5%), Японии (5,5%), Индии (4,7%) и РФ (4%) (Рис.2).

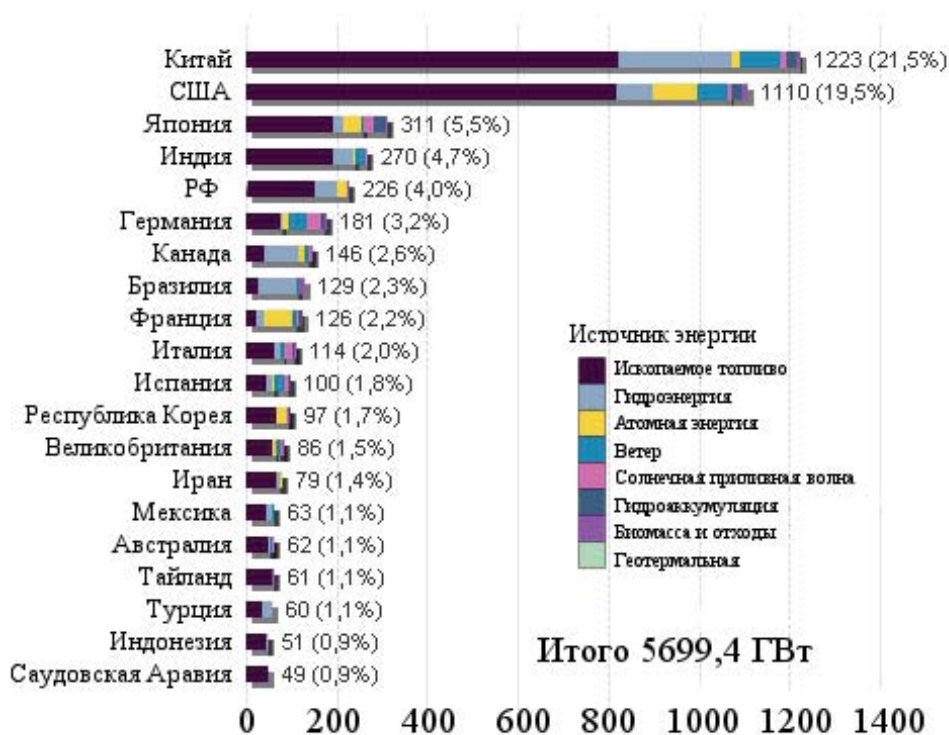


Рис.2 20-ка стран с наибольшей установленной мощностью в мире в 2014 г. (ТВт) [2]

Общий объем произведенной электроэнергии в 2014 году составил 22.4 млрд. кВт-ч (Рис.3).

Согласно прогнозу Международного энергетического агентства (IEA, МЭА), этот объем увеличится и достигнет к 2020 году отметки 25,8 млрд. кВт-ч и 36,5 млрд кВт-ч в 2040 году.

Рассмотрим факторы, влияющие на объем выработки электроэнергии:

- темпы экономического роста;
- баланс спроса и предложений на электроэнергию;
- национальная политика или международные соглашения, направленные на уменьшение или ограничение использования того или иного источника производства электроэнергии;
- техническое состояние активов;

- численность населения страны;
- другие факторы.



Рис. 3 20-ка стран в мире с наивысшей электрогенерацией в 2014 г. (ТВт) [3]

Общепринятый метод оценки затрат при эксплуатации энергомоощностей разного типа выражен в коэффициенте приведенной стоимости электроэнергии Levelized cost of electricity (LCOE). Коэффициент LCOE равен отношению средних совокупных расходов (или «полной стоимости») на сооружение и эксплуатацию генерирующих активов к общему объему произведенной ими электроэнергии и определяет минимальную стоимость, по которой электроэнергия должна продаваться в целях безубыточности на протяжении всего жизненного цикла.

Основные факторы, влияющие на оценку стоимости жизненного цикла, сведены в Таблицу 1.

Таблица 1

Невозобновляемые энергетические ресурсы		Возобновляемые энергетические ресурсы				
ТЭС (угольные, газовые)	АЭС	ветровые турбины, солнечные фотоэлектрические	Солнечная тепловая энергетика	Биомасса	волновая и приливная энергетика	ГЭС (энергия течений)

			панели	ка		ика	
капитальные затраты (включая утилизацию отходов, вывод из эксплуатации)	низкие	Очень высокие	высокие	Очень высокие	высокие	Очень высокие	высокие
затраты на топливо*	высокие	низкие	0	0	Высокие	0	0
операционные и амортизационные расходы на техническое обслуживание	низкие	высокие	низкие	низкие	низкие	низкие	низкие

* Затраты на топливо могут меняться непредсказуемо в течение срока службы генерирующего оборудования, в связи с политическими и другими факторами.

LSOE для конкретного источника энергии сильно зависит от сделанных допущений (например, он не включает такие факторы, как ущерб здоровью со стороны угольных электростанций, влияние выбросов CO₂ на изменение климата, подкисление океана, сдвиги океанических течений), условий финансирования и анализа технологического развития.

В частности, предварительный расчетный коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) оказывает существенное влияние на расчет LCOE. Затраты на вывод из эксплуатации АЭС, как правило, также не включаются в расчет LCOE (США является исключением, поскольку стоимость вывода из эксплуатации включена в стоимость электроэнергии, согласно Закону о политике ядерных отходов (the Nuclear Waste Policy Act)). В РФ в фонд средств для вывода АЭС из эксплуатации поступает около 3% от годовой выручки, есть отчисления для обращения с РАО. За переработку и захоронение ОЯТ «Росэнергоатом» платит сразу, как только передает его в

централизованное хранилище. Все эти затраты и отчисления включаются в себестоимость киловатт-часа, выработанного АЭС.

Исходя из выше перечисленного, основными факторами, влияющими на LCOE, являются:

- капитальные затраты;
- операционные и амортизационные расходы;
- затраты на топливо;
- условия финансирования;
- коэффициент использования установленной мощности;
- срок службы актива;
- термодинамического и технологического совершенства актива.

В исследовании инвестиционного банка Lazard энергетической экономики США [33] утверждается, что ветроэнергетика и большая солнечная энергетика являются самыми дешевыми способами получения электроэнергии. Без учета субсидий, приведенная стоимость производства энергии (LCOE) в ветроэнергетике составила 32-77 \$/МВт·ч, в большой солнечной энергетике – 50-70 \$/МВт·ч, в парогазовой генерации – 52-78 \$/МВт·ч, в угольной генерации – 65-150 \$/МВт·ч, на газо-турбинных электростанциях – 68-101 \$/МВт·ч, в ядерной энергетике – 97-136 \$/МВт·ч, в дизельной генерации – 212-281 \$/МВт·ч.

Нижеприведенный исторический обзор прогнозов величины LCOE Международного энергетического агентства (МЭА) показывает, что максимальные снижение LCOE за последние 6 лет достигнуты в береговой ветроэнергетике (-57%), фотовольтовой солнечной энергетике(-79%) и в газо-турбинном комбинированном цикле (-30%).

Таблица 2

Исторический обзор прогнозов величины LCOE Международного энергетического агентства по проектам за период 2010-2016гг. [3]

Оценка в \$/МВт за период гг.	Уголь (традиционная ТЭС)	Комбинированный цикл с жиганием природного газа		АЭС традиционные	Ветроэнергетика		Солнечная энергия	
		традиционный	усовершенствованный		береговая	морская	фотогальваническая	Сконцентрированная
2010-2016	100,4	83,1	79,3	119	149,3	191,1	396,1	256,6
2011-2016	95,1	65,1	62,2	114	96,1	243,	211	312,2

						7		
2012-2017	97,7	66,1	63,1	111,4	96	нет данн ых	152,4	242
2013-2018	100,1	67,1	65,6	108,4	86,6	221, 5	144,3	261,5
2014-2019	95,6	66,3	64,4	96,1	80,3	204, 1	130	243,1
2015-2020	95,1	75,2	72,6	95,2	73,6	196, 9	125,3	239,7
2016-2022	Нет данн ых	58,1	57,2	102,8	64,5	158, 1	84,7	235,9
Номиналь ные измени я проектов 2010-2016	Нет данн ых	-30%	-28%	-14%	-57%	- 17%	-79%	-8%
Примечание: Проектные LCOE скорректированы в соответствие с инфляцией и рассчитаны по доллару базового периода за два года, предшествующих оценке. Оценки даны без учета каких-либо субсидий. Стоимость передачи для источников, не участвующих в регулировании частоты энергосистемы, в среднем намного выше								

Ископаемые виды топлива продолжают наиболее широко использоваться в производстве электроэнергии. Электростанции на ископаемом топливе всегда характеризовались очень высоким и предсказуемым КИУМ (capacity factor, т.е. отношение реально получаемой отдачи от электростанции к ее максимальному потенциалу). Например, типичная электростанция на газе в США выдает примерно 70% от своего потенциала (снижение от 100% объясняется сезонными колебаниями потребления и расходами на обслуживание).

Таблица 3

Динамика коэффициента использования установленной мощности [5]

	Вторая половина 2014	Первая половина 2015	Вторая половина 2015
Уголь	86%	85%	85%
Природный газ	70%	70%	62%
Ветер	32%	35%	37%

Солнце	16%	17%	20%
--------	-----	-----	-----

Однако, в связи с распространением возобновляемой энергетики, КИУМ для станций на ископаемом топливе существенно снижается (Таблица 3). Причина этого в том, что после введения в эксплуатацию новой солнечной или ветровой станций они дают практически бесплатную электроэнергию (затраты на топливо равны нулю), в то время как на ТЭС выработка каждого нового ватта требует все нового топлива. Поэтому, если энергетическая компания имеет возможность выбора, она выбирает бесплатный вариант.



Рис. 4. Замкнутый цикл, обеспечивающий снижение стоимости возобновляемой энергии [6]

Так возникает «самоускоряющееся циклическое движение» (Рис.4). КИУМ угольных и газовых ТЭС тем меньше, чем больше строятся станций на возобновляемых источниках. Следовательно, LCOE станций на угле и газе будет повышаться, а прибыль энергетических компаний будет становиться менее предсказуемой.

Основным недостатком ТЭС является их негативное воздействие на окружающую среду. Дымовые газы (от сгорания топлива, транспортировки шлама) и тепловое загрязнение - основные источники загрязнения от электростанций на ископаемом топливе. Особенно сильное загрязнение окружающей среды производит угольная электростанция. Крупнейшим источником выбросов углекислого газа является Китай. Примерно 80% китайских ТЭЦ использует уголь. Дымовой туман, вызванный работой угольных ТЭЦ и предприятий тяжелой промышленности в Китае, – его давняя и постоянная проблема.

Именно из-за загрязнения окружающей среды угольными ТЭЦ экологические нормы в ключевых странах мира (США, Китае, Индии и Мексике) сдвинуты в пользу природного газа и возобновляемых источников энергии.

Гидроэнергетика

Среди различных видов ВЭИ самый широко распространенный - гидроэнергетика (76%), который используется для генерации электроэнергии, как в малых масштабах, так и на крупномасштабной основе. Выработка электроэнергии от гидроэлектростанций не производит парниковых газов, токсичных отходов и твердых частиц.

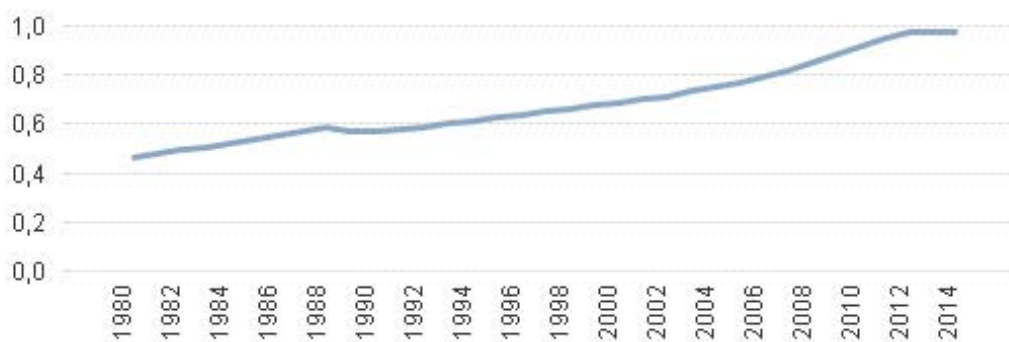


Рис. 5. Установленная мощность в гидроэнергетике (ТВт) [7]

Установленная мощность в гидроэнергетике увеличилась за последние 20 лет примерно в 2 раза [7]. Согласно оценкам, данный сектор имеет двукратный резерв роста, скрытый в мощности потоков воды, текущих по всему миру.

Огромные ресурсы скрывает волновая гидроэнергетика, дающая на сегодняшний день только 1% добываемой электрической энергии. Незначительное применение станций волновой энергетики объясняется дорогостоящей на выходе энергией.

Основная проблема ГЭС - создаваемый экологический дисбаланс, особенно в нижнем течении реки. Гидроэлектрические проекты нарушают экосистемы. Вода, вытекающая из дамбы, отличается по температуре и прозрачности (более мутная) в сравнении с водой вверх по течению. Это может вызвать береговую эрозию и подвергнуть опасности жизнь растений и животных, а также негативно влияет на популяцию рыб.

Несмотря на позиционирование гидроэнергетики как «зеленой», данные станции все же могут быть причиной выбросов парниковых газов в странах с тропическим климатом.

Из-за угрозы экологических проблем правительство Чили в 2014 г. отклонило проект компании HidroAysen по строительству дамб на пяти реках Патагонии [29].

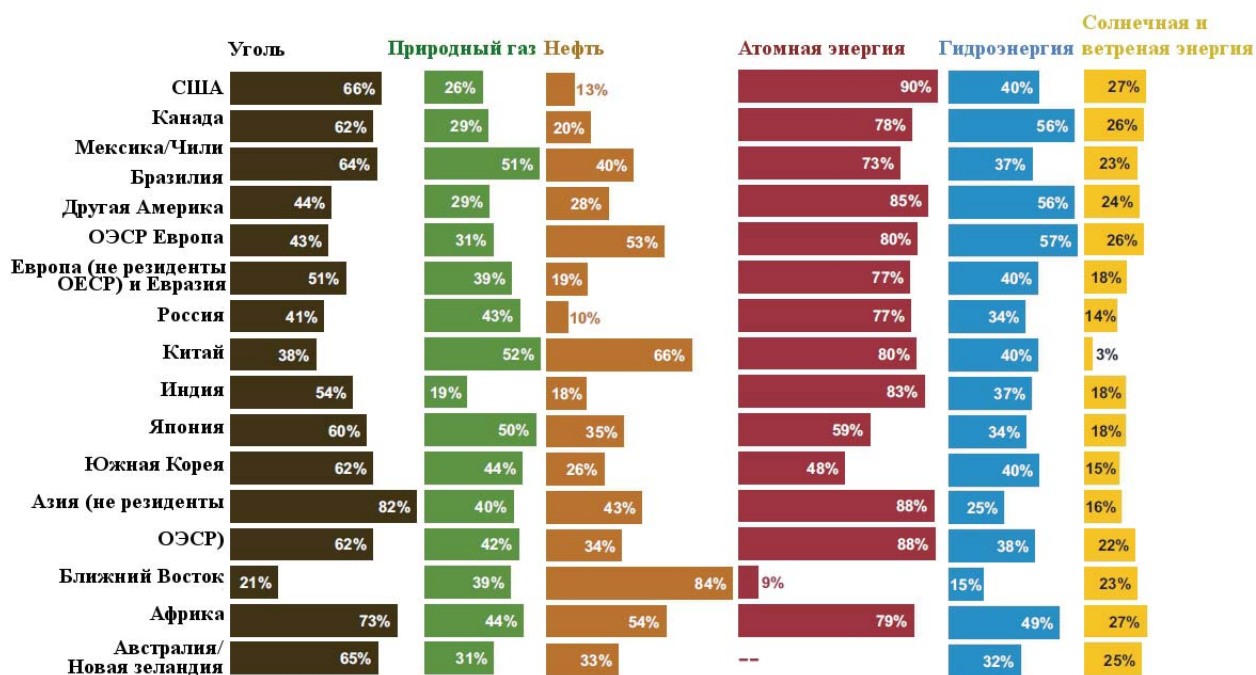
Строительство плотины Рогунская ГЭС стало основанием для транснационального спора вокруг водопользования между Таджикистаном, на чьей территории формируется сток основных рек, и Узбекистаном, располагающимся ниже по течению и пользующимся основными объемами водных ресурсов.

Другой важной проблемой является переселение людей из их родной земли, занимаемой ими и их предками на протяжении веков. К примеру, плотина Китая 22,5 ГВт «Три ущелья» стала причиной выселения 1,2 млн. человек.

Следует упомянуть и о положительных эффектах от строительства гидротехнических сооружений. Плотина в состоянии ослабить потоки пиков наводнения. Вышеупомянутая ГЭС «Три ущелья» была построена в первую очередь не как генератор энергии, а в целях контроля экстремальных наводнений, тем самым позволяя избежать экономического ущерба от наводнения в миллиарды долларов, не говоря уже о спасении множества жизней местного населения.

Еще одним минусом гидроэнергетики можно назвать довольно низкий коэффициент использования установленной мощности. Казалось бы, ввиду прямого преобразования механической энергии воды в электрическую энергию воды и отсутствия на них термодинамического цикла (преобразования тепловой энергии в механическую), КПД ГЭС должен быть высоким.

Однако ГЭС обладают довольно низким коэффициентом использования установленной мощности, составляющим порядка 50%. То есть один гигаваттный блок в лучшем случае выдает 500 мегаватт, что также сказывается на перспективах развития гидроэнергетики.



Примечание: Коэффициенты использования солнечных и ветряных мощностей для России и для других регионов Американского континента включает только ветряную мощность. Австралия/Новая Зеландия не имеет установленной мощности АЭС

Рис. 6 Средние Коэффициенты использования мощностей в течение пятилетнего периода по данным International Energy Outlook 2016 [8, 89]

Недостаточно изучен вопрос, как нивелировать экологические последствия при выводе ГЭС из эксплуатации, так как ни одну из крупнейших гидроэлектростанций еще не выводили. Ясно одно: вывод ГЭС из эксплуатации потребует больших бюджетных затрат.

По оценкам Международного энергетического агентства, география строительства больших ГЭС в предстоящие полтора-два десятилетия до 80% сосредоточится в развивающихся странах. В Африке, Азии, Южной Америке и странах бывшего СССР велик неосвоенный гидропотенциал, а вопросы экологии играют меньшую роль, как в силу менее строгих экологических стандартов, так и по причине относительно невысокой политизированности этих вопросов. Помимо различных вопросов для развития гидроэнергетики, одним из главных препятствий является финансирование проектов строительства ГЭС. Капитальные затраты растут с ростом стоимости цемента, стали и чугуна, что негативно отражается на коэффициенте приведенной стоимости электроэнергии ГЭС (LCOE). Правительства разных стран будут вынуждены искать частные инвестиционные компании и международные организации, такие как Всемирный банк, чтобы финансировать новые (гидротехнические) проекты. При таком сценарии финансирования важно, чтобы проект являлся жизнеспособным и связанные с ним вопросы были решены в полном объеме.

Исследователи Оксфордского университета обнаружили, что в большинстве стран стоимость крупных проектов плотин в среднем увеличилась на 57% по сравнению с их первоначальной стоимостью [28]. Учитывая высокую цену, финансовый уровень доходности по некоторым проектам может быть отрицательным.

Если проблемы окружающей среды, экологии, человеческого перемещения и переселения не оценены в полной мере или не рассмотрены вовсе в начальной стадии проекта, то вряд ли кто-нибудь будет готов инвестировать в строительство. На самом деле частные инвесторы предпочитают вкладывать средства в тепловые проекты из-за предыдущих неудачных опытов, когда гидроэнергетические проекты становились (финансово более объемными) перерасходными и реализовывались с задержкой из-за неправильного планирования проекта и недооценки численности переселяемого населения (пример - индийский проект Сардар Саровар).

В последние десятилетия в мире стала развиваться малая энергетика. Малая гидроэлектроэнергетика обладает уникальными преимуществами. Это зрелая технология, с небольшими затратами капитала при строительстве станций и относительно быстрым возвратом инвестиций (до 5 лет), которая минимизирует экологический ущерб, наносимый водохранилищами крупных ГЭС, и дает возможность гарантировать энергообеспечение в изолированных и труднодоступных районах.

Несмотря на то, что в результате строительства плотин по всему миру была затоплена территория, равная площади Калифорнии, население, равное по численности населению Германии, вынуждено было переселиться, а пресные воды превратились в экосистемы с угрозой вымирания редких видов, гидроэнергетика, являясь всемирно признанным источником экологически чистой энергии, играла и будет играть важную роль в глобальном энергобалансе. Причем большая гидроэнергетика будет развиваться преимущественно в развивающихся странах, а малая гидроэнергетика, являясь экономически более эффективной и с учетом положительной реакции в международном сообществе, будет развиваться как в развитых, так и в развивающихся странах.

Ветровая и солнечная энергетика

Возобновляемая энергетика вышла на 1-е место в мире по темпам прироста установленной мощности среди всех видов топлива.

Доля солнечной и ветровой энергии в глобальном потреблении электричества за последние 4 года удвоилась [9].

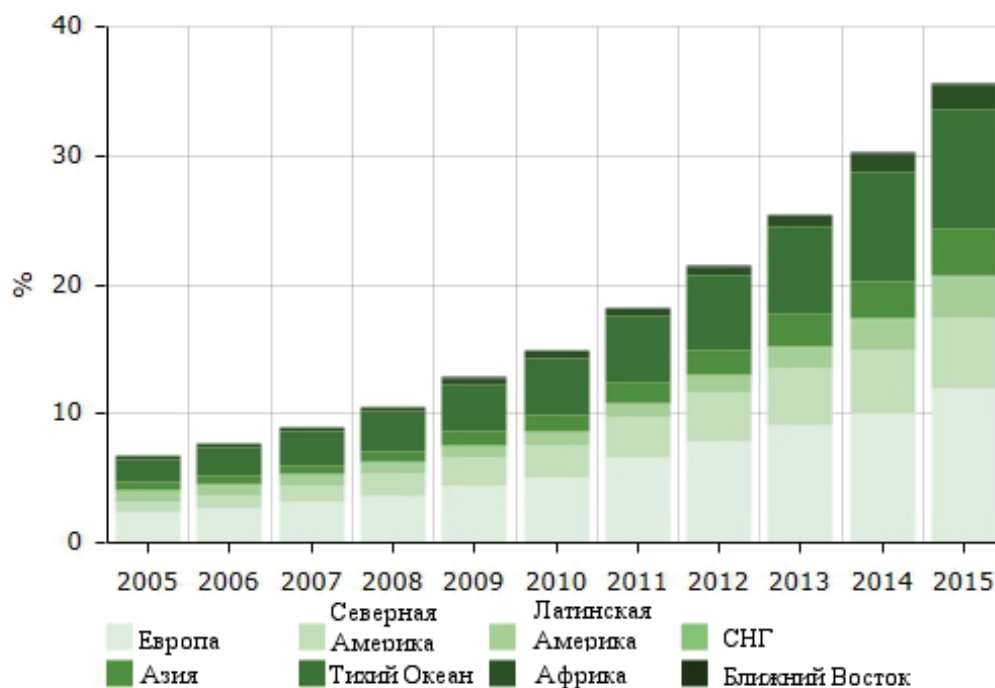


Рис. 7 Доля солнечной и ветровой энергии в глобальном потреблении электричества [9]

Международное энергетическое агентство (IEA, МЭА) в конце октября 2016 года повысило на 13% свой пятилетний прогноз роста для возобновляемых источников энергии, сделанный только в год назад [38], что связано с сильной политической поддержкой ВИЭ в таких странах как США, Китай, Индия и Мексика, а также резким сокращением стоимости. И даже низкие цены на уголь и газ не в состоянии предотвратить глобальную трансформацию энергетического рынка.

Мы привыкли думать, что революция альтернативных источников энергии – это далекое будущее. Однако в 2015 году, впервые в истории, ввод новых энергетических мощностей, работающих на возобновляемых источниках, достиг 153 ГВт, что соответствует около 55% всех введенных мировых энергетических мощностей.

Гистограмма "Чистого прироста производства электроэнергии из возобновляемых источников" (по данным агентства Bloomberg New Energy Finance (BNEF) [10]) прогнозирует «Бум чистой энергии» на 2015-2021 годы.

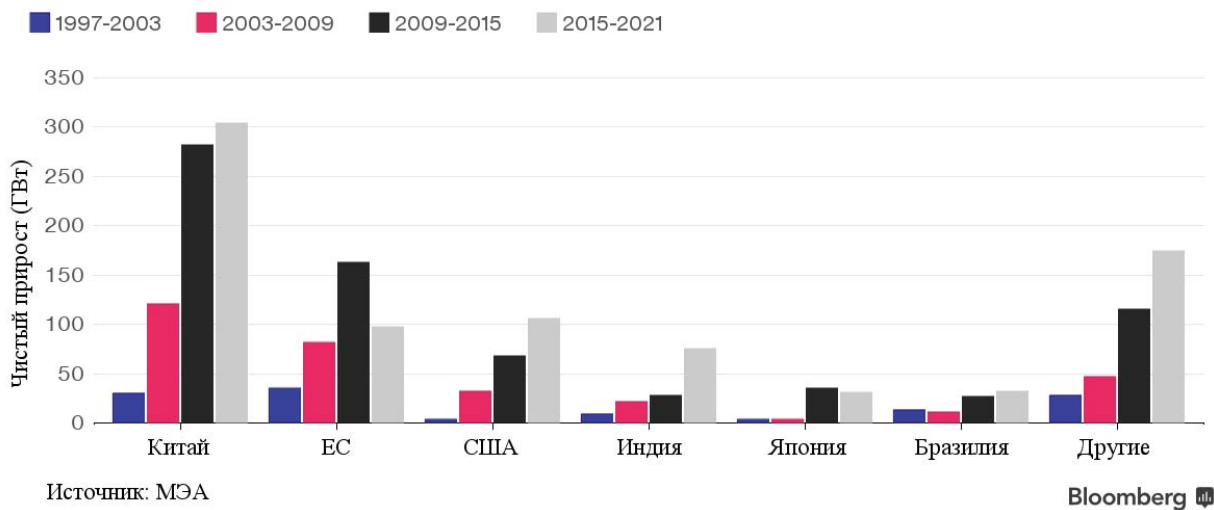


Рис.6 Чистый прирост производства электроэнергии из возобновляемых источников [10]

Международное энергетическое Агентство ожидает, что к 2021 году возобновляемые источники будут обеспечивать 42% мировых потребностей в энергии. Совсем скоро будет трудно назвать возобновляемые источники альтернативными.

Стоимость ветряков снижается [11].

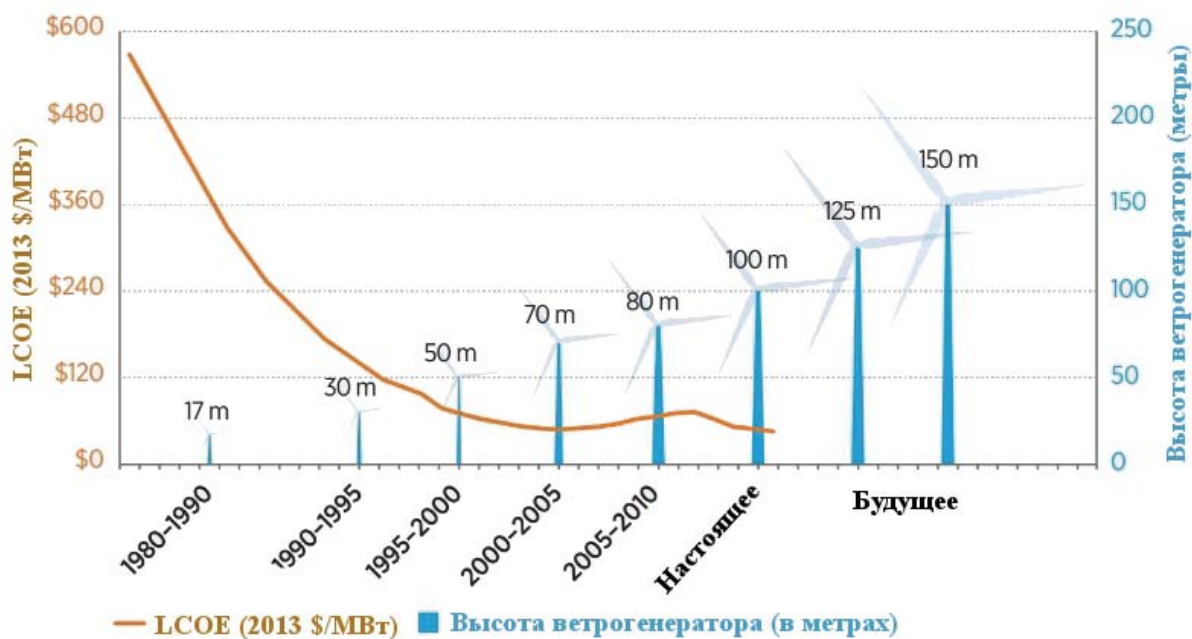


Рис.7 технологические тенденции увеличения масштаба ветряков и LCOE [11]

Коэффициент использования установленной мощности для ветра увеличивается из-за того, что «ветряки» становятся выше, а их лопасти - длиннее и легче, что позволяет им работать даже при небольшой силе ветра. Турбины устанавливаются повсеместно: в лесах, полях, на побережьях, в прибрежных водах морей и океанов (оффшорные парки). Даже в густонаселенных мегаполисах архитекторы умудряются внедрить ветрогенераторы в конструкции небоскребов, переводя их на частичное самообеспечение.

Для координации усилий и быстрого реагирования на изменения запросов рынка ветровой энергии создана международная некоммерческая организация WWEA (World Wind Energy Association) со штаб-квартирой в Германии.

В пятерку стран с самой развитой ветроэнергетикой входят: Китай, США, Германия, Индия, Испания.

Таблица 4.

Страны с наиболее развитой ветроэнергетикой [12]

Position	Country/Region	Total capacity June 2016 [MW]	Added capacity H1 2016 [MW]	Total capacity end 2015 [MW]	Added capacity H1 2015 [MW]	Total capacity end 2014 [MW]	Added capacity H1 2014 [MW]	Total capacity end 2013 [MW]	Total capacity June 2013 [MW]
1	China	158'000	10'000	148'000	10'101	114'763	7'175	91'324	80'827
2	United States	74'696	830	73'867	1'994	65'754	835	61'108	59'884
3	Germany	47'420	2'389	45'192	1'991	40'468	1'830	34'660	32'458
4	India	27'151	2'392	24'759	1'297	22'465	1'112	20'150	19'564
5	Spain	22'987	-	22'987	-	22'987	-	22'959	22'918
6	United Kingdom	13'940	320	13'614	872	12'440	649	10'711	9'776
7	Canada	11'298	109	11'205	510	9'694	723	7'698	6'578
8	France	10'861	568	10'293	523	9'296	338	8'254	7'697
9	Brazil	9'810	1'095	8'715	838	5'962	1'301	3'466	2'788
10	Italy	9'101	143	8'958	124	8'663	30	8'551	8'417
11	Sweden	6'338	309	6'029	157	5'425	354	4'470	4'271
12	Poland***	5'300	200	5'100	283	3'834	337	3'390	2'798
13	Turkey	5'146	428	4'718	431	3'763	466	2'959	2'619
14	Denmark*	5'089	25	5'064	76	4'883	83	4'772	4'578
15	Portugal**	5'040	6	5'034	-	4'953	105	4'724	4'547
	Rest of the World***	44'309	2'900	41'409	2'600	35'968	2'275	29'718	26'861
	Total	456'486	21'714	434'944	21'678	371'317	17'613	318'914	296'581

Развитие ветроэнергетики в таких странах ЕС, как Великобритания, Италия, Франция связано, в первую очередь, с постепенным отказом от использования атомной энергии. Страны не только занимаются активным

строительством ветропарков, но также являются ведущими разработчиками и производителями турбинного оборудования, наряду с Германией.

WWEA прогнозирует рост ветроэнергетики в мире [12,2].



Рис. 8 Суммарная установленная мощность ветроэнергетики в мире в 2012-2016 гг., МВт [12]

Возможности России в генерации ветровой энергии (которые в настоящее время практически не используются) оцениваются в 30% от общего электроэнергетического потенциала страны. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. (от 13 ноября 2009 г.) предполагает «увеличение относительного объема производства и потребления электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии (кроме гидроэлектростанций установленной мощности более 25 МВт) с 1,5 до 4,5 %» [30]. Суммарный показатель мощности ветропарков России, который планируется достигнуть к 2020 году составляет 3 ГВт.

Согласно Форбс [27], ГК «Росатом» вложит 83 млрд рублей в строительство ветроэлектростанций в России. Площадка для выпуска оборудования – одно из предприятий «Атомэнергомаш».

Недостатком ветровой энергетики является зависимость от силы ветра, в результате чего поступления сгенерированного электричества в общую сеть происходят неравномерно. Поэтому полностью отказаться от традиционных ГЭС, ТЭЦ и АЭС на данном этапе развития альтернативной энергетики не представляется возможным, так как они необходимы для стабилизации работы сетей.

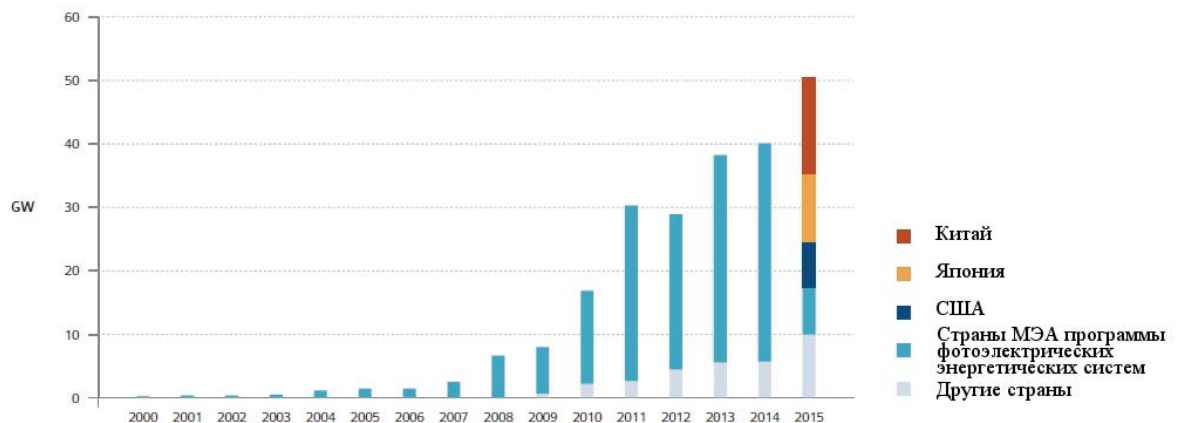
Если построить ветропарки во всех подходящих районах и объединить их в единую сеть, мы все равно не можем получить постоянный и надежный

источник электричества, так как есть проблема эффективной доставки выработанной электроэнергии до конечных потребителей, расположенных слишком далеко от работающих электрогенераторов.

Кроме этого, мощные ветропарки также оказывают воздействие на окружающую среду: нагревают почву, влияют на микроклимат и орнитологию.

По прогнозам IHS Technology, совокупная глобальная установленная мощность фотоэлектрических установок превзойдет 310 ГВт к концу 2016 года. В 2010 году она составляла всего 40 ГВт. Около 70% из 310 ГВт будут установлены в Китае, Соединенных Штатах, Японии, Германии и Италии.

Лидерами в солнечной энергетике в 2015 г. являлись Китай, Япония и США [13].



IEA PVPS TRENDS 2016 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

Источник: IEA PVPS & OTHERS.

Рис. 9 Динамика развития солнечной энергетики 2000-2015 годах [13]

По данным BNEF [14], в некоторых странах (включая Китай, Индию, Бразилию) в 2016 году солнечная энергия стала самой дешевой формой в производстве электроэнергии в мире.

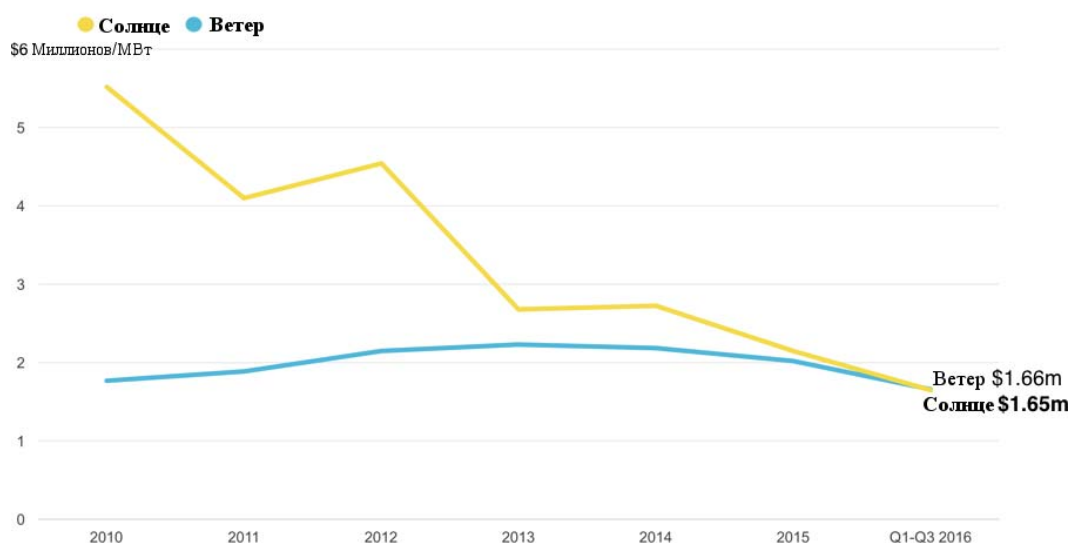


Рис. 10 Раскрытые капитальных расходов для берегового ветра и PV проектов в 58 странах, не входящих в ОЭСР [14]

Совершенствование технологии изготовления фотоэлементов постоянно повышает их мощность и эффективность, а также снижает их стоимость. С 2000 года произошло пятикратное снижение цен на солнечные батареи.

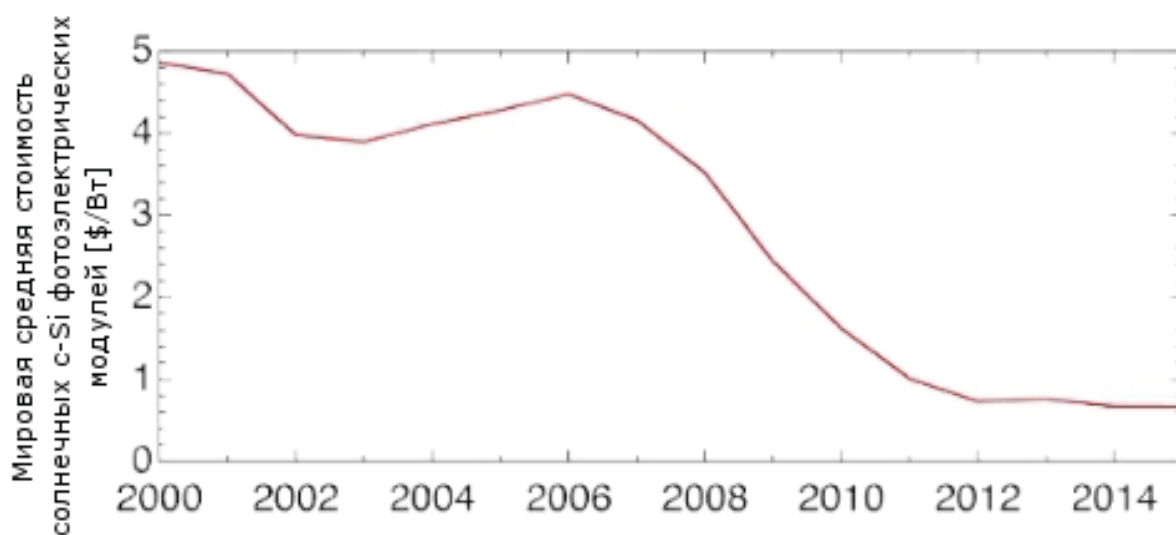


Рис.11. Стоимость солнечных батарей [15]

Развитию солнечной энергетики способствует подписание договора большинством стран на конференции COP 21, посвящённой проблеме климатических изменений. В договоре планируется существенное

увеличение доли возобновляемой энергетики во всем мире в ближайшие годы.

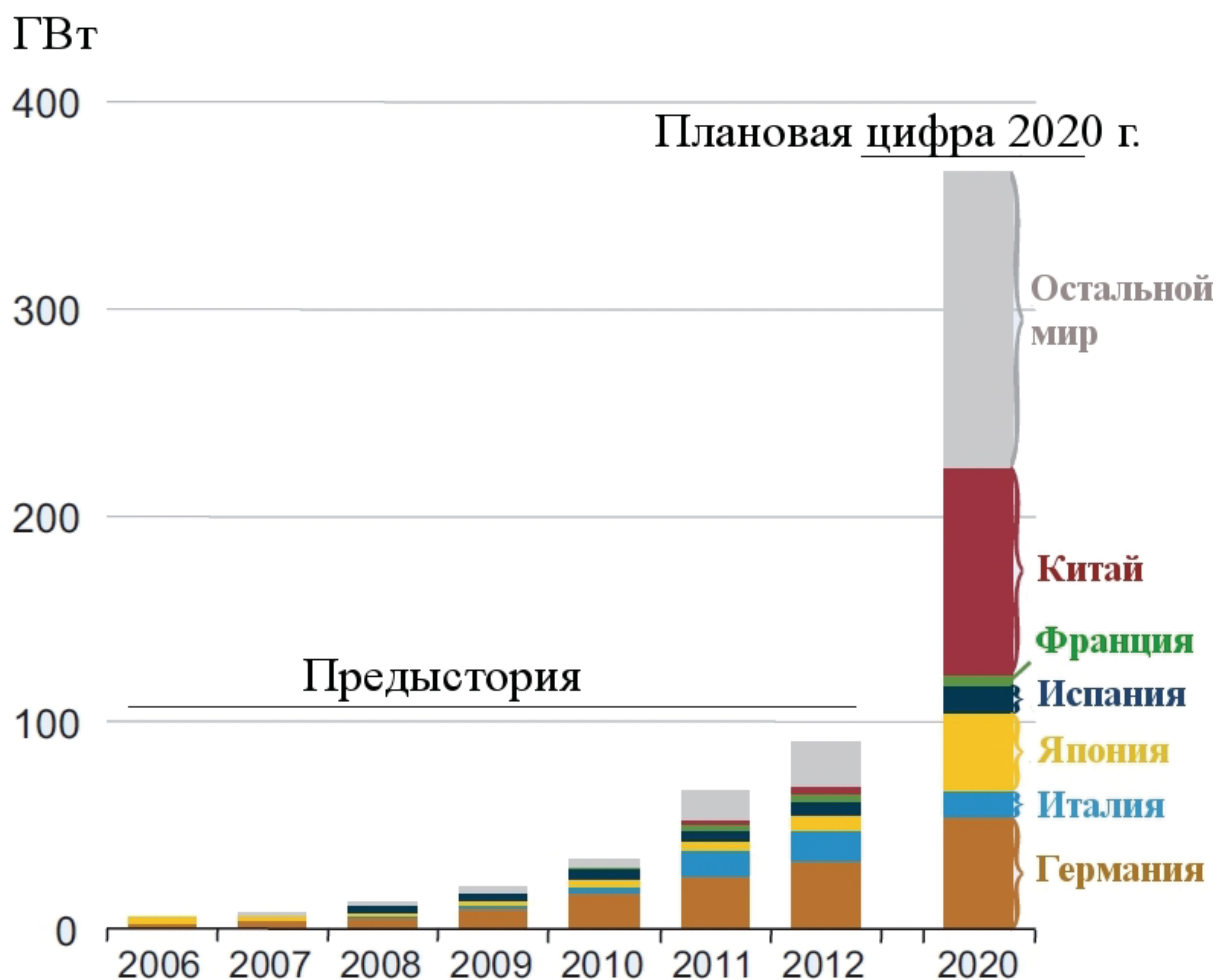


Рис.12 Мировая установленная солнечная рв мощность за 2006-2012 и прогноз на 2020 год [16].

Фактически, есть только один существенный недостаток солнечной энергии – это зависимость мощности солнечных электростанций от времени суток, времени года и погодных условий. Энергетическая система с такой надежностью имеет очень ограниченные области применения.

Проблема данной зависимости солнечного излучения может быть решена в будущем путем строительства солнечных электростанций по экватору и объединению их в сеть, либо путем создания аэростатных или орбитальных солнечных станций.

Таким образом, короткий инвестиционный цикл и быстрые сроки ввода мощностей в эксплуатацию – главные преимущества солнечной и ветровой энергетики. Тормозом на пути к глобальной экспансии в данный момент времени является отсутствие подходящего способа аккумулирования солнечной и ветровой энергии.

Ядерная энергетика

В настоящее время атомная энергетика представлена 449 коммерческими ядерными энергетическими реакторами, действующими в 30 странах, с общей установленной мощностью более 392 МВт. По данным World Nuclear Association [17] на 1 января 2017 года, в мире сооружается 60 реакторов, запланировано 164 реакторов. Наибольшее количество реакторов к сооружению запланировано в Китае (40), РФ (25), Индии (20), США (18), Япония (9), Южной Кореи (8).

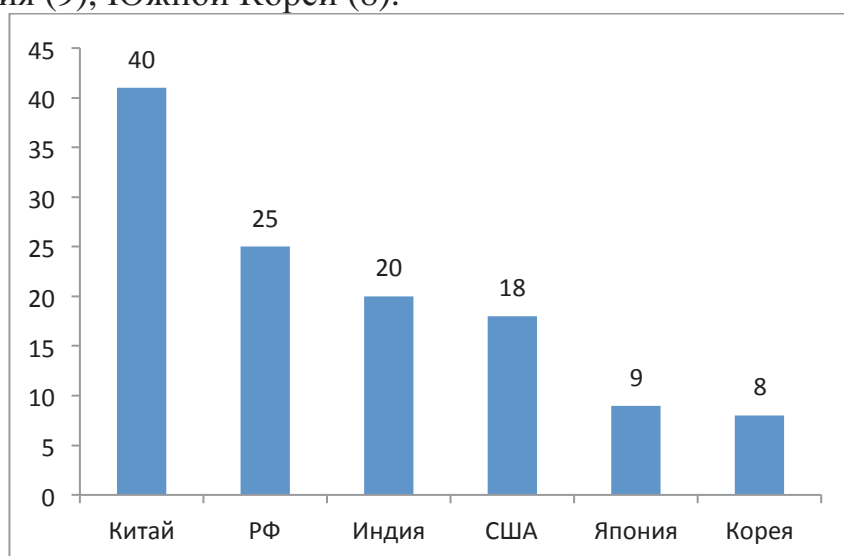


Рис. 13 Количество реакторов, запланированных к сооружению по данным World Nuclear Association на 1 января 2017 года [17]

Странами-лидерами по установленной мощности в данной области являются США, Франция, Япония, Россия, Корея и др.

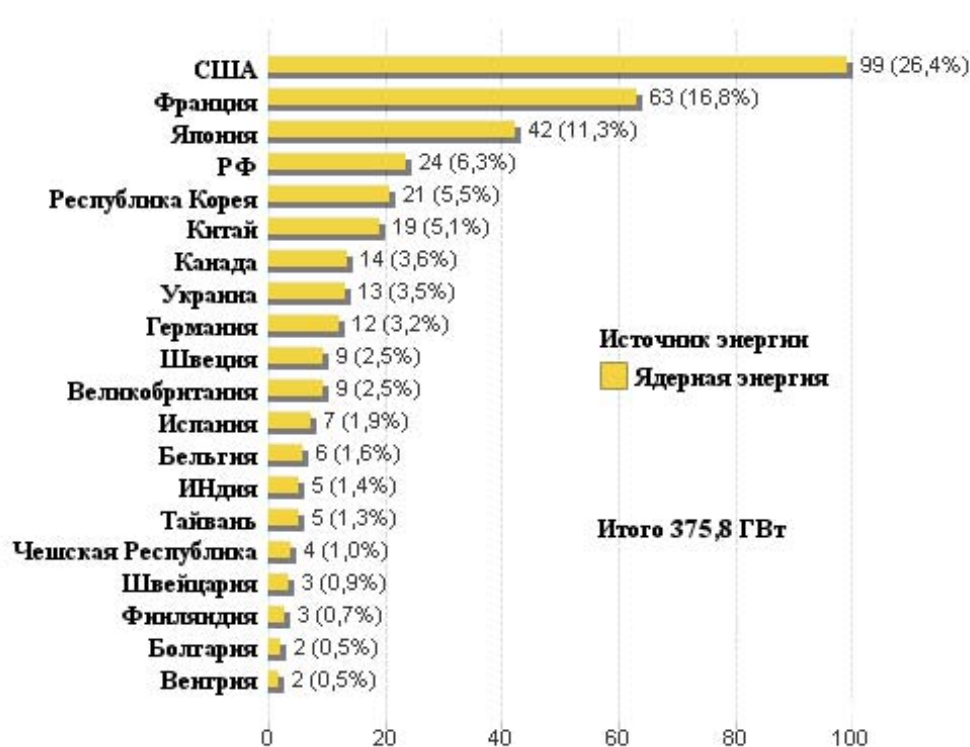


Рис. 14 Топ-20 стран-лидеров по установленной атомной мощности в 2014 г. (ГВт) [18]

Прогнозы World Nuclear Association, сделанные в 2016, предлагают увеличение установленной мощности на 30% до 510 ГВт к 2030 (Низким и высоким прогнозами являются 376 и 643 ГВт на 2030) [19].

Ядерная энергетика дает надежную базовую нагрузку в сеть. Реакторы большой мощности генерируют большое количество электрической энергии на одном единственном заводе с относительно небольшой площадью. АЭС отличаются наиболее высоким коэффициентом использования установленной мощности.

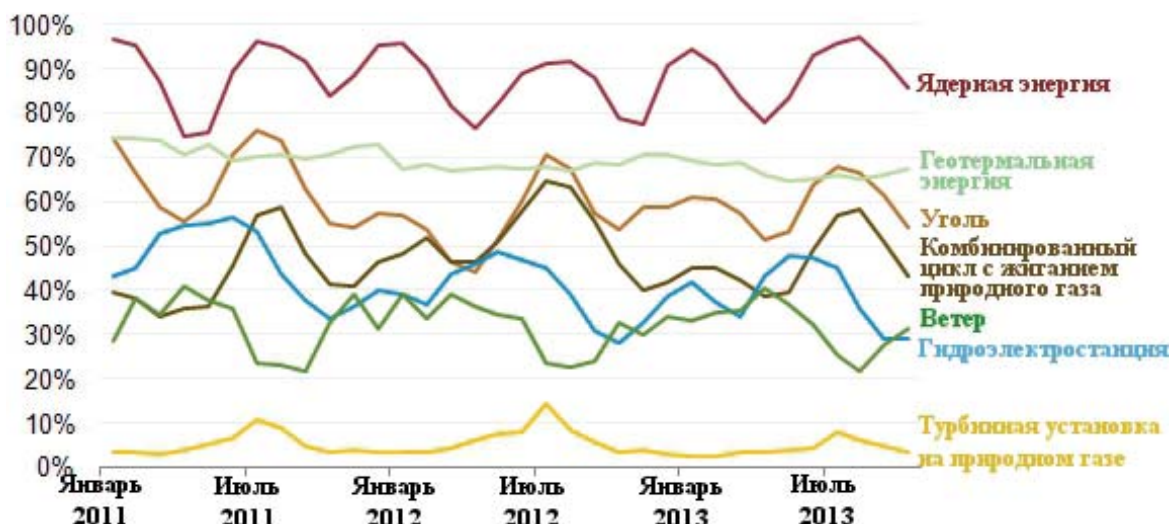


Рис. 15 Ежемесячные коэффициенты использования мощностей для выбранных типов топлива и технологий [20]

Уран 235, используемый в тепловых легководных реакторах, является конечным ресурсом. По различным оценкам, разведанных запасов урана 235 при существующих технологиях добычи хватит на следующие 60 - 100 лет.

Все еще нерешенной является проблема радиоактивных отходов. Несмотря на то, что в странах с ядерной энергетикой радиоактивные отходы составляют менее 1% от всех промышленных токсичных отходов, отходы атомной промышленности чрезвычайно опасны, и о них нужно тщательно заботиться в течение нескольких тысяч лет (10'000 лет согласно стандартам Агентства по охране окружающей среды США). Однако эти проблемы могут быть решены путем замыкания ядерного топливного цикла. Работы в этом направлении ведутся в целом ряде стран.

Генерация ядерной энергии производит относительно низкие объемы углекислого газа (CO₂). Поэтому вклад АЭС в глобальное потепление ничтожен. Это основное преимущество атомной энергетики перед энергетикой на ископаемых видах топлива.

Перспективным является развитие атомной энергетики малой и средней мощности. В последние несколько лет в мире возникло понимание, что ниша использования малых реакторов может быть существенно шире, чем применение данных технологий как транспортных, особенно в странах с неразвитой энергетической системой. Во-первых, в условиях рыночной экономики, где деньги стоят все дороже, маленькие станции в сравнении с большими строятся недолго и сразу приносят доход. Во-вторых, предполагается модульное заводское изготовление данных установок с последующим составлением блоков различной мощности. К примеру, южнокорейские компании построят в Саудовской Аравии два реактора типа SMART, контрактной стоимостью в 2 млрд долларов США [26].

С учетом всех описанных тенденций, происходит ли вытеснение атомной энергетики с глобального рынка? Вот несколько фактов:

- в мире с 2006 года ввод ядерных генерирующих мощностей меньше не только ввода ветровых, но и солнечных;

- по итогам 2015 г. совокупная установленная мощность ветряных электростанций в мире превзошла мощность атомных;

- атомная энергетика имеет наивысшую стоимостную неопределённость (или наивысшее отклонение стоимости от первоначальной цены) (Рис.16);

- доля мировой атомной энергетики стабильно снижается (Рис.17).

- средний срок службы действующих реакторов растет (25 лет на 2010 год), из 447 действующего ядерного энергетического реактора 250 находились в строю 30 и более лет. (Рис.18)

- стремление новых индустриальных стран, прежде всего Китая и Индии, к получению ядерных технологий.

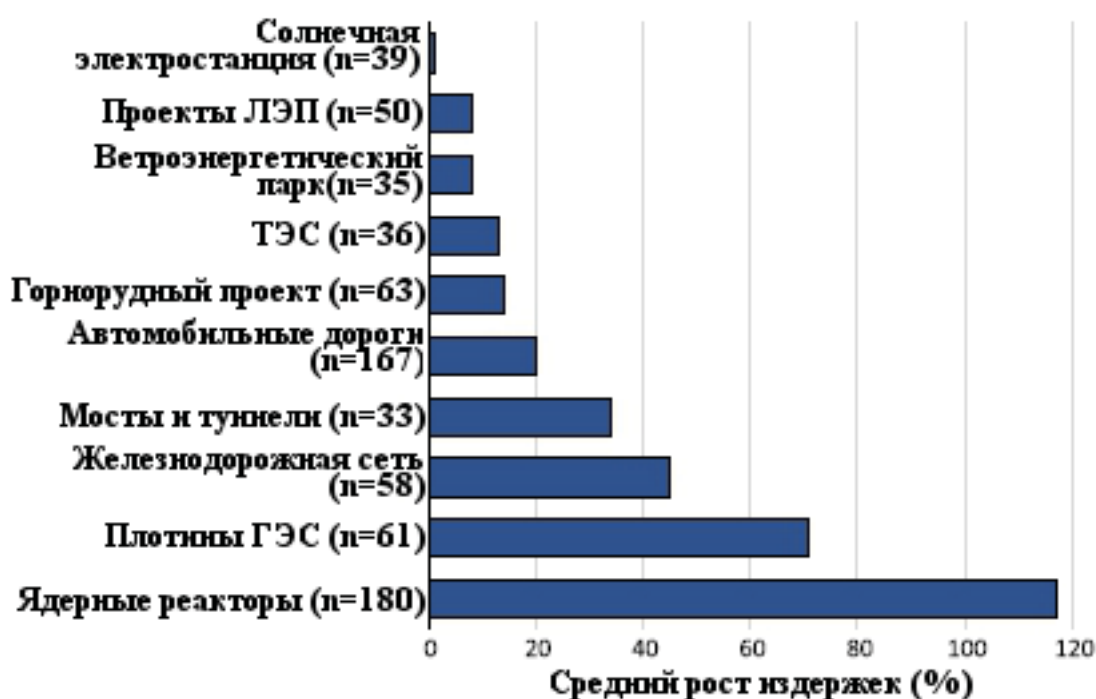


Рис.16 Средняя стоимость эскалации по видам проектов [22]

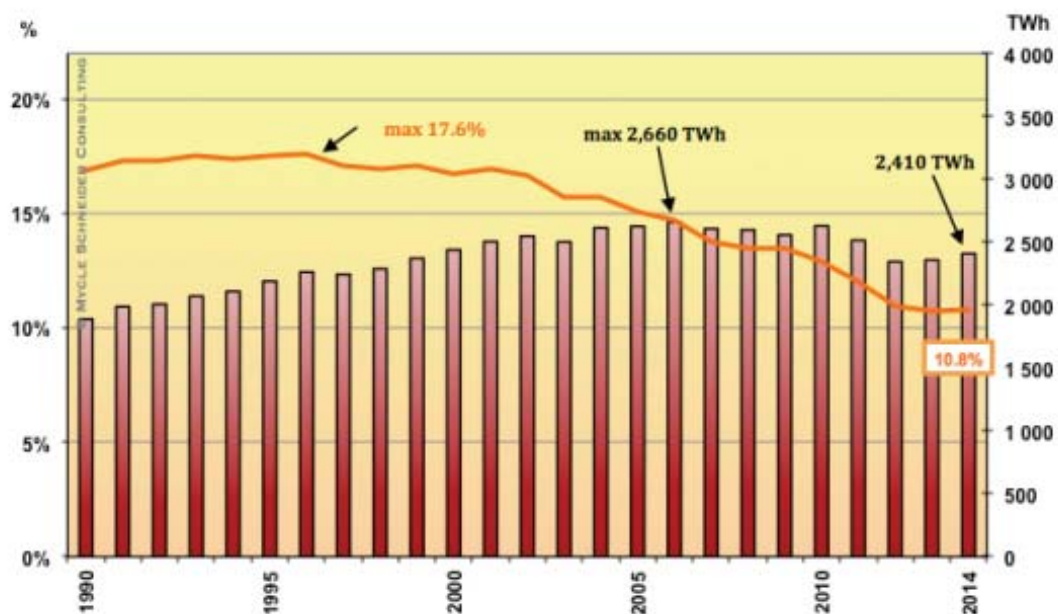


Рис.17 Динамика количества реакторов и установленной мощности с 1990 г. по 2014 г. [23]



Рис.18 . Распределение действующих энергетических реакторов по длительности эксплуатации на декабрь 2015 года [21]

Состояние атомной энергетики в ведущих странах мира описано таблицей 5.

Таблица 5

Состояние АЭ в ведущих странах

Страна	Мотивация к развитию АЭ	Перспективы

США	<p>Мотивации нет.</p> <p>АЭ неконкурентоспособно по сравнению с энергетикой на органическом топливе.</p> <p>АЭ невозможна без господдержки.</p>	<p>Снижение доли АЭС в выработке электроэнергии.</p>
Китай	<p>Китай задыхается от выбросов угольных электростанций. Задача АЭС – снизить загрязнение окружающей среды</p>	<p>Увеличение доли АЭС в выработке электроэнергии</p>
Франция	<p>Энергетическая независимость</p>	<p>Сохранение высокой доли АЭС в выработке электроэнергии</p>
Германия	<p>Мотивации нет. Задача – увеличение доли ВЭ в энергетическом балансе. Потребности в электроэнергии обеспечивают угольные и газовые электростанции.</p>	<p>Ликвидация АЭ</p>
Россия	<p>Внутри страны АЭ неконкурентоспособно по сравнению с энергетикой на органическом топливе.</p> <p>АЭ невозможна без господдержки.</p> <p>АЭ рассматривается как инструмент международной</p>	<p>В 2020 году господдержка строительства АЭС может исчезнуть совсем [25]</p> <p>Строительство АЭС за рубежом продолжится.</p> <p>Строительство АЭС внутри страны зависит от способности резкого (в два раза) сокращения сроков сооружения и стоимости</p>

	политики.	установленной мощности.
--	-----------	-------------------------

Выводы

Мир входит в новую эру - эру низко-углеродной энергетики, которая характеризуется существенными переменами в отношении заказа на поставку электроэнергии и снижением прямого и скрытого субсидирования традиционной энергетики.

Основным источником неопределенности в настоящий момент является скорость перехода к более низко-углеродной энергетической системе.

Прогнозируемые тенденции развития атомной энергетики из года в год выглядят все менее оптимистичными. Пересмотр в сторону понижения доли ядерной энергии последовал за аварией на Фукусиме (Япония).

Нерешенность проблемы замыкания топливного цикла и экономическая неконкурентоспособность могут поставить крест на атомной генерации электроэнергии уже в этом веке, оставив после себя рынок вывода из эксплуатации и обращения с ОЯТ и РАО.

География будущего ГК «Росатом», связанная со строительством АЭС, в ближайшее время сосредоточится в развивающихся странах. Для реализации строительных компетенций ГК «Росатом» на развитых рынках в настоящий момент нет возможности. Но она появится после успешного завершения проекта строительства АЭС «Ханхикиви» в Финляндии. Рынок развитой экономики активно завоевывается Китаем (пример – проект Hinkley Point C в Великобритании, хотя строительство предполагается по французским технологиям, но с привлечением китайских инвестиций [24]).

Таким образом, в условиях декарбонизации мировой энергетики, доминирующими источниками при генерации электрической энергии будут возобновляемые энергетические ресурсы (преимущественно энергия солнца и ветра) и атомная энергетика. Однако на сегодняшний момент атомная энергетика проигрывает борьбу за рынок. Переломить ситуацию можно только путём внедрения кардинально новых технологий, которые позволят изменить многолетнюю тенденцию к росту удельной капитальной стоимости и операционных затрат. Без решения проблемы конкурентоспособности атомной энергетики с возобновляемыми источниками энергии на горизонте в десятки лет максимум на что можно рассчитывать, это «нишевые» рынки и имиджевые проекты в условиях дальнейшего сокращения доли атомной энергетики в мировом энергобалансе. В этом сценарии проблема топливоиспользования теряет остроту и, соответственно, потребность в замыкании ядерного топливного цикла отодвигается на десятки лет.

Литература

1. Breakdown of Electricity Generation by Energy Source [Электронный ресурс]// The shift project data portal: [сайт]. [2013]. URL: <http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart/> (дата обращения 18.01.2016).
2. Countries with highest installed power capacity [Электронный ресурс]// The shift project data portal: [сайт]. [2013]. URL: <http://www.tsp-data-portal.org/TOP-20-Capacity#tspQvChart/> (дата обращения 18.01.2016).
3. Countries with highest electricity generation [Электронный ресурс]// The shift project data portal: [сайт]. [2013]. URL: (дата обращения 18.01.2016).
4. Historical summary of EIA's LCOE projections (2010–2016). Cost of electricity by source [Электронный ресурс]// Wikipedia, the free encyclopedia: [сайт]. [9 January 2017]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source/ (дата обращения 18.01.2016).
5. Randall T. Solar and Wind Just Passed Another Big Turning Point. Table: Capacity factor take a sharp turn [Электронный ресурс]// Bloomberg: [сайт]. [6 октября 2015]. URL: <http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-10-06/solar-wind-reach-a-big-renewables-turning-point-bnef/> (дата обращения 18.01.2016).
6. Randall T. Solar and Wind Just Passed Another Big Turning Point. Figure: The virtuous cycle has begun [Электронный ресурс]// Bloomberg: [сайт]. [6 октября 2015]. URL: <http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-10-06/solar-wind-reach-a-big-renewables-turning-point-bnef/> (дата обращения 18.01.2016).
7. Historical Electricity Installed Capacity Statistics [Электронный ресурс]// The shift project data portal: [сайт]. [2013]. URL: <http://www.tsp-data-portal.org/Historical-Electricity-Capacity-Statistics#tspQvChart/> (дата обращения 18.01.2016).
8. International Energy Outlook 2016 DOE/EIA-0484(2016)// U.S. Energy Information Administration (EIA) / Ed. by Conti J., Holtberg P., Diefenderfer J., LaRose A., James T. Turnure, Westfall L. Washington, DC 20585, [May 2016]. 290p.
9. Share of wind and solar in electricity production [Электронный ресурс]// Enerdata. Global Energy Statistical Yearbook: [сайт]. [2016]. URL: <https://yearbook.enerdata.net/wind-solar-share-electricity-production.html/> (дата обращения 18.01.2016).
10. Hirtenstein A. Record Green Power Installations Beat Fossil Fuel for First Time [Электронный ресурс]// Bloomberg: [сайт].

[25 октября 2016]. URL:
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-10-25/record-green-power-installations-beat-fossil-fuel-for-first-time/> (дата обращения 18.01.2016).

11. Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States DOE/GO-102015-4557// U.S. Department of energy, [April 2015] P. Xxxviii / URL:
https://www.energy.gov/sites/prod/files/WindVision_Report_final.pdf
12. WWEA Half-year Report 2016// World Wind Energy Association [2016] / URL:
www.wwindea.org/download/market_reports/Half-year_Report_WWEA_2016.pdf
13. Nowak S. TRENDS 2016 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS Report IEA PVPS T1-30// Report prepared by INTERNATIONAL ENERGY AGENCY [2016] P.8, 72 pp. / URL:
<http://iea-pvps.org/index.php?id=32>
14. Randal T. World Energy Hits a Turning Point: Solar That's Cheaper Than Wind [Электронный ресурс]// Bloomberg: [сайт]. [15 декабря 2016]. URL:
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-12-15/world-energy-hits-a-turning-point-solar-that-s-cheaper-than-wind>
15. Jean J., Borrelli D. C., Wu T. Mapping the Economics of U.S. Coal Power and the Rise of Renewables// An MIT Energy Initiative Working Paper [March 2016], Massachusetts, Cambridge. 32 PP. // URL:
<http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2016/03/MITEI-WP-2016-01.pdf>
16. International Energy Outlook 2016 DOE/EIA-0484(2016)// U.S. Energy Information Administration (EIA) / Ed. by Conti J., Holtberg P., Diefenderfer J., LaRose A., James T. Turnure, Westfall L. Washington DC, [May 2016]. P. 86 /URL:
[http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
17. World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements [Электронный ресурс]// World Nuclear Association: [сайт]. [January 2017]. URL:
<http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx/> (дата обращения 18.01.2016).
18. Countries with highest electricity generation [Электронный ресурс]// The shift project data portal: [сайт]. [2013]. URL:
<http://www.tsp-data-portal.org/TOP-20-Capacity#tspQvChart/> (дата обращения 18.01.2016).

19. Nuclear Power in the World Today [Электронный ресурс]// World Nuclear Association: [сайт]. [January 2017]. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx/> (дата обращения 18.01.2016).
20. Today in Energy. Monthly generator capacity factor data now available by fuel and technology [Электронный ресурс]// U.S. Energy Information Administration: [сайт]. [January 15, 2014] URL: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=14611#/> (дата обращения 18.01.2016).
21. Nuclear power reactors in the world. 2016 Edition., IAEA, Vienna, 2016.- 86p.
22. Gilbert A., Sovacool B., Johnstone P., Stirling A. Cost overruns and financial risk in the construction of nuclear power reactors: A critical appraisal [Электронный ресурс]// ResearchGate [сайт]. [April 2016]. URL: https://www.researchgate.net/publication/301305437_Cost_overruns_and_financial_risk_in_the_construction_of_nuclear_power_reactors_A_critical_appraisal/ (дата обращения 23.01.2016).
23. The World Nuclear Industry Status Report 2015 (HTML) [Электронный ресурс]// World Nuclear Industry Status Report [сайт]. [28 July 2015]. URL: <https://www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2015-HTML.html#ftnt31/> (дата обращения 23.01.2016).
24. Голуб П. Лондон разрешил Китаю построить в Англии очень дорогую АЭС [Электронный ресурс]// BFM [сайт]. [15 сентября 2016]. URL: <https://www.bfm.ru/news/333691/> (дата обращения 18.01.2016).
25. Степанов (Дзагуто) В. «К 2020 году господдержка строительства АЭС исчезнет совсем» [Электронный ресурс]// Коммерсантъ [сайт]. [26.12.2016]. URL: <http://www.kommersant.ru/doc/3181691/> (дата обращения 23.01.2016).
26. Корея построит в Саудовской Аравии два ядерных реактора на \$2 млрд. [Электронный ресурс]// Газета.ru [сайт]. [04.03.2015]. URL: https://www.gazeta.ru/business/news/2015/03/04/n_6979589.shtml/ (дата обращения 23.01.2016).
27. «Росатом» вложит 83 млрд рублей в строительство ветроэлектростанций. [Электронный ресурс]// Forbes [сайт]. [03.06.2016]. URL: <http://www.forbes.ru/news/321881-rosatom-vlozhit-v-stroitelstvo-vetroelektrostantsii-83-mlrd-rublei/> (дата обращения 23.01.2016).

28. Ansar A., Flyvbjerg B., Budzier A., Lunn D. Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development, *Energy Policy*, Volume 69, June 2014, pp. 43-56
29. В Чили не будет реализован крупнейший в стране проект строительства дамб из-за угрозы экологических проблем [Электронный ресурс]// Новые ведомости [сайт]. [11.06.2014]. URL: <http://nvdaily.ru/info/27575.html/> (дата обращения 23.01.2016).
30. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ РОССИИ НА ПЕРИОД ДО 2030 ГОДА [Электронный ресурс]// Министерство энергетики Российской Федерации [сайт]. [2008] URL: <http://minenergo.gov.ru/node/1026/> (дата обращения 23.01.2016).
31. Kuross E. The Future of Hydropower [Электронный ресурс]// Fair observer [сайт]. [MAY 26, 2015] URL: <http://www.fairobserver.com/more/environment/the-future-of-hydropower-00594/> (дата обращения 23.01.2016).
32. Общая мировая мощность фотоэлектрических установок достигнет в 2016 году 310 ГВт [Электронный ресурс]// Энергетика. ТЭС и АЭС [сайт]. [06.03.2016] URL: <http://tesiaes.ru/?p=15497/> (дата обращения 23.01.2016).
33. LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS—VERSION 9.0. LAZARD, 2015, 20 p.
34. BP Energy Outlook 2016 edition. BP, 2016, 98 p.
35. TRENDS 2016 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS, IEA / Ed. by Nowak S., 2016, 72p.
36. Jean J., Borrelli D.C., Wu T., Mapping the Economics of U.S. Coal Power and the Rise of Renewables, MIT Energy Initiative, Cambridge, USA, March 2016, 32 p.
37. Clark P. Green energy overtakes coal as biggest source of power capacity, *Financial times*, [26 October 2016]
38. Handbook of Generation IV Nuclear Reactors 1st Edition/ Ed. by Pioro I., Woodhead Publishing, 2016, 940p.