

ISSN 2222-517X

Ежемесячное обозрение

Апрель, 2013 (№21)

# НАУКА ЗА РУБЕЖОМ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ НАУКИ РАН

**НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ  
В ГИДРОЭНЕРГЕТИКЕ**

[www.issras.ru/global\\_science\\_review](http://www.issras.ru/global_science_review)

**Наука за рубежом**

№ 21, апрель 2013

Ежемесячное обозрение

Электронное издание:

[www.issras.ru/global\\_science\\_review](http://www.issras.ru/global_science_review)

Рубрика **«Энергетика и транспорт»**

Обзор выполнил **Н. А. Трофимов**

Выпускающее подразделение: **Сектор анализа зарубежной науки**

Руководитель проекта **Л. К. Пипия**

Редактор **О. Е. Осипова**

Верстка: **Н. В. Шашкова**

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение .....	4
1. Перспективы развития гидроэнергетики до 2050 г. ....	7
2. Экономические аспекты развития отрасли .....	9
3. Направления совершенствования существующих технологий .....	11
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	14
Рис. 1. Общее производство электроэнергии в мире по источникам энергии .....	14
Рис. 2. Гидроэнергетический потенциал по крупнейшим регионам мира: 2009 .....	15
Рис. 3. Среднесрочный прогноз развития гидроэнергетической мощности .....	16
Рис. 4. Оценка эмиссий парниковых газов за период жизненного цикла электростанции .....	16
Рис. 5. Крупнейшие строящиеся дамбы .....	17
Рис. 6. Схематическая иллюстрация турбин Пелтона, Френсиса и Каплана .....	17
Рис. 7. Улучшение гидравлической эффективности турбин .....	18
Табл. 1. Топ-10 производителей гидроэлектроэнергии: 2010 .....	18
Табл. 2. Страны, производящие более половины гидроэлектроэнергии в общем объеме производства электроэнергии: 2010 .....	19

*В условиях усиливающейся глобальной конкуренции за водные ресурсы, включая ресурсы питьевой воды и воды, расходуемой промышленными предприятиями, теплоцентралями и энергоблоками, а также акватории, используемые для навигации, рыболовства и других целей, гидроэнергетика зарекомендовала себя как отрасль энергетики, наиболее эффективно обеспечивающая оптимальное и рациональное природопользование. Темпы развития технологий гидроэнергетики недостаточно высоки вследствие поступательного характера инноваций, которые прежде всего должны минимизировать вредное воздействие на экосистемы. В то же время масштабность данной отрасли определяет необходимость участия государства в инвестициях в новые гидроэнергетические проекты, в финансировании исследований и управлении действующими и возводимыми мощностями. Ввиду очень значительного объема капиталовложений в реализацию крупных проектов их окупаемость возможна спустя десятилетия. Важное значение имеют тщательное планирование и контроль эффективного и безопасного использования гидроэнергии.*

## **Введение**

В 2012 г. Международное энергетическое агентство ОЭСР (IEA) опубликовало прогноз (технологическую дорожную карту) развития гидроэнергетики<sup>1</sup> на период до 2050 г. [1]. В прогнозе рассматриваются основные пути роста использования глобального гидроэнергетического потенциала с учетом того, что большая часть технологий гидроэнергетики уже достаточно зрелая и задача их дальнейшего совершенствования – сокращение отрицательного воздействия на окружающую среду при условии сохранения высоких показателей эффективности и соответствующего уровня затрат. Экспертами ОЭСР рассмотрены вопросы текущего состояния гидроэнергетики, перспективы развития отрасли, в том числе касающиеся использования гидроэнергии в качестве катализатора для развития других видов возобновляемой энергии, а также задачи устойчивого развития и охраны окружающей среды, экономические аспекты и новые технологии, необходимые для развития гидроэнергетики.

<sup>1</sup> В публикации не рассматривается развитие производных технологий, включая приливную и волновую гидроэнергетику.

Механическая энергия падающего потока воды использовалась человечеством на протяжении тысячелетий в различных регионах планеты, однако бурному развитию гидроэнергетики как одного из основных источников электроэнергии на заре XX в. положили начало изобретения великого сербского физика Николы Теслы<sup>2</sup>, сделанные в конце XIX в. Во многом росту гидроэнергетики способствовали географические условия, поскольку крупные потребители электроэнергии, например города и промышленные предприятия, как правило, расположены около крупных рек. Уже к 20-му году прошлого столетия гидроэнергетика обеспечивала в США порядка 40% общего производства электроэнергии.

На сегодняшний день гидроэнергия не только является одним из самых экологически чистых источников электроэнергии, но и косвенно благоприятствует развитию других видов возобновляемой энергетики, прежде всего ветряной и солнечной. В случае поступательного устойчивого роста гидроэнергетики, по оптимистичному сценарию, к 2050 г. объемы ежегодных выбросов углерода в атмосферу могут быть сокращены на 1 млрд т.

По мнению практически всех экспертов, в настоящее время гидроэнергия – один из самых надежных, безопасных и экономически выгодных источников электроэнергии в мире. Доля гидроэнергетики в глобальном производстве электроэнергии составляет 16,3%<sup>3</sup>, что существенно больше, чем доля атомной энергетики<sup>4</sup> (12,8%), а также ветряной, геотермальной и солнечной вместе взятых (3,6%), но значительно меньше доли электростанций на ископаемых видах топлива (67,2%) (рис. 1). В странах ОЭСР гидроэнергетика обеспечивает около 13% совокупного производства электроэнергии, в то время как в остальных странах мира этот показатель находится на отметке 19,8%.

<sup>2</sup> Н. Тесле принадлежит изобретение основных узлов электрических генераторов для первой в мире крупной гидроэлектростанции на Ниагарском водопаде, введенной в эксплуатацию 26 августа 1885 г. Изобретение электрогенератора стало возможным благодаря предшествующему успешному сотрудничеству Н. Теслы с компанией «Вестингауз», для которой сербский ученый изобрел в 1881 г. трехфазную систему переменного тока для передачи электроэнергии на расстояние, что помогло компании выиграть тендер на возведение ГЭС.

<sup>3</sup> Порядка 3500 ТВт·ч – в 2010 г.

<sup>4</sup> Данные показатели не соответствуют напрямую статистическим данным, поскольку измерение при первичном производстве электроэнергии отличается в атомной энергетике и гидроэнергетике.

Мировыми лидерами в области гидроэнергетики являются Китай, Бразилия, Канада и США, которые в целом производят почти половину гидроэлектроэнергии (табл. 1). К числу лидеров по показателю доли гидроэлектроэнергии в общем производстве электроэнергии относятся Парагвай, Норвегия, Бразилия, Венесуэла, Австрия, Канада, Новая Зеландия (табл. 2).

Современные гидроэлектростанции (ГЭС) достигли значительной диверсификации по размерам и мощности, высоте плотины, типам генераторов и турбин, целевой функциональности<sup>5</sup> и другим параметрам, и кроме того, они максимально приспособлены к локальным географическим условиям. Исходя из этого, в публикации ОЭСР для наглядности анализа ГЭС подразделяются на три типа: а) русловые, б) резервуарные и в) гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС). Русловые ГЭС используют преимущественно природные потоки воды, включая речные потоки и водопады, резервуарные – природные или искусственные водохранилища, а ГАЭС позволяют минимизировать пиковые нагрузки в энергосети.

Принцип действия ГАЭС основан на использовании двух резервуаров – верхнего и нижнего, соединенных каналом, через который гидротурбины закачивают воду наверх ночью, забирая из сети избыток энергии, и спускают ее обратно в часы пиковых нагрузок. Совокупная эффективность такого кругооборота составляет 70–85%. В современных условиях ГАЭС обеспечивают до 99% запаса электроэнергии в сети. При этом хотя бы один из резервуаров, как правило, частично пополняется природной водой, а в качестве резервуара не обязательно используются озера или природные водохранилища, это может быть, например, заброшенная шахта или подземная пещера.

Большая часть ГАЭС – это система с открытым контуром: как правило, они создаются путем добавления к существующей русловой ГЭС нижнего или верхнего внеусловного водохранилища. По данным ОЭСР, совокупная мощность ГАЭС составила по итогам 2011 г. около 140 ГВт; для сравнения: в 2005 г. – 98 ГВт. Лидирующими по уровню развития ГАЭС странами являются страны ЕС (45 ГВт), Япония (30 ГВт), Китай (24 ГВт) и США (20 ГВт).

---

<sup>5</sup> Например, электрогенерирующие, гидроаккумулирующие, многоцелевые ГЭС.

## **1. Перспективы развития гидроэнергетики до 2050 г.**

По оценкам экспертов, потенциал гидроэнергетики составляет около 15 000 ТВт·ч/год, что теоретически соответствует 35% потенциала ежегодных глобальных потокообразующих осадков. Для реализации данного потенциала потребуется глобальная гидроэнергетическая мощность порядка 3750 ГВт при условии 4000 ч полной нагрузки.

Среди крупнейших регионов мира наибольшим потенциалом неиспользованных гидроресурсов располагает Африка (92%). За ней следуют Азия (80%), Австралия и Океания (80%), Латинская Америка (74%), Северная Америка (61%) и Европа (47%) (рис. 2). Введенные в эксплуатацию гидроэнергетические мощности к концу 2011 г. достигли 1067 ГВт. Ожидается, что к 2017 г. общая мощность составит около 1300 ГВт (рис. 3).

Анализируя ситуацию в России, эксперты ОЭСР отмечают, что из 47 ГВт находящихся в стране в эксплуатации мощностей около 10 ГВт получены станциями, возраст которых превысил 40 лет – критическую для гидроэлектростанций отметку. Приблизительно 7 ГВт планируется ввести в среднесрочной перспективе (ведется строительство объектов) и еще 12 ГВт запланированы на долгосрочную перспективу. По имеющимся оценкам, доля гидроэнергетики в совокупном производстве электроэнергии в России останется на неизменном уровне – около 20%.

Потенциал ГАЭС пока что мало изучен, однако он тоже достаточно высок. Кроме того, ГАЭС могут быть возведены в дополнение к существующим резервуарным и каскадным ГЭС, а также в ходе модернизации крупных дамб. Большая часть из строящихся в настоящее время ГАЭС располагаются в странах Европы и в Китае.

В ряде стран, включая Германию, Испанию и Португалию, развитие ГАЭС происходит одновременно с распространением ветряной энергетики. Например, Португалии необходимы дополнительные гидроаккумулирующие мощности, поскольку сезоны ветров влияют на вариацию производства электроэнергии в сети. Ветряная энергия обеспечивает около 17% электричества в стране, однако были отмечены случаи, когда в отдельные дни

этот показатель превышал 70%<sup>6</sup>. В настоящее время в Португалии работают ГАЭС общей мощностью 1245 МВт, но уже к 2020 г. планируется в четыре раза увеличить этот потенциал.

Доля ГАЭС в общем потенциале электроэнергетики в значительной степени зависит от характеристик энергосистемы: в странах с большим удельным весом гидроэнергетики эта доля сравнительно невелика, и наоборот, в менее гибких энергетических системах спрос на ГАЭС существенно выше. Электростанции такого типа в США составляют около 2% от суммарной установленной электрической мощности, в Китае – 3%, в Европе – 5% и в Японии – 11%. Со временем эти показатели будут расти.

В перспективе до 2050 г. планируется оснастить большую часть ГЭС гидротурбинами, позволяющими сберегать до 95% рыб. Во многом это стало возможным благодаря появлению технологии MGR<sup>7</sup>, а также турбин, разработанных в исследовательской лаборатории Alden для малых ГЭС.

Распространению гидроэнергетики в регионах с невысокой антропогенной активностью может способствовать апробированная в Бразилии концепция развития гидроэнергоузлов в виде «офшорных платформ». При этом воздействие ГЭС на окружающую среду ограничивается преимущественно размерами самой станции, поскольку нет необходимости строить прилегающую к электростанции инфраструктуру: ее обслуживание минимизируется за счет использования автоматизированных систем управления, а необходимый обслуживающий персонал работает в сменном режиме.

Таким образом, в обозримом будущем современные технологии гидроэнергетики смогут демонстрировать практически непревзойденные показатели бережного отношения к окружающей среде в сравнении с другими отраслями энергетики (рис. 4). Например, эмиссии парниковых газов (в расчете на кВт·ч за период жизненного цикла ГЭС), складывающиеся из выбросов углерода в ходе возведения, эксплуатации, обслуживания и вывода из эксплуатации станции, на один-два порядка ниже таких эмиссий

<sup>6</sup> Например, 13 ноября 2011 г.

<sup>7</sup> От англ. Minimum gap runner.



электростанций на ископаемых видах топлива<sup>8</sup>. Воздействие ГАЭС на природные экосистемы, по всей видимости, еще ниже, поскольку такого рода проекты не требуют значительных ландшафтных преобразований, а их резервуары, как правило, рассчитаны на несколько дней работы в периоды пиковых нагрузок.

Большая часть возводимых для гидроэлектроэнергетических объектов дамб в перспективе будет рассчитана на многофункциональное использование<sup>9</sup> (рис. 5). Это связано с тем, что зачастую многофункциональность является единственно приемлемым решением, позволяющим сократить воздействие на окружающую среду и обеспечить наиболее рациональное использование земель и ландшафтов.

## **2. Экономические аспекты развития отрасли**

Как и большинство отраслей энергетики, основанных на возобновляемых источниках энергии, гидроэнергетика отличается значительной капиталоемкостью, но при этом очень невысокими затратами на эксплуатацию. Проекты строительства ГЭС имеют большую временную протяженность и нуждаются в крупных начальных инвестициях. Быстрота окупаемости вложенных средств связана во многом с ежегодной вариацией стокообразующих осадков. Затраты на возведение, как правило, составляют до 80% всех затрат в ходе жизненного цикла ГЭС. Срок эксплуатации электромеханического оборудования – 30–40 лет, а зданий и сооружений – 80 лет и более.

Указанные факторы, а также основанная на рыночных ценах модель сбыта электроэнергии, определяют риски на начальном этапе строительства, которые могут оказаться неприемлемыми для частного инвестора. В большинстве случаев для гидроэнергетики необходима масштабная поддержка со стороны государства.

---

<sup>8</sup> При сопоставлении не учитываются ландшафтные изменения и изменения в землепользовании.

<sup>9</sup> Не только производство электроэнергии, но и, например, создание запаса воды в водохранилищах, использование в системах ирригации и защиты земель от наводнений, а также как гидроаккумулирующие мощности.

Затраты на возведение ГЭС варьируются в пределах 1050–7650 долл. США/кВт для крупных электростанций и 1300–8000 долл. США/кВт для сравнительно небольших проектов. Ремонт и модернизация действующих станций обходится в 500–1000 долл. США/кВт.

Как правило, затраты на эксплуатацию ГЭС составляют от 2 до 5 долл. США/МВт·ч. Однако в ряде случаев были зафиксированы показатели, превышающие 20 долл. США/МВт·ч.

Агентство «Блумберг» оценивает среднюю стоимость электричества<sup>10</sup> примерно в 67 долл. США/МВт·ч для крупных ГЭС. При этом минимум и максимум цены составляют 25 и 180 долл. США/МВт·ч соответственно. Для малых ГЭС средняя стоимость, как правило, неизменна, но зафиксированный максимум составляет 227 долл. США/МВт·ч.

Основную часть доходов ГАЭС получают за счет разницы между пиковыми и демпинговыми ценами на электроэнергию. Для того чтобы проект ГАЭС стал успешным, эти доходы, за вычетом потерь эффективности и тарифов энергосети, должны покрывать расходы на инвестиции, эксплуатацию и обслуживание. В данном секторе гидроэнергетики складывается несколько парадоксальная экономическая ситуация. С одной стороны, большинство стран, прежде всего с небольшим гидроэнергетическим потенциалом, осознают потребность в развитии мощностей для создания запаса электроэнергии, а ГАЭС представляют собой наиболее недорогой и масштабный вариант. С другой стороны, экономические показатели данного сектора гидроэнергетики ухудшились за последние годы. Например, ГАЭС в Германии обеспечили доходы порядка 87 000 евро/МВт в 2008 г., а уже в 2010 г. этот показатель сократился до 35 000 евро/МВт. Отчасти это объясняется долгосрочным характером планирования запасов электроэнергетических мощностей, что идет вразрез с краткосрочными рыночными флуктуациями и предпочтениями.

<sup>10</sup> От англ. Levelised cost of electricity – нормированная стоимость электроэнергии.

### **3. Направления совершенствования существующих технологий**

Сегодня гидроэнергетика является максимально эффективной технологией производства электроэнергии. Однако по-прежнему остаются важнейшие направления развития данной отрасли энергетики<sup>11</sup>, где необходимы дополнительные исследования и разработки с целью повышения надежности, эффективности, экономической рентабельности и безопасности узлов и агрегатов ГЭС.

Разработки, направленные на повышение гидравлической эффективности различного типа турбин (рис. 6) ведутся на протяжении многих десятилетий. Современные турбины обеспечивают эффективность порядка 90–95% (рис. 7). Технологией, сопутствующей разработке усовершенствованных турбин, в последние десятилетия является вычислительная гидродинамика<sup>12</sup>. Основной акцент при разработке турбин делается на экологических аспектах их функционирования, в том числе на сохранении рыбных ресурсов, использовании малых потоков, минимизации воздействия на прибрежную среду обитания, поддержке стандартов допустимого качества воды, включая насыщенность кислородом.

Крайне важной остается разработка новых и совершенствование традиционных материалов с улучшенными свойствами. Прежде всего это касается нержавеющей стали, покрытий, устойчивых к абразивному влиянию русловых осадений, коррозионному воздействию воды и содержащихся в ней примесей, а также различного рода недорогих материалов для строительства, включая пластики и оптоволоконные материалы.

Гидрокинетические турбины разрабатываются для преобразования энергии свободных (природных) потоков воды, в отличие от традиционных турбин, рассчитанных на искусственно направляемые потоки воды при помощи дамб и других гидравлических систем. Дополнительный импульс эти исследования получили благодаря достижениям волновой и приливной энергетики.

<sup>11</sup> Например, усовершенствование гидротурбин и разработка турбин кинетического потока для каналов, трубопроводов и речных русел.

<sup>12</sup> От англ. Computational fluid dynamics.

ГЭС, проработавшей 30–40 лет, как правило, требуется замена или модернизация части электромеханического оборудования. Развитие современных технологий в этом направлении позволяет существенно повысить эффективность ГЭС, прежде всего за счет увеличения эффективности турбин. Как правило, одновременно происходит повышение выходной мощности.

Зачастую модернизация существующей ГЭС более оправдана с экономической точки зрения, чем возведение новой, более современной электростанции. В связи с этим важны исследования и разработки, изучающие оптимальные пути замены приводов турбин, генераторных установок, систем возбуждения электрогенераторов, управляющих и контролирующих узлов.

Эти же технологии могут быть применены для совершенствования и расширения функциональности значительного количества дамб, изначально не предназначенных для производства электроэнергии. Большинство из построенных в мире 45 тыс. крупных дамб используется для контроля за наводнениями, ирригации и сельскохозяйственных нужд, водохранилищ, навигации и рекреационных услуг. Только 25% из них изначально рассчитаны в том числе на потребности гидроэнергетики и лишь менее 13% – построены специально для ГЭС.

Гидротурбины, как правило, создаются с учетом определенных параметров: скорости, высоты плотины<sup>13</sup> и расхода воды через турбину<sup>14</sup>. Разработка турбин-насосов с переменной скоростью очень важна для повышения экономических показателей ГАЭС. В настоящее время разрабатываются различные типы турбин-насосов, в том числе турбины тернарного типа<sup>15</sup>, работающие в одном вращательном направлении и оснащенные единым мотором-генератором.

Продолжаются активные разработки ГАЭС, базирующихся на море. Первая станция такого типа была создана в Японии на острове Окинава в 1999 г. В качестве нижнего резервуара используется море, в качестве

<sup>13</sup> От англ. Head.

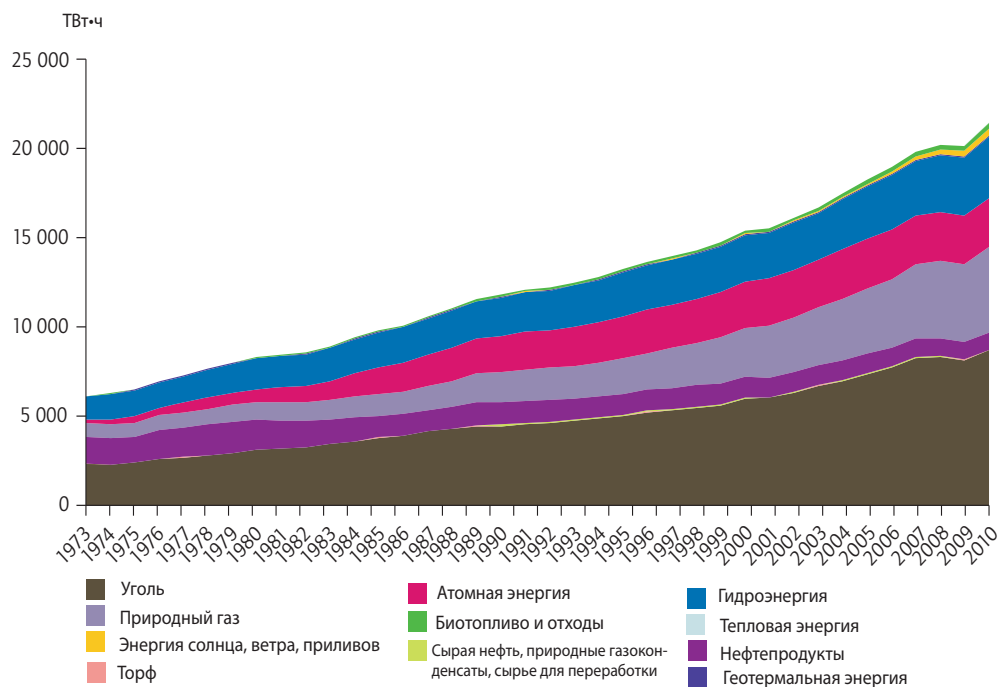
<sup>14</sup> От англ. Turbine discharge – объем воды, протекающий через турбину в единицу времени.

<sup>15</sup> От англ. Ternary pump turbine.

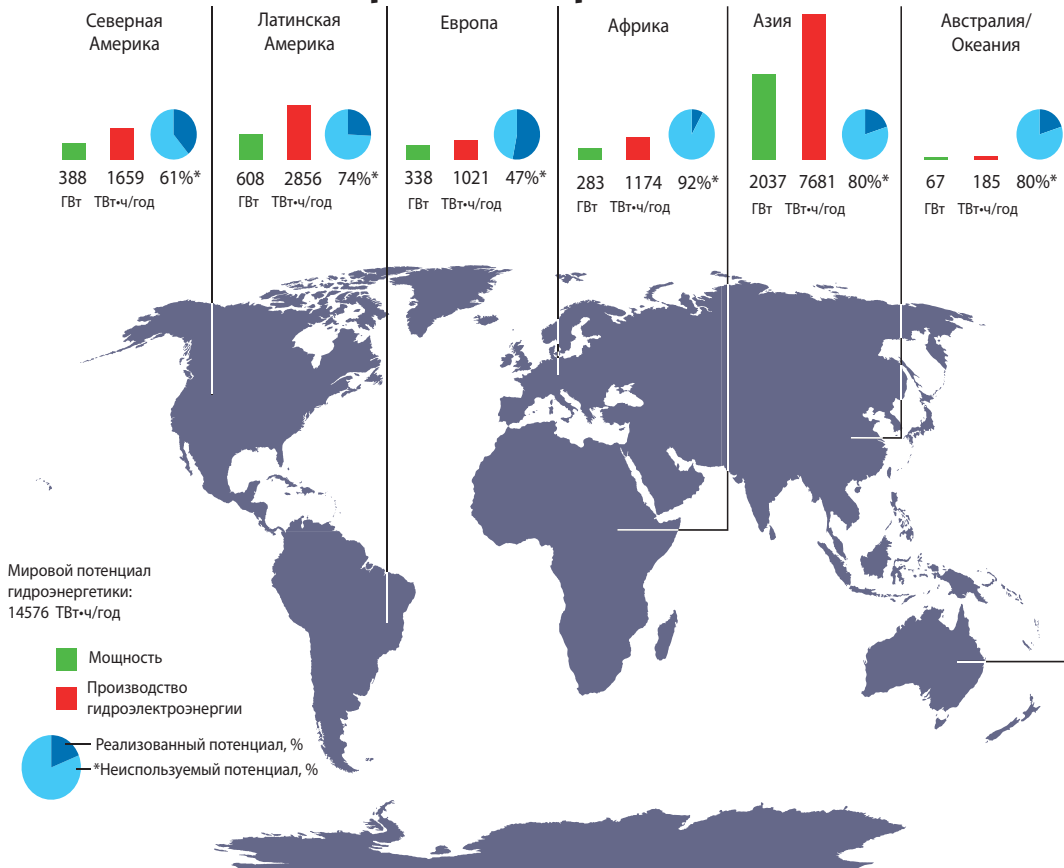
верхнего – искусственное водохранилище на вершине скал. Разработка турбин для морской воды не является большой проблемой. Например, электростанция Ля Ранс во Франции работает на энергии приливов уже более 50 лет. Сейчас изучаются возможности строительства нескольких станций мощностью свыше 1 ГВт в Нормандии и Бретани – регионах с достаточным для этого потенциалом переменных ветров.

## Приложение

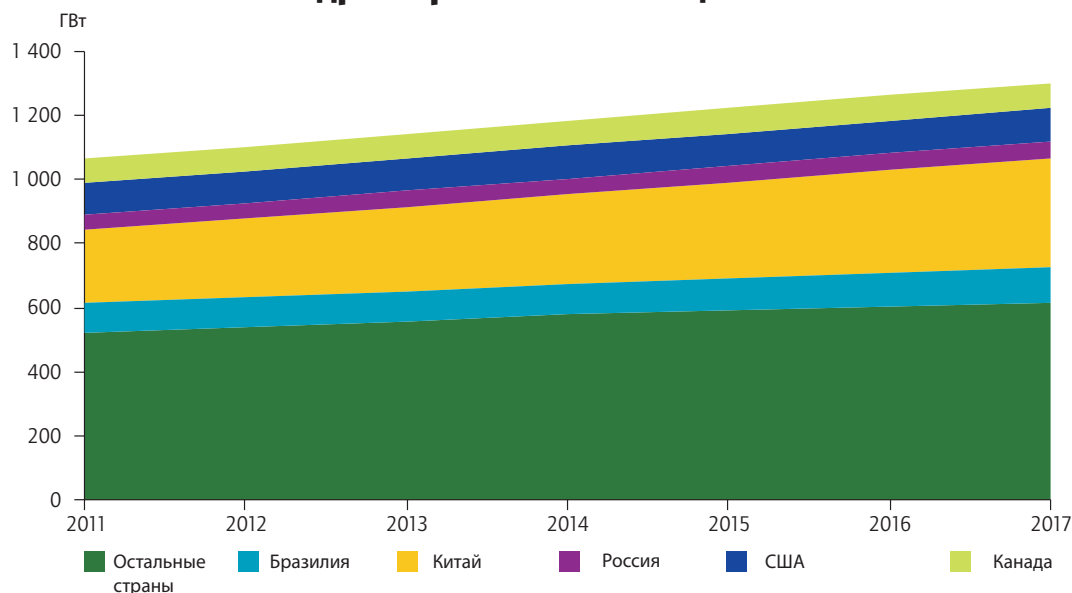
Рисунок 1. **Общее производство электроэнергии в мире по источникам энергии**



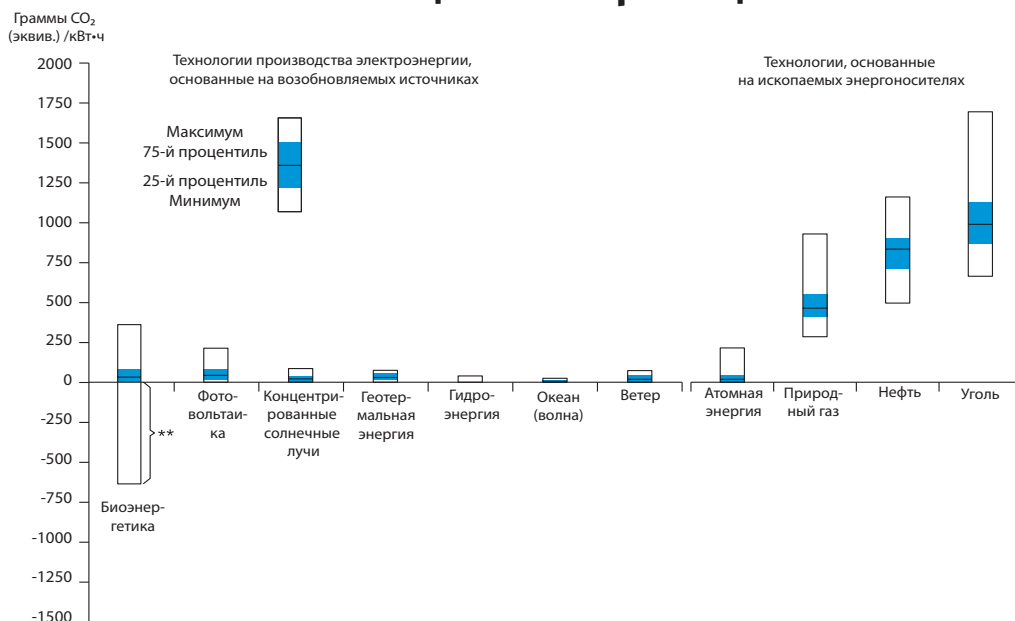
**Рисунок 2. Гидроэнергетический потенциал по крупнейшим регионам мира: 2009**



**Рисунок 3. Среднесрочный прогноз развития гидроэнергетической мощности**



**Рисунок 4. Оценка эмиссий парниковых газов за период жизненного цикла электростанции\***

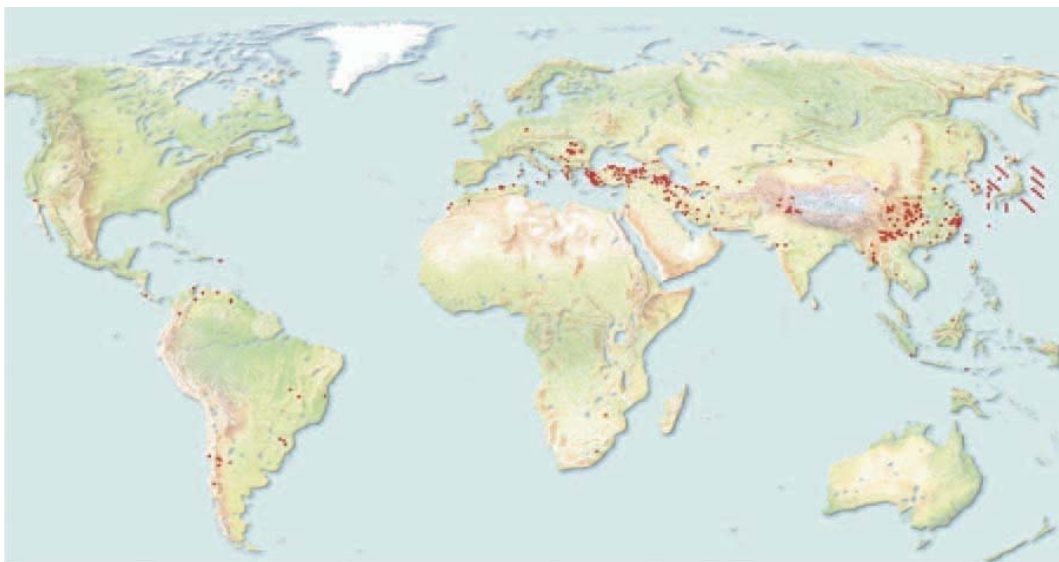


\*За исключением ландшафтных изменений и изменений в землепользовании.

\*\* Эмиссии, которых удается избежать.



Рисунок 5. **Крупнейшие строящиеся дамбы\***



\* Из них 60% – многофункциональные.

Рисунок 6. **Схематическая иллюстрация турбин Пелтона, Френсиса и Каплана**

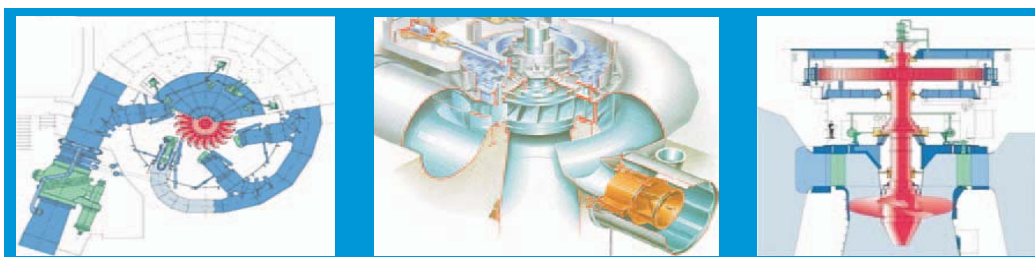


Рисунок 7. **Улучшение гидравлической эффективности турбин**  
(пиковая эффективность, проценты)

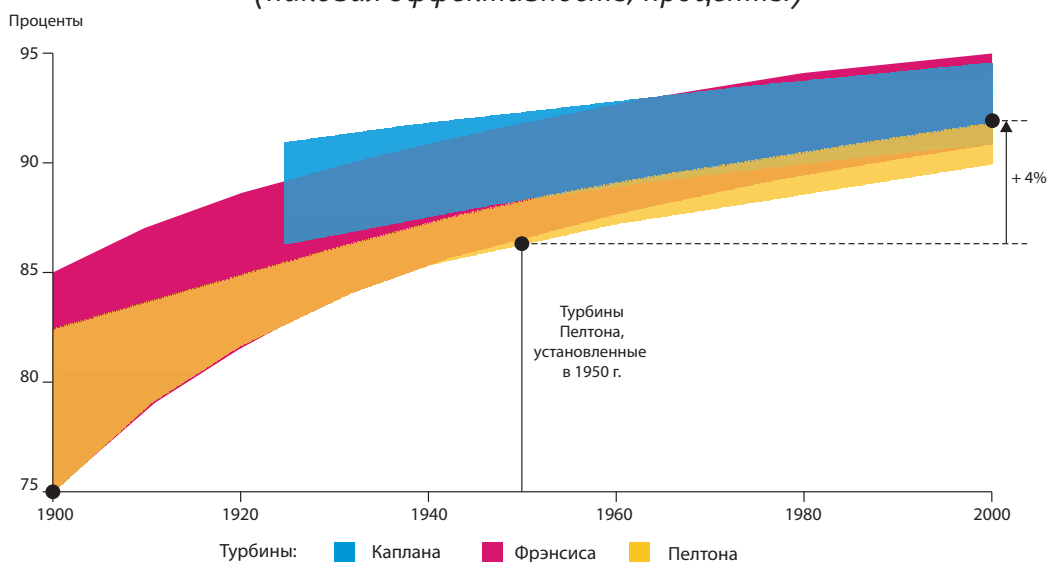


Таблица 1. **Топ-10 производителей гидроэлектроэнергии: 2010**

Страна	Гидроэлектроэнергия, ТВт·ч	Доля в производстве электроэнергии, %
Китай	694	14,8
Бразилия	403	80,2
Канада	376	62,0
США	328	7,6
Россия	165	15,7
Индия	132	13,1
Норвегия	122	95,3
Япония	85	7,8
Венесуэла	84	68
Швеция	67	42,2

**Таблица 2. Страны, производящие более половины гидроэлектроэнергии в общем объеме производства электроэнергии\*: 2009**

Доля гидроэнергетики	Страны	Производство гидроэлектроэнергии, ТВт·ч
≈ 100%	Парагвай	54
> 90%	Норвегия	126
> 80%	Бразилия	403
> 70%	Венесуэла	77
> 60%	Австрия, Канада	38; 351
> 50%	Новая Зеландия, Швейцария	25; 36

\* Представлены страны, производящие гидроэлектроэнергию объемом более 20 ТВт·ч.

Обзор выполнен на основе следующих публикаций:

1. OECD/IEA (2012), Hydropower. Technology Roadmap. IEA Publications, 2012.  
[www.iea.org](http://www.iea.org)

## **Тематические рубрики ежемесячного обзора**

Аэронавтика и космос

Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство,  
пищевая и химическая промышленность

Информационные и телекоммуникационные технологии  
и вычислительная техника

Исследования в области ядерной и квантовой физики

Медицинские технологии и оборудование

Нанотехнологии и новые материалы, микроэлектроника

Социальные и экономические науки и статистика

***Энергетика и транспорт***