

# Создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения

Андреев В.М., Баринов В.А., Варфоломеев С.Д., Годжаев З.А., Гришин В.И., Есяков С.Я., Лачуга Ю.Ф., Лунин К.А., Матюхин В.Ф., Панченко В.Я., Редько И.Я., Рокецкий Л.Ю., Сигов А.С., Стенников В.А., Шестаков А.Л., Цивадзе А.Ю.\*

## АННОТАЦИЯ:

*Рассмотрена краткая характеристика Государственного плана электрификации России (ГОЭЛРО), разработанного по инициативе В.И. Ленина Комиссией ГОЭЛРО во главе с Г.М. Кржижановским и принятого 22 декабря 1920 года VIII Всероссийским Съездом Советов, а также ключевые направления перспективного плана научных исследований по проблеме создания Единой энергосистемы страны (ЕЭС), разработанного Комиссией под руководством Г.М. Кржижановского в 1957 году, которые заложили основу образования ЕЭС — самого крупного в мире на конец 80-х годов централизованно управляемого энергообъединения. Приведены показатели развития и эффективности работы электроэнергетики страны.*

*Рассмотрена сущностная часть проведённых в начале XXI века реформ в электроэнергетике России, их недостатки, которые привели к снижению эффективности функционирования отрасли и появлению различного рода «узких мест» и диспропорций.*

*Рассмотрены идущие в мире процессы трансформации энергетических систем, в результате которых создаётся новая архитектура энергетических систем.*

*Сформулированы первоочередные задачи, стоящие перед российской электроэнергетикой в этих условиях.*

В 2020 году исполняется 100 лет Государственному плану электрификации России (плану ГОЭЛРО). Развивая идеи плана ГОЭЛРО, электроэнергетика страны прошла в своём развитии громадный путь от предусмотренного планом ГОЭЛРО сооружения первых крупных электростанций и объединяющих их в энергосистемы электрических сетей до образования Единой энергосистемы страны (ЕЭС) — самого крупного в мире централизованно управляемого энергообъединения [1].

Перед Первой мировой войной суммарная мощность электростанций России составляла всего 1141 МВт, а годовая выработка электроэнергии — 2039 млн кВт·ч. Самая крупная тепловая электростанция (ТЭС) имела мощность 58 МВт; наибольшая мощность энергоагрегата была 10 МВт. Суммарная мощность гидроэлектростанций (ГЭС)

составляла 16 МВт, самой крупной была ГЭС мощностью 1350 кВт.

На электростанциях, принадлежавших частным компаниям, применялись различные системы электрического тока: постоянный и переменный (однофазный и трёхфазный — в основном частотой 50 и 25 Гц). Электростанции работали изолированно, и случаи параллельной работы были исключительными.

Все электрические сети напряжением выше генераторного имели протяжённость около 100 км. В 1914 г. вступила в строй первая линия электропередачи напряжением 70 кВ от подмосковной электростанции «Электропередача» до Москвы; это было наивысшее напряжение, освоенное до Первой мировой войны.

Энергетическое оборудование и электротехническая аппаратура были в основном импортными или изготавливались на находившихся в России за-

\* Подробную информацию об авторах читайте в конце статьи.

водах иностранных фирм. Самая крупная турбина, выпущенная в России, имела мощность 1250 кВт при давлении пара 1,2 МПа; трансформаторы, масляные выключатели, изоляторы, защитная аппаратура в стране не изготавливались.

Потребление электроэнергии на душу населения составляло в 1913 г. всего 12,8 кВт·ч в год. Электроэнергией пользовалось не более 20% населения.

Первая мировая война, интервенция и Гражданская война привели к тяжёлой хозяйственной разрухе. Производство электроэнергии в 1921 г. сократилось в четыре раза по сравнению с довоенным уровнем, было выработано всего 520 млн кВт·ч. Значительная часть электрических сетей была разрушена.

Коренное изменение положения в электроэнергетике страны началось после Великой Октябрьской революции и связано с разработкой и реализацией Государственного плана электрификации России, разработанного по инициативе В.И. Ленина комиссией ГОЭЛРО во главе с Г.М. Кржижановским и принятого 22 декабря 1920 г. VIII Всероссийским съездом Советов.

План ГОЭЛРО — это первый единый государственный план развития народного хозяйства страны, в котором были определены основные направления хозяйственного строительства: индустриализация страны при опережающем развитии электрификации; рациональное размещение по стране промышленности с концентрацией производства путём создания энергопромышленных комбинатов; широкое распространение электроэнергии в промышленности и сельскохозяйственном производстве; всемерное развитие железнодорожного транспорта на основе электрификации.

План ГОЭЛРО, рассчитанный на 10–15 лет, предусматривал строительство 30 новых районных ТЭС и ГЭС общей мощностью 1750 МВт, сооружение электрических сетей 35 и 110 кВ для передачи электроэнергии к узлам нагрузки, соединение электростанций на параллельную работу, создание региональных энергосистем и их последующую интеграцию в объединённые энергосистемы.

Создание плана ГОЭЛРО базировалось на разработанном Г.М. Кржижановским комплексном методе, предусматривающем органическую связь между развитием всего народного хозяйства и энергетикой [2]. В последующем этот метод был обобщён и развит соратниками Г.М. Кржижановского и их последователями в виде методологии системных исследований [2–6].

Комплексность плана ГОЭЛРО состояла также и в создании научной базы для развития энергети-

ки страны и подготовки кадров. С этой целью в 20-е и 30-е годы были созданы базовые научно-исследовательские и проектные институты, а также учебные институты для подготовки инженерных кадров.

По завершении программы электрификации России в объёме плана ГОЭЛРО продолжалось дальнейшее строительство электростанций и сетей и развитие энергетических систем. Государство в эти и последующие годы особое внимание уделяло опережающему развитию электроэнергетики, о чём свидетельствуют директивы по пятому (1951–1955 гг.) и шестому (1956–1960 гг.) пятилетним планам развития народного хозяйства страны.

Во исполнение этих директив комиссией под руководством Г.М. Кржижановского в 1957 г. был разработан перспективный план научных исследований по проблеме создания ЕЭС СССР. В соответствии с этим перспективным планом создание и развитие ЕЭС должно было характеризоваться переводом всей энергетической техники на качественно новую ступень. К числу основных направлений этой стратегии относились [2]:

- атомные электростанции различных типов и параметров;
- сверхмощные конденсационные электрические станции до 2–3 млн кВт с агрегатами до миллиона киловатт со сверхвысокими параметрами пара; мощные теплоэлектроцентрали с агрегатами 100–200 тыс. кВт; газотурбинные электрические станции, в том числе работающие в комплексе со станциями подземной газификации углей; электростанции с новыми методами комплексного использования топлива на энерготехнологической основе;
- сверхмощные гидроэлектростанции на сибирских реках с новыми типами гидротехнических сооружений, гидромеханического и электрического оборудования;
- дальние электропередачи сверхвысоких напряжений на постоянном и переменном токе с пропускной способностью в 2–3 млн кВт на одну цепь протяжённостью 2–2,5 тыс. км;
- комплексная автоматизация электростанций различных типов, автоматическое управление энергосистемами и ЕЭС с применением ЭВМ, с автоматическими операторами, установленными на электростанциях и подстанциях.

Будущее развитие ЕЭС во многом реализовало направления этого перспективного плана.

К концу 80-х годов на территории страны был создан хорошо организованный и весьма

эффективно работавший электроэнергетический комплекс страны, высокая эффективность которого была достигнута благодаря реализации ряда основополагающих стратегических направлений, к которым относились:

- формирование энергосистем, объединение энергосистем на параллельную работу и создание уникального энергообъединения — Единой энергосистемы страны, которая в конце 80-х годов стала крупнейшим централизованно управляемым энергообъединением в мире;
- создание и ввод большого количества мощных и высокоэффективных агрегатов тепловых, гидравлических и атомных электростанций;
- взаимоувязанное развитие Единой энергосистемы страны и её системы управления как двух частей единого целого и создание на этой основе высокоэффективной иерархической системы планирования развития и управления функционированием Единой энергосистемы, позволяющей решать весь комплекс задач, связанных с её оптимальным развитием и функционированием, с использованием принципа оптимальности на каждом уровне временной и территориальной иерархии при обеспечении требуемого уровня надёжности [4].

Создание мощных территориальных энергообъединений и организация их параллельной работы в составе Единой энергосистемы страны позволили значительно повысить эффективность работы электроэнергетики, характеризуемой следующими индикаторами:

- удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию снизился с 590 г/кВт·ч в 1950 г. до 325,8 г/кВт·ч в 1990 г.;
- удельный расход электроэнергии на собственные нужды электростанций в % от выработки электроэнергии снизился с 6,55% в 1950 г. до 4,43% в 1990 г.;
- потери электроэнергии на её транспорт по электрическим сетям снизились с 8,78% в 1950 г. до 8,65% в 1990 г.;
- удельная численность персонала на 1 МВт установленной мощности снизилась с 11 человек в 1950 г. до 2,85 в 1990 г.

Общий экономический эффект от создания Единой энергосистемы страны к концу 80-х годов в сравнении с изолированной работой энергосистем оценивался снижением капитальных вложе-

ний в электроэнергетику на величину свыше 2 млрд руб. в ценах 1984 г. и уменьшением ежегодных эксплуатационных расходов на величину 1 млрд руб. Выигрыш в снижении суммарной установленной мощности электростанций ЕЭС в сравнении с изолированной работой энергосистем за счёт снижения годового максимума нагрузки и сокращения необходимой резервной мощности оценивался величиной свыше 15 млн кВт. Несмотря на то, что требования в отношении резервов мощности были ниже аналогичных требований в энергообъединениях западных стран, благодаря хорошо организованному управлению и широкому внедрению и использованию противоаварийной автоматики обеспечивалась высокая надёжность работы энергосистем и электроснабжения потребителей. Не было крупных системных аварий с погашением большого числа потребителей, какие имелись в США и в других странах [4].

Установленная мощность электростанций по стране в целом увеличилась с 1916 г. по 1990 г. с 1,19 до 344 млн кВт, а ЕЭС страны с 1970 г. по 1990 г. — со 104,9 до 288,6 млн кВт.

Производство электроэнергии по стране в целом увеличилось с 1916 г. по 1990 г. с 2,575 до 1726 млн кВт·ч, а ЕЭС страны с 1970 г. по 1990 г. — с 529,5 до 1528,7 млн кВт·ч.

В результате проведённых в начале XXI века реформ в электроэнергетике России централизованная иерархическая система оптимального управления электроэнергетическим комплексом страны (которая соответствовала государственному устройству страны и основу которой составляли вертикально интегрированные региональные энергокомпании, отвечающие за надёжное и экономичное энергоснабжение регионов) была заменена рыночной структурой управления с образованием большого числа новых субъектов хозяйствования, что нарушило фундаментальный принцип управления, а именно соответствие системы управления самой технологической системе (в политэкономии — соответствие базиса и надстройки, производительных сил и производственных отношений) [7, 8]. При этом для новой структуры управления отраслю к настоящему времени не созданы эффективные механизмы совместной работы новых собственников и государственного управления, обеспечивающие оптимальное развитие и функционирование электроэнергетического комплекса страны как единого целого в новых условиях. Результатом этого стало снижение эффективности функционирования отрасли, появление различного рода узких мест и диспропорций [9], что характеризуется:

- снижением эффективности использования установленной мощности электростанций;
- снижением эффективности использования топлива на ТЭС;
- увеличением штатного коэффициента;
- ростом уровня потерь электроэнергии в электрических сетях;
- ростом средних тарифов на электроэнергию для потребителей с темпами, превышающими рост уровня инфляции;
- ростом электросетевой составляющей тарифов до 60%, в то время как в передовых странах она составляет 40%;
- наличием существенных диспропорций в установлении цен на электросетевое строительство и строительство электростанций, при которых становится невыгодным сетевое строительство, в том числе развитие межсистемных связей в ЕЭС России;
- сокращением наиболее эффективного производства электроэнергии на ТЭЦ.

К дополнительным «узким местам» и проблемам в современном состоянии электроэнергетики России следует отнести:

- отсутствие целостной системы стратегического планирования развития электроэнергетики страны с учётом долгосрочной перспективы;
- отсутствие целевого видения и проектов долгосрочного развития электроэнергетики России, в том числе развития ВЛ высоко-го и сверхвысокого напряжения постоянного и переменного тока (в создании которых в 80-х годах прошлого столетия СССР был впереди многих зарубежных стран, которые получили значительное развитие за последние годы, в том числе в странах БРИКС — Китае, Бразилии, Индии и ЮАР);
- отсутствие целостной нормативно-правовой базы, которая должна учитывать идущие в стране процессы увеличения разнообразия источников генерации и компонентов энергосистем, включая развитие распределённой генерации на базе ГТУ, дизельных, газопоршневых, ветровых и солнечных электростанций, потребителей-производителей электроэнергии, систем управления спросом, накопителей энергии;
- отсутствие целостной системы планирования и проведения научных исследований;
- отсутствие регулярного финансирования НИОКР и создания инновационных технологий;

- отсутствие освоенных отечественных современных инновационных технологий и оборудования — мощных газовых турбин, паросиловых технологий на твёрдом топливе с суперсверхкритическими параметрами пара, современной силовой электроники, систем накопления энергии и др.;
- при общем значительном избытке генерирующих мощностей недостаточная мощность пиковых и полупиковых генерирующих мощностей.

Вместе с тем, в настоящее время энергетика многих стран мира претерпевает коренные изменения [10–15], в результате которых создаётся новая архитектура энергетических систем.

Основными факторами, способствующими трансформации энергетических систем в мире, являются:

- значительное уменьшение стоимости технологий производства и потребления электроэнергии (включая ветровые и солнечные электростанции, распределённую генерацию, электротранспорт, системы управления спросом и накопления энергии);
- растущая электрификация экономики;
- стремление уменьшить экологические воздействия;
- расширение цифровизации и автоматизации энергетических систем;
- стремление повысить надёжность и эффективность работы энергетических систем;
- расширение доступности энергии с использованием инновационных технологий.

Происходящие технологические изменения сопровождаются созданием институциональной основы, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила надёжного и эффективно-го развития и функционирования энергетических систем в новых условиях и отражённой в нормативных документах.

Расширение использования нетрадиционных возобновляемых источников электрической энергии (НВИЭ) стало возможным благодаря техническому прогрессу в этой области, позволившему, прежде всего, значительно снизить себестоимость производства электроэнергии ветровыми (ВЭС) и солнечными (СЭС) электростанциями различных типов. Стоимость новых СЭС в мире с 2010 г. снизилась на 70%, ВЭС — на 25%.

Если первоначально ВЭС и СЭС сооружались для ограниченных местных потребителей и относились к категории распределённой генерации, то в настоящее время мощность ветропарков и солнеч-

ных фотоэлектрических электростанций достигает сотен и тысяч мегаватт, что переводит их в разряд основных источников централизованного электроснабжения.

По прогнозам Мирового энергетического агентства [13], доля электроэнергии в конечном потреблении энергии может увеличиться к 2040 г. в 2 раза, при этом доля прироста мощности электростанций, использующих возобновляемые источники энергии, может составить более 60% от общего увеличения.

Происходящая в мире трансформация энергетических систем связана с появлением большого числа новых элементов с отличными от существующих характеристиками, что значительно усложняет структуру систем, изменяет их функциональные свойства и обуславливает необходимость изменения существующей политической, рыночной и нормативной базы и её адаптации к новому укладу энергетических систем [11–12].

Для обеспечения согласованной работы различных типов генерирующих источников, систем передачи и распределения энергии, систем управления спросом, накопителей энергии и других систем развиваются технологии интегрального планирования, которые в новых условиях должны включать следующие элементы:

- учёт стохастичности выработки электроэнергии ветровыми и солнечными электростанциями;
- управление со стороны спроса;
- интегральное планирование системы генерации, передачи и распределения электроэнергии;
- планирование и функционирование сетей низкого и среднего напряжения с учётом развития распределённой генерации;
- межотраслевое планирование между электроэнергетикой и другими секторами, в том числе теплоснабжения, охлаждения, транспорта;
- планирование с учётом различных регионов, юрисдикций, балансирующих зон.

Происходит адаптация к новым условиям моделей управления в электроэнергетике. Требуемые адаптации моделей управления различны в каждом конкретном случае. В глобальном масштабе наблюдается определённая степень конвергенции требуемой адаптации между различными моделями [11–12].

В странах, где до сих пор преобладали вертикально интегрированные модели, наблюдается тенденция к внедрению механизмов повышения эффек-

тивности работы энергетических систем. В странах, которые первыми начали либерализацию электроэнергетического рынка, наблюдается тенденция к внедрению дополнительных механизмов обеспечения надёжности электроснабжения. При совершенствовании электроэнергетических рынков центральной задачей является нахождение наилучшего сочетания принципов координации и конкуренции.

Для повышения гибкости энергетических систем с целью компенсации стохастичности выработки электроэнергии ветровыми и солнечными электростанциями развиваются [13]:

- технологии накопления энергии различных типов;
- технологии генерации с высоким быстродействием, в том числе газотурбинные станции;
- технологии управляемого спроса;
- технологии развития межсистемных связей.

Происходящая трансформация энергетических систем приводит к коренному изменению интерфейса между передающей и распределительной электрическими сетями [11].

Электрические сети низкого и среднего напряжения меняются от парадигмы пассивно распределённой электроэнергии для потребителей к интеллектуальным, активно управляемым системам с двунаправленными потоками электроэнергии и информации. Успешный переход требует рассмотрения трёх ключевых аспектов: технологического, экономического и институционального:

- *технологически*: обеспечение надёжной и эффективной работы энергосистемы в изменяющихся условиях приводит к новым приоритетам для энергокомпаний и регулирующих органов. Использование передовых информационных и коммуникационных технологий (цифровизация) позволяет улучшить наблюдаемость и управление энергетическими системами и открывает возможности для существенного расширения управления спросом;
- *экономически*: рост распределённой генерации и повышение экономичности накопителей энергии требуют реформы розничного ценообразования и налогообложения поставок электрической энергии с учётом оплаты поставляемой ими электроэнергии и покрытия части стоимости общей инфраструктуры;
- *институционально*: изменятся функции и обязанности субъектов управления. Приоритетным станет улучшение координации между операторами передающих и распределительных сетей. Кроме того, в управление включаются совершенно новые субъекты, такие как агрегаторы.

Происходящий процесс трансформации энергетических систем в мире сопровождается созданием соответствующей нормативной базы, отражённой, в частности:

- в сетевых кодексах различных стран;
- в материалах рабочих групп CIGRE;
- в материалах ENTSO-E;
- в Директиве ЕС 2016/631 от 14.04.2016 г.;
- в стандартах IEEE серии 1547;
- в законе США «О политике регулирования энергокомпаний общего пользования (PURPA) от 1978 года»;
- в законе США «Об энергетической политике (ЕРАСТ) от 2005 г.».

Трансформация энергетических систем сопровождается интеграцией в комплексные энергетические системы, которая включает:

- интеграцию распределённой генерации в централизованные энергосистемы, интеграцию централизованных и децентрализованных энергосистем [11];
- интеграцию систем электроснабжения, теплоснабжения, топливоснабжения, охлаждения, возобновляемой энергетики, систем водоснабжения, транспорта, управления энергопотреблением [15];
- создание крупных региональных энергообъединений и формирование глобальной энергосистемы мира [16–18].

Трансформация энергетических систем связана с развитием существующих и созданием новых технологий в электроэнергетике, рассмотренных в том числе в [19–20]. Для построения эффективной системы управления трансформируемыми энергетическими системами проводятся широкие исследования и накоплен значительный опыт решения подобных задач, включая разработку «платформы» транзактивных энергетических систем (Transactive Energy Systems — TE systems), которая представляет систему экономических и управляющих механизмов, позволяющую обеспечить динамический баланс спроса и поставок электроэнергии во всей электроэнергетической инфраструктуре, используя стоимость как ключевой операционный параметр. С платформой TE systems связаны другие развивающиеся применительно к энергетическим системам транзакционные платформы Блокчейн, Emergent, Faraday Grid.

В условиях наличия многих субъектов хозяйствования с различными интересами в процессе развития и управления функционированием и развитием энергетических систем создаются методы целостного (холистического) управления в этих

условиях, предусматривающего решение задачи оптимального управления энергетической системой или их совокупностью как единым целым с распределением обязательств и выгод между субъектами хозяйствования (правилами их совместной работы), обеспечивающего достижение оптимального решения для системы в целом.

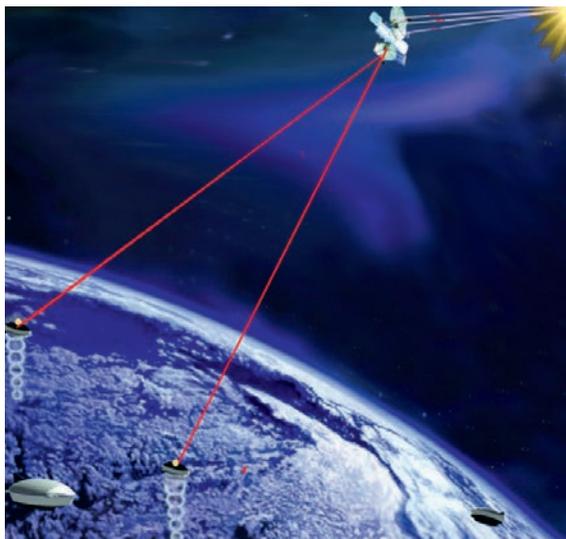
Развиваются инновационные технологии в области распределённой энергетики, в том числе [21, 22]:

- на базе солнечных аэрокосмических энергетических комплексов с СВЧ и лазерными магистральями передачи энергии, которые могут обеспечить энергетическую безопасность и надёжное энергоснабжение на отдалённых и труднодоступных территориях Сибири, Севера и Дальнего Востока, не охваченных централизованным энергоснабжением;
- на базе многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК), которые являются основой автономных систем энергоснабжения и используют всё многообразие местных энергетических ресурсов.
- на базе многофункционального энергобиотехнологического комплекса (биоМЭК), который позволит принципиально новым способом получить энергию и продукты питания на основе фитотронных технологий.

### *Развитие новых энергетических направлений на базе солнечных аэрокосмических электростанций (САКЭ)*

В Российской Федерации, помимо большого энергетического, экономического, экологического эффекта, связанного с возрождением и дальнейшим развитием технологического и индустриального уровня страны, созданием рабочих мест, развитием образовательного и интеллектуального уровня населения, имеет большое оборонное значение. Эффективным путём решения этой проблемы может стать создание аэрокосмических комплексов мощностью 0,1–10,0 ГВт с беспроводной передачей электроэнергии наземным потребителям, что позволит развивать направление критических технологий в Российской Федерации.

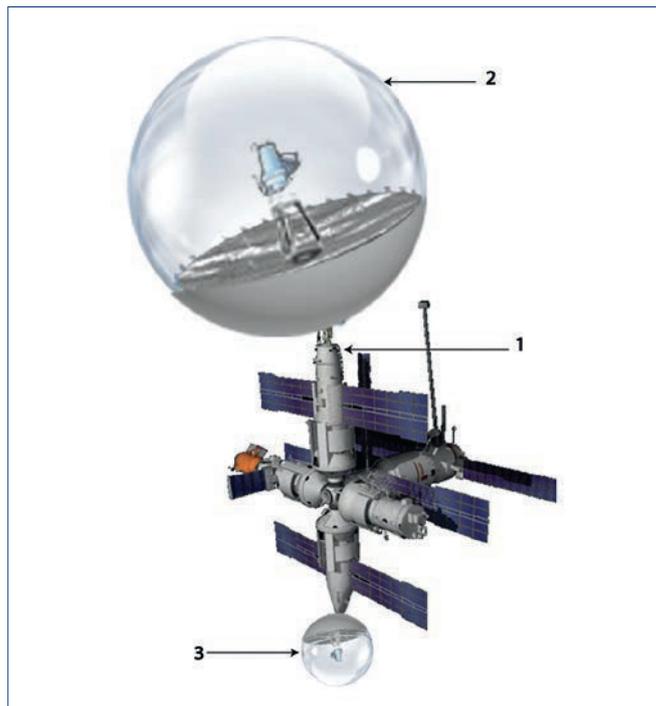
В Российском технологическом университете (РТУ) МИРЭА разработана концепция распределённой солнечной аэрокосмической энергетической системы. В её состав войдёт и комплекс беспроводной доставки электроэнергии потребителям в труднодоступных районах Сибири, Крайнего Севера, Дальнего Востока с населением в 20 миллионов человек, не охваченных централизованным энергоснабжением (рис. 1).



*Рис. 1. Концепция построения аэрокосмического энергетического комплекса*

В составе САКЭ предусматриваются:

- космический сегмент (КС) с системами приёма солнечной энергии, преобразования в лазерное излучение и направленной передачи на одну из стратосферных платформ, предлагается построить космический сегмент по модульному принципу. Каждый из модулей будет аккумулировать от 100 до 300 МВт солнечной энергии (рис. 2);
- стратосферный сегмент (СтС) на платформах (аэростатах, дирижаблях и др.) (рис. 3) в составе одной или нескольких платформ, способный выполнять перемещения, стабилизацию платформ на высотах 16–30 км в заданных областях пространства для формирования зон эффективного приёма энергии, принимать энергию с КС и передавать на СВЧ-генераторы (магнетроны, клистроны) с КПД выше 75–80%. После формирования энергии в СВЧ-диапазоне будет производиться её передача по СВЧ-каналам на ректенны, размещённые на поверхности Земли;
- наземный сегмент (НС) — объекты, располагаемые в заданных районах для обеспечения потребителей энергией, осуществляющие приём излучений с СтС, преобразование её в электрический ток с промышленными параметрами в соответствии с установленными требованиями и передачу в наземные сети энергоснабжения;



*Рис. 2. Функционально автономный модуль космического сегмента САКЭ*

- система информации, навигации, управления САКЭ и её сегментами, отдельными элементами, средствами обеспечения безопасности, сбора данных о состоянии атмосферы по направлениям передачи энергии и в местах расположения наземных ректенн, выполнения точных навигационных измерений и расчётов в целях управления и координации функционированием космического, стратосферного и наземного сегментов системы, поддержания заданных параметров излучений и токов в соответствии с перечнем и установленными режимами работы потребителей энергии.

Использование передающих телескопов космического сегмента диаметром 10 м позволит при передаче энергии с геостационарной орбиты, высота которой порядка 36 тыс. км, концентрировать лазерные лучи на поверхности Земли в пространственную область 10,0–25,0 м. Комбинированный вариант построения САКЭ, использующий лазерную магистраль для доставки энергии на заатмосферную платформу, преобразование её в ток, питающий микроволновые генераторы, и транспортировка излучения микроволн на Землю наиболее целесообразен для построения распределённой энергетики России и гибкого энергообеспечения труднодоступных объектов территории страны. Диаметр СВЧ-ректенн на передачу составит примерно 25–50 м, а на приём —

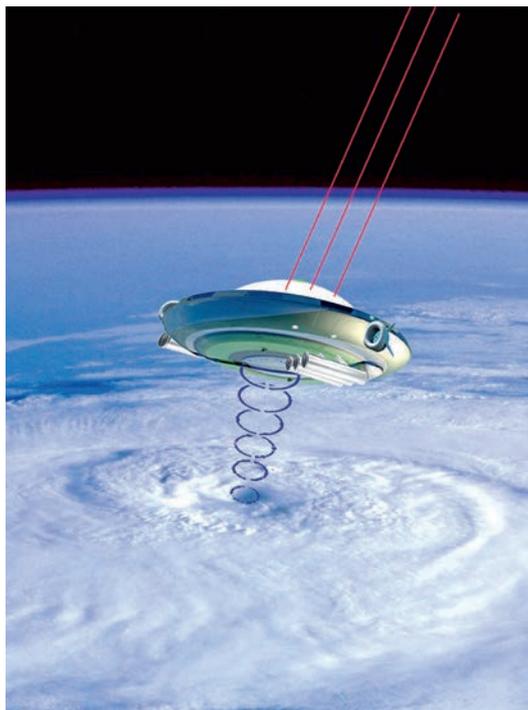


Рис. 3. Стратосферный сегмент САКЭ

до 50 метров. Высокоэффективный и надёжный приём и преобразование СВЧ-излучения в электрический ток (с КПД до 75%) могут осуществить электронные циклотронные преобразователи СВЧ-излучения в постоянный ток, нечувствительные к перегрузкам, что особенно важно для мощных систем беспроводной передачи энергии.

Развитие технологий транспортировки мощных лазерных пучков по стратосферным магистралям позволит также внести серьёзный вклад в решение проблемы энергообеспечения северных регионов страны. Предлагаемая технология может быть реализована с использованием морских атомных электростанций и стратосферных средств беспроводной передачи энергии.

Вместе с тем, следует отметить, что сегодня уровень инициативных работ по тематике солнечных аэрокосмических электростанций в России уже не обеспечивает решения всего объёма задач, стоящих перед исследовательскими и промышленными организациями. Для концентрации усилий различных научно-исследовательских учреждений, гарантирующих достижение требуемых результатов в приемлемые сроки, исследования и работы должны получить статус и финансирование в рамках национальных государственных программ России, что обусловит прорыв в создании многих важных для экономики России критических технологий для развития ряда отраслей экономики. Среди них высокие



Рис. 4. Комплексный стенд по отработке и демонстрации эффективности технологий САКЭ (Крым, КрАО, Симеиз)

космические, авиационные, воздухоплавательные технологии, средства лазерной и СВЧ-передачи энергии, энергетика, материалы, наноантенная техника.

Солнечные аэрокосмические электростанции с лазерными и СВЧ-магистралями могут стать наиболее предпочтительным вариантом для построения распределённой энергетической системы РФ (в т.ч. информационно-энергетического обеспечения объектов в районах Крайнего Севера). Как первый шаг решения проблемы создания в России САКЭ, предлагается в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла (КНТП) (далее — комплексная программа) поставить НИЭР «Разработка научно-технологических основ и конструкторско-технологических решений в интересах обоснования принципов построения и демонстрации эффективности ключевых технологий солнечных аэрокосмических электростанций (САКЭ) с дистанционной передачей энергии по лазерным и СВЧ-каналам» (шифр «Магистраль») и создание наземной инфраструктуры для демонстрации эффективности технологий САКЭ в наземных условиях на базе КрАО (Крым, Симеиз) (рис. 4).

### **Анализ мирового тренда развития мобильных технологических агрегатов (МТА)**

В зависимости от уровня развития и конкретных условий их эксплуатации возможны МТА тяговые, тягово-энергетические и энергетические. Тяговые МТА трансформируются в мобильные МЭЖ с многоканальным распределением мощности различной физической природы между их потребителями с активными рабочими органами и электронно-ионными устройствами. Разработанный дифференцированный метод оценки энергетической эффективности использования топлива в МТА позволяет

обеспечить рациональное развитие системы «топливо — ДВС — конструктивно-компоновочная схема — трансмиссия — движитель — технологическое средство — почва».

С целью технико-технологического обеспечения сельскохозяйственного производства рассматриваются возможность внедрения интеллектуальных машинных технологий, создание интеллектуальных мобильных МЭК для агропромышленного производства, в том числе из-за сокращения населения в сельской местности и возрастающего значения продовольственной безопасности страны.

Включение интеллектуальных мобильных МЭК в технологический цикл производства продукции в полеводстве позволит перейти на высокоинтенсивные технологии в сельскохозяйственном производстве, в полной мере реализуя концепцию интеллектуализации и электрификации земледелия.

Это подтверждается и анализом мировых тенденций развития инновационных машин и оборудования для аграрно-промышленного комплекса, который показывает, что в ближайшие 5–10 лет будет наблюдаться интенсивное применение автоматизированных электро- и гибридных приводов на сельскохозяйственных машинах, в т.ч. и в роботизированных сельскохозяйственных комплексах. Данное направление имеет большие перспективы, связанные с технико-экономической эффективностью, экологической безопасностью, управляемостью, улучшением условий труда, а также повышением технического уровня и качества создаваемых машинных технологий сельскохозяйственного производства.

В настоящее время энергетическая эффективность преобразования веществ и энергии характеризуется относительно невысоким КПД. Например, трансформация энергии топлива в электричество оценивается относительно невысоким КПД в 20–30%, при этом значительная доля энергии рассеивается в окружающую среду в форме низкопотенциального тепла.

Существенно более сложные энергетические проблемы современное общество имеет при производстве продуктов питания. Общий коэффициент преобразования энергии от фотосинтеза до потребительского продукта крайне низок. С учётом затрат на транспортировку, распределение продуктов, выкармливание сельскохозяйственных животных, общий коэффициент преобразования энергии можно оценить в 0,001%. Очевидно, что эта величина представляется абсолютно неприемлемой. Глобальным вызовом современности является принципиальное повышение энергетической эффективности произ-

водства пищевых продуктов. Принципиально новым способом повышения этой эффективности является сопряжение в одном технологическом цикле процессов получения энергии и фотосинтеза на основе сельскохозяйственных и технических растений.

### *Многофункциональный энергобиотехнологический комплекс (биоМЭК)*

БиоМЭК позволит принципиально новым способом получить энергию и продукты питания на основе фитотронных технологий. Их ключевым элементом является климат-контроль и фитотронный способ культивирования растений. Избыточное низкопотенциальное тепло электрогенерирующих станций (около 70% производимой энергии) может быть использовано для климат-контроля фитотронного блока. Фитотрон представляет собой замкнутое полностью автоматическое устройство с полностью контролируемыми параметрами, оптимизированными под выращивание продуктивной культуры.

Принципиальным является то, что современные достижения биотехнологии и биохимической физики позволяют выращивать сельскохозяйственные растения в предельно оптимальных условиях без использования почвы (технология аэропоники).

Основное экономическое преимущество аэропоники заключается в том, что для её производства не требуется земли, а как следствие возможно создание многоярусных теплиц для производства экологически чистой продукции. Такой подход поможет решить проблемы ограниченного количества площади для культивирования растений, а также позволит выращивать овощи и зеленые культуры в пустынях, тундре и других не пригодных для сельского хозяйства районах Земли.

Современные сенсорные технологии, средства автоматизации и контроля обеспечивают возможности программирования роста растений с предельной эффективностью использования световой энергии, приближающейся к теоретически возможной. Создание оптимальных условий роста по температуре, влажности, составу минеральных компонентов питания, освещённости позволяет получать высокие урожайности для большинства сельскохозяйственных культур.

Источниками света могут служить светодиоды, эффективно конвертирующие электроэнергию в световое излучение. Принципиальным является регулируемое использование  $\text{CO}_2$  — базового углеродсодержащего соединения для фотосинтетического процесса. Контроль повышенного уровня  $\text{CO}_2$  по-

звolyет в несколько раз повысить продуктивность растений.

Оценки показывают, что с учётом внесезонности культивирования растений, оптимального уровня  $\text{CO}_2$ , температуры, влажности, минерального питания, безвирусности исходного посевного материала и при отсутствии проблем с сельскохозяйственными вредителями, средняя годовая урожайность фитотронного культивирования с единицы поверхности в 50–500 раз выше традиционного сельскохозяйственного производства.

Широкомасштабное внедрение многофункциональных биоэнерготехнологических комплексов на базе гибридных энергоустановок (СЭС, ВЭС, ГЭС и т.п.) позволит до 2025 года снизить уровень импортозависимости в российском производстве семян высших категорий не менее чем на 30%.

Основное производство направлено на получение энергии в виде продуктов питания на базе автоматического фитотронного производства (аэропоника) без использования почвы. Продуктами производства являются востребованные углеводные и белковые продукты питания, все отходы возвращаются в технические циклы после конверсии под действием метаногенеза.

Использование комплексной технологии производства энергии и сельскохозяйственной продукции требует соответствующую разработку общих технических требований к многофункциональным энергобиотехнологическим комплексам, которые заключаются в следующем:

- многофункциональность, многотопливность, модульное построение автономных систем энергоснабжения, в использовании местных энергоресурсов и ВИЭ;
- возможность реализации единого обобщённого универсального унифицированного типового проекта, который отвечал бы современным техническим требованиям, предъявляемым к биоМЭК;
- нулевое загрязнение окружающей среды вредными веществами, содержащимися в отработавших газах первичных поршневых двигателей за счёт обеспечения замкнутости цикла конверсии углекислоты в продукты питания, прежде всего, путём эффективного использования энергии сжигаемого топлива и продуктов его сгорания ( $\text{CO}_2$ );
- согласованность характеристик энергетических модулей, в том числе ДВС, силовых генераторов, ВИЭ-модулей, потребителя нагрузки и др. модулей;

- значительное повышение КПД преобразования энергии;
- наличие фитотронного культивирования растений без почвы в условиях аэропоники, позволяющее более эффективно использовать энергию, повышать урожайность в 4–5 раз, обеспечивать независимость от климатических условий, непрерывность культивирования круглый год (6–12 урожаев в год), безвирусное растениеводство и экологически чистые продукты, исключить пестициды и болезни растений;
- обеспечение полной автономной энергонезависимости;
- производство экологически чистых сельскохозяйственных продуктов;
- экономия топлива только за счёт оптимизации режимов работы многотопливной электростанции и использования потенциала ВИЭ;
- повышение коэффициента использования топлива за счёт комплексной утилизации сбросового тепла ДВС и повышения его энергетической эффективности;
- согласованность энергетических и биологических характеристик биоМЭК и его модулей, в т.ч. фитотронных модулей, ДВС, генератора и потребителя нагрузок;
- объём производства ДВС выбросов  $\text{CO}_2$  не должен превышать потребление углекислоты, необходимой для оптимального прироста биомассы;
- возможность совместной работы ДВС-электростанции с возобновляемыми источниками энергии (гибридная электростанция) при любом соотношении мощности за счёт применения всережимного генератора, преобразователя частоты и САУ, а также с энергосистемой;
- обеспечение высокого качества электрической и тепловой энергии независимо от колебаний нагрузки и потенциала возобновляемых видов энергии;
- создание интеллектуальной системы автоматического управления биоМЭК;
- высокий коэффициент загрузки ДВС (~1).

Подобные комплексные технические решения нигде в мире не применяются, что позволяет говорить об их новизне, возможности технологического лидерства и выхода на целевые зарубежные рынки.

В целом, создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения на базе предложенных инновационных технологий в условиях происходя-

щих в мире процессов трансформации энергетических систем позволит повысить эффективность, надёжность и безопасность функционирования системы энергоснабжения России и тем самым будет способствовать повышению конкурентоспособности её экономики.

Создаются современные технологии электрификации мобильных процессов в различных отраслях экономики, прежде всего, в АПК и транспорте.

Особую значимость в настоящее время приобретают вопросы выбора архитектуры будущей интегрированной системы энергоснабжения Арктического региона России.

В этих условиях возникает необходимость:

- в разработке целевого видения развития электроэнергетического комплекса страны с учётом долгосрочной перспективы, включая вопросы развития электротранспортных систем, в том числе парка электротракторов и рабочих машин с электроприводами и различными силовыми приводами в отраслях сельского хозяйства, а также распределённой и аэрокосмической энергетики на территории Российской Федерации;
- в разработке предложений по созданию институциональной основы, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила оптимального развития и функционирования электроэнергетического комплекса;
- в разработке научных основ формирования и принципов управления комплексных интегрированных систем энергоснабжения, включая развитие и разработку новых методов и отечественных программных средств интегрального планирования ресурсов в условиях происходящих процессов трансформации энергетических систем;
- в выполнении работ по созданию комплексных интегрированных систем энергоснабжения, включая создание комплексной интегрированной системы энергоснабжения Арктического региона России.

Для решения таких задач могут быть использованы разработанная в стране методология системных исследований, методы оптимального управления функционированием и развитием энергосистем и их объединений, имеющиеся разработки институтов РАН, отраслевых научно-исследовательских институтов, вузов и других организаций, в том числе тех, представители которых вошли в состав авторского коллектива.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время энергетика мира претерпевает коренные изменения, в результате которых создаётся новая архитектура энергетических систем. Электроэнергетика России стоит в начале идущих в мире процессов трансформации энергетических систем и находится, по существу, в стагнации, а по показателям эффективности и надёжности уступает показателям, достигнутым к концу 80-х годов прошлого столетия.

В этих условиях актуальным для нашей страны является решение следующих задач:

- определение ключевых направлений и целевого видения развития электроэнергетического комплекса страны с учётом долгосрочной перспективы подобно тому, как это было сделано комиссиями, возглавлявшимися Г.М. Кржижановским при разработке плана ГОЭЛРО и определении плана перспективных исследований по проблеме создания ЕЭС страны в 1957 г.;
- создание институциональной основы, а в целом — целостной системы управления, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила оптимального развития и функционирования электроэнергетического комплекса страны в условиях идущих в стране и мире процессов трансформации энергетических систем;
- разработка научных основ формирования и принципов управления комплексных интегрированных систем энергоснабжения, включая развитие и разработку новых методов и отечественных программных средств интегрального планирования ресурсов в условиях происходящих процессов трансформации энергетических систем;
- развитие распределённой энергетики на базе солнечных аэрокосмических энергетических комплексов;
- развитие распределённой энергетики на базе многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК) и многофункциональных энергобиотехнологических комплексов (биоМЭК) и их интеграция в энергетические системы страны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Электроэнергетика России. История и перспективы развития / под общей ред. А.Ф. Дьякова. М.: АО «Информэнерго», 1997. 568 с.*

2. *Материалы юбилейной сессии учёного совета, посвящённые 40-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции и 25-летию Энергетического института АН СССР.* М., 1958. 125 с.
3. Мелентьев Л.А. *Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития.* М.: Наука, 1979. 416 с.
4. Баринов В.А., Совалов С.А. *Режимы энергосистем. Методы анализа и управления.* М.: Энергоатомиздат, 1990. 440 с.
5. *Системные исследования в энергетике. Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай.* Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.
6. Волков Э.П., Баринов В.А., Маневич А.С. *Методология обоснования и перспективы развития электроэнергетики России.* М.: Энергоатомиздат, 2010. 556 с.
7. Богданов А.А. *Тектология. Всеобщая организационная наука.* Петербург; Москва; Берлин: Изд-во З.И. Гржебина, 1913.
8. Винер Н. *Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине.* М.: Советское радио, 1968. 326 с.
9. Есяков С.Я., Сигов А.С., Воропай Н.И., Варфоломеев С.Д., Стенников В.А., Редько И.Я., Баринов В.А., Матюхин В.Ф. *Предложения по созданию целостной системы управления функционированием и развитием электроэнергетики России. Электроэнергия. Передача и распределение, 2019, № 1, с. 31–33.*
10. Есяков С.Я., Лунин К.А., Стенников В.А., Воропай Н.И., Редько И.Я., Баринов В.А. *Трансформация электроэнергетических систем. Электроэнергия. Передача и распределение, 2019, № 4, с. 134–141.*
11. *Status of Power System Transformation. System integration and local grids.* IEA, 2017. 158 p.
12. *Status of Power System Transformation 2019. Power system flexibility.* IEA, 2019. 32 p.
13. *World Energy Outlook 2018.* OECD/IEA, 2018. 661 p.
14. *Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050.* IRENA, 2018. 76 p.
15. *European ENERGY Research Alliance (EERA) Description of Work. Joint Programme of Energy System Integration (ESI).* EERA. 2015. 86 p.
16. Волков Э.П., Баринов В.А., Исаев В.А., Луцицын Н.В., Маневич А.С., Мурачёв А.С., Усачёв Ю.В. *Направления развития энергетического хозяйства и ЕНЭС России и её интеграция в глобальную электрическую сеть. Известия Российской академии наук. Энергетика, 2016, № 5, с. 1–11.*
17. Voropai N.I., Podkovalnikov S.V., Osintsev K.A. *From interconnections of local electric power systems to Global Energy Interconnection // Global Energy Interconnection, 2018, vol.1, no.1, pp. 4–10.*
18. *Global electricity network Feasibility study.* CIGRE, WG C1.35, September 2019, Reference: 775. 139 p.
19. *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations.* OECD/IEA, 2017. 443 p.
20. *Grid Wise Transactive Energy Framework. Draft version.* October 2013. 65 p.
21. Годжаев З.А., Измайлов А.Ю., Лачуга Ю.Ф., Шогенов Ю.Ю. *Перспективы применения автоматизированных и роботизированных электроприводов на мобильных энергосредствах и рабочих органах сельхозмашин. Известия Московского государственного технического университета МАМИ, 2018, № 2, с. 41–47.*
22. Сигов А.С., Матюхин В.Ф., Редько И.Я., Абрамов П.И. *Аэрокосмическая энергетика России (цели создания, концептуальные подходы, перспективы). Радиоэлектронные технологии, 2019, № 1, с. 79–84.*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Андреев Вячеслав Михайлович**, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией ФЭП ФГБУН «Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН».

**Баринов Валентин Александрович**, академик АЭН, д.т.н., заведующий отделением АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (АО «ЭНИН»).

**Варфоломеев Сергей Дмитриевич**, член-корр. РАН, д.х.н., профессор, заведующий кафедрой химической энзимологии химического факультета МГУ.

**Годжаев Захид Адыгезалович**, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, заместитель директора по инновационной и внедренческой деятельности ФГБНУ ФНАЦ ВИМ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».

**Гришин Виктор Иванович**, д.э.н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова».

**Есяков Сергей Яковлевич**, к.э.н., первый заместитель председателя Комитета Государственной Думы РФ по энергетике.

**Лачуга Юрий Фёдорович**, академик РАН, член президиума РАН, д.т.н., профессор, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН.

**Лунин Кирилл Александрович**, к.т.н., генеральный директор АО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского».

**Матюхин Владимир Фёдорович**, д.т.н., директор НИИЦ ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), директор НИИЦ «САФ и САКЭ».

**Панченко Владислав Яковлевич**, академик РАН, член президиума РАН, д.ф.-м.н., профессор, председатель совета Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), научный руководитель Института проблем лазерных и информационных технологий РАН (ИПЛИТ РАН), и.о. заместителя академика-секретаря и руководителя секции нанотехнологий ОНИТ РАН.

**Редько Иван Яковлевич**, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского».

**Рокецкий Леонид Юлианович**, д.т.н., председатель НЭС при рабочей группе Совета Федерации по мониторингу реализации законодательства в об-

ласти энергетики, энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

**Сигов Александр Сергеевич**, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», член Совета по безопасности при президенте Российской Федерации.

**Стенников Валерий Алексеевич**, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, директор ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук».

**Шестаков Александр Леонидович**, профессор, ректор ФГАОУ ВО «Южно-Уральского государственного университета (НИУ)», вице-президент Союза ректоров вузов России, председатель Совета ректоров вузов УрФО.

**Цивадзе Аслан Юсупович**, академик РАН, член президиума РАН, д.х.н., руководитель секции «Наука о материалах» РАН, президент Российского химического общества имени Д.И. Менделеева, профессор МГУ.

**ЭЛЕКТРО**  
29-я международная выставка  
«Электрооборудование. Светотехника.  
Автоматизация зданий и сооружений»  
7–10 ИЮНЯ 2021

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»  
Краснопресненская наб., 14  
Павильон №2 (залы 1, 2)  
[www.elektro-expo.ru](http://www.elektro-expo.ru)

**ЭЛЕКТРО  
МАРКЕТ**  
ВАЖНЫЕ СВЯЗИ  
ДЛЯ ВАЖНЫХ ДЕЛ

**ЭЛЕКТРО  
TALK**  
РАЗГОВОРЫ  
С ТОЛКОМ

**ЭЛЕКТРО  
SKILLS**  
ПРОКАЧАЙ НАВЫКИ  
И КОМПЕТЕНЦИИ

12+

**ЭКСПОЦЕНТР**