

Блэкаут в штате Техас, США: анализ и некоторые выводы¹

Н.И. ВОРОПАЙ, чл.-корр. РАН, доктор технических наук

E-mail: voropay@isem.irk.ru; ORCID: 0000-0003-1604-3980

Д.С. КРУПЕНЁВ, кандидат технических наук

E-mail: krupenev@isem.irk.ru; ORCID: 0000-0002-3093-4483

С.В. ПОДКОВАЛЬНИКОВ, доктор технических наук

E-mail: spodkovalnikov@isem.irk.ru; ORCID: 0000-0002-7210-0436

С.М. СЕНДЕРОВ, доктор технических наук

E-mail: ssm@isem.irk.ru; ORCID: 0000-0001-6615-4502

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

Аннотация. В статье представлен анализ причин и последствий аварии в энергетическом комплексе штата Техас, США в феврале 2021 г. Из-за резкого экстремального похолодания произошли отказы большого числа объектов в электроэнергетической, газоснабжающей и водоснабжающей системах, причем, из-за прямых технологических связей отказы одних систем усугубляли последствия для других. Анализ ситуации показал, что в правовом поле Техаса имеются пробелы, которые в совокупности с другими факторами привели к негативным последствиям в феврале 2021 г., а также могут усугублять подобные ситуации в будущем. На основании проведенного анализа предложен комплекс первичных технических и организационных мероприятий для минимизации негативных последствий для энергетических систем при реализации экстремальных природно-климатических явлений.

Ключевые слова: электроэнергетическая система; система газоснабжения; система водоснабжения; системная авария; нормативное правовое регулирование; природно-климатические явления; Техас

Введение

В феврале 2021 г. на территории практически всей южной части США бушевал арктический шторм с нетипично для этих мест низкими температурами и обильными снежными бурями. При этом наиболее тяжелая ситуация сложилась в штате Техас. Системы топливо- и энергоснабжения штата не выдержали непосредственного воздействия экстремальных климатических условий в сочетании со значительно увеличившейся нагрузкой

¹ Работа выполнена в рамках проектов государственного задания (№ FWEU-2021-0001 и № FWEU-2021-0003) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. и с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

со стороны потребителей. Результатом стала цепная реакция отключений технологических объектов во взаимосвязанных системах жизне- и энергообеспечения, приведшая к тяжелым экономическим и социальным последствиям, сопровождающимся смертельными случаями.

В условиях глобального потепления, изучением процессов и последствий которого занимается большое количество исследователей, экстремальные проявления природных процессов возникают достаточно активно в разных частях планеты. Техасский блэкаут как следствие таких проявлений в совокупности с особенностями организации системы топливо- и энергоснабжения потребителей еще раз указал на высокую актуальность стоящих в разных странах и регионах вопросов обеспечения надежности функционирования энергетических систем и комплексов не только в обычных условиях, но и в случае крупномасштабных чрезвычайных ситуаций. Наличие регионов с изолированными или слабо связанными с «соседями» системами энергоснабжения в России и в других странах мира говорит о возможности проявления больших или меньших негативных последствий для потребителей энергоресурсов в условиях наступления экстремальных условий функционирования энергетических систем.

Цель данной статьи – разобраться в основных причинах произошедшего и сформулировать необходимую направленность действий для минимизации негативных последствий у потребителей энергоресурсов в схожих условиях и обстоятельствах. Для этого авторы предлагают рассмотреть основные особенности организации системы топливо- и энергоснабжения потребителей штата Техас, разобраться, что произошло и почему, и предложить определенные шаги для того, чтобы не допускать такой тяжелой ситуации в будущем.

Энергетика штата накануне блэкаута

Установленная мощность электростанций энергосистемы Техаса на начало 2021 г. составила около 129,6 ГВт. В том числе 53,6% приходится на газовые электростанции, около 23% – на ветровые. Кроме того, определенную долю генерации обеспечивают атомные (8,7%) и угольные (16,6%) блоки, солнечные установки (1,7%). Незначительная часть электроэнергии поступает в штат из Southwest Power Pool (две линии общей

пропускной способностью 820 МВт) и из Мексики (три линии общей пропускной способностью 430 МВт). Электрическая сеть представлена линиями переменного тока на напряжениях 69–345 кВ. Энергосистема работает на частоте 60 Гц.

Обычно пик потребления электроэнергии и мощности в Техасе отмечается летом и связан с наиболее активной работой систем кондиционирования. Поэтому электростанции, как правило, проводят техническое обслуживание и плановые ремонты своего оборудования в мягкие зимние месяцы, чтобы подготовиться к максимальному спросу на электроэнергию и мощность летом. Так, в феврале 2021 г. некоторые электростанции суммарной мощностью около 4 ГВт были отключены для проведения ремонтных работ.

Необходимо отметить, что более 60% домохозяйств штата отапливаются за счет электроэнергии и менее 40% – за счет газа. Следует учитывать и то, что климатические условия в разных районах штата различаются достаточно существенно. В частности, средняя температура воздуха зимой на юге (Техас-Сити) в дневные часы составляет $+19^{\circ}\text{C}$, а ночью $-+16^{\circ}\text{C}$ ², а северные и западные районы подвержены снегопадам в связи с более низкими средними температурами. Так, в феврале 1956 г. на севере Техаса количество выпавшего снега³ в течение одной недели составило около 150 см; в декабре 1987 г. за 24 часа в Эль-Пасо на крайнем западе Техаса выпало 57 см снега⁴.

В центре штата, в наиболее пострадавшем в 2021 г. городе Остин, зима обычно мягкая и относительно сухая, в то же время в среднем на 18 дней в году температура опускается ниже 0°C , а самая низкая температура была зарегистрирована 31 января 1949 г. и составила -19°C ⁵.

² Архив погоды в Техас-Сити зимой. URL: https://world-weather.ru/archive/usa/texas_city/winter/ (дата обращения: 30.03.2021).

³ *Brown H. E., Brintzenhofe R. A.* Snowstorm of February 1–5, 1956, in New Mexico and Texas. Monthly weather review. February 1956. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.394.8014&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 30.03.2021).

⁴ Here is the national weather service list of heavy snowfall in El Paso. El Paso Times. Feb. 2020. URL: <https://www.elpasotimes.com/story/weather/2020/02/05/read-national-weather-service-list-heavy-snowfall-record-el-paso/4666418002/> (дата обращения: 30.03.2021).

⁵ Austin climate summary. URL: <https://www.weather.gov/media/ewx/climate/ClimateSummary-ewx-Austin.pdf> (дата обращения: 30.03.2021).

Что произошло?

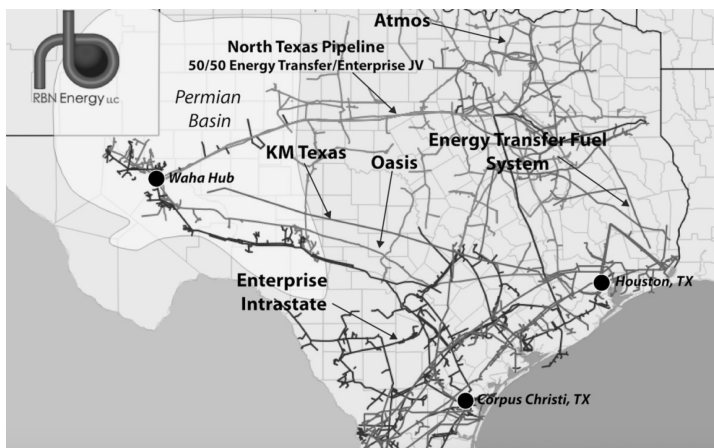
На рисунке 1 показан график нагрузки и его покрытие накануне и во время блэкаута, по данным ERCOT⁶. Как видно из рисунка, неприятности начались задолго до экстремальной ситуации – с 7–8 февраля, когда температура в г. Остин снизилась ниже нормального уровня и продолжила снижаться 10–13 февраля, что привело к обледенению механизмов лопастей ветротурбин и невозможности работы примерно половины (12 ГВт мощности) всей ветровой генерации.



Рис. 1. График прохождения блэкаута в штате Техас (США)

⁶ A Cold Knockout to the Electric Reliability Council of Texas. URL: https://www.reddit.com/r/hardenergy/comments/lrpb27/a_cold_knockout_to_the_electric_reliability/ (дата обращения: 03.08.2021).

В значительной степени пострадала газовая генерация и газоснабжающая инфраструктура, которая является весьма развитой в Техасе (рис. 2). Аномальные морозы привели к тому, что основные газопроводы были заморожены, то есть закупорены ледяными пробками, постепенно образовавшимися из замерзшей воды, присутствующей в небольшом количестве в недостаточно для таких температурных условий осушенном газе.



Источник. RBN energy NATGAS Permian report URL: <https://rbnenergy.com/products/permian-natgas/> (дата обращения: 30.03.2021).

Рис. 2. Схема сети магистральных газопроводов штата Техас

Эти явления связаны с точкой росы газа по воде, характеризующей образование твердых фаз (лед, газовые гидраты), что затрудняет транспорт газа. Например, при давлении в магистральных газопроводах США в 75 атм. такая точка росы располагается в пределах $-15/-16^{\circ}\text{C}$ [Коллас, Паркер, 2003]. В южных районах страны, где температура в большинстве случаев не опускается ниже нуля, газ обычно не осушается даже до этих значений точки росы [Bullin, Dustman, 2011].

По аналогичным причинам перестало работать оборудование и на газовых скважинах штата. Дело в том, что в процессе добычи на поверхность из пласта, помимо газа, может поступать некоторое количество нефти и воды. Увеличение количества жидкости в газовой скважине приводит к постепенному повышению давления в ее стволе и уменьшению отдачи газа. Для предотвращения

такой ситуации скважину осушают разными способами. Все это использовалось и в Техасе, но с учетом обычных для штата зимних температур, значительно превышающих 0°C. Утепление на случай сильного похолодания на соответствующем оборудовании не предусматривалось, и в результате замерзания жидкости, содержащейся в газе, оно не смогло работать.

По этой причине во второй декаде февраля 2021 г. большинство скважин на Permian Basin (крупный нефтегазоносный бассейн осадочного типа в юго-западной части США) были выведены из эксплуатации [Balasta, Munawar, 2021]. Если в начале февраля техасские операторы производили около 24 млрд футов³ газа в сутки, то в условиях экстремально низких температур 14–20 февраля добыча газа упала до суточных объемов около 12–17 млрд футов³.

Как следствие, отключилась половина газовых электростанций, энергосистема штата потеряла в пике около 26 ГВт мощности. Кроме того, замерзшее оборудование на других объектах привело к отключению некоторых угольных электростанций и даже одного реактора на АЭС. Еще около 45 ГВт мощности были недоступны из-за аварийных отключений линий электропередачи (другими словами, эти 45 ГВт мощности были в состоянии готовности, но из-за отказов в сетевом комплексе возможность передачи мощности снизилась, и это привело к «запертому» состоянию этой мощности).

Подчеркнем, что расчетные условия обеспечения достаточного уровня балансовой надёжности энергосистемы полностью соблюдались. Так, собственный резерв генерирующей мощности был более 15%, что считается достаточным по всем нормативам. К последующим катастрофическим событиям привели чрезвычайные обстоятельства нерасчетного характера для рассматриваемого региона.

Свой вклад в такое развитие ситуации вынужденно внесли и бытовые потребители. Дома в штате Техас не рассчитаны на такие низкие температуры. И поскольку, как было отмечено, около 40% домохозяйств отапливаются за счет газа, а с его поставкой произошли перебои, жители начали включать электрообогреватели, как и остальные 60% домов с электроотоплением. Это привело к росту спроса на электрическую мощность до рекордных 70 ГВт, в то время как в результате предварительного рас-

чета для экстремальных зимних условий была получена оценка 67 ГВт. При этом средний уровень потребляемой до блэкаута мощности составлял около 40 ГВт⁷.

Аномально холодную погоду в центральных и южных районах штата не выдержали и системы водоснабжения [Asmelash, 2021]. Трудности с подачей холодной воды испытала почти половина его жителей (около 15 млн человек). В штате зафиксированы многочисленные факты порывов трубопроводов холодного водоснабжения, замерзания колодцев на водопроводных сетях и выхода из строя водоочистных сооружений. Представители комиссии штата по ликвидации чрезвычайной ситуации сообщали, что из-за лопнувших труб в г. Остин было потеряно около 1,2 млрд л воды. Власти Хьюстона, крупнейшего города Техаса, получили сообщение о почти 5 тысячах повреждений труб холодного водоснабжения [Nealy et al., 2021].

Так эта катастрофа охватила практически все инфраструктурные системы штата.

Немного истории

События февраля 2021 г. не были чем-то исключительным. На юго-западе штата экстремально холодные погодные явления отмечались в 1983, 1989, 2003, 2006, 2008, 2010 и 2011 гг., и они тоже сопровождались авариями в энергосистемах с отключениями потребителей. Худшие из них были в 1989 и 2011 гг., они наиболее сопоставимы с 2021 г. (таблица).

Сопоставительная характеристика аварий в энергосистеме Техаса 1989, 2011 и 2021 гг.

Показатель	21–23 декабря 1989 г.	1–2 февраля 2011 г.	15–17 февраля 2021 г.
Мин. температура и мин. температура с учётом фактора ветра в районе Далласа	–18,3 °С; –24,4 °С	–10,6 °С; –21,1 °С	–18,9 °С; –26,7 °С
Пик нагрузки системы, МВт	38,300	56,334	76,713
Снижение мощности генерации (нетто,%), МВт	11,809 (31)	14,702 (26)	28,035 (36,5)

Источник. M. Giberson Texas power failures: what happened in February 2021 and what can be done. (URL: <https://reason.org/wp-content/uploads/texas-power-failures-what-happened-what-can-be-done.pdf>)

⁷ Texas power failures: what happened in February 2021 and what can be done. URL: <https://reason.org/wp-content/uploads/texas-power-failures-what-happened-what-can-be-done.pdf> (дата обращения: 30.05.2021).

В 1989 г. ERCOT впервые прибег к системным ограничениям поставок электроэнергии «гарантированным» потребителям для предотвращения более широких аварийных отключений⁸. Аналогичные действия были реализованы в феврале 2011 г.

В пятницу 22 декабря 1989 г. ERCOT не смог удержать минимальный уровень требуемого резерва активной мощности из-за рекордно высоких нагрузок и отключения большого количества энергоблоков. В 8:30 частота упала ниже 59,95 Гц, и ERCOT приказал запустить все доступные генерирующие мощности. Локальные диспетчерские центры, испытывающие дефицит генерации, также ограничивали «прерываемые» (interruptible) нагрузки и сводили их к минимуму. На практике это приводило к дополнительным отключениям потребителей электроэнергии из-за проблем в сетях низкого напряжения. Коммунальные предприятия публично призывали потребителей добровольно сократить потребление.

В тот год электроэнергетические и газовые компании сообщили о выполнении плановых мероприятий по подготовке к зиме, однако резко сократившаяся в холода производительность многих энергоблоков и газовых скважин показала, что либо эти мероприятия не выполнялись должным образом, либо в их основе лежали неверные (слишком оптимистичные) расчеты.

Энергетическая комиссия штата – PUCT (Public Utilities Commission of Texas) исследовала ситуацию 1989 г. и сделала ряд рекомендаций, направленных на улучшение подготовки генерирующих компаний к зиме. Однако в 2011 г. ситуация повторилась, причем проблемы возникли практически у тех же компаний. По итогам блэкаута 2011 г. Сенат Техаса принял закон по улучшению планов обеспечения надежности электроснабжения. Несмотря на это, в 2021 г. штат вновь столкнулся с теми же проблемами.

Механизмы регулирования

В своем отчете 1989 г. PUCT отмечал: «Достаточно ли действия, предпринимаемые генерирующими компаниями для предотвращения будущих отказов электростанций, связанных

⁸ Термин «ограничения» обозначает преднамеренное частичное отключение подачи мощности и электроэнергии потребителям.

с экстремально низкими температурами, подтвердит только непосредственный опыт с наступлением следующего события с экстремальными холодами»⁹.

Как показали 2011 и 2021 гг., корректирующие мероприятия не были адекватными или попросту не выполнялись: генерирующие компании не обеспечили готовность к холодам. Возможно, у владельцев объектов генерации превалировало желание снизить издержки, при этом не было сделано выводов из уроков исторической ретроспективы, с тем чтобы сделать усилия по обеспечению надежности энергоснабжения потребителей приоритетными.

Отметим, что на федеральном уровне после масштабной системной аварии на Северо-Востоке США и Востоке Канады в 2003 г., когда без электричества остались 50 млн человек, а ущерб оценивался в 6 млрд долл.,¹⁰ была осознана потребность в новом наборе правил, которые помогли бы предотвратить подобные массовые аварийные отключения электроэнергии.

Закон об энергетической политике 2005 г. уполномочил Federal Energy Regulatory Commission (FERC) назначить национального оператора по надежности – ERO (Electric Reliability Operator). В 2006 г. FERC издал приказ об учреждении NERC (North American Electric Reliability Corporation) в качестве такого оператора для США. До того, как NERC приступила к своим обязанностям, требования руководящих документов по эксплуатации и планированию энергосистем не были обязательными, а носили, по существу, рекомендательный характер. NERC организовала разработку стандартов надежности и получила полномочия обеспечивать соблюдение этих стандартов посредством денежных штрафов и других санкций.

Однако ни в федеральных, ни в региональных стандартах надежности нет каких-либо четких положений, которые напрямую требовали бы от частных генерирующих и сетевых компаний выполнения мероприятий по *подготовке к зиме*. Эти вопросы регулятор по-прежнему оставляет на усмотрение энергокомпаний.

⁹ Report on outages and curtailments during the Southwest cold weather event of February 1–5, 2011: Causes and recommendations / Prepared by the Staffs of the Federal Energy Regulatory Commission and the North American Electric Reliability Corporation, August 2011. URL: <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/08-16-11-report.pdf> (дата обращения: 30.05.2021)

¹⁰ Хроника энергетических аварий августа 2003 года. URL: <https://ria.ru/20030829/426505.html> (дата обращения: 30.03.2021)

В то время как в стандартах надежности EOP-001 R.4 и R.5 подготовка к зимнему периоду рассматривается в планах действий при чрезвычайных ситуациях, эти требования применяются только к балансирующим органам, владельцам некоторых линий электропередачи и операторам передачи электроэнергии, то есть организациям, на которые государство на федеральном уровне или на уровне штата может реально повлиять. Полностью частные генерирующие и электросетевые компании не попадают под это влияние. И основная проблема состоит в том, что и стандарты надежности, и закон, принятый Сенатом штата Техас в 2011 г., носят *для частных компаний* *сузубо рекомендательный характер*. В этом плане упомянутые полномочия NERC по возможным штрафам и санкциям практически не работают.

Особенность энергосистемы Техаса состоит в том, что она работает практически изолированно. Основу ее сети составляют линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 138 и 345 кВ, а связь с соседними регионами осуществляется преимущественно по ЛЭП 161 кВ. ERCOT управляет сетью, называемой Texas Interconnection, которая обслуживает 90% территории штата. На протяжении всей истории ERCOT всячески сопротивлялась подключению к двум другим энергосистемам страны: Eastern Connection, которая связывает поставщиков и потребителей к востоку от Скалистых гор, и Western Connection, которая связывает энергоснабжение к западу от Скалистых гор (к слову, в городах Эль-Пасо и Бомонт, расположенных у границ Техаса и запитанных от сетей других штатов, последствия от похолодания для потребителей были относительно минимальными).

Руководство Техаса и собственники энергетических объектов хотели сохранить независимость от федеральной юрисдикции в отношении эксплуатации энергосистемы штата, чтобы обеспечить себе максимальный контроль над ней и независимость от федерального энергетического рынка и федерального законодательства, а наличие на территории штата крупных месторождений ископаемого топлива лишь усугубляет это стремление к энергоизоляции. Самостоятельная энергетическая политика привела, например, к интенсивному развитию ветроэнергетики [Lloyd, 2021]. По этому критерию Техас является лидером США.

Однако катастрофические последствия температурной аномалии 2021 г. показали, что практическая изолированность

и независимое управление таким крупным энергообъединением могут привести к рискам развития масштабных системных аварий. При планировании развития подобных систем необходимо учитывать большее количество негативных факторов, влияющих на энергосистему, чем это делается в настоящее время.

Отечественный опыт обеспечения надежности электроснабжения

В условиях СССР основные требования к надежности электроснабжения потребителей были определены «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ), в настоящее время они закреплены Постановлением¹¹ Правительства №861 (далее Правила). Требования к системной надежности определялись руководящими указаниями и нормативами по проектированию развития энергосистем, а также нормами технологического проектирования их объектов. Требования по обеспечению устойчивости электроэнергетических систем формулировались «Руководящими указаниями по устойчивости энергосистем».

В соответствии с Правилами, обеспечение надёжности электроснабжения закрепляется в договоре. Потребители электроэнергии разделены на три категории по надёжности, в отношении которых обязательства сетевой организации по обеспечению надежности снабжения электрической энергией несколько различаются, что закрепляется договором. Так, «для первой категории надежности время восстановления электроснабжения не может превышать <...> максимальное время действия автоматики восстановления питания от резервных источников. <...> Для третьей категории надежности допустимое число часов отключения в год составляет 72 часа, но не более 24 часов подряд, включая время восстановления электроснабжения, за исключением случаев, когда для производства ремонта объектов электросетевого

¹¹ Постановление правительства РФ от 27.12.2004 №861 «Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам администратора торговой системы оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям».

хозяйства необходимы более длительные сроки, согласованные с Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору».

Согласно Правилам, на потребителей электроэнергии накладываются обязанности по обеспечению поддержания автономного резервного источника питания мощностью, достаточной для обеспечения электроснабжения своих электроприемников «при возникновении вне регламентных отключений, введении аварийных ограничений режима потребления электрической энергии (мощности) или использовании противоаварийной автоматики».

Как видно из этих выдержек, часть ответственности за обеспечение надёжности при нарушениях электроснабжения в России возлагается на самого потребителя, который должен либо устанавливать у себя резервные источники питания, либо платить энергоснабжающей организации за обеспечение высокого уровня надёжности электроснабжения. Этот подход – наследие советских времен, хотя тогда он реализовался несколько иначе, путем определения требований к схемам присоединения потребителей. Например, для электроприемников первой категории должно было обеспечиваться питание от двух (а для некоторых из них – от трех) независимых взаимно резервируемых источников.

Включение потребителя в ту или иную категорию определяется в зависимости от его стратегической значимости и ущерба, который может быть нанесен в результате перерывов в его энергообеспечении. Со стороны энергосистемы надежность различного уровня формируется разной степенью резервирования мощности, разной скоростью восстановления нарушенного электроснабжения и др. В вопросах поддержания надёжности в отечественной энергосистеме используются различные виды противоаварийной автоматики, которые во многих кризисных ситуациях предотвращают развитие крупных системных аварий.

Уровень резервирования в разных частях энергосистемы определяется по-разному. Технологически энергосистему можно разделить на несколько звеньев: снабжение станций топливом, генерация, передача и распределение электроэнергии. Все эти технологические звенья обеспечивают требуемый уровень надёжности электроснабжения, при этом по отдельности, как показывает практика, уровень их надёжности различен.

Так, по статистике, в России около 70% всех отключений электроэнергии у потребителей возникает по причине низкой надёжности распределительных сетей, что напрямую коррелирует с их протяженностью и степенью их защищенности от различных угроз (например, чрезвычайно важно содержать в порядке охранную зону электросетей).

В генерации надёжность работы определяется в первую очередь наличием топлива, поэтому в советский период вопрос обеспечения электростанций топливом всегда был на особом контроле. В современных реалиях управления энергосистемой бывают случаи несоблюдения норм по резервированию топлива по разным причинам, что в итоге может приводить к снижению выдачи мощности электростанциями. Что же касается требований по уровням резерва генерирующей мощности, в настоящее время идет работа по их актуализации, поскольку действующие нормативы¹² устарели.

Требования к уровню надёжности каждого технологического звена закладываются еще на этапе проектирования. Так, чрезвычайно важны для обеспечения надёжности энергоснабжения нормативные требования к выбору конструкций и характеристик оборудования с учетом климатических условий. К примеру, системы теплоснабжения, включая источники тепловой энергии, рассчитываются на работу в условиях *когда-либо зафиксированных* в данном регионе наиболее холодных суток со значительным запасом. Нормальным (неаварийным) режимом для систем отопления является их работа в условиях наиболее холодной пятидневки согласно строительным нормам и правилам «Строительная климатология»¹³. Не может быть и речи о прокладке труб водо- и теплоснабжения выше уровня промерзания грунта. В более теплых регионах России, безусловно, соблюдаются те же правила.

Кроме того, для регионов с повышенной вероятностью обледенения предусматриваются конструкции с усилением сетевых элементов, особенно проводов ЛЭП, а также с возможностью использования плавки наледи за счет повышенных токов, применения других мер повышения эксплуатационной надёжности.

¹² См., например, «Методические рекомендации по управлению энергосистем».

¹³ СП 131.13330.2018 «СНиП 23–01–99* Строительная климатология». URL: <http://sniprf.ru/sp131-13330-2018> (дата обращения: 22.07.2021).

Деятельность по совершенствованию и адаптации нормативных требований в области надёжности электроснабжения продолжается практически непрерывно. Однако в целом требования становятся менее жесткими, чем в советский период. Примером может служить трансформация «*Руководящих указаний по устойчивости энергосистем*» в «*Методические указания*». Ситуацию в определенной мере спасает традиция жесткой диспетчерской дисциплины при управлении развитием и режимами электроэнергетических систем (ЭЭС).

За долгие годы у специалистов сложились основополагающие принципы управления режимами ЭЭС в различных условиях: в нормальных режимах осуществляются управляющие воздействия для реализации коммерческих правил управления; в случае угрозы возникновения аварии, в предаварийных условиях и при ликвидации аварии обеспечивается приоритет системного оперативного и противоаварийного технологического управления перед коммерческим [Концепция, 2013]¹⁴. Эти принципы узаконены в одобренных Правительством РФ «*Правилах технологического функционирования электроэнергетических систем*»¹⁵.

В целом советская и российская практика обеспечения надёжности электроснабжения потребителей является показательной, несмотря на существование некоторых отрицательных моментов. Например, в нормативных документах, регулирующих проектирование объектов электроснабжения, нередко отсутствуют требования к особым условиям эксплуатации энергетического оборудования. К тому же отечественная промышленность просто не производит оборудования, например, для северных условий, где значение внешней температуры нередко ниже расчетных величин. В таких ситуациях проектировщики в частном порядке решают возникшие вопросы с заказчиком и заводом – изготовителем оборудования и согласовывают локальные решения, которые не гарантируют преодоления всех возникших проблем при эксплуатации.

¹⁴ См. также Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2004 г. № 854 (с изменениями от 30.01.2021 № 86) «Об утверждении правил оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике».

¹⁵ Постановление Правительства РФ от 13 августа 2018 г. № 937 (с изменениями и дополнениями) «Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».

Считаем, что на решение этих проблем в современных условиях необходимо направить дополнительные усилия всех заинтересованных сторон и своевременно разрабатывать необходимые стандарты по проектированию и производству электротехнической продукции.

Конечно же, в России имеются изолированные энергосистемы (Чукотский автономный округ, Камчатский край, Сахалинская и Магаданская области, Норильско-Таймырский и Николаевский энергорайоны, энергосистема северной части Республики Саха (Якутия)). Нормы проектирования, в том числе по обеспечению надёжности, для этих энергосистем такие же, как и для ЕЭС России, в каждом случае – с учетом погодно-климатических особенностей.

Если сопоставить отечественный опыт обеспечения надёжности электроснабжения и опыт в штате Техас, то можно заключить, что в России, во-первых, по сравнению с США применяются единые стандарты по учету надёжности при управлении развитием и функционированием ЭЭС, что, на наш взгляд, является ее несомненным преимуществом, во-вторых, ни в России, ни в Техасе *практику* обеспечения надёжности нельзя признать совершенной, у каждой из них есть свои недостатки, требующие устранения.

Что можно было сделать в Техасе?

Ситуация, сложившаяся в Техасе, к сожалению, может повторяться и в других регионах мира при отсутствии реакции на преподнесенные уроки прошлого. При этом следует сказать, что регионы с холодным климатом гораздо больше приспособлены к выживанию в условиях экстремальных природных эксцессов. К этому их привела жизненная важность обеспечения надежного топливо- и энергоснабжения потребителей в суровых условиях. Тем не менее уроки Техаса чрезвычайно важны и актуальны, и их обязаны учитывать руководители стран и регионов, несущие ответственность перед своими гражданами за надежное обеспечение энергоресурсами требуемого качества.

На протяжении всей истории энергосистема Техаса развивалась под влиянием факторов, связанных с желанием крупного бизнеса управлять ею по своему усмотрению, без оглядки на рекомендации федеральных и местных органов власти и географическое расположение региона. Считаем, что

для системного решения проблемы повышения надёжности топливо- и энергоснабжения в регионе необходимо, во-первых, ужесточить нормативные требования по проектированию развития энергетических систем с детальной проработкой вопросов резервирования, во-вторых, обеспечить усиление межсистемных связей с энергосетями соседних штатов; в-третьих, разработать четкие инструкции проведения мероприятий для потребителей, включая население, при объявлении чрезвычайной ситуации.

В числе конкретных мер повышения надёжности топливо- и энергоснабжения можно назвать следующие.

В газоснабжающей системе. Учитывая сложившийся опыт с периодическими похолоданиями, необходимо по примеру более холодных регионов обеспечить покрытие основных элементов, подверженных обмерзанию, на оголовках газовых скважин материалом, препятствующим обмерзанию и образованию льда внутри конструкций. Непосредственно на газовых месторождениях нормативно предусмотреть в определённые периоды осушку газа до значительно более низкой температуры точки росы.

В водоснабжающей системе все магистральные и распределительные сети населенных пунктов штата должны быть утеплены на случай резкого похолодания (возможно, с применением системы греющих кабелей), либо заглублены до отметок, превышающих глубину промерзания грунтов.

В электроэнергетической системе следует как минимум добиться реализации тех предложений, которые были разработаны по итогам кризисов 1989 и 2011 гг.¹⁶:

1) привлечь все энергокомпании ежегодно до наступления холодов к проведению проверки оборудования на предмет готовности к работе в «зимних условиях»;

2) все инженерные сети должны поддерживать целостность изоляции и системы обогрева в надлежащем рабочем состоянии, а также проводить профилактическое обслуживание систем управления энергоблоками и оборудования, необходимого для работы в холодную погоду;

¹⁶ Report on outages and curtailments during the Southwest cold weather event of February 1–5, 2011: Causes and recommendations / Prepared by the Staffs of the Federal Energy Regulatory Commission and the North American Electric Reliability Corporation, August 2011. URL: <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/08-16-11-report.pdf> (дата обращения: 30.05.2021)

3) привлечь энергокомпании к проведению дополнительных программ обучения для персонала по процедурам действий в условиях аварийной холодной погоды, включая периодические учения;

4) технический персонал PUCT должен изменить процедуры проверки CCN (Certificates of Convenience and Necessity) электростанций, включив в них проверку надежности электростанций в неблагоприятных погодных условиях. Особый интерес представляет выбор подходящего диапазона расчетных температур для выбора площадки электростанции;

5) целесообразно определить потребителей электроэнергии, ответственных за обеспечение функционирования важнейших объектов, а также потребителей с наибольшим ущербом в случае отключения электроэнергии, и разработать план повышения уровня надёжности их электроснабжения с местным резервированием.

Заключение

Проанализировав причины и последствия аварии в энергетическом секторе Техаса в феврале 2021 г., мы считаем, что обвинения в ненадежности, звучащие в адрес возобновляемой энергетики, в том числе ветровой и солнечной генерации, не совсем справедливы. Энергетический коллапс произошел по многим причинам: это и природные, и экономические, и организационно-правовые.

В более холодных регионах, к примеру, лопасти ветрогенераторов вполне успешно работают в зимнее время. Они оснащаются подогревом для плавки образующейся наледи, основные элементы покрываются материалами, препятствующими обмерзанию и образованию льда. Если бы это было сделано в Техасе, значительная часть негативных проявлений случившегося похолодания была бы предотвращена. Однако такие меры увеличили бы себестоимость производства энергии и привели к росту тарифов (полагаем, ликвидация последствий аварии и энергосистеме, и домохозяйствам обойдется гораздо дороже полученной в результате экономии).

Поскольку подобное негативное сочетание природных факторов в южных районах Техаса бывает сравнительно редко, энергетические компании, похоже, до сих пор предпочитали

не принимать его во внимание, хотя Сенат штата еще в 2011 г. принял закон, предписывающий PUCT подготовить отчет о готовности к чрезвычайным погодным условиям, проанализировать имеющиеся планы действий в чрезвычайных ситуациях и рекомендовать улучшения планов для обеспечения надежности электроснабжения.

В результате халатного отношения к вопросу учета особых факторов при проектировании и эксплуатации энергосистемы последствия оказались катастрофическими, вплоть до потерь среди населения.

Очевидно, что доверять регулирование деятельности такой важнейшей жизнеобеспечивающей инфраструктуры, как энергосистема, чисто рыночным механизмам нельзя. Для обеспечения их надёжного и сбалансированного функционирования в различных условиях, включая экстремальные, справедливого распределения рисков, необходимо достаточно жёсткое регулирование. Фактическое отсутствие такого регулирования привело к череде повторяющихся энергетических кризисов в Техасе.

Литература/ References

Коласс Р., Паркер К. Измерение влажности природного газа. 2003. URL: http://gazanaliz.ru/articles/Michell_Instruments_2003/Michell_Instruments.html (дата обращения: 30.03.2021).

Colass, R., Parker, K. (2003). Measuring the moisture content of natural gas. *Izmereniye vlazhnosti prirodnogo gaza*. (In Russ.) Available at: http://gazanaliz.ru/articles/Michell_Instruments_2003/Michell_Instruments.html (accessed 30.03.2021). (In Russ.).

Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / Отв. ред. Н.И. Воропай и Г.Ф. Ковалев. М.: ИД «Энергия», 2013.

The concept of ensuring reliability in the electric power industry. (2013). Resp. editors N.I. Voropai and G.F. Kovalev. Moscow. Publishing House "Energiya". (In Russ.).

Asmelash, L. (2021). Why water is a huge issue for Texas right now. CNN. Available at: <https://edition.cnn.com/2021/02/17/us/texas-winter-storm-water-trnd/index.html> (accessed 30.03.2021).

Balasta, S., Munawar, A. (2021). Fallout from Texas energy crisis; lessons of political battles over pipelines. S&P Global Market Intelligence. Available at: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/fallout-from-texas-energy-crisis-lessons-of-political-battles-over-pipelines-63033569> (accessed 30.03.2021).

Bullin, J. A., Dustman, T. Practical hydrocarbon dew point specification. Bryan Research & Engineering. Available at: <https://www.bre.com/PDF/Practical->

Hydrocarbon-Dew-Point-Specification-for-Natural-Gas-Transmission-Lines.pdf (accessed 30.03.2021).

Healy, J., Fausset, R., Dobbins, J. (2021). Cracked pipes, frozen wells, offline treatment plants: A Texas water crisis. The New York Times, Available at: <https://www.nytimes.com/2021/02/18/us/texas-water-crisis-winter-storm.html> (accessed 30.03.2021).

Lloyd, R. (2021). Massive power failure could finally cause Texas to connect with the Nation's Power Grids. Scientific American. February 19.

Статья поступила 31.03.2021

Статья принята к публикации 28.07.2021

Для цитирования: Воронай Н.И., Крупенёв Д.С., Подковальников С.В., Сендеров С.М. Блэкаут в штате Техас, США: анализ и некоторые выводы// ЭКО. 2021. № 9. С. 125–143. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-9-125-143

For citation: Voropai, N.I., Krupenev, D.S., Podkovalnikov, S.V., Senderov, S.M. (2021). Blackout in Texas, USA: Analysis and Some Conclusions. *ECO*. No. 9. Pp. 125–143. (In Russ.) DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-9-125-143

Summary

Voropai, N.I., Corresponding Member of RAS, Doct. Sci. (Techn.), Krupenev, D.S., Ph.D., Podkovalnikov, S.V., Doct. Sci. (Techn.), Senderov, S.M., Doct. Sci. (Techn.), Melentiev Institute of Energy Systems SB RAS, Irkutsk

Blackout in Texas, USA: Analysis and Some Conclusions

Abstract. The paper presents an analysis of the causes and consequences of the blackout at the power complex of Texas, USA, which occurred in February 2021. A sharp extreme cold snap led to the failure of a large number of infrastructure facilities for electricity, gas and water supply. Due to the direct technological interconnections, failures of some systems exacerbated the consequences for others. The analysis of the situation showed that there are gaps in the legal field of Texas, which, together with other factors, led to negative consequences in February 2021, and may also aggravate such situations in the future. Based on the results of the analysis, the article proposes a set of primary technical and organizational measures that allow minimizing the negative consequences for energy systems exposed to extreme natural and climatic events.

Keywords: *electric power system; gas supply system; water supply system; blackout; legal regulation; natural and climatic phenomena; Texas*