

**Некоммерческое партнерство
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ
Единой энергетической системы»**

111 250, Москва, проезд Завода Серп и Молот,
дом 10, офис 608, Тел. (495) +7 495 012 60 07
E-mail: dtv@nts-ees.ru, <http://www.nts-ees.ru/>
ИНН 7717150757



Основана в 1724 году

**Российская Академия Наук
Секция по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по
системным исследованиям в энергетике**

УТВЕРЖДАЮ

Президент, Председатель
Научно-технической коллегии,
д.т.н., профессор

Н.Д. Рогалев

«04» июля 2025 г.

ПРОТОКОЛ № 10

совместного заседания Секций «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы»,
«Гидроэлектростанции, гибридные энергетические комплексы и возобновляемые
источники энергии» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике

19 июня 2025 г.

г. Москва

Присутствовали: члены секции «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» и
«Гидроэлектростанции, гибридные энергетические комплексы и возобновляемые
источники энергии» НП «НТС ЕЭС», представители ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»,
ФГБУН «ИНЭИ РАН», ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», АО «НТЦ ФСК ЕЭС»,
Электроэнергетического совета стран СНГ, Комитет ВИЭ РосСНИО, ГБОУ ВО
«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,
ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический университет», ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина», ФГБОУ ВО
«Сибирский федеральный университет», ФГАОУ ВО «Национальный

исследовательский Томский политехнический университет», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», АНО «НИЦ-«АТМОГРАФ», ООО НПП «ЭКРА», ООО «РТСофт-СГ» и др., всего 47 человек.

Со вступительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В.

Во вступительном слове было отмечено, что на территории России осуществляется массовое строительство ветровых электростанций (ВЭС). На текущий момент по итогам конкурсного отбора инвестиционных проектов строительства объектов на основе ВИЭ право реализации проектов по ДПМ ВИЭ получила ПАО «Форвард Энерго» с проектами ВЭС суммарной мощностью 250 МВт в Пензенской области. В ближайшее время планируется проведение конкурсного отбора инвестиционных проектов в ОЭС Востока, где планируется ввод ВЭС суммарной мощностью 600 МВт. Такой объем согласовало Минэнерго России. Правительственная комиссия по развитию электроэнергетики в конце апреля 2025 г. одобрила проведение отбора проектов ВИЭ на Дальнем Востоке в объеме до 1,7 ГВт. В соответствии с генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики до 2042 г. (утверждена распоряжением Правительства РФ от 30 декабря 2024 г. №4153-р) ежегодно должно вводиться около 900 МВт электростанций на основе ВИЭ. Некоторое замедление с вводом новых ВЭС обусловлено сложностью производства отдельных элементов для современных ветроэнергетических установок (ВЭУ). Однако это время следует использовать для анализа практического опыта эксплуатации ВЭС и решения множества актуальных вопросов научным сообществом. В настоящее время АО «СО ЕЭС» активно развивают систему прогнозирования выдачи мощности ВЭС. Ошибки прогнозирования отечественных программных комплексов для краткосрочного и оперативного прогнозирования пока достаточно высокие, что требует совершенствования моделей, повышения точности исходной информации, а также внедрения на ВЭС современных измерительных комплексов. Анализ опыта эксплуатации действующих ВЭС позволяет выявить области отставания от достижений других стран, а также усовершенствовать отечественные подходы как к проектированию и строительству, так и к эксплуатации ВЭС. В докладе будет рассмотрен один из таких вопросов, который является крайне важным с точки зрения правильного проектирования ВЭС.

С докладом **«Разработка системы автоматизированного расчета аэродинамического затенения ВЭС с учетом влияния различных факторов»** выступили Игнатьев Евгений Витальевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры

«Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» (ГВИЭ) НИУ «МЭИ» и Корнев Дмитрий Александрович – директор Научно-исследовательского института проектирования НИУ «МГСУ» (соискатель кафедры ГВИЭ НИУ «МЭИ»).

Основные положения доклада приведены ниже. Презентация доклада прилагается (**Приложение 1**).

1. Доклад посвящен разработке автоматизированной системы расчёта аэродинамического затенения ветроэнергетических установок (ВЭУ) ветровых электростанций (ВЭС). Учёт аэродинамического затенения необходим в процессе проектирования и эксплуатации ВЭС для оценки следующих негативных факторов, влияющих на их работу:

- снижение выработки электрической мощности и энергии, которое может достигать 20% и более для наиболее затененных ВЭУ в плотных массивах;
- повышенная турбулентность, увеличивающая динамические нагрузки и физический износ ВЭУ;
- нарушение равномерности выработки электрической мощности по территории площадки ВЭС, которое вызывает несоответствие загрузки оборудования схемы электрических соединений проектным режимам;
- влияние на прогнозирование выдачи мощности ВЭС.

2. Подробно описана методика, используемая в разработанной системе расчета аэродинамического затенения ВЭС, включает три основных этапа:

- построение карты аэродинамического затенения ВЭС (т.н. Wake Map);
- расчёт входных скоростей ветра на каждой ВЭУ с учётом затенения;
- расчёт рядов выдачи мощности для каждой ВЭУ, на базе которых определяется совокупный ряд выдачи мощности ВЭС в целом и/или объемов выработки электрической энергии за рассматриваемый период.

3. Описана методика построения карты аэродинамического затенения ВЭС (Wake Map), реализация которой осуществляется путём анализа взаимного расположения ВЭУ на площадке ВЭС и определения зон влияния спутных струй, образующихся при прохождении невозмущенного ветрового потока через ометаемую площадь ветрового колеса затеняющих ВЭУ, с учётом направления ветра и геометрического перекрытия ометаемых площадей ветровых колес.

4. Выполнен обзор используемых в проектной инженерной практике моделей спутной струи ВЭУ, необходимых для построения карт аэродинамического затенения ВЭС и расчета входных скоростей ветра на каждой ВЭУ. Подробно рассмотрены:

- эмпирическая модель Н.О. Йенсена и её практическая имплементация для проведения расчетов аэродинамического затенения И. Катича;

- численная модель на основе осредненных Рейнольдсом уравнений Навье-Стокса (RANS) Дж.Ф. Эйнсли;
- гибридная динамическая модель Г.К. Ларсена, основанная на решении уравнения турбулентного пограничного слоя Прандтля.

Для моделей Эйнсли и Ларсена также рассмотрены необходимые в них модели определения турбулентности в невозмущенном ветровом потоке и добавленной турбулентности в спутной струе, а также существующие практические имплементации для инженерных расчетов (суперпозиции спутных струй, «mini-wake»). Дополнительно к рассмотренным была предложена авторская модель имплементации, объединяющая подход И. Катича с методом Монте-Карло.

5. Дополнительно для подробно рассмотрены разработанные докладчиками суб-методики определения параметров, используемых в расчетах аэродинамического затенения: шероховатости подстилающей поверхности и характеристики коэффициента тяги ВЭУ.

6. Разработанная суб-методика расчета шероховатости подстилающей поверхности (Суб-модель №1) базируется на использовании данных ветроизмерительных комплексов (ВИК), устанавливаемых на площадках проектируемых ВЭС на этапе ветромониторинга, и использует два подхода к определению шероховатости:

- логарифмический профиль скорости ветра (уравнение Прандтля);
- интенсивность турбулентности с использованием стандартных эмпирических констант.

Методика реализована в виде программы на языке Matlab, что обеспечивает автоматизацию расчётов и подготовку данных, включая синхронизацию временных рядов и фильтрацию аномалий. Показаны результаты верификации расчётной модели шероховатости, которая осуществляется путём построения регрессионных зависимостей между расчётными величинами шероховатости с разными интервалами осреднения и метеорологическими параметрами (например, высотой снежного покрова), измеренными на метеостанциях-аналогах. Результаты верификации показали низкую эффективность подхода, использующего определение величины шероховатости в зависимости от типа поверхности, а также положений датских методических указаний DS472 по расчету интенсивности турбулентности невозмущенного ветрового потока для площадок ВЭС на территории России.

7. Разработанная суб-методика численного расчета характеристики коэффициента тяги ВЭУ (Суб-модель №2), необходимая в условиях ограниченного доступа к таким характеристикам, базируется на теории импульса (BEM/BET и её модификациях) и использует технические характеристики ВЭУ,

предоставляемые их производителями (мощностную характеристику, диаметр ветроколеса, состав элементов и их КПД). Разработанная методика реализована авторами программно в среде Matlab (программа WTCurves), а её работоспособность и эффективность доказана посредством верификации с использованием существующих подходов к оценке точности моделирования. Для этого были использованы материалы из открытых источников: коэффициент тяги малых ВЭУ и крупных оффшорных ВЭУ.

8. Докладчиками обозначена необходимость учета фактических метеорологических условий на площадке ВЭС при расчете выдаваемой мощности с использованием паспортных мощностных характеристик ВЭУ, для чего должны быть использованы существующие подходы.

9. Разработанная система расчета аэродинамического затенения ВЭС реализована в виде браузерного веб-сервиса Wind Energy PRO, написанного на языке php с использованием нескольких интегрированных библиотек, и имеет дополнительный функционал, облегчающий моделирование исходных метеорологических данных и повторяющий базовый функционал основных САПР в области ветроэнергетики WindPRO и WAsP. Приведено сравнение, разработанного программного обеспечения с ближайшими зарубежными аналогами – САПР для ветроэнергетических расчетов WindPRO (разработанного датской компанией EMD International). Показаны преимущества использования разработанного сервиса, заключающиеся в более низкой стоимости, простоте обучения работы с сервисом и отсутствии ограничений, связанных с лицензионным доступом.

10. Представлена верификация расчетов, выполненных с использованием разработанной системы, на примере Адыгейской ВЭС. В рамках верификации проведены:

- анализ эксплуатационного режима работы ВЭС по стадиям строительства за 2021 год;
- моделирование исходных ветровых данных в моделях горизонтальной и вертикальной интерполяции скорости ветра, разработанных сотрудниками кафедры Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ»;
- моделирование шероховатости подстилающей поверхности на площадке ВЭС с верификацией результатов на основании корреляционной зависимости с высотой снежного покрова по Суб-модели №1 и моделирование характеристики коэффициента тяги ВЭУ модели L100-2.5 MW, установленной на ВЭС, с использованием программы WTCurves по Суб-модели №2;
- с помощью разработанного докладчиками сервиса Wind Energy PRO рассчитаны ветровой кадастр в точке ВЭС, определен режим работы одиночной ВЭУ и оценка выдачи мощности ВЭС с учетом аэродинамического затенения

для нескольких вариантов (учет фактической плотности воздуха относительно атмосферного давления и температуры на площадке; учет внутригодового изменения шероховатости подстилающей поверхности на площадке ВЭС);

– оценка качества расчета выдачи мощности ВЭС с учетом аэродинамического затенения для нескольких вариантов на основании существующих метрик точности прогнозирования выдачи мощности ВЭС.

11. Результаты верификации разработанной интегрированной методики расчета аэродинамического затенения ВЭС и апробации её программной имплементации выявили, что систематическая ошибка расчетов выдачи мощности в лучших из вариантов не превышает 0,5%, что соответствует отраслевым требованиям к P50 (менее 2%), что делает её крайне эффективной для применения на этапе технико-экономического обоснования проектов ВЭС. Форма расчетного почасового профиля выработки электроэнергии передается с более низкой, но удовлетворительной точностью (RMSE около 20%, коэффициент детерминации около 0,5). При использовании этой методики в качестве физического блока в гибридных системах прогнозирования выработки ВЭС совместно со статистическими моделями мощностных характеристик ВЭУ и моделированием прогнозных ветровых данных с использованием более прогрессивных моделей (SARIMAX, LS-SVM, нейросетей LSTM, GRU и др.) возможно ожидать более точных результатов.

12. Представлены направления дальнейших исследований:

– использованием разработанной методики в качестве физического блока в гибридных системах среднесрочного прогнозирования выработки ВЭС (36 часов) для участия в отборах на рынке на сутки вперед;

– увеличение числа используемых моделей спутной струи и добавленной турбулентности.

В обсуждении доклада и прениях выступили:

Николаев В.Г. (АНО «НИЦ-«АТМОГРАФ»), Тягунов М.Г. (ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»), Ачитаев А.А. (ПАО «РусГидро»), Малинин Н.К. (ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»), Вольный В.С. (ФГБУН «ИНЭИ РАН»), Илюшин П.В. (НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»), Шихин В.А. (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), Шеповалова О.В. (ООО «ВИЭСХ-ВИЭ»).

Николаев В.Г. – Директор Автономной некоммерческой организации «Научно-информационный центр – «АТМОГРАФ», д.т.н.

Отметил высокую значимость и большой объем проделанной работы.

Задал следующие вопросы:

1. Какие дальнейшие шаги авторы видят в этом направлении? Что еще

необходимо исследовать?

2. Как необходимо рассчитывать мощность всей ВЭС с учётом аэродинамического затенения?

3. Возможно ли использовать только метеостанцию без ветро-измерительного комплекса для решения поставленной задачи?

4. До какой высоты учитывать логарифмическую погрешность?

5. При какой «скученности» ВЭУ начинает проявляться эффект «леса»?

6. Учитывается ли в модели аэрация городов?

7. Какой язык программирования использовался при создании модели прогнозирования мощности ВЭС?

8. Учитывалась ли в модели погрешности их паспортных данных ВЭУ?

Тягунов М.Г. – Председатель секции «Гидроэлектростанции, гибридные энергетические комплексы и возобновляемые источники энергии» НП «НТС ЕЭС», профессор кафедры «Гидроэнергетики и возобновляемые источники» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», д.т.н., профессор.

Отметил необходимость оценок точности используемых моделей для прогнозирования выработки ВЭС.

Обратил внимание на важность использования совместно с ВЭС систем накопления электроэнергии.

Задал следующие вопросы:

1. Каким образом связана ошибка во входных данных с ошибкой в выходных данных?

2. Как долго необходимо осуществлять сбор данных с ВЭС?

3. Зависит ли точность модели от длины ряда замеров?

4. Насколько достоверны собранные данные, которые были использованы в процессе верификации разработанной модели?

5. Зависит ли качество моделирования прогнозирования выработки ВЭС от ее функционирования в составе ЕЭС России или изолировано от нее?

Ачитаев А.А. – Ведущий эксперт Управления развития гидроэнергетики Департамента инноваций ПАО «РусГидро», к.т.н., доцент.

Отметил масштабность и актуальность проделанной работы.

Задал следующие вопросы:

1. Учитывался в аэродинамических кодах спутной струи эффект Кармана?

2. Какая методика прогнозирования выработки ВЭС использовалась при проведении исследования?

Малинин Н.К. – Независимый эксперт, д.т.н., профессор.

Задал следующие вопросы:

1. Используемые данные о потерях выработки электроэнергии ВЭС составляют от 2% до 20% в зависимости от массива ВЭУ получены из зарубежной литературы или отечественных источников?
2. Каким массивам ВЭУ соответствуют 2% и 20%?
3. Имеются ли отечественные разработки аэродинамических моделей ВЭУ?

Вольный В.С. – Аспирант ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук».

Задал следующие вопросы:

1. Какая модель прогнозирования использовалась при расчете выработки ВЭС?
2. В связи с чем ометаемая площадь зарубежными специалистами принималась равной 2,52, а в докладе – 0,7?

Илюшин П.В. – Председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н.

Задал следующие вопросы:

1. В исследовании рассматривалось прогнозирование выработки электрической энергии или величины выдаваемой мощности ВЭС?
2. Рассматривалось ли в исследовании использование импульсных лидаров, радаров или содаров для повышения точности прогнозирования выдачи мощности ВЭС? Такие измерительные комплексы широко используются в других странах и показали свою эффективность.

Отметил необходимость проведения научных исследований в части определения оптимального количества импульсных лидаров для повышения точности прогнозирования выдачи мощности ВЭС.

Обратил внимание, что современные исследования в области прогнозирования выдачи мощности ВЭС основаны на использовании прогнозов на уровне единичных ВЭУ, групп ВЭУ, а также последующим агрегированием полученных данных для ВЭС в целом.

Отметил необходимость применения рассмотренной в докладе методики прогнозирования мощности ВЭС для анализа фактических данных мощности с действующих ВЭС. Это позволит уточнить методики прогнозирования.

Шихин В.А. – Руководитель научной группы кафедры Управления и интеллектуальных технологий ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», к.т.н., доцент.

Обратил внимание на отсутствие требований в отечественных нормативно-технических документах в области проектирования ВЭС по анализу аэродинамического затенения.

Задал вопрос о достоверности исходных данных в применяемых моделях.

Шеповалова О.В. – Генеральный директор ООО «ВИЭСХ-ВИЭ», к.т.н.

Обратила внимание на сложности согласования изменений в НТД в части ветроэнергетики и что в существующих НТД изложены подходы к оценке влияния аэродинамического затенения на выработку ВЭС.

Заслушав выступления экспертов по результатам дискуссии совместное заседание Секций «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», «Гидроэлектростанции, гибридные энергетические комплексы и возобновляемые источники энергии» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **отмечает:**

1. Важность и актуальность поднятых в докладе проблемных вопросов в области проектирования ВЭС, работающих в ЕЭС России и в зоне децентрализованного энергоснабжения.

2. Необходимость корректной оценки влияния аэродинамического затенения на выработку электрической мощности и энергии ВЭС для улучшения оценки показателей, определяемых на этапе технико-экономического обоснования проектов.

3. Необходимость использования современных российских САПР для проведения ветроэнергетических расчетов для улучшения показателей эффективности процесса проектирования в ветроэнергетике, а также снижения специфических издержек, связанных с использованием иностранного программного обеспечения.

Совместное заседание Секций «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», «Гидроэлектростанции, гибридные энергетические комплексы и возобновляемые источники энергии» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **решило:**

1. Рекомендовать авторам продолжить исследования в области расчета влияния аэродинамического затенения на выдачу мощности и выработку электроэнергии ВЭС с проработкой следующих вопросов:

– при оценке показателей качества моделирования рядов активной мощности ВЭС следует проводить оценку точности определения и моделирования используемых ветровых и иных метеорологических данных, а также учитывать точность определения мощностных характеристик ВЭУ, предоставляемых их производителями;

– провести оценку влияния точности учета аэродинамического затенения на величину показателей экономической эффективности проектируемых ВЭС на основе доступных данных технико-экономического обоснования существующих проектов ВЭС;

– при моделировании характеристик спутной струи ВЭУ следует учитывать эффект вихревой дорожки Кармана, который опускается в простых эмпирических моделях спутной струи, используемых в инженерных расчетах (например, в модели Йенсена и её имплементации Катича);

– при оценке метрик качества прогнозов использовать другой набор метрик, не включающий коэффициент детерминации, но включающий среднюю абсолютную ошибку в процентах (MAPE);

– провести исследование возможности использования разработанной методики микропрогнозирования для обеспечения участия ВЭС в балансирующем рынке;

– провести исследование влияния аэродинамического затенения на системы накопления электроэнергии, работающие совместно с ВЭС;

– провести исследование специфических аэродинамических эффектов, возникающих при аэродинамическом взаимодействии ВЭУ (синхронизация скорости вращения ветровых колес затеняющей и затененной ВЭУ, повышение коэффициента использования ветрового потока для ВЭУ с двумя ветровыми колесами и др.).

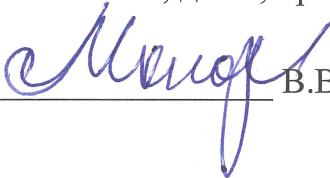
2. Рекомендовать компаниям и организациям различных форм собственности, осуществляющим проектирование, строительство и эксплуатацию ВЭС в России, ознакомиться с результатами исследования, представленными в докладе, и рассмотреть возможность учета разработанного методического подхода при проектировании новых ВЭС.

3. Рекомендовать Подкомитету ПК-5 «Распределенная генерация (включая ВИЭ)» ТК 016 «Электроэнергетика» Росстандарта рассмотреть возможность обновления ГОСТ Р 54418.1-2023 (Приложение К), в соответствии с предложениями, изложенными в докладе.

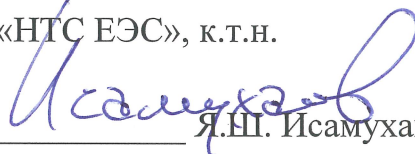
С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических

систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил, что корректный учёт аэродинамического затенения позволяет повысить точность прогнозирования мощности ВЭС, что способствует улучшению их технико-экономических показателей. Внесение необходимых изменений в действующие НТД позволит увеличить прибыль для собственников ВЭС, а также обеспечить надежное функционирование ВЭС в составе ЕЭС России. Отмечена целесообразность представления результатов диссертационных исследований аспирантов (докторантов) на заседаниях профильных секций НП «НТС ЕЭС» на промежуточных этапах с целью своевременного учета замечаний, предложений и рекомендаций по продолжению и завершению диссертационного исследования и представления диссертаций к защите.

Первый заместитель Председателя
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор


В.В. Молодюк

Ученый секретарь
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.


Я.Н. Исамухамедов

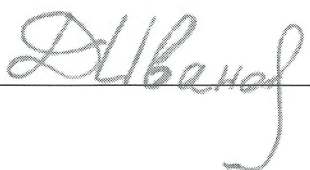
Председатель секции «АСРЭ и РЭР»
НП «НТС ЕЭС», ученый секретарь
Секции по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по системным
исследованиям в энергетике, д.т.н.


П.В. Илюшин

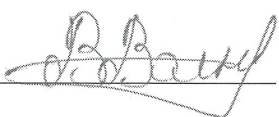
Председатель секции
«Гидроэлектростанции, ГЭК и
возобновляемые источники энергии»
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор


М.Г. Тягунов

Ученый секретарь секции
«Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные
энергоресурсы» НП «НТС ЕЭС», к.т.н.


Д.А. Ивановский

Ученый секретарь секции
«Гидроэлектростанции, ГЭК и
возобновляемые источники энергии»
НП «НТС ЕЭС»


В.С. Вольный