

**УДК 662.76:628.4:620.9**

Чесняк А.В., студент МЭТ-241

Тихомирова Т.И., к.т.н., доцент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.  
Шухова

Chesnyak AV, student MET-241

Tikhomirova TI, PhD, associate professor

V. G. Shukhov Belgorod State Technological University

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЕРЕВОДА ОБЪЕКТОВ  
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ НА ВОДОРОД И ВОДОРОД-ГАЗОВЫЕ  
СМЕСИ**

**ENVIRONMENTAL ASPECTS OF CONVERTING THERMAL POWER  
FACILITIES TO HYDROGEN AND HYDROGEN-NATURAL GAS  
BLENDS**

Переход мировой энергетики к низкоуглеродной модели является одним из ключевых направлений технологической трансформации XXI века. На фоне необходимости сокращения антропогенных выбросов парниковых газов и достижения углеродной нейтральности всё больше внимания уделяется водородным технологиям, способным изменить экологический баланс в энергетике. Особенно актуальным становится вопрос адаптации к этому переходу теплоэнергетики, поскольку она остаётся одной из наиболее углеродоёмких отраслей. Использование водорода и водородно-газовых смесей в теплоэнергетике связано с рядом очевидных экологических преимуществ: при сжигании водорода образуется только водяной пар и не выделяется углекислый газ, что делает данный путь логичным элементом процесса декарбонизации.

Процесс перехода к водородной энергетике нередко называют именно «декарбонизацией», и он уже получил официальную поддержку во многих развитых странах. Приняты программы стимулирования водородных технологий, в первую очередь направленные на производство так называемого «зелёного» водорода. Этот водород получают из воды методом электролиза, используя электроэнергию, вырабатываемую на основе возобновляемых источников — ветра, солнца и гидроэнергии [1]. Таким образом, при условии использования «чистой» электроэнергии процесс становится практически безуглеродным и обеспечивает реальное снижение совокупных выбросов. В ряде стран — Японии, Германии, Южной Кореи — уже формируются полноценные водородные кластеры, включающие производство, транспортировку и потребление водорода в энергетике и промышленности.

Однако экологический эффект от использования водорода не полностью ясен. Углеродные выбросы исчезают при сжигании водорода. Но есть другие процессы, которые требуют внимания. Водородное пламя горячее и горит быстрее, чем метан. Это увеличивает риск образования оксидов азота. Эксперименты показывают, что концентрация  $\text{NO}_x$  может расти в несколько раз, если не контролировать температуру горения. Поэтому водородное топливо не полностью безопасное. Важно учитывать все факторы, включая возможное увеличение азотных соединений в выбросах [2].

Одним из эффективных подходов к снижению экологических рисков является использование водородно-газовых смесей, в которых доля водорода не превышает 20–50%. Такой вариант позволяет сочетать преимущества низкого углеродного следа с контролируемыми параметрами горения. В последние годы ряд ведущих производителей энергетического оборудования разработали и испытали турбины, адаптированные для подобных смесей. Например, газовые турбины Ansaldo Energia H-класса (GT36) способны работать с газом, содержащим до 50% водорода, а установка AE94.3A F-класса — до 25%. Турбина 7HA от компании General Electric, оснащённая системой сжигания multi-tube (DLN2.6e), может использовать смесь природного газа и водорода с объёмной долей водорода до 50%. Датская компания OPRA предлагает систему, допускающую сжигание 100% водорода, а турбина M1A-17 от Kawasaki Heavy Industries ещё в 2018 году продемонстрировала способность работать исключительно на водороде. Эти примеры наглядно показывают, что технологическая база для широкого внедрения водородных и водородно-газовых топлив уже существует, и основной вызов теперь смещается в сферу безопасности, инфраструктуры и экономики.

Происхождение водорода важно. Сейчас большинство водорода в мире делается из метана. Этот способ выпускает много  $\text{CO}_2$ . Такой водород называется «серым». Его использование не помогает сохранить климат. Оно просто переносит загрязнение из одной части экономики в другую. Есть и другие виды. «Синий» водород делается так, что часть  $\text{CO}_2$  улавливается и хранится. «Бирюзовый» водород получается из метана через пиролиз, и при этом образуется твердый углерод. Только «зелёный» водород, который делают на базе возобновляемой энергии, полностью помогает уменьшить выбросы. В этом случае важно развивать технологии электролиза и увеличивать использование чистой энергии. Эти шаги важны для защиты окружающей среды.

Несмотря на значительный потенциал, использование водорода сопровождается рядом недостатков и ограничений. Прежде всего — высокой стоимостью его производства и проблемами, связанными с хранением и транспортировкой. Водород обладает низкой плотностью, поэтому для его транспортировки необходимы специальные резервуары и

материалы, устойчивые к водородному охрупчиванию. Высокая диффузионная способность водорода повышает риск утечек, а широкий диапазон концентраций воспламенения делает его обращение потенциально опасным. В отличие от природного газа, водородное пламя бесцветно и практически невидимо, что усложняет визуальный контроль. Все эти факторы требуют создания новой инфраструктуры, включающей безопасные трубопроводы, датчики утечек, системы вентиляции и автоматического отключения.

Экологическая оценка перехода на водород должна учитывать весь цикл жизни. Это значит, от производства до использования. Если электролиз используют с электроэнергией с угольных или мазутных станций, то суммарные выбросы  $\text{CO}_2$  могут быть высокими. Они могут даже быть больше, чем у обычной теплоэнергетики. Поэтому важно использовать возобновляемую энергию и повышать эффективность. В будущем можно создать локальные системы [3]. В этих системах водород делают и используют на одной территории. Это снизит потери и повысит безопасность.

С точки зрения практической реализации в России переход на водород и водородно-газовые смеси рассматривается как постепенный процесс модернизации существующих мощностей. Наиболее реалистичный сценарий — использование смесей с низким содержанием водорода в газотурбинных и котельных установках. Пилотные проекты показывают, что техническая адаптация возможна без радикальной перестройки оборудования, однако требует совершенствования систем контроля выбросов. Особенно важно внедрить новые методы расчёта и мониторинга концентраций оксидов азота, так как традиционные эмпирические модели, разработанные для метана, не отражают особенностей водородного пламени. На этом направлении активно работают российские и зарубежные исследовательские центры, создавая базы данных и алгоритмы моделирования кинетики горения [4].

С экологической точки зрения переход на водород меняет структуру загрязнений: при устранении углеродной составляющей возрастает доля оксидов азота и водяного пара, который, хотя и не является загрязнителем, способен влиять на локальные климатические процессы. Повышенное содержание водяного пара в атмосфере может способствовать образованию облаков и изменению радиационного баланса, особенно в районах с высокой концентрацией теплоэнергетических объектов. Следовательно, экологические эффекты водородной энергетики должны анализироваться не только на уровне выбросов, но и в контексте климатического моделирования.

Отдельно следует отметить необходимость адаптации нормативно-правовой базы и системы экологического регулирования. В переходный период, когда на объектах теплоэнергетики используются различные

топливные смеси, важно разработать гибкие нормативы, учитывающие как углеродную, так и азотную составляющую выбросов. Это требует накопления экспериментальных данных, проведения испытаний на реальных объектах и совершенствования технологий селективного каталитического восстановления [5]. Современные системы мониторинга позволяют отслеживать состав дымовых газов в реальном времени, что создаёт условия для адаптивного управления процессом горения с минимизацией экологических последствий.

Наконец, нельзя не учитывать социально-экологическую сторону вопроса. Водород часто воспринимается как «опасное» топливо, что порождает настороженность в обществе. Поэтому информационная открытость, демонстрация реальных результатов и прозрачное обсуждение рисков становятся важнейшей частью стратегии внедрения. Успех водородного перехода зависит не только от инженерных решений, но и от уровня доверия между промышленностью, научным сообществом и обществом.

В целом перевод объектов теплоэнергетики на водород и водородно-газовые смеси представляет собой сложный, но перспективный путь к снижению экологической нагрузки. Потенциал сокращения выбросов углерода очевиден, но сопровождается новыми вызовами — ростом вероятности образования оксидов азота, необходимостью обеспечения безопасности и созданием инфраструктуры хранения и транспортировки. Эффективность и устойчивость водородного перехода возможны лишь при системном подходе, сочетающем технологические инновации, экологическое проектирование и грамотную организацию производственных процессов. Только при соблюдении этих условий водород сможет занять место реального инструмента декарбонизации теплоэнергетики, а не остаться лишь символом «чистой» энергетики будущего.

### Список литературы

1. Тихомирова Т.И., Щетинин Н.А. Экологические вопросы использования альтернативных источников энергии // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды: сб. докл. Междунар. научнотехн. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. — С. 135-137.
2. Исследование путей и темпов развития низкоуглеродной энергетики в России / А.А. Макаров, А.В. Кейко, В.А. Малахов и др.; под ред. А.А. Макарова. — М.: ИНЭИ РАН, 2022. — 138 с.
3. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. — М.: Наука, 1979. — 415 с.
4. Рабогашвили Е.В. Теплоэнергетика и окружающая среда / Е.В. Рабогашвили. — М.: Наука, 2003. — 312 с.

5. Кирильчук И. О. Подходы к совершенствованию расчета платы за негативное воздействие на окружающую среду // Наука Красноярья. 2019. — № 1. — С. 114-137.

### References

1. Tikhomirova T.I., Shchetinin N.A. Environmental issues of using alternative energy sources // Energy and resource saving environmentally friendly chemical-technological processes of environmental protection: collection of reports of the International Scientific and Technical Conference. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2015. — P. 135-137.

2. Study of ways and rates of development of low-carbon energy in Russia / A.A. Makarov, A.V. Keiko, V.A. Malakhov et al.; edited by A.A. Makarov. — M.: INEI RAN, 2022. — 138 p.

3. Melentiev L.A. System research in energy. Elements of theory, directions of development. — M.: Science, 1979. — 415 p.

4. Rabogashvili E.V. Thermal power engineering and environment / E.V. Rabogashvili. — M.: Science, 2003. — 312 p.

5. Kirilchuk I.O. Approaches to improving the calculation of payment for negative impact on the environment // Science of Krasnoyarye. 2019. — No. 1. — P. 114-137.