

RENWEX 2026

Круглый стол

«Опыт регионов и лучшие практики: кейсы энергосбережения в зеленой энергетике»

Ассоциация малой энергетики

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ**

Александр Козлов, e-mail: kozlov@isem.irk.ru,
к.т.н., заведующий лабораторией Термодинамики,
Отдел тепловых систем, Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН

Москва, 09.04.2026

Объемы образованных и утилизированных отходов в 2022 г.

Федеральный округ	Образование отходов, млн т	Утилизация отходов, млн т	Доля утилизированных отходов, %
ЦФО	267,7	116,5	43,5
СЗФО	526,3	94,3	17,9
ЮФО	38,6	23,8	61,7
СКФО	3,6	1,8	50,0
ПФО	129,7	73,1	56,4
УФО	454,2	212,4	46,8
СФО	5603,5	2803,5	50,0
ДФО	1993,6	781,6	39,2
РФ, всего	9017,3	4107,0	45,5

Экономическая эффективность pelletного производства

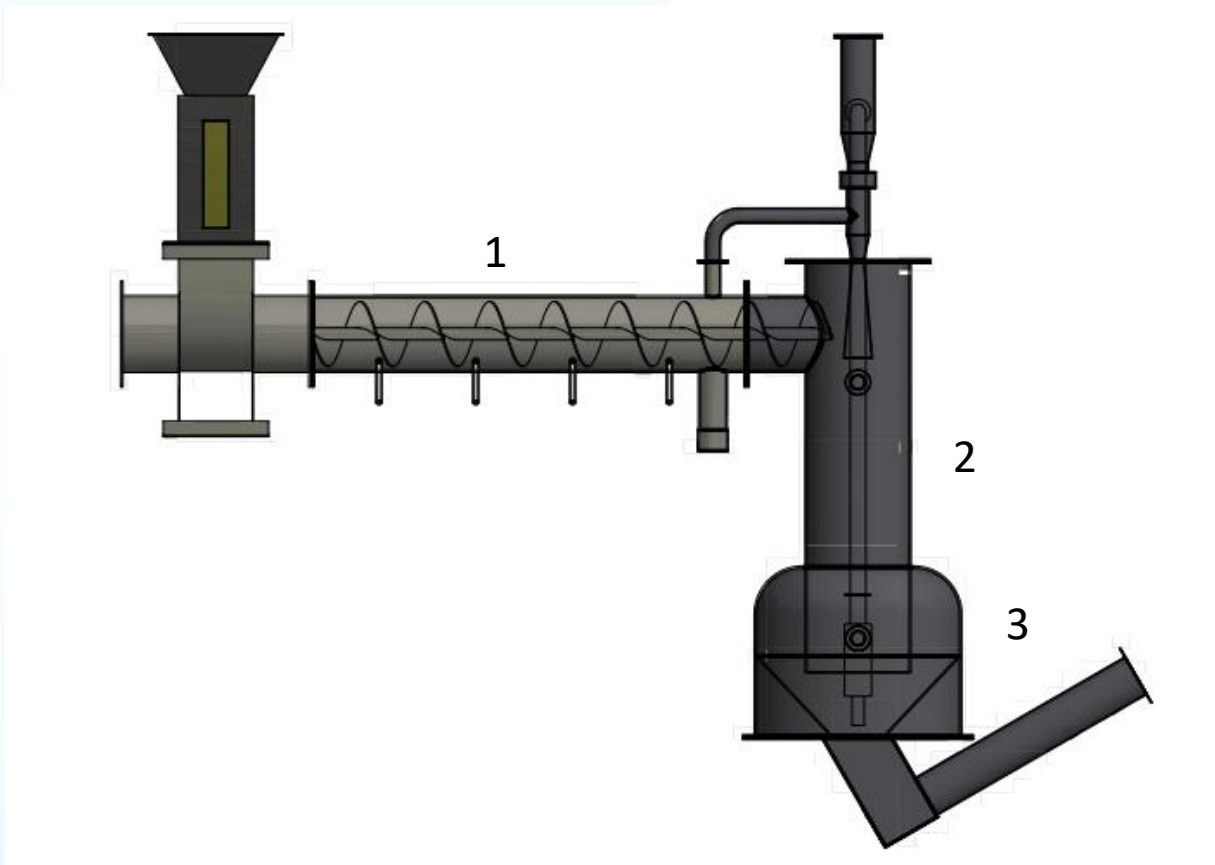
$$P = \frac{\sum_{t=1}^n (C_t + I_t) \cdot (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^n F_t \cdot (1 + r)^{-t}}$$

P – нормированная стоимость pellet, **C_t** – эксплуатационные затраты в год, млн руб.; **I_t** – капитальные затраты в год, млн руб.; **r** – ставка дисконтирования; **F** – количество произведенной продукции в год **t**, тыс. т; **n** – жизненный цикл производства, количество лет

Эксплуатационные затраты на производство топливных pellet, млн руб./год (4,5 тыс. т в год)

Статья расходов	Сырье для производства pellet		
	отходы ЛПК	отходы АПК	ТКО
Условно-постоянные, всего	11,7	11,5	13,8
- фонд оплаты труда	10,2	10,2	12,2
- амортизация	1,2	1	1,3
- налог на имущество	0,3	0,3	0,3
Переменные, всего	15,7	17,3	23,2
- сырье	10,2	13,2	17,6
- электроэнергия	3,0	2,1	3,0
- ремонт оборудования	0,9	0,8	1,0
- прочие расходы	1,6	1,3	1,7
Итого:	27,4	28,8	37,0
Себестоимость, тыс. руб/т	6,1/3,5	6,4/3,7	8,2/4,3

Многоступенчатый газогенератор: Принципиальная схема



Требования к современному газогенератору:

1. Высокий химический КПД ~95%;
2. Малоотходность;
3. Несложная конструкция, обеспечивающая минимизацию затрат и высокую надежность;
4. Универсальность технологии к топливной базе и требованиям потребителя.

1. Реактор пиролиза биомассы, 2. Реактор сгорания осмоленного пиролизного газа, 3. Реактор газификации биоугля

CFD моделирование многоступенчатого газогенератора

Математическое моделирование реактора пиролиза (первая ступень)

Движение газов через пористую среду

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left(\left(\mathbf{u}_1 \cdot \nabla \right) \frac{\mathbf{u}_1}{\varepsilon} \right) = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla \mathbf{u}_1 + (\nabla \mathbf{u}_1)^T) - \frac{2\mu}{3\varepsilon} (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) \mathbf{I} \right] - \left(\frac{\mu}{k} + \beta_F |\mathbf{u}_1| + \frac{Q_{br}}{\varepsilon^2} \right) \mathbf{u}_1 + \mathbf{F}$$
$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_1) = Q_{br}$$

Движение греющих газов

$$\rho ((\mathbf{u}_2 \cdot \nabla) \mathbf{u}_2) = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u}_2 + (\nabla \mathbf{u}_2)^T) - 2/3 \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}_2) \mathbf{I} \right] + \mathbf{F}$$
$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_2) = 0$$

Теплообмен

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k_{eff} \nabla T) = Q$$

Радиационная составляющая

$$Q = c_0 (T_2^4 - T_1^4)$$

Кинетическое уравнение

Исследование кинетики термохимической конверсии твердых ТОПЛИВ

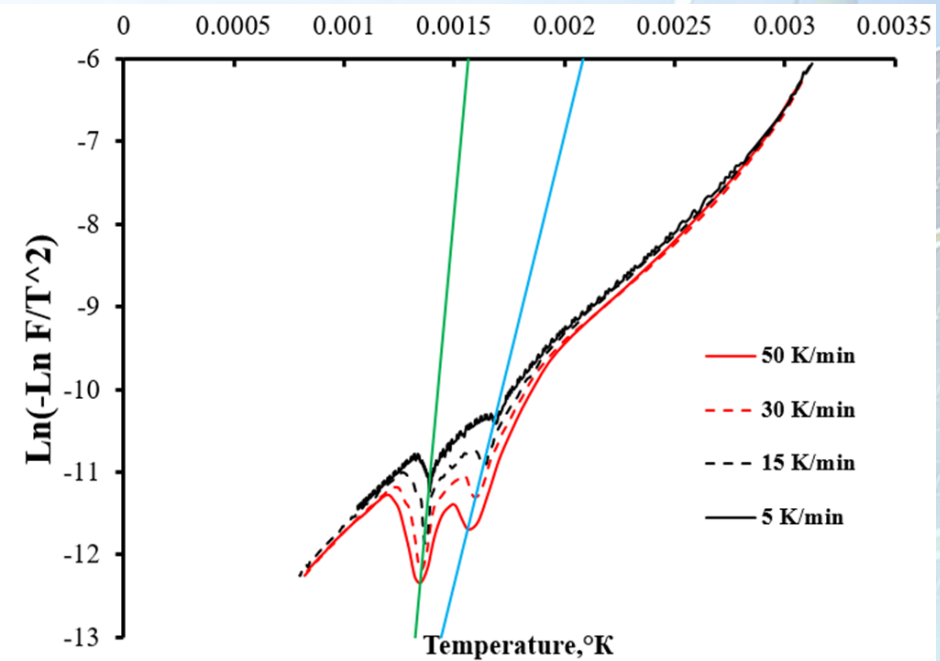
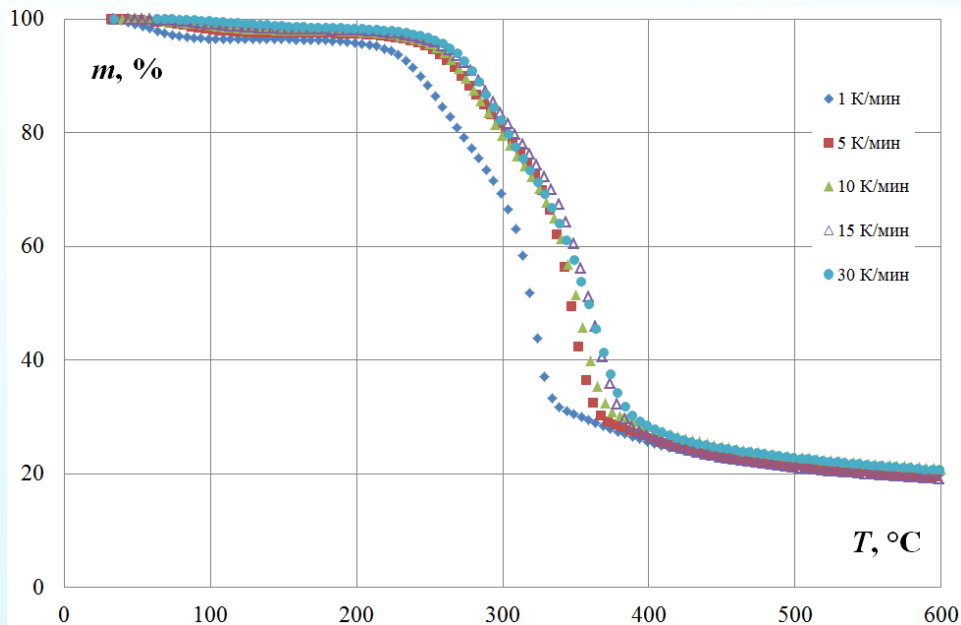


$$\ln \left[-\frac{1 - (1 - x)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] n > 1$$

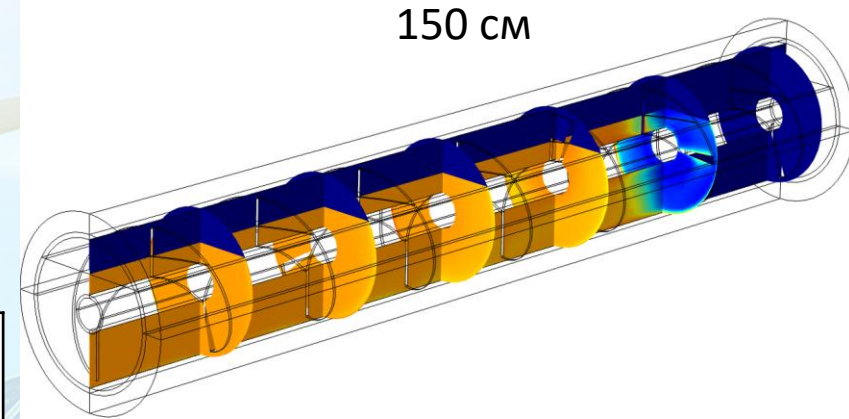
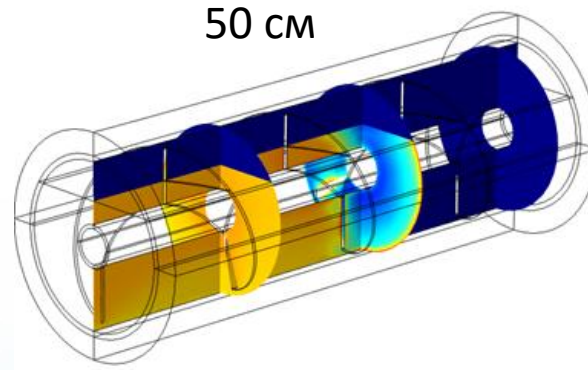
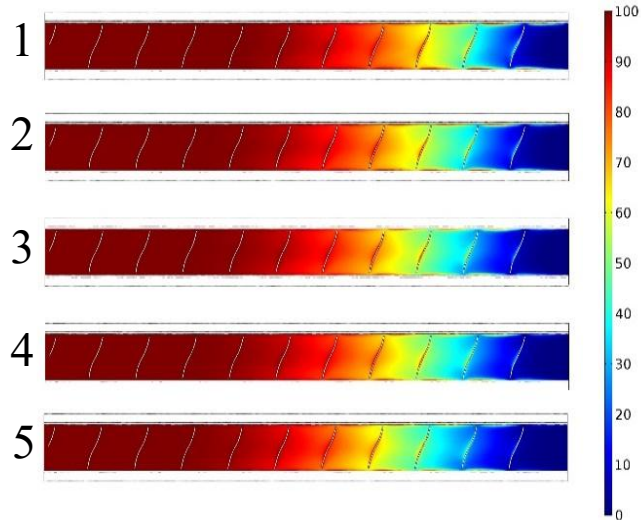
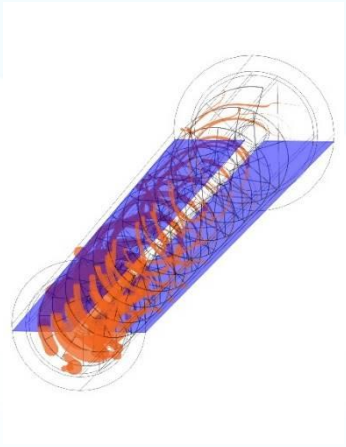
$$k = -\frac{E_a}{R}, \quad b = \ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \right]$$

$$f \left(\ln \left[-\frac{\ln F}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \right] - \frac{E_a}{RT} \right)$$

$$E_a = -kR, \quad A = \frac{\beta E_a e^b}{R}$$



Результаты моделирования реактора пиролиза

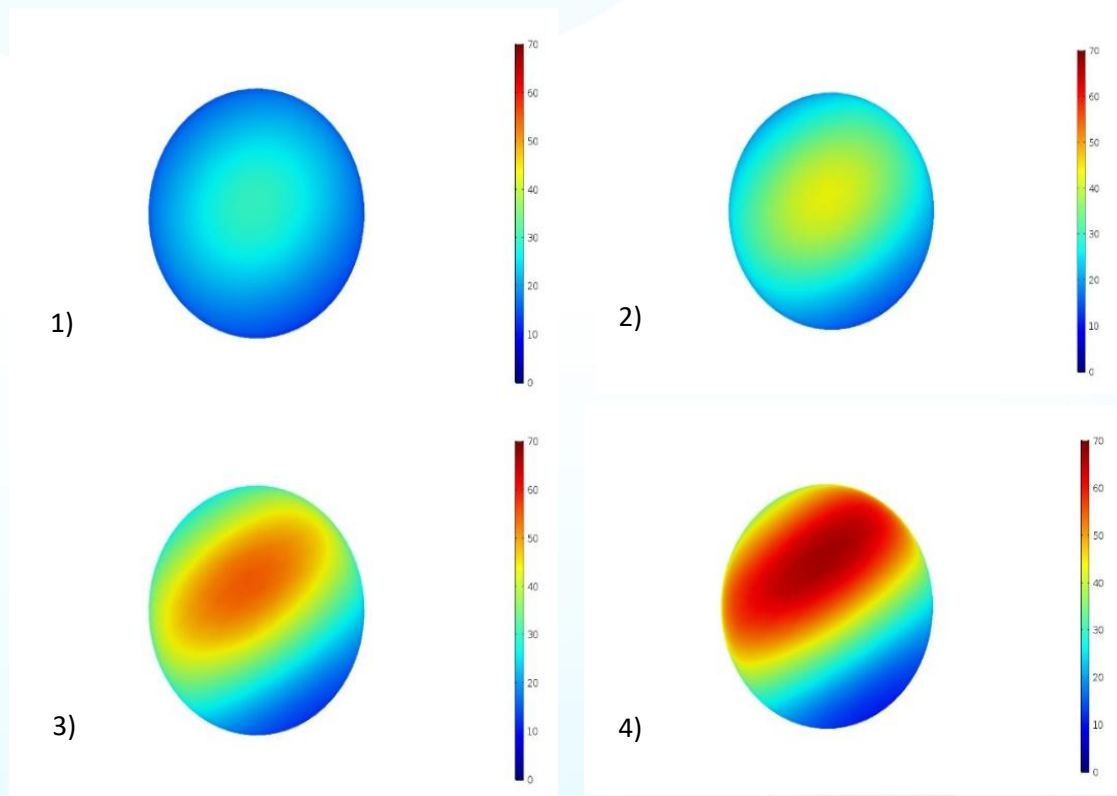


Изменение степени конверсии биомассы при различных скоростях подачи топлива [мм/ч]:
1 – 106; 2 – 140; 3 – 176; 4 – 212; 5 – 248.

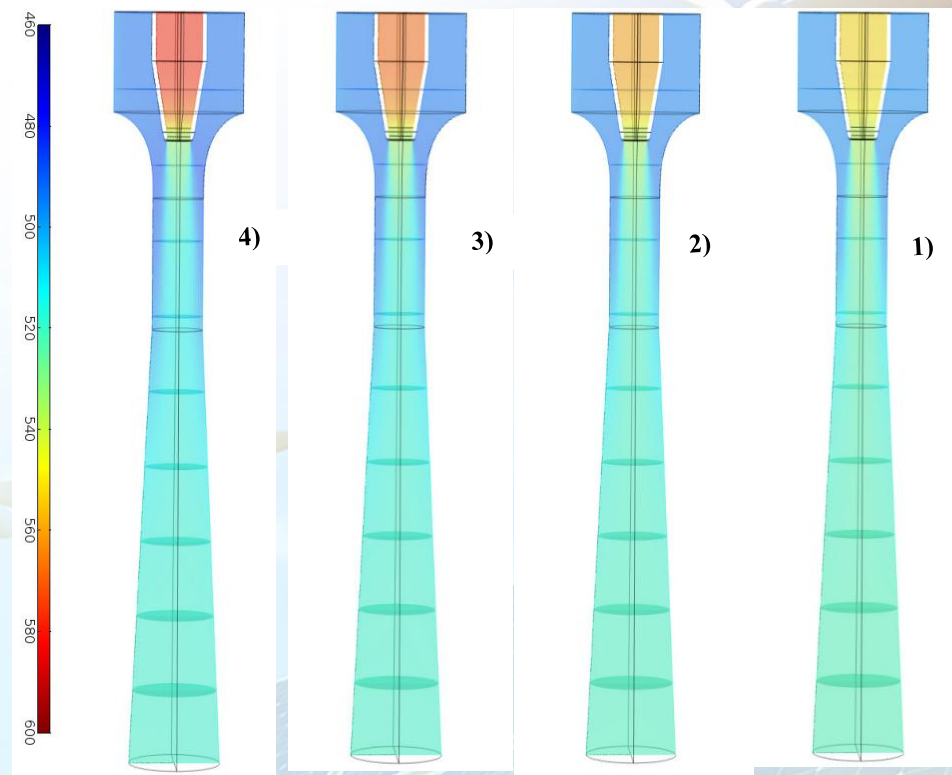
Превращение древесины в биоуголь

Скорость подачи топлива (мм/с)	Древесный уголь (г/с)		Смола (г/с)		Пиролизный газ (г/с)	
	Модель	Эксперимент	Модель	Эксперимент	Модель	Эксперимент
0.19	0.227	0.23	0.505	0.5	0.41	0.405
0.36	0.47	0.47	0.95	0.94	0.78	0.66
0.62	0.97	0.98	1.45	1.47	0.55	0.542

Модель горения пиролизного газа в эжекторе (вторая ступень)



Изменение скорости газа в сечении эжектора при различных массовых расходах газа, поступающего с 1-й ступени лабораторного стенда 1 г/с, 2 г/с, 3 г/с, 4 г/с.

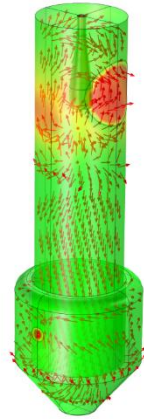


Рассчитанные поля температур при расходе газа с 1й ступени: 1) 1 г/с; 2) 2 г/с; 3) 3 г/с; 4) 4 г/с.

Моделирование реактора газификации (третья ступень)



Расчетная сетка

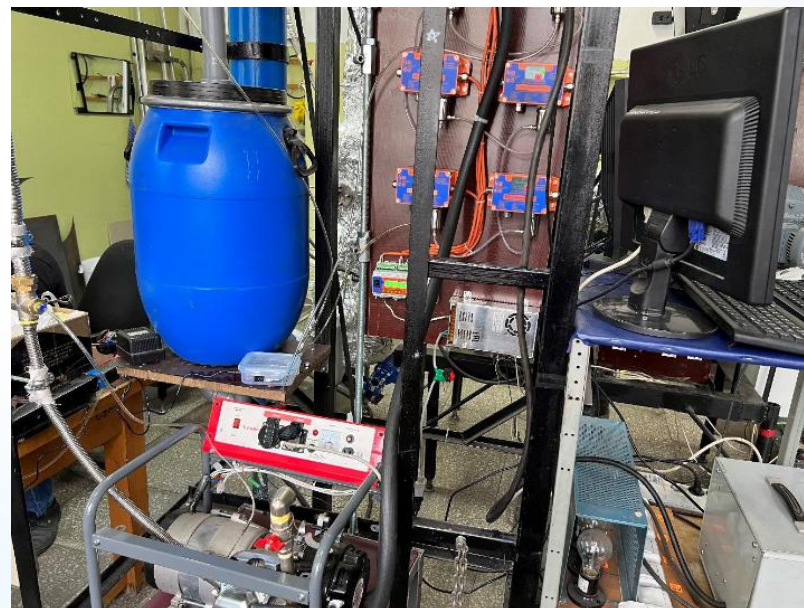


Движение газов

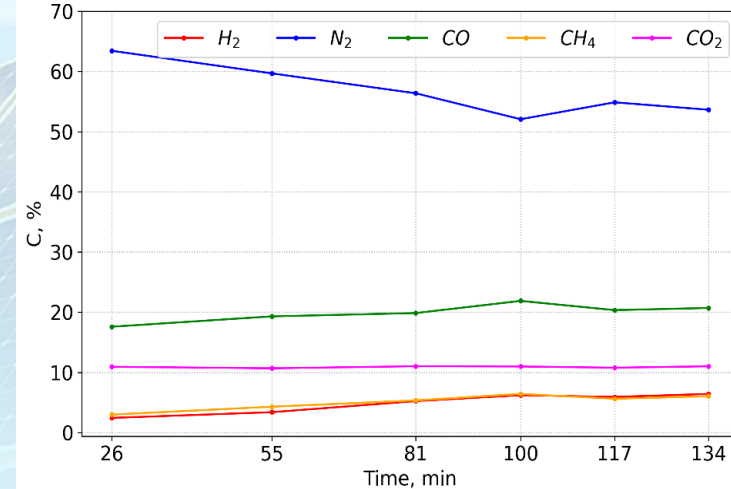
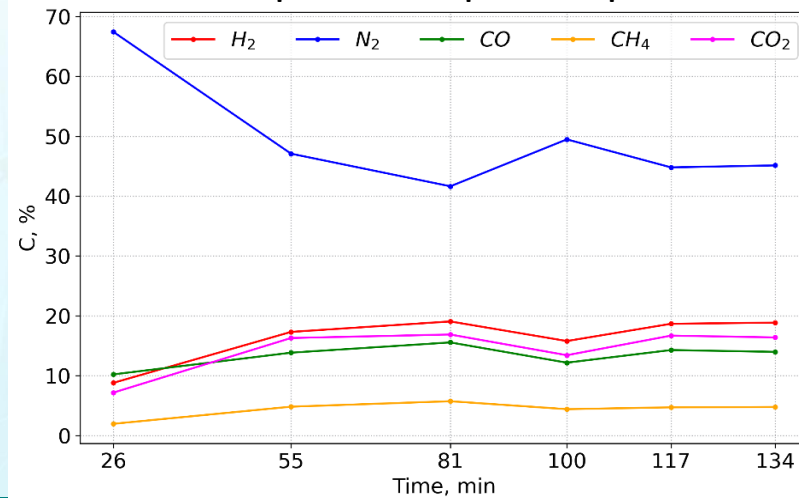
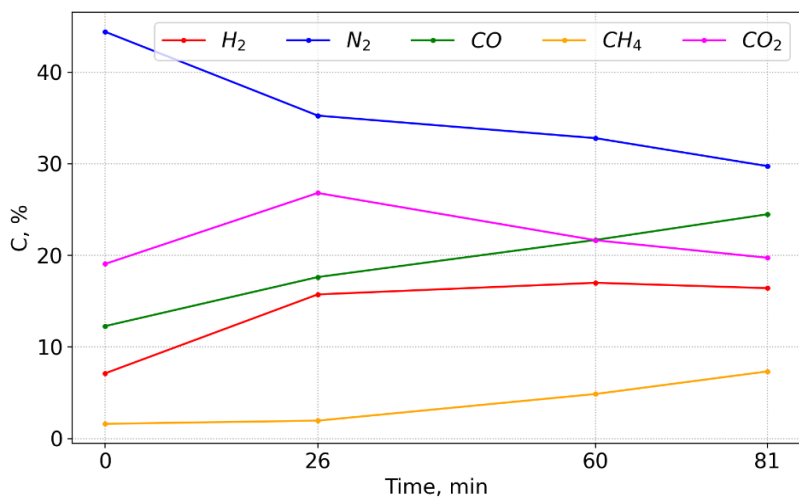


Скорость греющих газов во
входном сечении $w=0.1$ м/с;
температура греющих газов
 $T_0=600^\circ\text{C}$

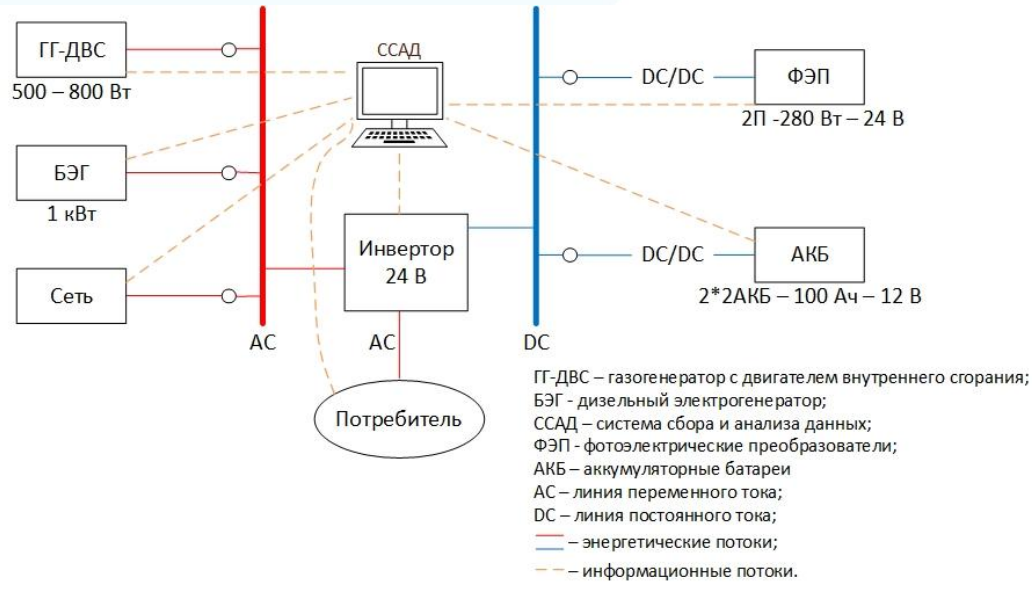
Многоступенчатый газогенератор



Состав газа первой, второй и третьей ступени



Гибридная энергосистема



Микросеть — действующая экспериментальная гибридная электростанция. Данная энергосистема предназначена для анализа режимов работы энергосистем, включающих альтернативные источники энергии, с целью повышения показателей надёжности.

Тестирование работы лабораторной микросети: автономный режим работы электростанции - нагрузка на бытовой холодильник и освещение подсобного помещения

График изменения напряжения батареи за день

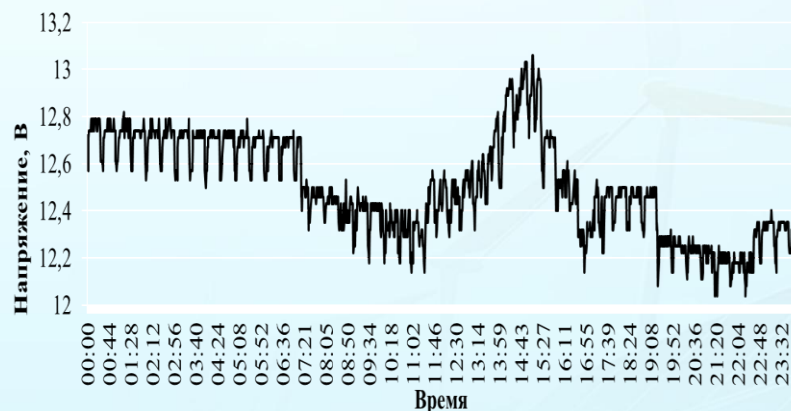
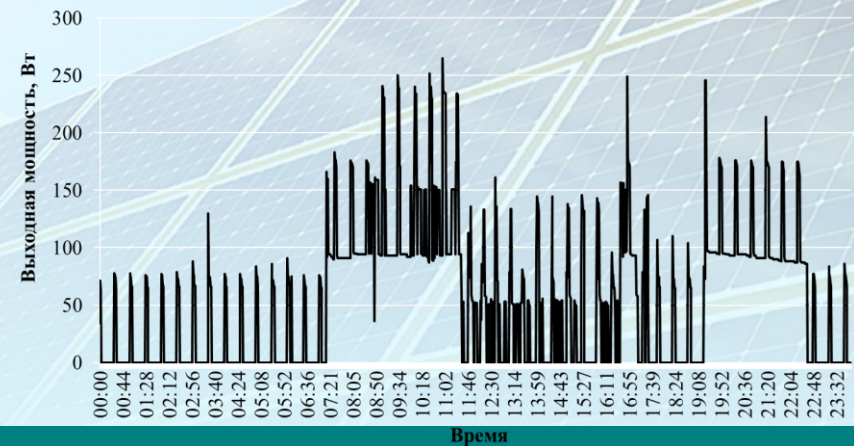


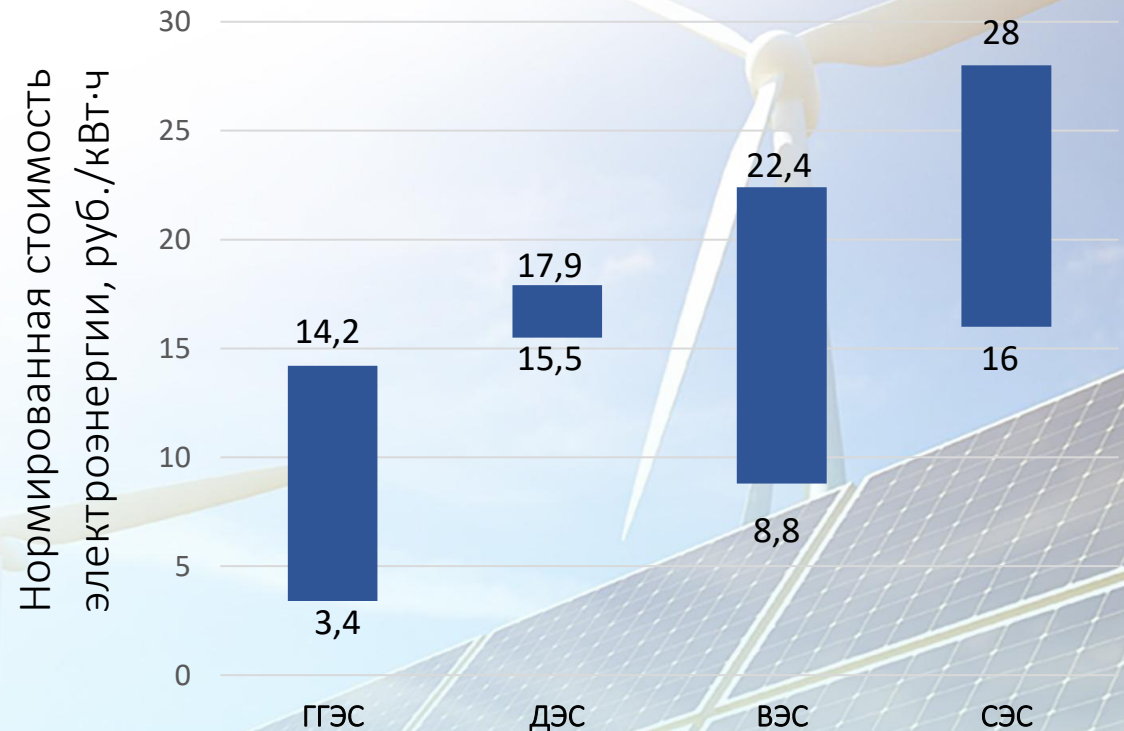
График мощности нагрузки энергосистемы за день



Технико-экономические оценки

Исходные данные

Вид затрат	Ед. измерения	Стоимость
Выработка электроэнергии	кВт·ч	750000
Капиталовложения в ГЭС	млн руб.	16,95
Цена топливной щепы	тыс. руб./т	1,00
Цена биоугля	тыс. руб./т	55,00
ФОТ	млн руб./год	5,76
Амортизация	млн руб./год	1,06
Налог на имущество	млн руб./год	0,16
Прочие расходы	млн руб./год	0,50



Нормированная стоимость электроэнергии сопоставима с текущими рыночными показателями. При производстве единственного продукта (электроэнергии) LCOE составляет 14,2 руб./кВт·ч. При стоимости побочного продукта в виде биоугля (55 тыс. руб./т) LCOE составляет 3,4 руб./кВт·ч. Это значение существенно ниже не только стоимости электроэнергии, получаемой от ДЭС, ВЭС и СЭС, но и тарифов на электроэнергию в ЕЭС в большинстве регионов страны.

Публикации и РИДы

- Получено 12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ;
- Опубликовано 41 статья и 2 главы в коллективных монографиях (основные публикации):

1. Badenko, V., Sosnovsky, I., Kozlov, A., Penzik, M., & Zhang, S. (2024). Kinetic and quantitative analysis of gaseous products of thermochemical biomass conversion based on thermogravimetric and mass-spectrometric data. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18(5), 1254-1266.
2. Voropai, N. I., Domyshev, A. V., Efimov, D. N., Kolosok, I. N., Korkina, E. S., Kurbatsky, V. G., Kozlov A.N. ... & Popova, E. V. (2023). Hierarchical modeling principles for operation and control of electric power systems. In *Hierarchical Modeling of Energy Systems* (pp. 213-302). Elsevier
3. Tomin, N., Shakirov, V., Kurbatsky, V., Muzychuk, R., Popova, E., Sidorov, D., Kozlov A. ... & Yang, D. (2022). A multi-criteria approach to designing and managing a renewable energy community. *Renewable Energy*. DOI: 10.1016/j.renene.2022.08.151,
4. Shakirov, V., & Kozlov, A. Multi-Criteria Assessment Of Biomass Gasification-Based Hybrid Energy Systems In Remote Areas. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. DOI: 10.1002/bbb.2377,
5. Penzik, M.V., Kozlov, A.N., Zhang, S., Badenko, V.V., Sosnovsky, I.K., Shamansky, V.A. (2022). A segmental analysis of pyrolysis of woody biomass. *Thermochimica Acta*, 179209 DOI: 10.1016/j.tca.2022.179209,
6. Penzik, M.V., Donskoy I. G. Kozlov, A.N., Kozlova M.A., Shamansky, V.A. (2022). Oxidation of partially decomposed wood: Experimental investigation and kinetic analysis. *Thermochimica Acta*, 179215 DOI: 10.1016/j.tca.2022.179215,
7. Donskoy I.G., Kozlov A.N., Svishchev D.A., Penzik M.V. Experimental study on fixed-bed combustion and agglomeration of sawdust–polyethylene mixtures// *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2022, P. 1-13 DOI: 10.1080/15567036.2022.2030440,
8. Tomin, N, Shakirov ,V, Kozlov, A, Sidorov, D, Kurbatsky, V, Rehtanz, C, Lora, E Design and optimal energy management of community microgrids with flexible renewable energy sources // *Renewable Energy*, 2021, 183, p. 903-921 DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.024,
9. Kozlov, A.N., Shamansky, V.A., Donskoy, I.G., Penzik, M.V., Keiko, A.V. A DSC signal for studying kinetics of moisture evaporation from lignocellulosic fuels // *Thermochimica Acta*, 2021, 698, 178887 10.1016/j.tca.2021.178887,
10. Donskoy, I.G., Kozlov, A.N., Kozlova, M.A., Penzik, M.V., Shamanskiy, V.A. Thermochemical interaction of wood and polyethylene during co-oxidation in the conditions of thermogravimetric analysis // *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2020, 131(2),
11. Marchenko, O., Solomin, S., Kozlov, A., Shamanskiy, V., Donskoy, I. Economic efficiency assessment of using wood waste in cogeneration plants with multi-stage gasification // *Applied Sciences*. 2020, 10(21), стр. 1–15, 7600 DOI: 10.3390/app10217600,
12. Kozlov A.N., Tomin N.V., Sidorov D.N., Lora E.E.S., Kurbatsky V.G. Optimal operation control of PV-biomass gasifier-diesel-hybrid systems using reinforcement learning techniques // *Energies*. Vol.13. No.10. ID: 2632. 2020. DOI: 10.3390/en13102632,
13. Marchenko, O.V., Solomin, S.V., Kozlov, A.N. Possibilities of use of wood wastes in the power industry of Russia (in Russian) // *Ecology and Industry of Russia*, 2019, 23(6), p. 17-21.

Финансовая поддержка

- РНФ 16-19-10227 «Разработка эффективной технологии получения газа энергетического назначения на основе ступенчатой газификации низкосортных твердых топлив», 2016 – 2018 гг. – 18 млн. руб.;
- РФФИ 19-58-80016 БРИКС_т «Термохимическая конверсия лигноцеллюлозной биомассы и отходов в газовое и жидкое топливо для использования в двигателях внутреннего сгорания», 2020 – 2022 гг. – 15 млн. руб. (<http://brics-sti.org/index.php?p=project/60>);
- Минобрнауки РФ – БРИКС 075-15-2022-1215 «Моделирование и методы управления киберфизическими системами в мультиэнергетических микросетях», 2022 – 2024 гг. – 15 млн. руб. (https://isem.irk.ru/solutions/BRICS_FCP2023/);
- Минобрнауки РФ – БРИКС 13.2251.21.0241 «Устойчивое повышение ценности биомассы в рамках взаимосвязи вода-продовольствие-энергия: подход экономики замкнутого цикла для повышения эффективности использования ресурсов в условиях меняющегося климата», 2024 – 2026 гг. – 30 млн. руб. (<https://isem.irk.ru/solutions/ustoychivoepovyshenie-tsennosti-biomassy-v-ramkakh-vzaimosvyazi-voda-prodovolstvie-energiya-podkhod/>).

Обобщение результатов по разработке

1. Разработан многоступенчатый газогенератор. Пиролиз древесных отходов происходит в реакторе со шнековым транспортером. Пиролизный газ сжигается над слоем древесного угля, в результате чего получается генераторный газ с небольшим содержанием смол (содержание смол – 0,1–1 кг/ч, теплотворная способность – около 6 МДж/Нм³).
2. Разработан вычислительный комплекс для моделирования реакторов термохимической конверсии биомассы.
3. Многоступенчатый газогенератор рассмотрен в составе газогенераторной электростанции (ГГЭС). КПД электрогенератора достигает около 25%, при выходной мощности 40–55% от номинальной.
4. Газогенераторная электростанция интегрирована в гибридную энергетическую систему, включающую фотоэлектрические панели и систему накопления энергии.
5. Техничко-экономические оценки показали высокую конкурентоспособность производства электроэнергии с использованием ГГЭС, особенно в случае производства дополнительного продукта (биоугля).
6. Уровень готовности технологии (TRL) – 5 – работоспособность подтверждена на опытном образце. Подготовлено техническое задание на создание опытно-промышленной установки. Исследован потенциал применения разработки в водородной энергетике и условиях Арктики.
7. Разработка может быть актуальна для России и стран БРИКС+ в рамках развития экологически чистых энергетических решений.

Наши партнеры

Научные организации:

- ❖ Университет Витсватерсранда, ЮАР,
- ❖ Федеральный университет Итажубы, Бразилия,
- ❖ Нанкинский университет леса, Китай,
- ❖ Университет нефти – Пекин, Китай,
- ❖ Харбинский технологический институт, Китай,
- ❖ Южный центральный университет, Китай,
- ❖ Индийский технологический университет Рурки, Индия,
- ❖ Уральский федеральный университет, Уральский энергетический институт, Россия,
- ❖ Новосибирский государственный университет, Россия.

Индустриальные партнеры:

1. ЭН+- мировой лидер по производству низкоуглеродного алюминия и возобновляемой энергии.
2. РТ Софт - Разработка и внедрение программных продуктов и сервисов для объектов электроэнергетики и систем электроснабжения потребителей.
3. ООО Армада – сбор, переработка и утилизация опасных и неопасных отходов.



ЦКП «Высокотемпературный контур»



КОМПЛЕКС ВИЗУАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ПОТОКАХ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ СРЕД

Высокоскоростная видеокамера Phantom v2012 (Vision Research, США)
Набор светосильных объективов с фокусными расстояниями от 24 до 100 мм
Система подсветки MultiLED (GSVITEC, Германия)
Тепловизор ТНТ600Н Т -20 - +1200°С (HT Italia, Италия)

КОМПЛЕКС ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

Приборы синхронного термического анализа STA 449 C и STA 449 F1 (NETZSCH, Германия)
Квадрупольный масс-спектрометр QMS 403 C (NETZSCH, Германия)
Хромато-масс-спектрометр (Хроматэк, Россия)

КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Макротермогравиметрический анализатор TGA 801 (LECO, США)
Изоперебалический калориметр AC 500 (LECO, США)
Муфельная печь (Nabertherm, Германия)
Сушильный шкаф (Binder, Германия)
Анализатор углерода и серы Метавак-CS (Экскан, Россия)



КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

Тензометрический интерфейс pcd-400a (Kyowa, Япония)
Датчики PHL-A-2MP-A (Kyowa, Япония)
Датчики PGL-A-2MP-A (Kyowa, Япония)
Твердотельный импульсный лазер (Китай)

КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ ОБЪЕКТОВ ЖКХ

Ультразвуковой расходомер Panametrics PT878 (США)
Газоанализатор MRU Delta 65 (MRU, Германия)
Анализатор качества электроэнергии Circutor AR5L (Circutor; Италия)
Тепловизор Testo 875-2 (Testo, Германия)

КОМПЛЕКС АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ

Информационно-вычислительный кластер ПВК «АНАРЭС» (ИСЭМ СО РАН, Россия)
ПВК «АНГАРА» (ИСЭМ СО РАН, Россия)
ПВК «СОСНА» (ИСЭМ СО РАН, Россия)
ПВК «ThermalModeler» (ИСЭМ СО РАН, Россия)
ПВК COMSOL Multiphysics (ComsolLab, Швеция)

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Одно и многоступенчатый газогенератор (ИСЭМ СО РАН, Россия)
Газовый хроматограф Micro GC Fusion (Inficon, Германия)
Газовый хроматограф SRI 8610 C (SRI Instruments, США)
Газоанализатор TESTO 340 (TESTO, Германия)
Анализаторы SO₂, CO₂, CO, NO_x, CH₄, O₂, H₂ (Сенсон, Россия)
Трубчатая печь (Nabertherm, Германия)
Индукционный нагреватель Микроша – 3000 (Электроника, Россия)



Дополнительная информация о других проектах

Проект Минобрнауки РФ-ЮАР 13.2251.21.0254 – Разработка технологии пирогазетического коксования углей с получением коксов с улучшенными экологическими и эксплуатационными характеристиками – 2024-2025 гг. – 20 млн. руб.;

Проект Минобрнауки РФ-ЮАР 13.2251.21.0336 – Разработка ресурсосберегающей и экологически безопасной технологии термохимической конверсии углеродсодержащих отходов в электродные материалы суперконденсаторов для микроэнергосистем с возобновляемыми источниками энергии – 2026-2027 гг. – 14 млн. руб.



Заключение

- ИСЭМ СО РАН (лаборатория Термодинамики) обладает компетенциями разработки полного цикла технологий: исследование свойств углеродсодержащего сырья – определение целевых продуктов – выбор технологии – моделирование и разработка конструкций реакторов – монтаж и проведения испытаний – интегрирование в энергосистему – оценка экологической и экономической эффективности;
- Лаборатория имеет необходимый набор аналитического оборудования для физико-химического анализа и разработки и монтажа установок лабораторного масштаба;
- Лаборатория представляет собой интенсивно развивающееся подразделение института.

Спасибо за внимание!!!