

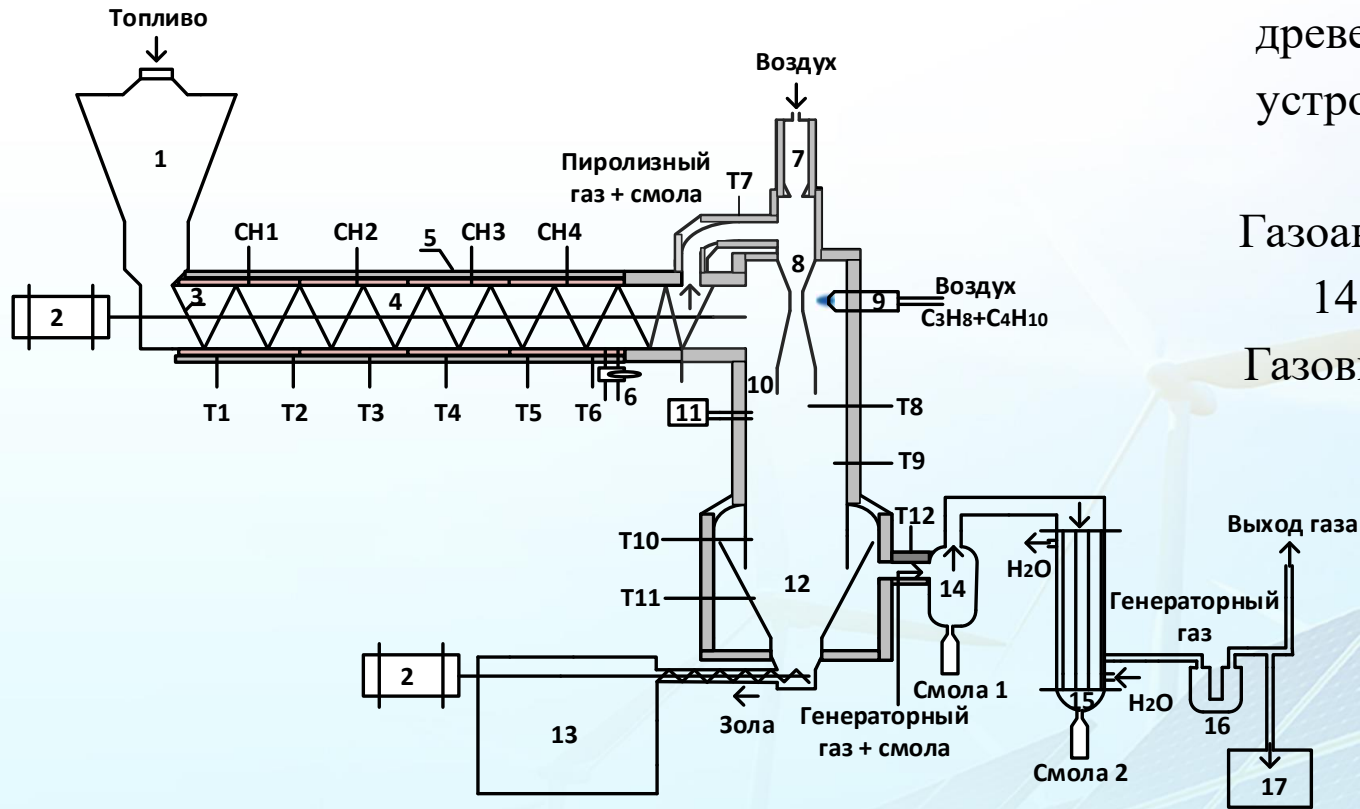
XI Международная премия
«Малая энергетика – большие достижения»,
номинация

«Научно-исследовательские разработки в сфере малой
распределенной энергетики»

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

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

Многоступенчатый газогенератор: Принципиальная схема



1. Топливный бункер. 2. Привод шнека. 3. Шнек. 4. Реактор пиролиза. 5. Теплоизоляция. 6. Пробоотборник древесного угля. 7. Нагреватель воздуха. 8. Струйное устройство (эжектор). 9. Газовая горелка. 10. Реактор дожигания пиролизного газа и смолы. 11. Газоанализатор. 12. Реактор газификации. 13. Зольник. 14. Циклон. 15. Теплообменник. 16. Фильтр. 17. Газовый хроматограф. T1-T12 – Термодатчики. CH1-CH4 – Секции нагрева.

CFD моделирование многоступенчатого газогенератора

Математическое моделирование реактора пиролиза (первая ступень)

Движение газов через пористую среду

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

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

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

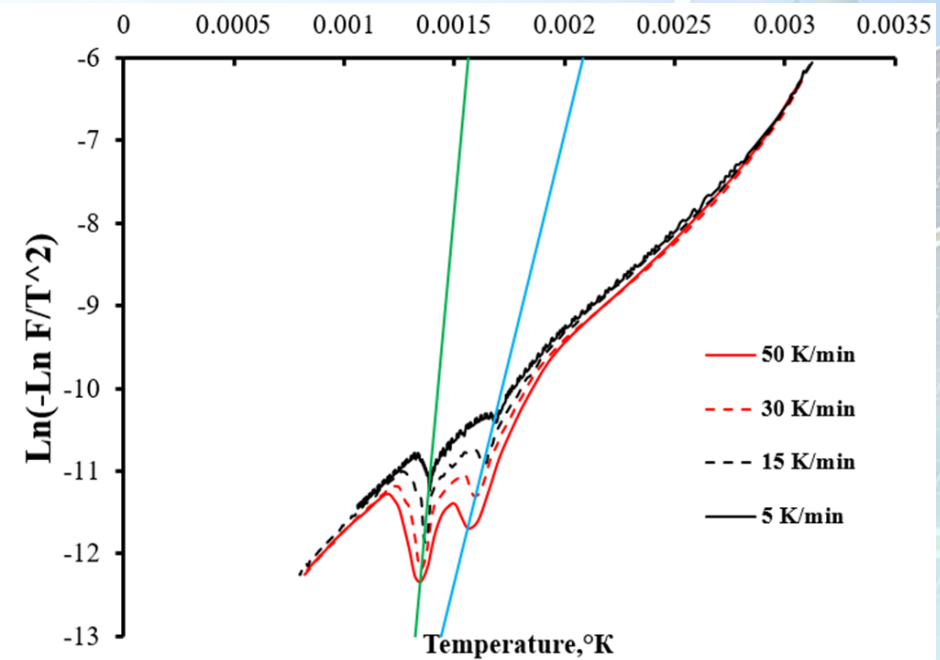
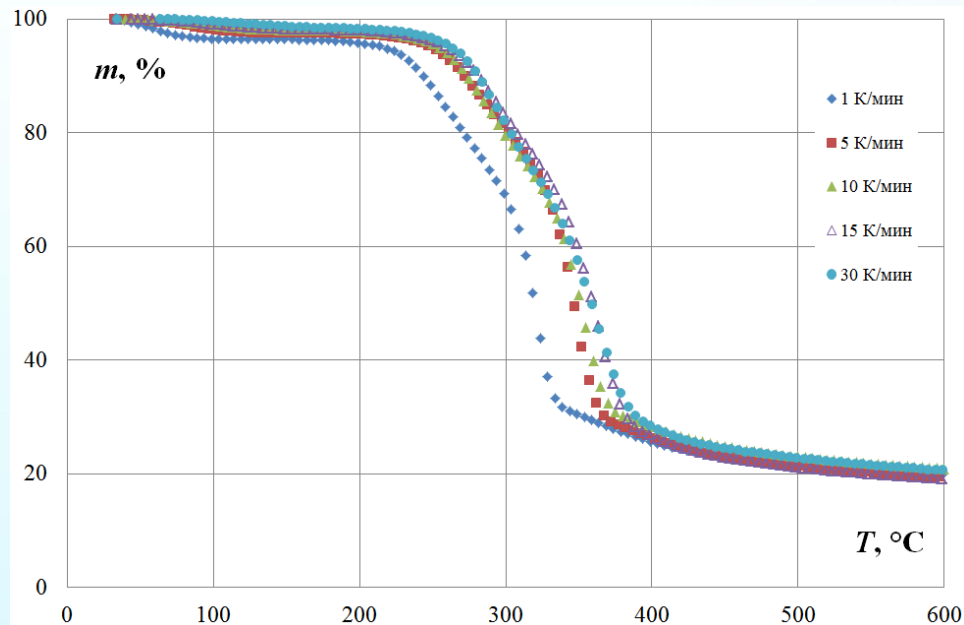
Кинетическое уравнение

Исследование кинетики термохимической конверсии твердых ТОПЛИВ

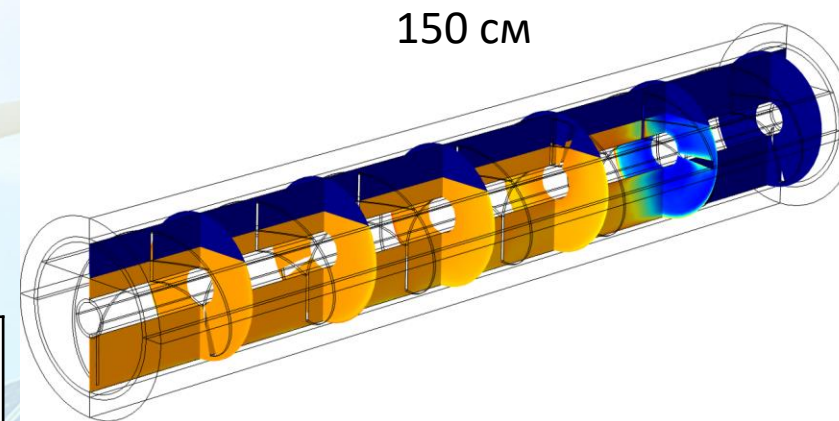
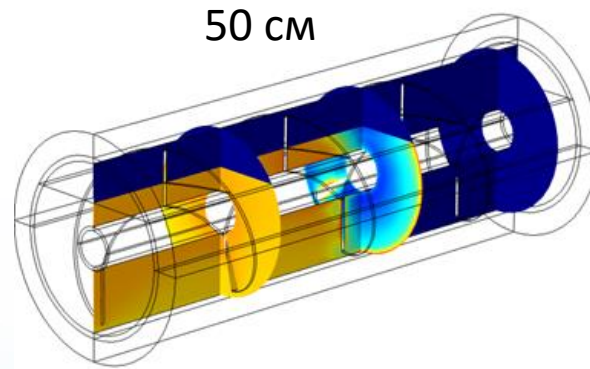
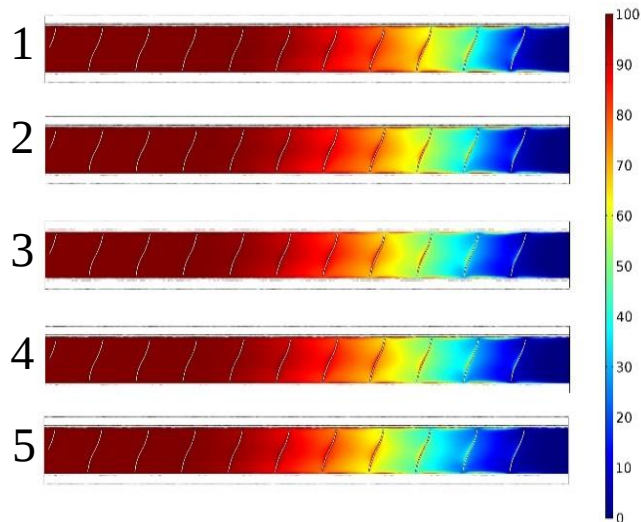
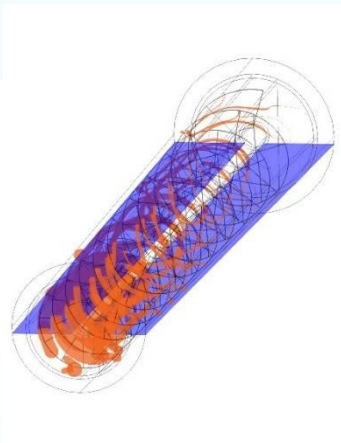


$$\ln \left[-\frac{1 - (1 - x)^{1-n}}{T^2(1 - n)} \right] n > 1 \quad k = -\frac{E_a}{R}, \quad b = \ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \right]$$

$$f \left(\ln \left[-\frac{\ln F}{T^2} \right] \right) = \ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \right] - \frac{E_a}{RT} \quad E_a = -kR, \quad A = \frac{\beta E_a e^b}{R}$$



Результаты моделирования реактора пиролиза

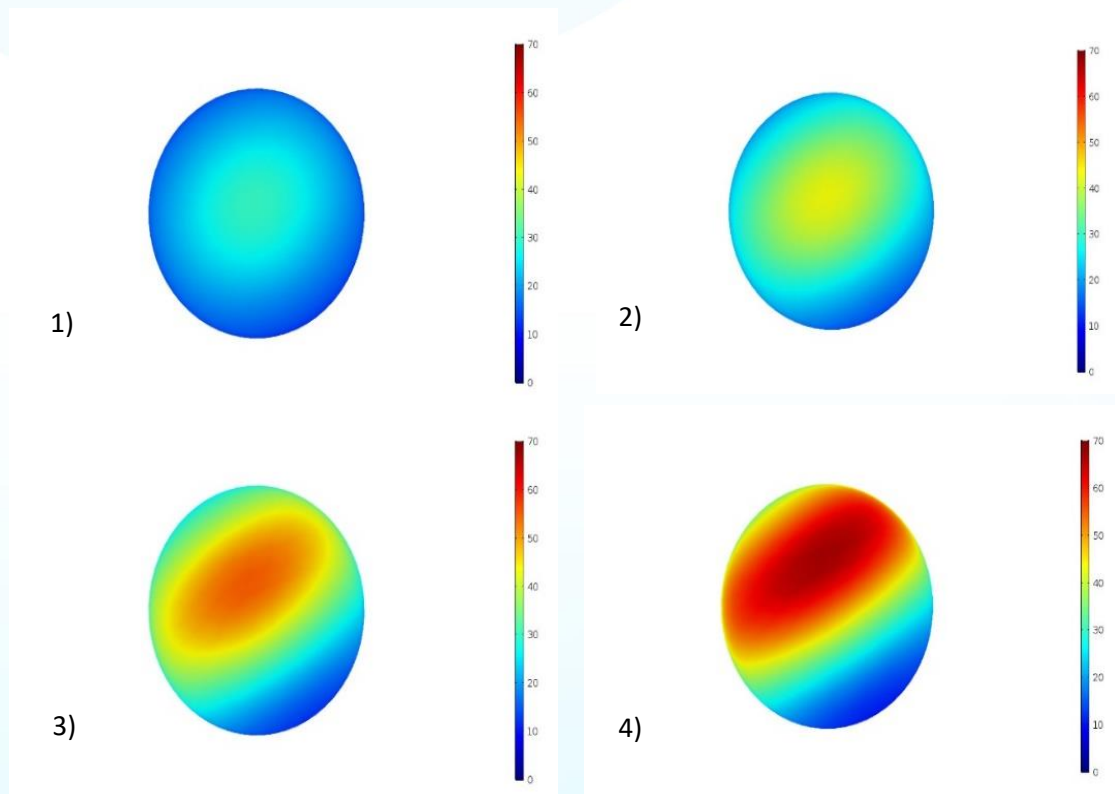


Превращение древесины в биоуголь

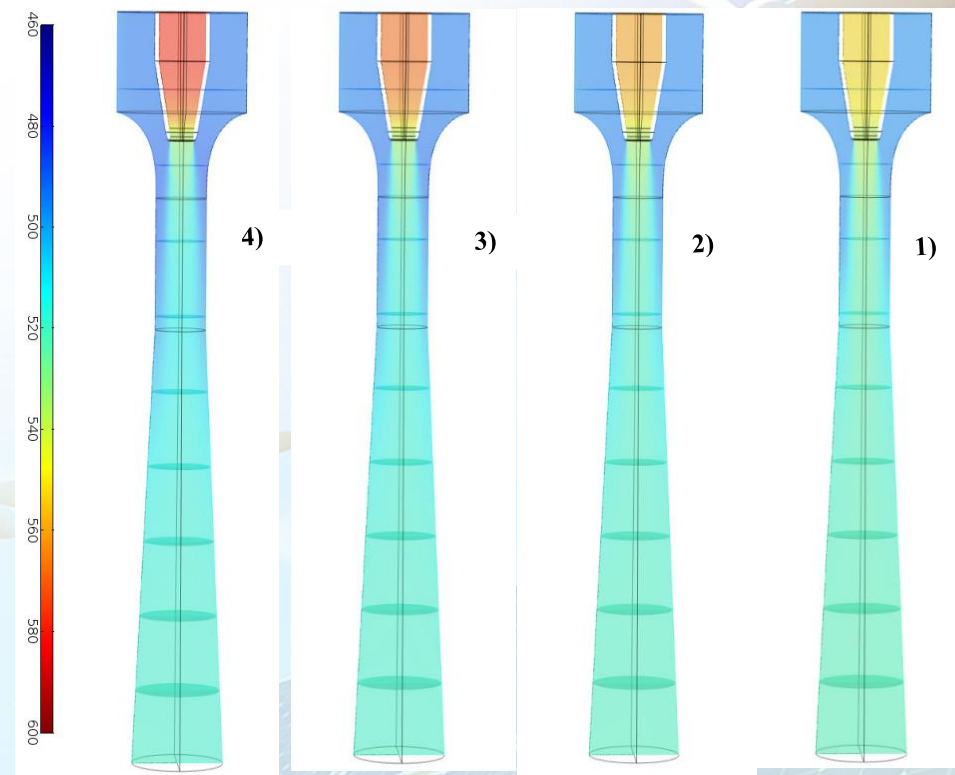
Изменение степени конверсии биомассы при различных скоростях подачи топлива [мм/ч]:
1 – 106; 2 – 140; 3 – 176; 4 – 212; 5 – 248.

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)

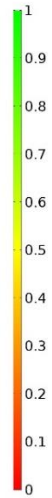
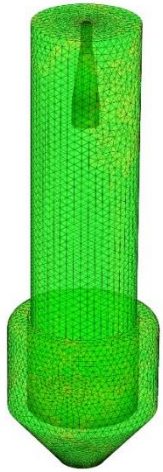


Изменение скорости газа в сечении эжектора при различных массовых расходах газа, поступающего с 1-й ступени лабораторного стенда 1 г/с, 2 г/с, 3 г/с, 4 г/с.

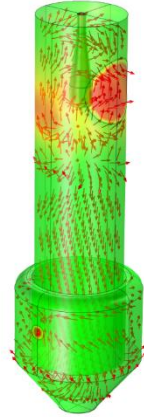


Рассчитанные поля температур при расходе газа с 1й ступени: 1) 1 г/с; 2) 2 г/с; 3) 3 г/с; 4) 4 г/с.

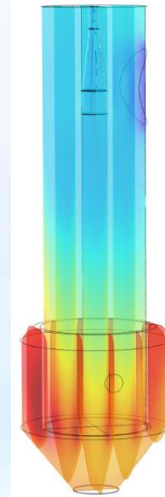
Моделирование реактора газификации (третья ступень)



Расчетная сетка



Движение газов



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

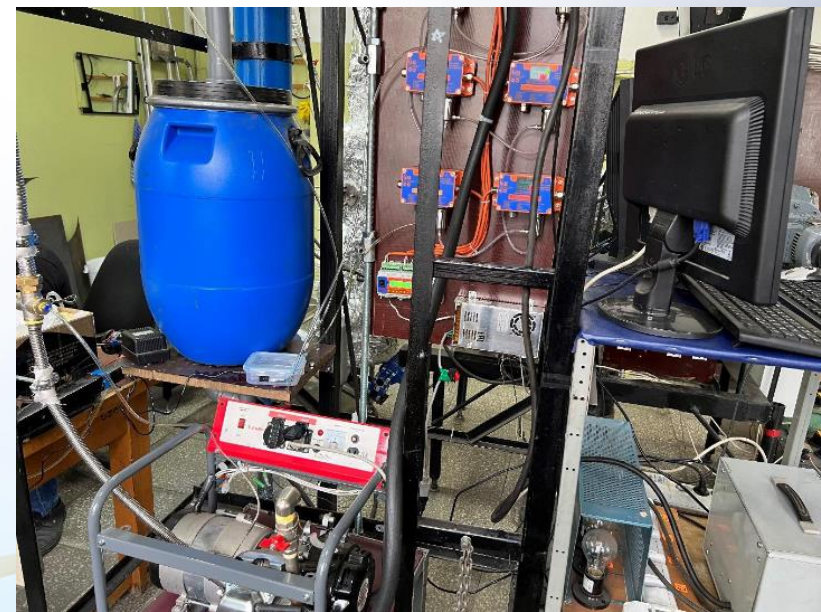
Объемы образованных и утилизированных отходов в 2022 г.

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

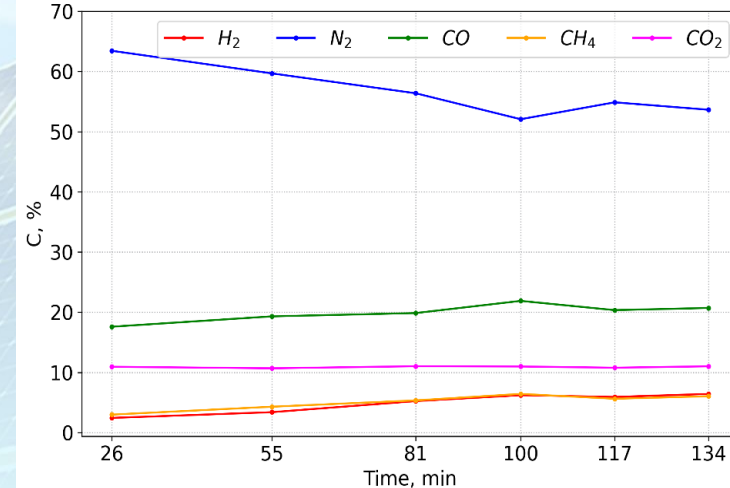
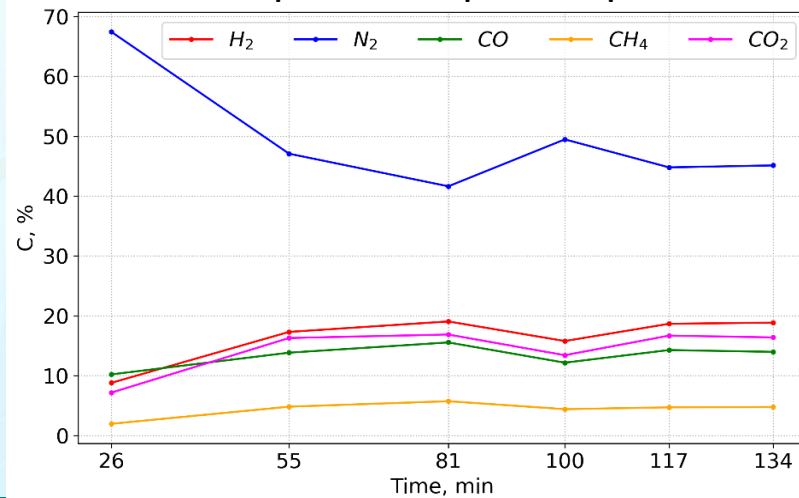
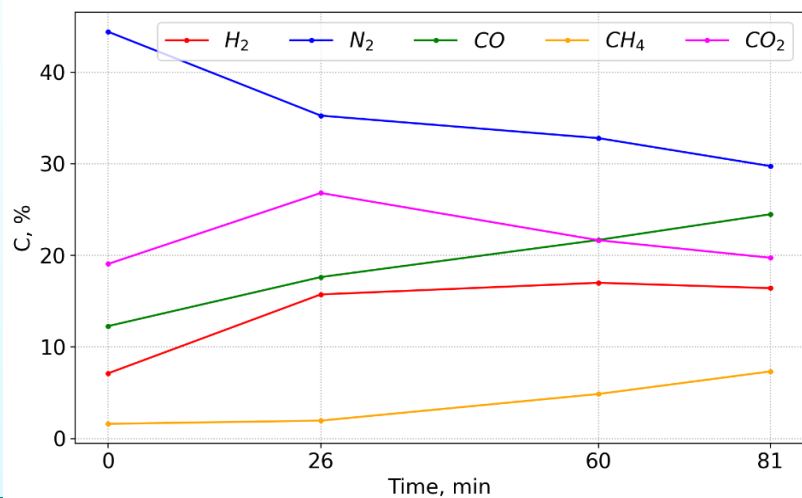
Объемы образованных и утилизированных отходов в 2022 г.

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

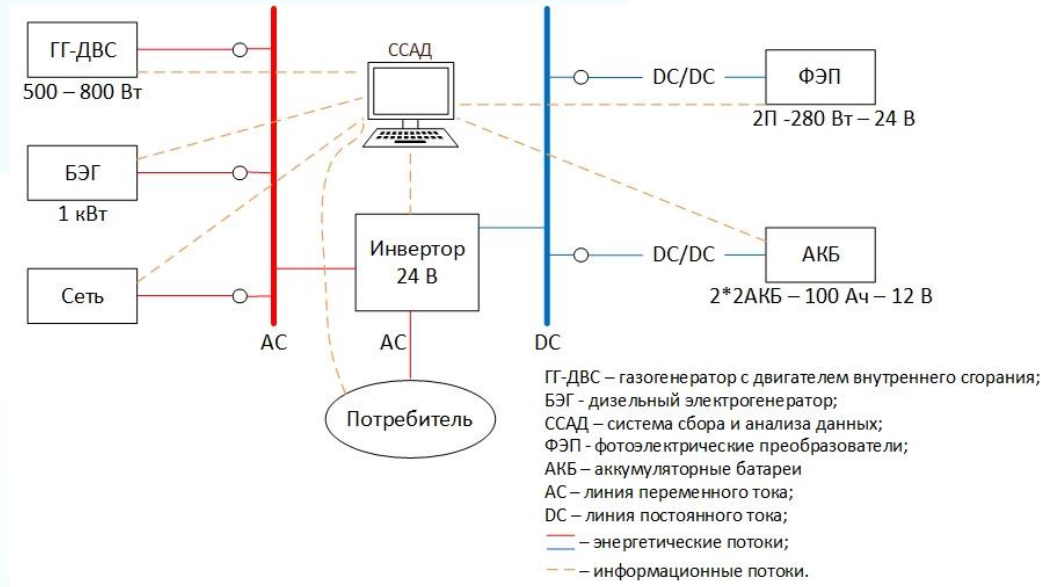
Многоступенчатый газогенератор



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

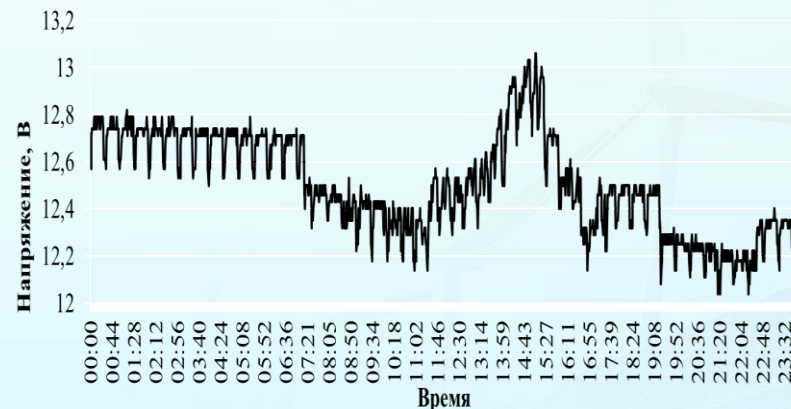
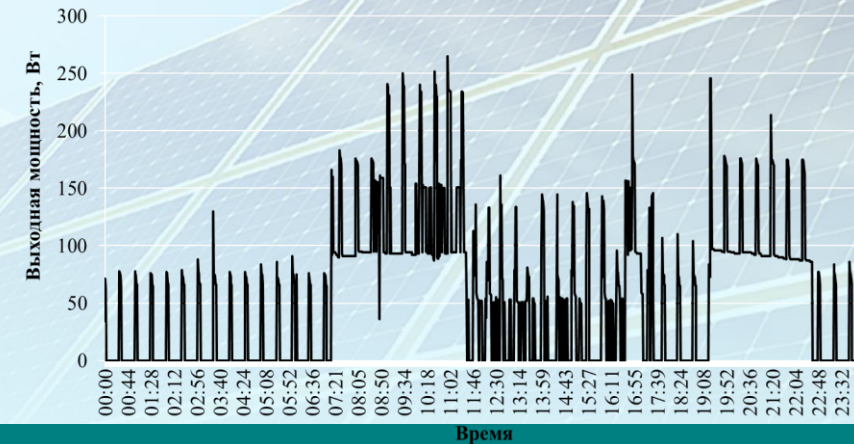
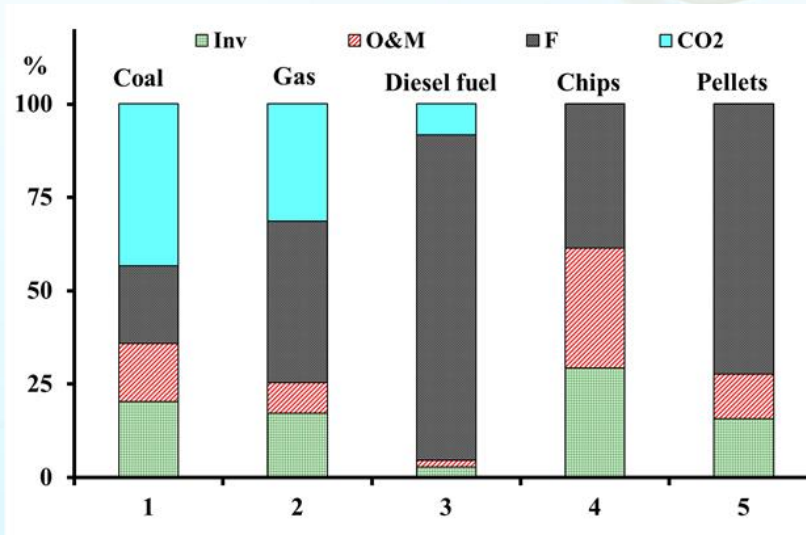
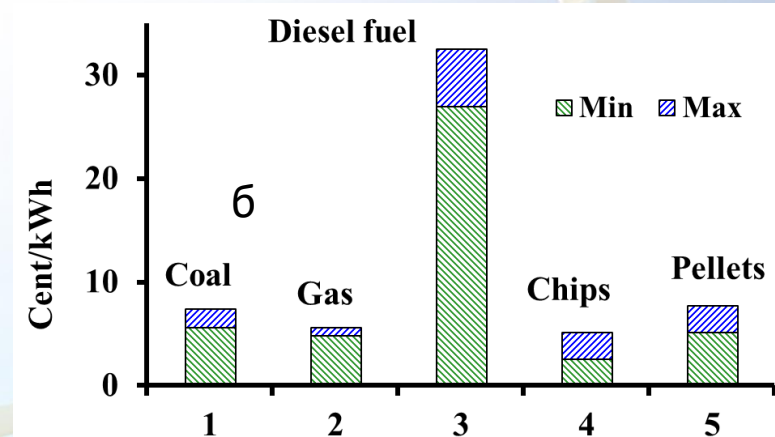
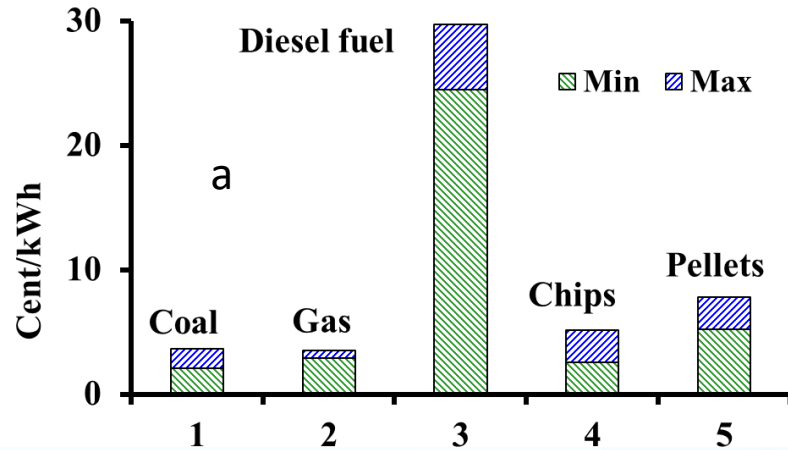


График мощности нагрузки энергосистемы за день



Технико-экономические оценки

Стоимость электроэнергии от источников энергии, использующих различные виды топлива (а – без налога на выбросы углерода, б – с налогом на выбросы углерода, min и max – минимальная и максимальная стоимость энергии с учетом интервала неопределенности)



Составляющие стоимости энергии (Inv — инвестиции, O&M — эксплуатация и техническое обслуживание, F — топливо, CO₂ — плата за выбросы углекислого газа)

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 DOI: 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;
- 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 (<http://brics-sti.org/index.php?p=project/60>);
- Минобрнауки РФ – БРИКС «Моделирование и методы управления киберфизическими системами в мультиэнергетических микросетях», 2022 – 2024 (https://isem.irk.ru/solutions/BRICS_FCP2023/);
- Минобрнауки РФ – БРИКС «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 (<https://isem.irk.ru/solutions/ustoychivoe-povyshenie-tsennosti-biomassy-v-ramkakh-vzaimosvyazi-voda-prodovolstvie-energiya-podkhod/>).

Заключение

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). Реактор дожигания смолы продемонстрировал высокую эффективность.
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. Проанализированы экономические аспекты. Себестоимость электроэнергии ГГЭС, работающей на древесном топливе, в три раза ниже, чем у дизельной электростанции, но менее конкурентоспособна по сравнению с газопоршневыми установками в условиях низких цен на газ.
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.

Спасибо за внимание!!!