

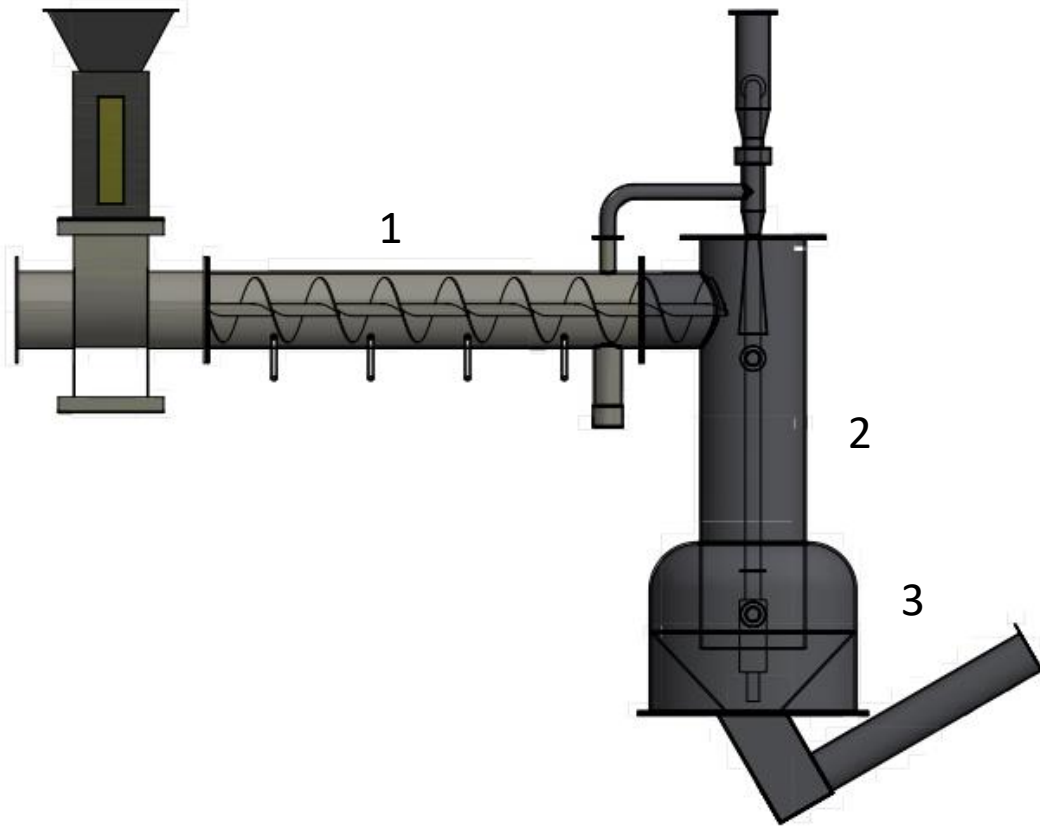
**XI Международная премия**  
**«Малая энергетика – большие достижения»,**  
**номинация**

**«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](mailto: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. Реактор пиролиза биомассы, 2. Реактор сгорания  
осмоленного пиролизного газа, 3. Реактор  
газификации биоугля

## 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.

# 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

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

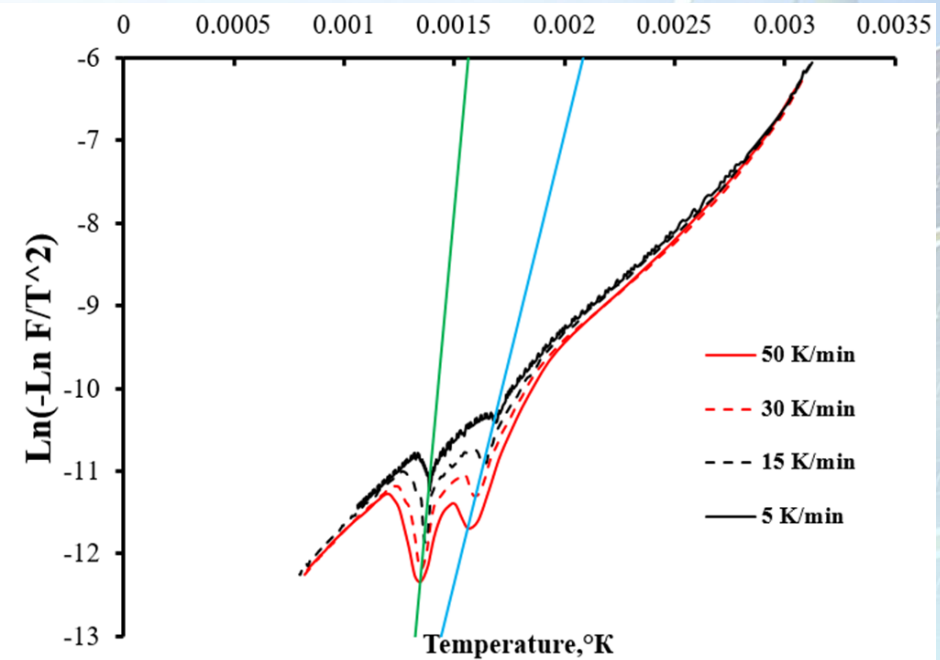
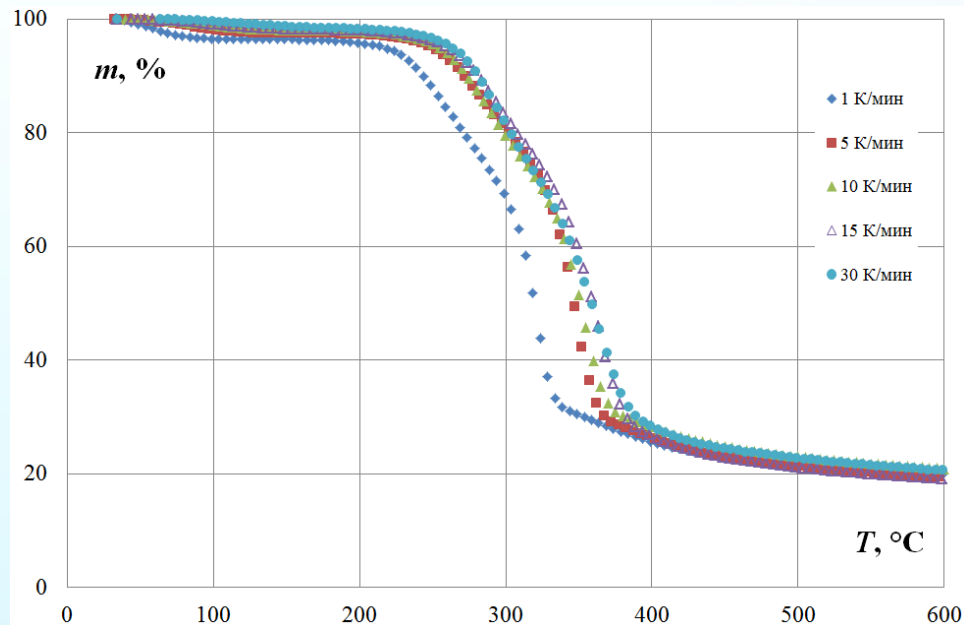
Кинетическое уравнение

# Исследование кинетики термохимической конверсии твердых ТОПЛИВ

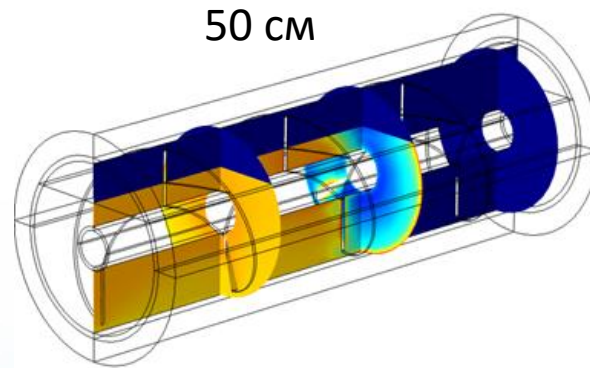
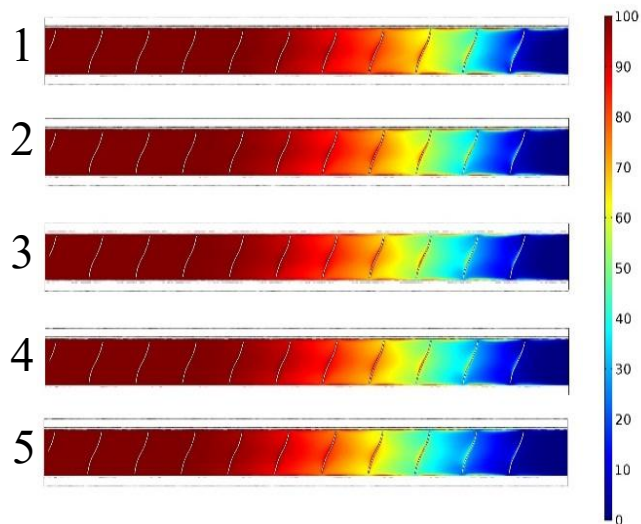
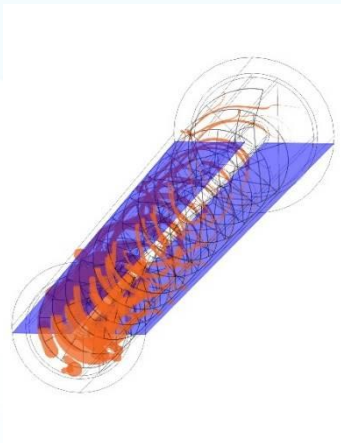


$$\ln \left[ -\frac{1 - (1 - x)^{1-n}}{T^2(1 - n)} \right] n > 1 \quad k = -\frac{E_a}{R}, \quad b = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E_a} \right]$$

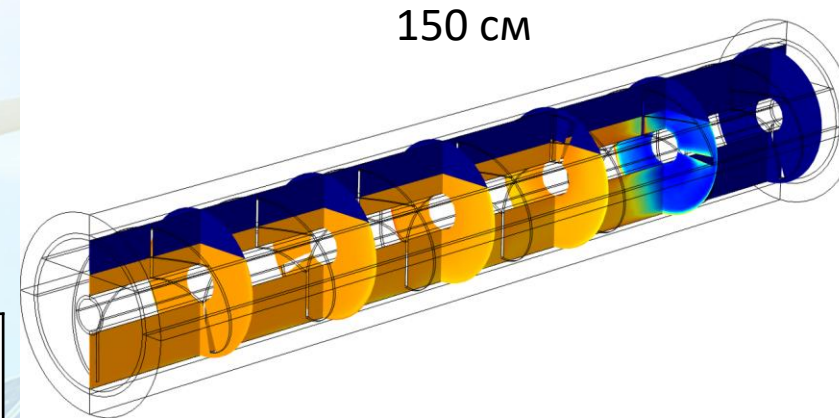
$$f \left( \ln \left[ -\frac{\ln F}{T^2} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E_a} \right] - \frac{E_a}{RT} \right) \quad E_a = -kR, \quad A = \frac{\beta E_a e^b}{R}$$



# Результаты моделирования реактора пиролиза



50 см



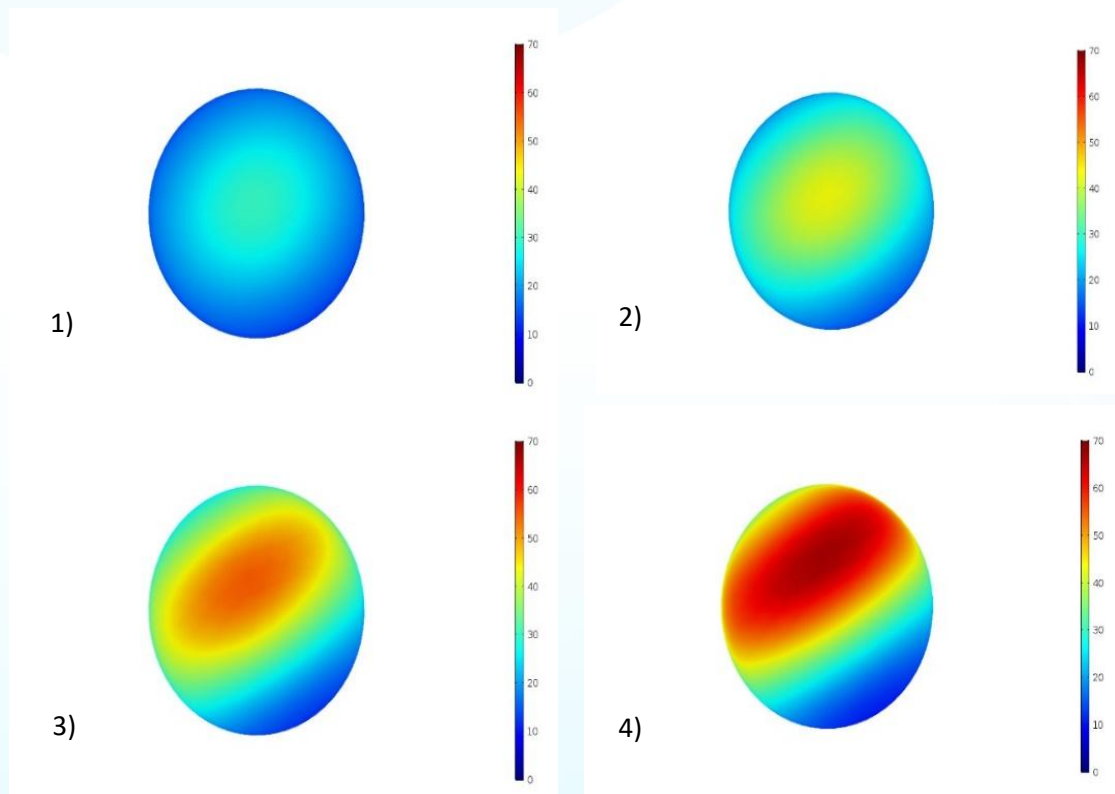
150 см

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

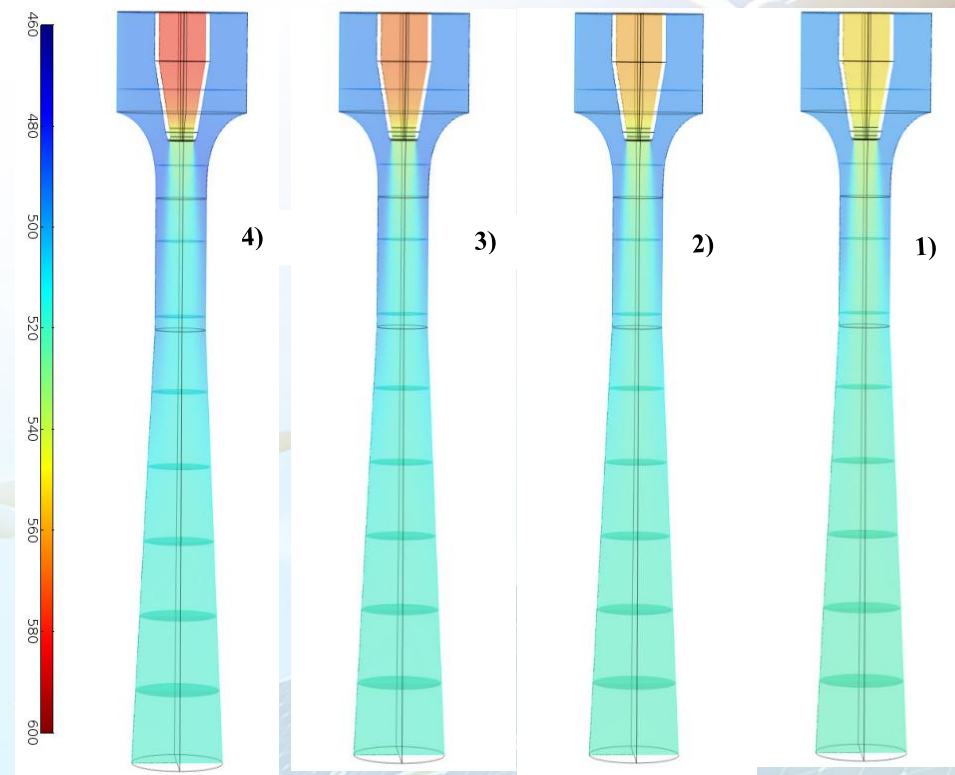
Превращение древесины в биоуголь

| 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)

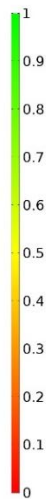
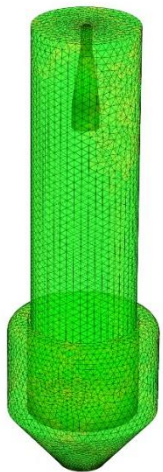


Изменение скорости газа в сечении эжектора при различных массовых расходах газа, поступающего с 1-й ступени лабораторного стенда 1 г/с, 2 г/с, 3 г/с, 4 г/с.

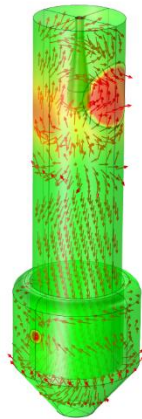


Рассчитанные поля температур при расходе газа с 1й ступени: 1) 1 г/с; 2) 2 г/с; 3) 3 г/с; 4) 4 г/с.

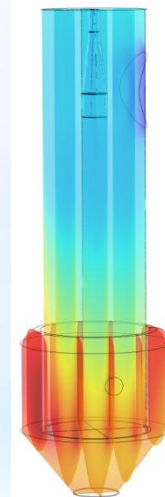
# Моделирование реактора газификации (третья ступень)



Расчетная сетка



Движение газов



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

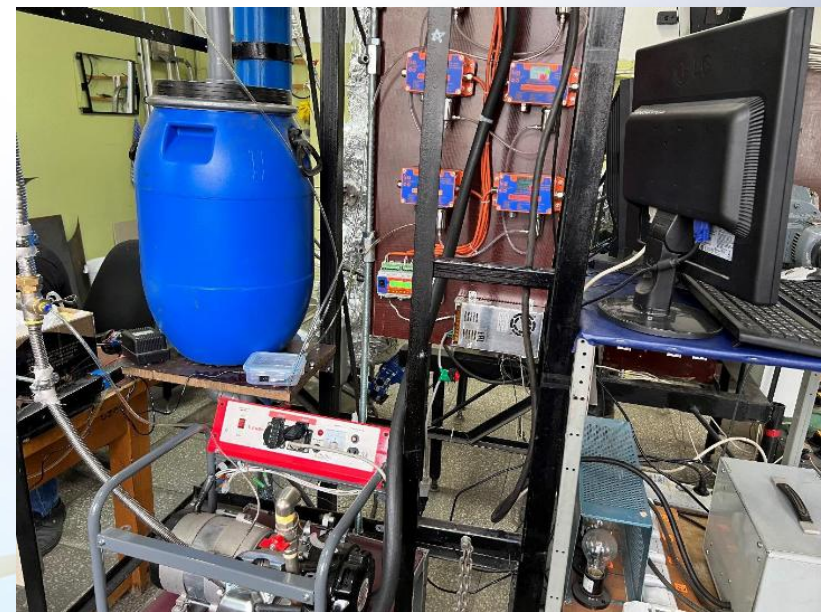
# Объемы образованных и утилизированных отходов в 2022 г.

| 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                            |

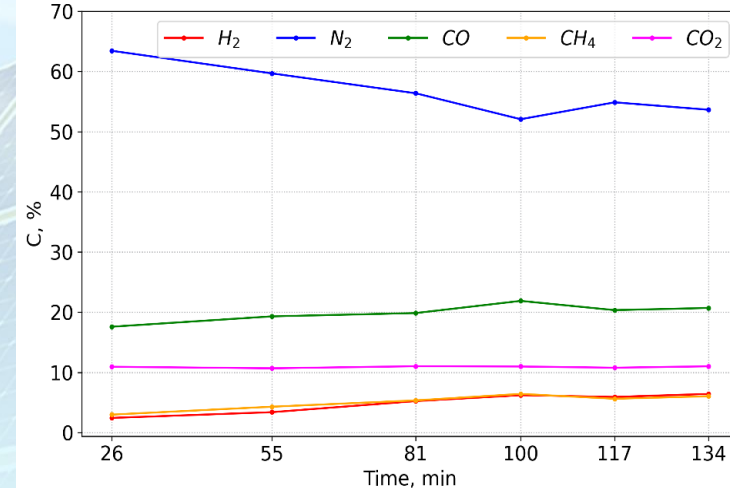
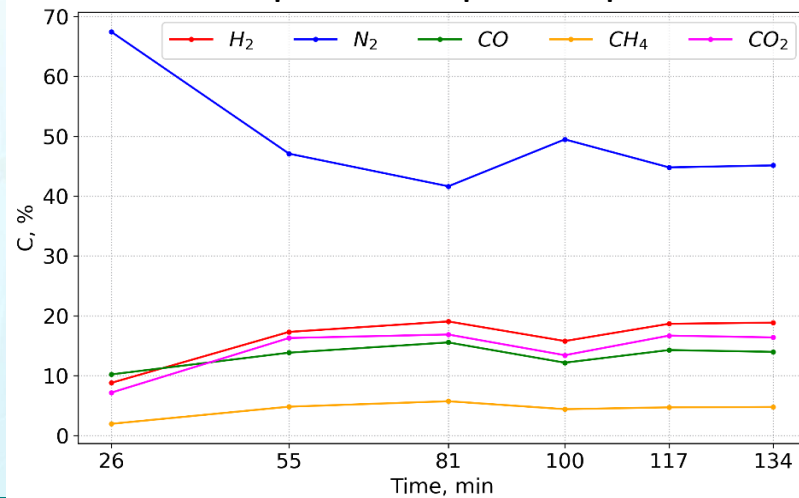
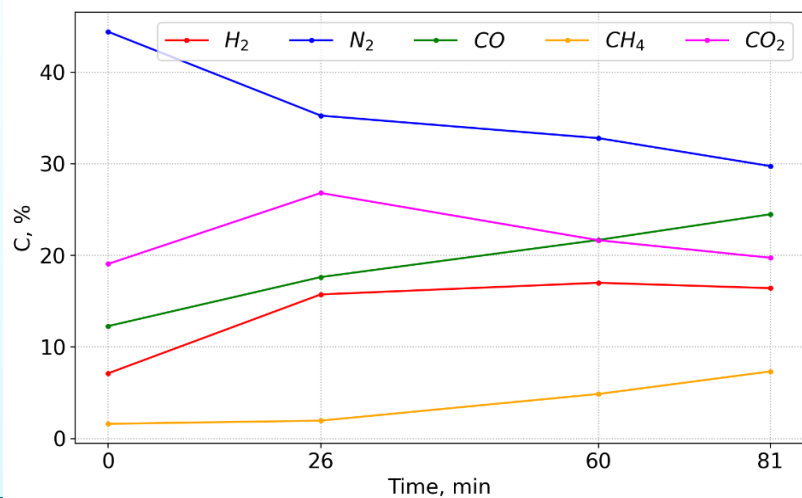
# Объемы образованных и утилизированных отходов в 2022 г.

| 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                            |

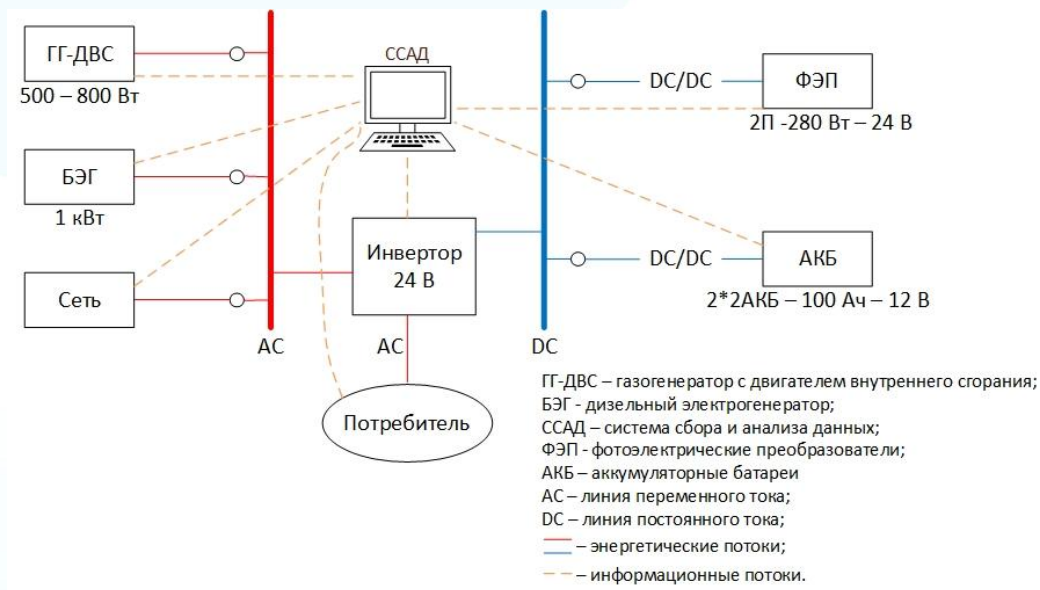
# Многоступенчатый газогенератор



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

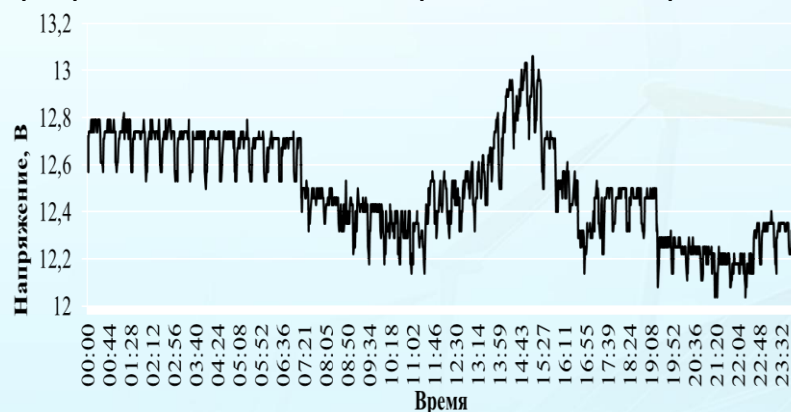
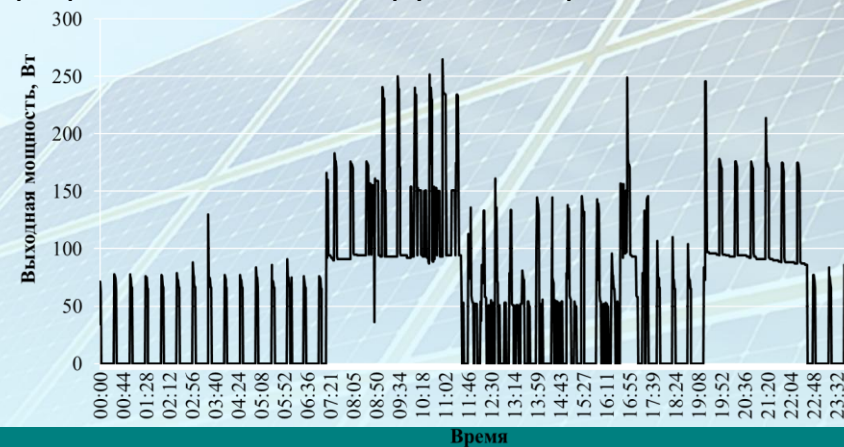


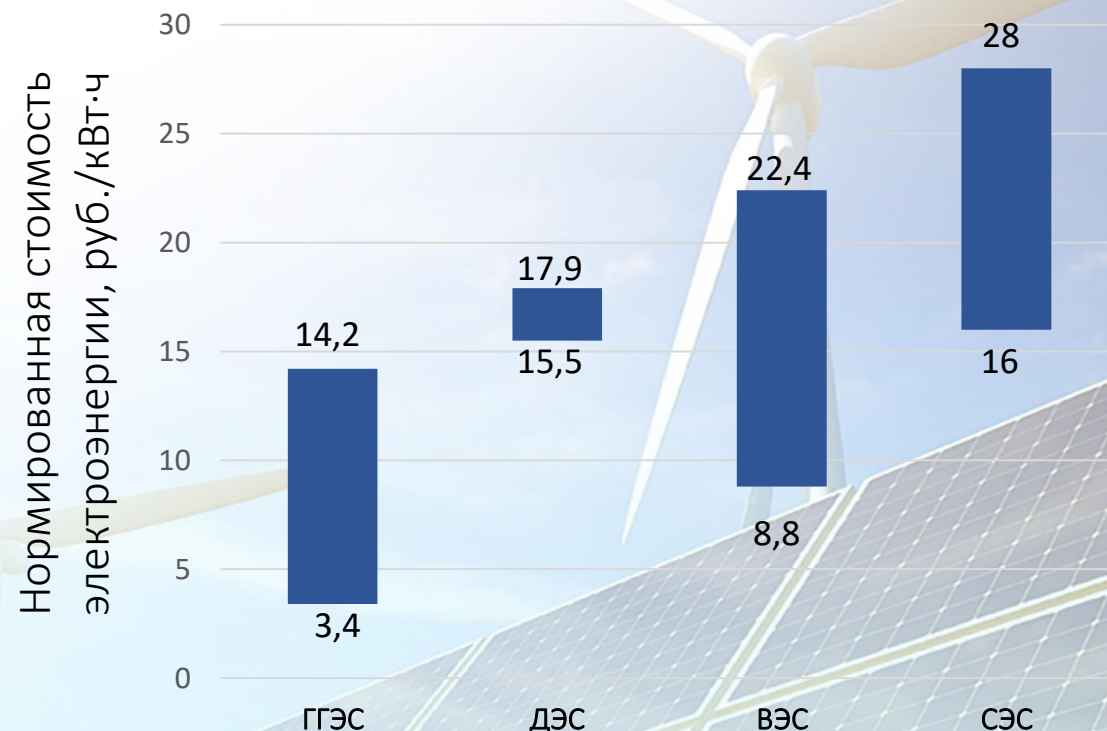
График мощности нагрузки энергосистемы за день



# Технико-экономические оценки

## 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 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/](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/Нм<sup>3</sup>).
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.

Спасибо за внимание!!!