

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI  
OLIV TA‘LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI  
QARSHI DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

**“RAQAMLI SANOAT VA  
AVTOMATLASHTIRISH: TEXNOLOGIK  
JARAYONLAR VA ISHLAB CHIQRISHNI  
BOSHQARISH TIZIMLARIDA INNOVATSION  
YECHIMLAR”**

**MAVZUSIDAGI RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY ANJUMANI**

**MATERIALLAR TO‘PLAMI**

**2025 - yil 18-19-aprel**



**Qarshi - 2025**

32	Цифровизация зелёной энергетики узбекистана в условиях энергоперехода	Ситдиқов Р.А., Радионова О.В.	707
33	Расчёт термодинамических свойств парогазовой смеси	Маматкулова С.Г.	712
34	Zamonaviy shaharlarda velosiped almashish tizimlarining samaradorligi va kelajakdagi istiqbollari	Samatov R.G. Rajapova S.S. Abdug‘apparov D.O.	719
35	Oziq-ovqat xavfsizligini ta’minlashda agrar va oziq-ovqat sohasining tutgan o‘rni	Saidov A. Xoliqov Z.B.	726
36	Binoga integratsiya qilingan fotoelektrik-issiqlik o‘zgartirgich tajriba qurilmasining umumiy tavsifi va tadqiqot o‘tkazish metodikasi	Davlonov X.A. Nasrullayev Y.Z. Boboqulov Z.A.	730
37	Quyosh fotopanellarining samaradorligiga ta’sir qiluvchi omillarni tadqiq qilish	Davlonov X.A. Kamolov U.A. Soxibov M.I.	733
38	Информационные технологии в сфере высшей образования	Саматова Ш. Ю. Хамраев Ш.Г.	738
39	Мультимадал ташишда транспорт-логистика тизимини ривожлантириш масаласи	<i>Комилов. А.Л</i>	743

1. Шваб К. Четвертая промышленная революция. - М.: Изд-во Эксмо, 2016. - 138 с.
2. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы её развития /под ред. Салимова А.У. -Т.: Fan va texnologiyalar. 2021. -952 с.
3. Указ Президента РУз от 05.10.2020 № УП-6079 «Об утверждении Стратегии «Цифровой Узбекистан-2030» и мерах по её эффективной реализации».
4. Закон РУз № ЗРУ-939 «Об электроэнергетике» от 07.08.2024 г.
5. Закон РУз № ЗРУ-940 "Об экономии энергии, ее рациональном использовании и повышении энергоэффективности" от 07.08.2024 г.
6. Постановление Кабинета Министров РУз № 204 «О дополнительных мерах по внедрению рыночных механизмов в топливно-энергетической сфере» от 16.04.2024 г.
7. Указ Президента РУз от 27.03.2025 г. N УП-63 «О мерах по совершенствованию государственного управления в сфере повышения энергоэффективности и развитию рынка услуг энергосервисных компаний».
8. Баринава В.А. и др. Роль цифровизации в глобальном энергетическом переходе и в российской энергетике //Вестник международных организаций, 2021. - Т. 16. - № 4. - С. 126-145. DOI: 10.17323/1996-7845-2021-0406.
9. Текслер А.Л. Цифровизация энергетики: от автоматизации процессов к цифровой трансформации отрасли // Цифровая энергетика, 2018. - В. 5. - С. 3-6.

## **РАСЧЁТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ**

**Маматкулова С.Г. – докторант**

*Каршинского государственного технического университета*

*Аннотация.* В работе исследуются термодинамические свойства парогазовой смеси, образующейся при пиролизе растительной биомассы. С использованием модели Peng–Robinson и программного комплекса Comsol Multiphysics выполнены расчёты плотности, теплоёмкости, теплопроводности, вязкости и других параметров смеси при разных значениях влажности. Представлены зависимости свойств от температуры и молярной доли воды.

**Ключевые слова:** пиролиз биомассы, парогазовая смесь, термодинамические свойства, влажность биомассы, модель Peng–Robinson.

Введение. Наблюдается быстрый рост интереса к разнообразным возобновляемым источникам энергии для декарбонизации общества. Растительная биомасса, включая сельскохозяйственные отходы, считается перспективным конкурентоспособным кандидатом для замены ископаемого топлива [1]. Поэтому термохимическая конверсия биомассы в биотопливо и другие соединения привлекла значительное внимание исследователей [2].

Пиролиз является одним из таких процессов, в котором термохимическая конверсия биомассы осуществляется в отсутствие кислорода. Во время пиролиза структура биомассы термически разлагается на уголь (твёрдая фракция), бионефть (конденсированные пары) и постоянный газ (неконденсирующиеся газы в атмосферных условиях). Относительное количество и состав этих продуктов зависят от нескольких факторов, включая скорость нагрева пиролиза, температуру, время пребывания, технологию и характеристики биомассы [3].

Термическая деградация карбонильных и карбоксильных функциональных групп в трех лигноцеллюлозных компонентах приводит к образованию парогазовой смеси из  $\text{CO}_2$ , разделению связей C и CO при образовании CO и разрыву CН и ароматических групп при образовании  $\text{H}_2$  [4].

Основными компонентами парогазовой смеси, получаемого при пиролизе растительной биомассы, являются  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_3H_6$  и др. [5].

Постановка задачи. Используя рассчитанные данные, такие как средняя молярная масса парогазовой смеси и среднюю удельную газовую постоянную, мы рассчитаем термодинамические свойства парогазовой смеси который выделяется при пиролизе растительной биомассы. Для этого необходимо создать термодинамическую систему для парогазовой смеси, используя необходимые значения компонентов с помощью программы Comsol multiphysics.

Метод исследования. Для описания поведения смеси наиболее подходящая моделью является модель Peng-Robinson (PR). В отличие от идеального газа, модель PR учитывает силы Ван-дер-Ваальса между молекулами, что критично для газов с полярными компонентами ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ). [6].

Для расчета теплопроводности парогазовой смеси выбран метод Кинетическая теория, потому что она основана на молекулярно-кинетической теории газов и учитывает столкновения молекул, что особенно важно для многокомпонентных газовых смесей, таких как продукты пиролиза [7].

Для расчета вязкости газовых смесей оптимальным выбором считается метод Брокава, потому что он учитывает полярность молекул, межмолекулярные силы и квантово-механические эффекты. Так как парогазовая смесь пиролиза биомассы содержит компоненты, находящиеся при высоких температурах (до  $500^\circ C$ ), метод Брокава доказал свою точность в высокотемпературных условиях по сравнению с другими корреляциями [8].

При расчёте термодинамических свойств парогазовой смеси необходимо учитывать массовую долю воды, так как при пиролизе разной растительной биомассы с разной влажностью, термодинамические свойства меняются исходя от температуры процесса. Массовая доля воды в парогазе напрямую зависит от влажности растительной биомассы. Учитывая это, мы вычислили термодинамические свойства парогазовой смеси при разных массовых долях воды в диапазоне  $0.05 \div 0.25$ , исходя от оптимального диапазона % влажности

(рис.4.), которые были исследованы исследователями [9].

Чтобы вычислить процент влажности при молярной доле воды, используем формулу массовой доли воды [10]:

$$w_{H_2O} = \frac{X_{H_2O} \cdot M_{H_2O}}{\sum(X_i \cdot M_i)}$$

где:  $w_{H_2O}$  – массовая доля воды (влажность);  $X_{H_2O}$  – молярная доля воды;  $M_{H_2O}$  – молярная масса воды;  $X_i$  и  $M_i$  - молярные доли и молярные массы всех компонентов смеси.

Результаты исследования. Результаты вычислений приведены на рис.1.

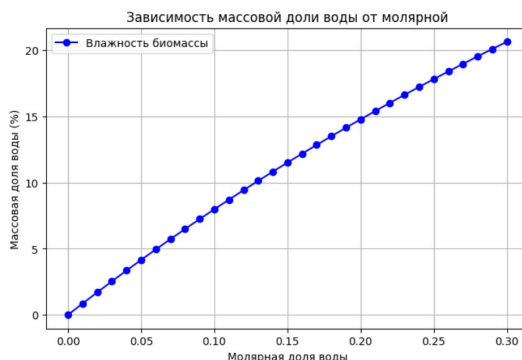


рис.1. Зависимость массовой доли воды от молярной.

С помощью программы Comsol multiphysics рассчитаем термодинамические свойства парогазовой смеси при содержании воды молярной доли в диапазоне  $0.05 \div 0.25$ , исходя от результатов вычислений (рис.1.). Вычисления термодинамических свойств парогазовой смеси будут производиться при разных молярных долях воды в смеси исходя от изменения температуры смеси в диапазоне  $273 \div 573$  К.

При симуляции процесса получили следующие результаты которые предоставлены на рис. 2-7.

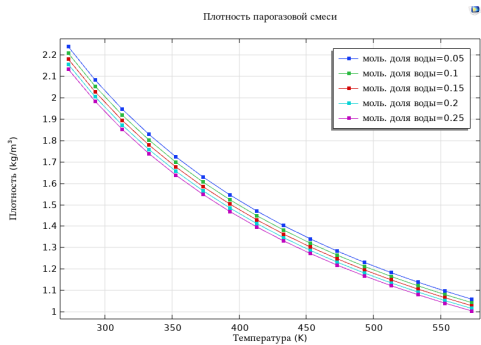


рис.2. Плотность парогазовой смеси.

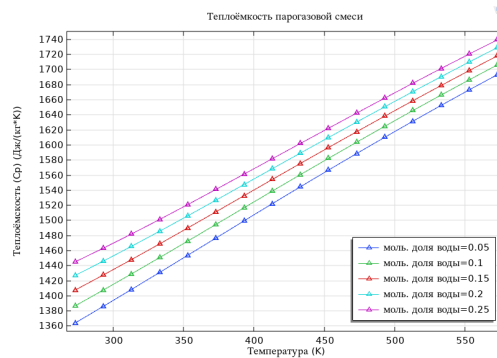


рис.3. Теплоёмкость парогазовой смеси.

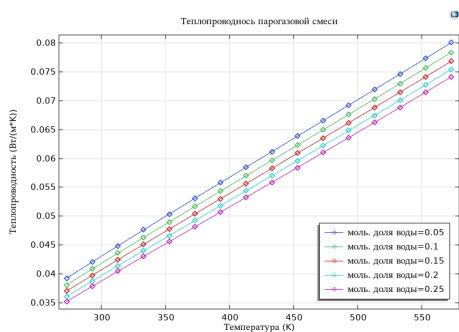


рис.4. Теплопроводность парогазовой смеси

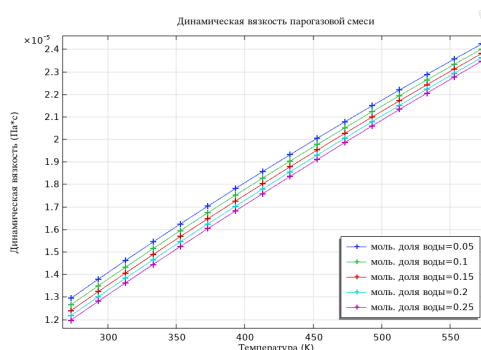


рис.5. Динамическая вязкость парогазовой смеси.

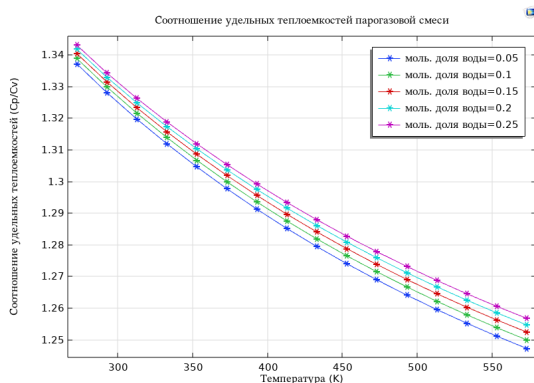


рис.6. Соотношение удельных теплоёмкостей парогазовой смеси.

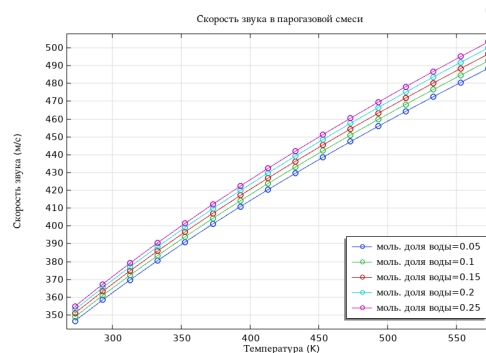


рис.7. Скорость звука в парогазовой смеси

Обсуждение. На основании проведённого моделирования в среде Comsol Multiphysics были получены графические зависимости термодинамических свойств парогазовой смеси от температуры и молярной доли воды.

Анализ результатов показал следующее:

Плотность смеси (рис. 2) уменьшается с ростом температуры и

увеличивается при возрастании молярной доли воды, что связано с высокой плотностью водяного пара по сравнению с другими компонентами.

Теплоёмкость смеси (рис. 3) возрастает с повышением температуры, особенно при высоких значениях содержания воды, что обусловлено вкладом водяного пара в теплоёмкость системы.

Теплопроводность (рис. 4) также демонстрирует рост с температурой, отражая активизацию молекулярного движения и теплопередачи. При этом при увеличении содержания воды наблюдается усиление теплопроводности.

Динамическая вязкость (рис. 5) уменьшается с ростом температуры, но увеличивается с повышением доли воды, что объясняется увеличением межмолекулярного взаимодействия при наличии полярных компонентов.

Соотношение удельных теплоёмкостей ( $C_p/C_v$ ) (рис. 6) растёт с температурой и имеет более выраженное изменение при высоком содержании воды, указывая на изменение тепловых свойств смеси.

Скорость звука в смеси (рис. 7) увеличивается при снижении молярной доли воды и с ростом температуры, что соответствует общей тенденции для газовых смесей с разной плотностью и упругостью.

Заключение. Проведённый расчёт показал, что изменение молярной доли воды в парогазовой смеси оказывает существенное влияние на её термодинамические свойства. Использование модели Peng–Robinson позволило достоверно смоделировать поведение смеси при высоких температурах. Полученные зависимости подтверждают высокую чувствительность термодинамических свойств к составу парогазовой смеси и её температурному режиму. Эти результаты могут быть использованы для расчёта теплообменных процессов в конденсаторах-теплообменниках в реальных условиях.

### **Использованная литература**

1. D. Gielen, D. Saygin, A. Lopez-Peña, N. Wagner, G. Prakash, S. Teske, et al., Methodology Background Document: Development of a Decarbonisation Pathway for the Global Energy System to 2050. A Country-By-Country

Analysis for the G20 Based on IRENA's REmap and Renewable Energy Benefits Programmes, Irena, 2020.

2. F. Ronsse, R. W. Nachenius and W. Prins, Carbonization of Biomass, *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*, Elsevier B.V., 2015, Ch. 11.
3. P. Basu, Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design, 2010.
4. Collard, F.-X., & Blin, J. (2014). A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 38, 594–608
5. A. C. M. Vilas-Boas et al. Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products. *Sustainable Energy Fuels*, 2024, 8, 379-396.
6. M. Ghanbari. A comparison between Peng-Robinson and Soave-Redlich-Kwong cubic equations of state from modification perspective, April 2017 *Cryogenics* 84:13-19, DOI: [10.1016/j.cryogenics.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.04.001).
7. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.
8. K.S. Egorov, L.V. Stepanova. Thermophysical properties of noble gas mixtures with low Prandtl number. *Engineering Journal Science and Innovation*, 2019, DOI: [10.18698/2308-6033-2019-3-1858](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-3-1858).
9. Uzakov G. N., Davlonov H. A., Holikov K. N. Study of the influence of the source biomass moisture content on pyrolysis parameters // *Applied Solar Energy*. – 2018. – Т. 54. – С. 481-484.
10. Колобова А.В., Мальгинов А.В., Нечаев А.В. Динамические методы приготовления газовых смесей. "Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки", 2024