

TECH SCIENCE

ISSN 3030-3702

**TEXNIKA FANLARINING
DOLZARB MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL
SCIENCES**



№ 2 (3) 2025

TECHSCIENCE.UZ

№ 2 (3)-2025

**TEXNIKA FANLARINING DOLZARB
MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES
OF TECHNICAL SCIENCES**

TOSHKENT-2025

BOSH MUHARRIR:

KARIMOV ULUG'BEK ORIFOVICH

TAHRIR HAY'ATI:

Usmankulov Alisher Kadirkulovich - Texnika fanlari doktori, professor, Jizzax politexnika universiteti

Fayziyev Xomitxon – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Rashidov Yusuf Karimovich – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Adizov Bobirjon Zamirovich– Texnika fanlari doktori, professor, O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti;

Abdunazarov Jamshid Nurmuxamatovich - Texnika fanlari doktori, dotsent, Jizzax politexnika universiteti;

Umarov Shavkat Isomiddinovich – Texnika fanlari doktori, dotsent, Jizzax politexnika universiteti;

Bozorov G'ayrat Rashidovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Maxmudov MUxtor Jamolovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Asatov Nurmuxammat Abdunazarovich – Texnika fanlari nomzodi, professor, Jizzax politexnika universiteti;

Mamayev G'ulom Ibroximovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Jizzax politexnika universiteti;

Ochilov Abduraxim Abdurasulovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Buxoro muhandislik-texnologiya instituti.

OAK Ro'yxati

Mazkur jurnal O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi Rayosatining 2025-yil 8-maydagi 370-son qarori bilan texnika fanlari bo'yicha ilmiy darajalar yuzasidan dissertatsiyalar asosiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM" mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

**TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA
FANLARINING DOLZARB MASALALARI**
elektron jurnali 15.09.2023-yilda
130343-sonli guvohnoma bilan davlat
ro'yxatidan o'tkazilgan.

TAHRIRIYAT MANZILI:

Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik
Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.
Elektron manzil:
scienceproblems.uz@gmail.com

Barcha huqular himoyalangan.

© Sciencesproblems team, 2025-yil

© Mualliflar jamoasi, 2025-yil

MUNDARIJA

| | |
|--|-------|
| <i>Raxmanqulova Mashhura va G'ulomov Sherzod</i> PAKETLARNI FILTRLASH ALGORITMLARI TAHLILI VA AMALIYOTDA TAQQOSLASH | 5-10 |
| <i>Razzakova Gulora</i> EDGE COMPUTING VA EDGE INTELLIGENCE: IOT TIZIMLARIDA SAMARADORLIK VA TEZKOR QAROR QABUL QILISH IMKONIYATLARI | 11-17 |
| <i>Rahimov Doston va Toshpo'latov Murodullo</i> IKKINCHI TARTIBLI NOKLASSIK TENGLAMALAR SISTEMASI UCHUN CHEGARAVIY MASALA..... | 18-22 |
| <i>Axmadaliyeva Shoxista, Rasuleva Roziya, Ro'zimova Surayyo</i> RAQAMLI PEDAGOGIKANING ZAMONAVIY TA'LIM TIZIMIDAGI O'RNI..... | 23-30 |
| <i>Abduvoxobov Abbosbek</i> AXBOROT XAVFSIZLIGINI TA'MINLASH TEXNOLOGIYALARI | 31-35 |
| <i>To'rayev Azizbek</i> AVTOMOBIL GRUNTOVKALARIDA BAZALT TOLASINING QO'LLANILISHI: ISTIQBOLLI TADQIQOTLAR VA KELAJAK YO'NALISHLARI..... | 36-46 |
| <i>Абдуллаев Абдурауф</i> МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ГИПЕРКОНВЕРГЕНТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ | 47-62 |
| <i>Ochilov Murodjon va Ibragimov Islomnur</i> QUYOSH PANELLARI YUZASIDAGI IFLOSLANISHNI BARTARAF ETISH UCHUN PYEZOELEKTRIK VIBRATSIYAGA ASOSLANGAN AVTOMATLASHTIRILGAN TOZALASH TIZIMINI LOYIHALASH VA JORIY ETISH USULLARI | 63-72 |
| <i>Маматкулова Сайёра</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННОГО ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ПОДСОЛНЕЧНОЙ БИОМАССЫ В ТРУБЧАТОМ РЕАКТОРЕ ПИРОЛИЗНОЙ УСТАНОВКИ | 73-82 |
| <i>O'tashov Zafar</i> CHIGITNI LINTERLASHDA ARALASHTIRGICHDAGI QAYSHQOQ ELEMENT BILAN ARRALI SILINDRNI HARAkatDAGI CHIGITLAR QATLAMIGA TA'SIRI JARAYONINI MODELLASHTIRISH..... | 83-90 |
| <i>Achilov Jamoliddin</i> G'ALLA O'RISH – TASHISH TIZIMI TEXNIKA VOSITALARINI SAQLASHNI ILMiy ASOSLASHGA DOIR ADABIYOTLAR TAHLILI | 91-96 |

| | |
|--|---------|
| <i>Eshdavlatov Akmal va Pirnzarova Madina</i> SARIMSOQPIYOZ YETISHTIRISH TEXNOLOGIYASI..... | 97-100 |
| <i>Махфуз Ахмади</i> ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ИРРИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ АФГАНИСТАНА И НЕОБХОДИМОСТЬ ИХ АДАПТАЦИИ..... | 101-108 |
| <i>Baytileuova Guljaxan, Davlatboyeva Ozoda, Berdimbetova Amina</i> TRANSFER MATRITSA USULI YORDAMIDA OROL DENGIZI HAVZASIDA YER KONVERSIYASINI TAVSIFLASH..... | 109-114 |
| <i>Payzullayeva Ayzada, Madetov Dauranbek, Berdimbetov Timur</i> GRACE YORDAMIDA SUV BALANSINI VA UNING IQLIM O'ZGARISHIGA MUNOSABATINI BAHOLAS..... | 115-120 |
| <i>Bazarov Dilshod, Norkulov Bezzod, Voxidov Oybek, Rayimova Iroda, Qalandarova Dilsuz</i> SAMARQAND VILOYATI TOG'LI XUDUDIDA SEL OQIMLARINING SHAKLLANISHI VA OQIBATLARI..... | 121-129 |
| <i>Raxmatova Gulhayo</i> RESPUBLIKAMIZNING YIRIK SHAHARLARIDA KO'P QAVATLI AVTOSAQLASH JOYLARINI REJALASHTIRISHNING ZARURATI..... | 130-136 |
| <i>Akberadjiyeva Umida,</i> O'SIMTA HUYAYRASI (SARATON) O'SISHINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH..... | 137-142 |

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННОГО ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ПОДСОЛНЕЧНОЙ БИОМАССЫ В ТРУБЧАТОМ РЕАКТОРЕ ПИРОЛИЗНОЙ УСТАНОВКИ

Маматкулова Сайёра Гулямовна

докторант Каршинского Государственного Технического Университета

e-mail: urisheva80@mail.ru

тел: +998 90 050 0880

orcid: 0000-0002-0987-5298

Аннотация. В статье представлено математическое моделирование тепло- и массообменных процессов пиролиза подсолнечной биомассы в трубчатом реакторе. Модель основана на уравнениях сохранения массы, импульса, энергии и компонентного состава, реализованных в среде SolidWorks. Применён закон Дарси для описания фильтрационного потока через пористую среду. Учтены физико-химические характеристики подсолнечной биомассы, включая теплопроводность, влажность и пористость. Проведено нестационарное численное моделирование с оценкой влияния температуры, скорости, пористости и состава на эффективность процесса. Результаты демонстрируют фронтальное распространение зоны пиролиза снизу вверх с постепенным снижением тепловыделения и образования летучих продуктов. Установлено, что ключевые параметры, такие как пористость и теплопроводность, существенно влияют на скорость и распределение реакции. Разработанная модель может быть использована для оптимизации конструкции реакторов и параметров их работы.

Ключевые слова: пиролиз, подсолнечная биомасса, теплообмен, массообмен, математическое моделирование, трубчатый реактор.

PIROLIZ QURILMASINING QUVURSIMON REAKTORIDA KUNGABOQAR BIOMASSASINI PIROLIZ ISSIQLIK-MASSA ALMASHINISH JARAYONINI MODELLASHTIRISH

Mamatkulova Sayyora Gulyamovna

Qarshi Davlat Texnika Universiteti doktranti

Annotatsiya. Maqolada quvursimon reaktorda kungaboqar biomassasi pirolizining issiqlik va massa almashinish jarayonlarining matematik modellashi keltirilgan. Model SolidWorks muhitida amalga oshirilgan massa, impuls, energiya va komponentlar tarkibini saqlash tenglamalariga asoslangan. G'ovakli muhitdan filtrlash oqimini tasvirlash uchun Darsi qonuni qo'llanilgan. Harorat, tezlik, g'ovaklilik va tarkibning jarayon samaradorligiga ta'sirini baholaydigan sonli modellashtirish o'tkazilgan. Natijalardan piroliz zonasining pastdan yuqoriga qadar frontal tarqalishini, issiqlik ishlab chiqarish va uchuvchan mahsulot hosil bo'lishining asta-sekin pasayishini ko'rish mumkin. G'ovaklik va issiqlik o'tkazuvchanlik kabi asosiy parametrlar sezilarli darajada reaksiya tezligi va taqsimotiga ta'sir qilishi belgilangan. Ishlab chiqilgan model reaktorlar dizaynini va ularning ish parametrlarini optimallashtirish uchun ishlatilishi mumkin.

Kalit so'zlar: piroliz, kungaboqar biomassasi, issiqlik uzatish, massa uzatish, matematik modellashtirish, quvurli reaktor.

DOI: <https://doi.org/10.47390/ts3030-3702v3i2y2025N09>

Введение.

Многофазное поведение пиролиза, требует применения методов математического моделирования, включающее теплопередачу, массообмен, химические реакции и фазовые превращения. Такой подход обеспечит возможность анализа процессов в реакторе, определения критических параметров, оптимизации режимов и геометрии оборудования [1].

Исследователи [2, 3] утверждают, что переход от эмпирических методов проектирования к расчетно-аналитическим системам существенно повышает точность прогноза и снижает издержки при разработке биоэнергетических установок. В частности, это актуально для переработки низкосортной лигноцеллюлозной биомассы.

Математическое моделирование в работе [4] позволяет обосновать выбор условий нагрева, отсева фракций, скорости фильтрации и условий работы в реакторах.

Кроме того, использование численных моделей даёт возможность учесть индивидуальные характеристики биомассы (влажность, пористость, теплопроводность), что важно при создании энергоэффективных установок [5,6].

Материалы и методы.

Объектом моделирования является пиролизная установка с рекуперативным теплообменником (рис.1.), предназначенная для термохимической переработки сельскохозяйственных отходов. Установка включает две основные функциональные зоны: трубчатый реактор пиролиза в водяной рубашке типа труба в трубе и рекуперативный теплообменник. В центре реактора расположен теплоэлектрический нагреватель (ТЭН) с мощностью 2кВт, которая для обеспечения процесса пиролиза передаёт тепло загруженной биомассе. Такая компоновка позволяет эффективно разлагать биомассу с выделением летучих и твёрдых продуктов и утилизировать теплоту пиролизной жидкости с целью предварительного подогрева поступающей воды водяной рубашки.

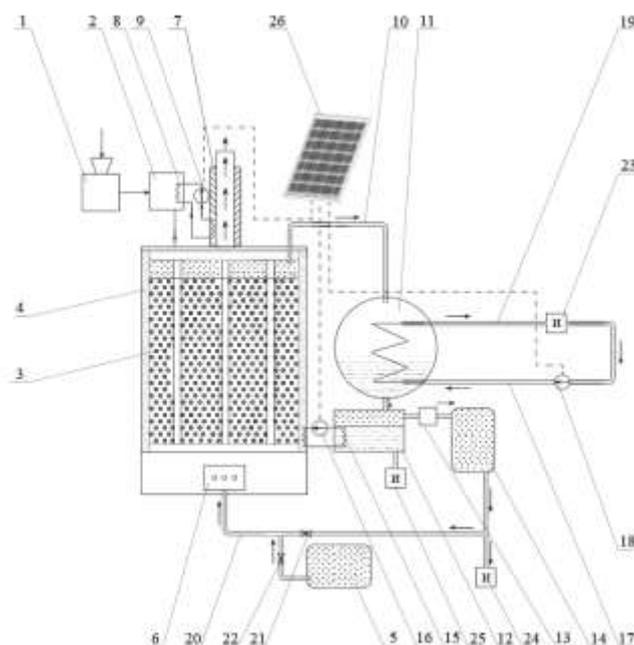


рис. 1. Тепловая схема пиролизной биоэнергетической установки (ПБЭУ) с рекуперативным теплообменником

1 — бак дробилки; 2 — сушильная камера; 3 — пиролизный реактор; 4 — водяная рубашка; 5 — резервное топливо; 6 — топка; 7 — дымоход; 8 — первый рекуперативный теплообменник; 9, 16, 18 — циркуляционные водяные насосы; 10 — труба парогазовой смеси; 11 — конденсатор-охладитель; 12 — бак жидкого топлива; 13 — фильтр; 14 — газгольдер; 15 — второй рекуперативный теплообменник; 17 — труба для воды низкой температуры; 19 — труба для воды высокой температуры; 20 — труба пирогаза; 21, 22 — вентили; 23 — потребитель горячего водоснабжения; 24 — потребитель пирогаза; 25 — потребитель жидкого топлива; 26 — солнечная фотоэлектрическая установка.

В качестве биомассы используется одна из наиболее доступных и массовых отходов аграрного сектора – отходы подсолнечника. Подсолнечная биомасса обладает физико-техническими характеристиками которая предоставлена в таблице № 1. Состав пиролизных продуктов зависит от температурного режима, времени пребывания и степени рекуперации.

Таблица № 1. Физико-технические характеристики подсолнечной биомассы [7,8].

| Показатели | Значения |
|---|---------------|
| Плотность насыпанная, кг/м ³ | 100-130 |
| Влажность исходная, % | 18-22 |
| Низшая теплота сгорания, МДж/кг | 15,3 |
| Зольность, % | 3 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/м ⁰ С | 0,046 – 0,093 |
| Пористость в насыпанном виде | до 0,95 |

В данной работе цель моделирования заключается в количественном описании тепло- и массообменных процессов, протекающих в пиролизной установке с неподвижным слоем подсолнечной биомассы. Для этого необходимо построить систему уравнений, отражающую движение газов через пористую реакционную среду, теплопередачу между фазами, а также процессы химического превращения органической составляющей биомассы в условиях нагрева.

Геометрически установка моделируется как цилиндр с осевой симметрией. Для расчётов использована **двумерная осесимметричная модель**, которая построена в координатах r и z и позволяет учитывать радиальные и аксиальные градиенты температуры, скорости и концентраций. Увеличена плотность узлов в областях с высокими градиентами температуры и скорости. Геометрия реактора включает активную зону пиролиза. Расчётная область включает: зону загрузки сырья, активную зону пиролиза, область теплообменника с возвратом тепла.

В модели учитываются следующие основные переменные:

- Температура $T(r, z, t)$;
- Давление $p(r, z, t)$;
- Вектор скорости парогазовой смеси $\vec{v}(r, z, t) = (u, w)$;
- Массовые доли компонентов $w_i(r, z, t)$.
- Плотность ρ , пористость ϵ , теплоёмкость c_p , теплопроводность λ .

При построении модели приняты следующие допущения:

- поток парогазовой смеси — ламинарный;
- фаза твёрдого топлива неподвижна;
- изменение пористости и плотности моделируется как функция температуры и степени разложения;
- теплообмен с окружающей средой сводится к граничному условию первого рода;
- химические реакции описываются с использованием кинетики первого порядка.

Граничные и начальные условия на входе в установку задаются:

- температура подаваемого тепла;
- начальная температура сырья;
- начальные массовые доли компонентов: $w_{\text{gas}}=0$, $w_{\text{tar}}=0$.

На выходе и стенках применяются условия скольжения для парогаса и тепловой поток от стенки реактора. Задача моделирования сводится к решению замкнутой системы дифференциальных уравнений с начально-граничными условиями, которая описывает поведение многокомпонентной среды в условиях пиролиза биомассы.

Для описания процессов, протекающих в трубчатом реакторе с пористым неподвижным слоем подсолнечной биомассы, используется система дифференциальных уравнений, основанных на законах сохранения массы, импульса, энергии и компонентного состава, которые были реализованы в SolidWorks.

Для каждой компоненты в пористой среде уравнение сохранения массы записывается в форме:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon_p w_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} w_i) = \nabla \cdot (D_{\text{эф}} \nabla w_i) + R_i \quad (1)$$

где: ρ – плотность фазы; ε_p – пористость среды; w_i – массовая доля компонента i ; $\vec{v} = (u, w)$ – вектор скорости парогаса; $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии; R_i – скорость химического превращения вещества i .

Это уравнение описывает изменение содержания компонента в результате конвекции, диффузии и химических превращений.

В данной модели движения парогаса через пористую структуру неподвижного слоя подсолнечной биомассы описывается законом Дарси, что обусловлено характером среды и низкими фильтрационными скоростями. Такой подход позволяет эффективно связать градиенты давления с фильтрационной скоростью парогаса и учитывать анизотропную проницаемость материала, которая изменяется в зависимости от степени пиролиза.

В модели пиролиза подсолнечной биомассы уравнение сохранения импульса реализовано через **закон Дарси**:

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla p + \vec{v}_r \quad (2)$$

где: \vec{v} – скорость фильтрационного потока; k – проницаемость пористой среды; μ – динамическая вязкость; ∇p – градиент давления; \vec{v}_r – поправка на гравитацию.

Тепловое поле внутри реактора описывается уравнением энергии, учитывающим теплопроводность, конвекцию и внутренние источники теплоты от химических реакций:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \vec{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{\text{эф}} \nabla T) + Q_{\text{реак}} \quad (3)$$

где: T – температура, c_p – удельная теплоемкость, $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность среды, $Q_{\text{реак}}$ – теплопоглощение в результате реакций.

Данное уравнение описывает температурный режим в установке и позволяет учитывать влияние теплообмена между потоками.

Передача вещества в парогазовой фазе и взаимодействие с твёрдым топливом учитываются через следующее уравнение:

$$\frac{\partial(\rho w_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} w_i) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla w_i) + R_i \quad (4)$$

где: D_i – коэффициент молекулярной диффузии.

В данном уравнение учитывается перенос компонентов в результате движения среды, молекулярной и термодиффузии, а также их разрушение в химических реакциях.

Полученные уравнения составляют замкнутую систему, которая описывает взаимодействие тепловых, механических и химических процессов в пиролизной установке. Численное решение позволит анализировать влияние ключевых параметров (температуры, скорости потока, состава сырья) на эффективность теплового и массообменного взаимодействия, а также оптимизировать конструкцию и режимы работы оборудования.

В среде моделирования SolidWorks численное решение представленных системы уравнений основана на методе конечных элементов. Среда моделирования позволит интегрировать уравнения переноса массы, импульса (через закон Дарси), энергии и компонентного состава в едином многофизическом подходе.

Представленные системы уравнений решаются в нестационарном режиме с изменением времени $t=60, 120, 180, 240$ мин. Уравнения решаются с использованием: для временной дискретизации используется неявная схема (Backward Differentiation Formula, BDF), для нелинейных систем метод Newton-Raphson, с встроенным мультифизическим решателем SolidWorks с автоматическим контролем шага по времени.

Результаты.

Моделирование процесса пиролиза в среде моделирования SolidWorks, позволило отследить формирование и продвижение **реакционного фронта** внутри трубчатого реактора.

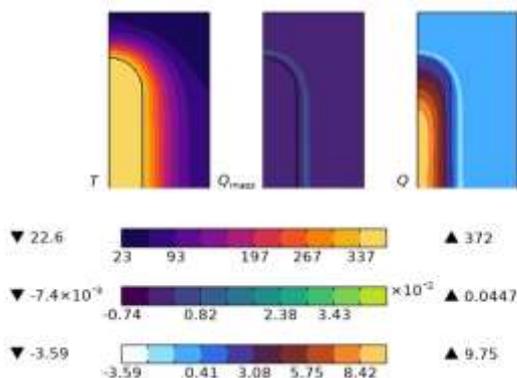


рис.2. Распределение температуры, массового источника и тепловыделения

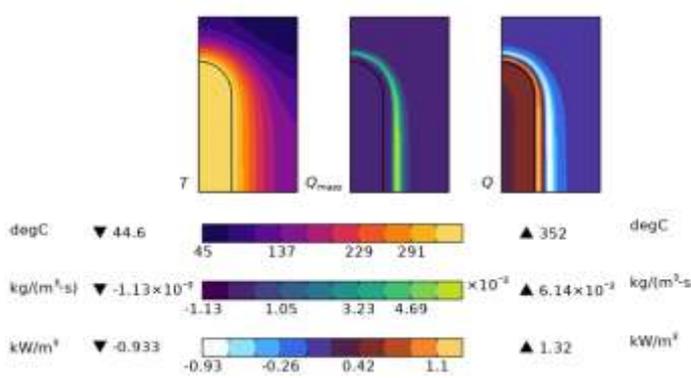


рис.3. Распределение температуры, массового источника и тепловыделения

(60 минут).

(120 минут).

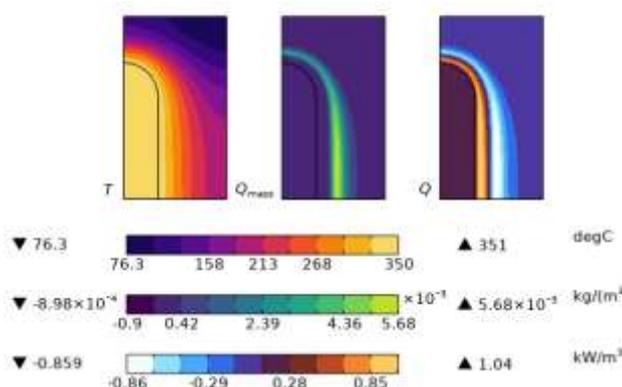


рис.4. Распределение температуры, массового источника и тепловыделения (180 минут).

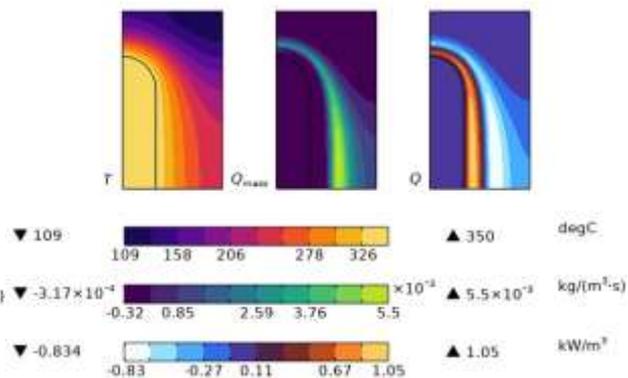


рис.5. Распределение температуры, массового источника и тепловыделения (240 минут).

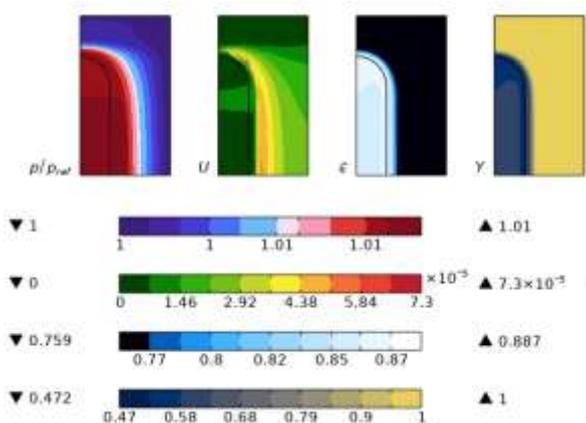


рис. 6. Распределение давления, скорости, пористости и массовой доли летучих компонентов (60 минут).

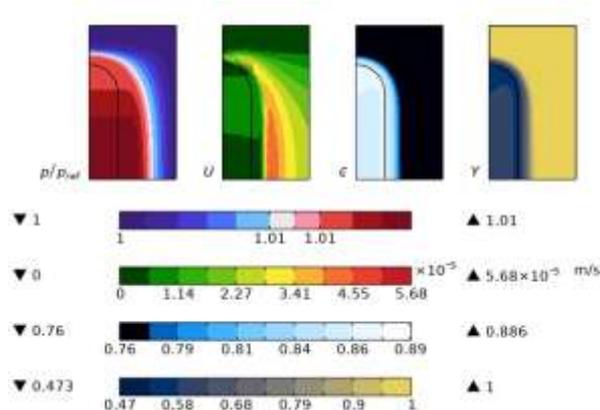


рис. 7. Распределение давления, скорости, пористости и массовой доли летучих компонентов (120 минут).

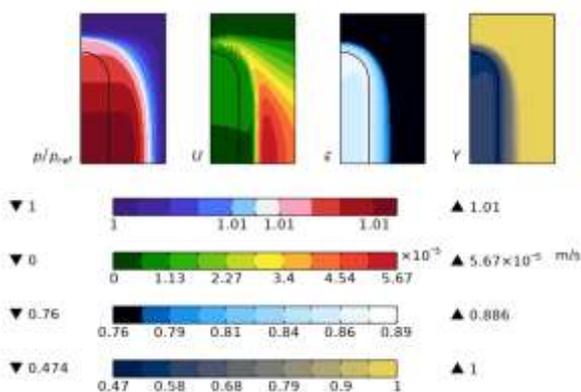


рис. 8. Распределение давления, скорости, пористости и массовой доли летучих компонентов (180 минут).

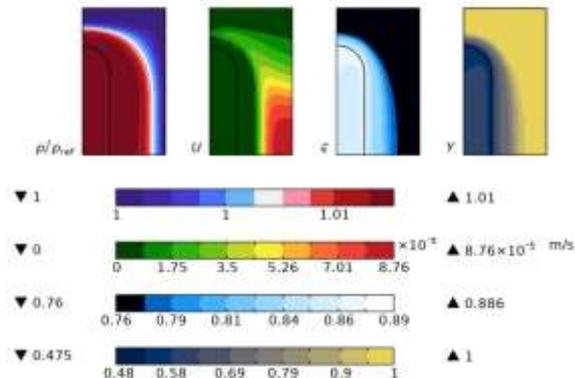


рис. 9. Распределение давления, скорости, пористости и массовой доли летучих компонентов (240 минут).

Обсуждение.

На рис. 2 отображены результаты численного моделирования, фиксированные на временной точке в 60 минут. Зафиксированное максимальное значение температуры, около $372\text{ }^{\circ}\text{C}$, отмечается в нижнем сегменте реактора, точно соответствуя области активного пиролиза. Наблюдаемый температурный градиент сигнализирует о начальном этапе распространения теплового воздействия, направленного вверх по загрузке. Интенсивное формирование летучих компонентов локализовано в узкой области, пространственно совпадающей с фронтом температурного воздействия. Максимальный показатель достигает примерно $0.045\text{ кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$, что служит индикатором пикового значения химической активности. Объемное тепловыделение зафиксировано на уровне до $9.75\text{ кВт}/\text{м}^3$ и сконцентрировано в непосредственной близости от области, соответствующей тенту. Представленные данные служат подтверждением начала активной фазы пиролиза к 60-й минуте; фронт реакции формируется в нижней части слоя, сопровождаясь интенсивным тепловыделением и высвобождением летучих фракций.

На графиках (рис. 3) продемонстрированы профили основных переменных модели, зафиксированные спустя 120 минут после начала процесса. Отмечается увеличение области высоких температур по вертикали реактора. Максимальная температура зафиксирована на уровне $352\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тепловой фронт перемещается вверх, что свидетельствует об активном пиролизе во втором и третьем слоях загрузки. Зона выделения летучих продуктов следует за температурным фронтом в направлении вверх. Интенсивность реакции снижается по сравнению с показателями 60-минутного отрезка — максимум составляет примерно $\sim 0.00614\text{ кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$, что указывает на выгорание нижнего слоя. Объемное тепловыделение сосредоточено в зоне, где совпадают температурный и реакционный фронты. Максимум существенно падает до $\sim 1.32\text{ кВт}/\text{м}^3$, что отражает постепенное уменьшение наиболее реакционноспособной фракции биомассы. На текущем этапе наблюдается устойчивое продвижение фронта пиролиза, сопровождаемое снижением интенсивности массо- и тепловыделения. Данные изменения соответствуют логике распространения реакции, обусловленной выгоранием нижней части загрузки и началом активации средних слоёв.

На рис. 4 представлены данные, отражающие финальную фазу активного пиролиза. Воздействие температуры распространяется почти по всей площади реактора, фиксируясь на отметке около $351\text{ }^{\circ}\text{C}$. Распределение температур выравнивается, указывая на налаживание процесса теплообмена внутри реактора. Область реакции перемещается в верхнюю часть слоя. Интенсивность выделения летучих веществ существенно падает (пиковое значение около $0.00568\text{ кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$), что говорит о частичном завершении процессов терморазложения в нижних и средних слоях. Тепловая активность сохраняется лишь в верхних областях слоя, в то время как нижние участки переходят в режим догорания и охлаждения.

На рис. 5 запечатлён этап (240 минут), практически совпадающий с окончанием интенсивной фазы пиролиза. Тепловой фронт дошёл до верхнего предела слоя. Температура стабилизировалась в районе $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ по всей вертикали реактора. Данное распределение говорит о завершении распространения тепловой волны и формировании, по сути, однородного температурного поля. Зона формирования летучих фракций крайне мала и сосредоточена возле выходного отверстия реактора. Интенсивность реакции понизилась до $\sim 0.0055\text{ кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$, что свидетельствует о почти

полном прекращении процессов терморазложения биомассы. Фиксируется остаточное тепловыделение ($\sim 1.05 \text{ кВт/м}^3$), отражающее финишные этапы разложения и минимальные процессы тления.

На рис. 6 отображены основные параметры газодинамики и структуры слоя биомассы подсолнечника, изученные на начальной стадии пиролиза — спустя 60 минут от момента запуска процесса. По оси потока отмечено падение давления: оно уменьшается от 1.01 до 1.0. Именно градиент давления является главным драйвером для фильтрационного потока в пористой среде. Модуль скорости газа показывает наибольшие значения ($\sim 7.3 \times 10^{-5} \text{ м/с}$) вблизи нижней зоны, где пиролиз наиболее интенсивен. Профиль скорости раскрывает влияние как теплового расширения газов, так и сопротивления, оказываемого пористым материалом. Структура биомассы, представленной подсолнечником, трансформируется под воздействием термохимического разложения: значения снижаются с ~ 0.88 до ~ 0.76 . Это свидетельствует о начальных процессах, включающих усадку, спекание и деградацию биомассы в зоне активного теплового воздействия. Отмечается формирование фронта летучих веществ: концентрация достигает 1.0 в зоне термического разложения, указывая на активную фазу генерации пиролизных газов.

На текущем этапе моделирования процесса пиролиза (см. рис. 7) сохраняется градиент давления, задающий направление: от 1.01 внизу слоя до 1.0 наверху. Это гарантирует устойчивое фильтрационное движение газообразной фазы, устремленной вверх. Наибольшие значения скорости фиксируются на уровне $\sim 5.68 \times 10^{-5} \text{ м/с}$ и наблюдаются в области активного пиролиза. По сравнению с данными за 60-минутный срез, наблюдается уменьшение максимальной скорости. Этот эффект объясняется выгоранием наиболее проницаемых участков материала и частичным разрушением структуры. Происходят изменения и в профиле пористости: фронт ее снижения смещается вверх. Это иллюстрирует прогрессирующее термохимическое разрушение биомассы, сопровождающееся уплотнением слоя. Минимальная величина пористости достигает значения 0.76. Область активного образования летучих продуктов расширилась в направлении вверх. Значения параметра Y , близкие к 1, наблюдаются в верхней половине реактора, что свидетельствует о продвижении фронта реакции и о насыщении продуктами пиролиза.

На текущем временном интервале (см. рис.8) градиент давления фильтрации остается неизменным. Значения варьируются в диапазоне от 1.0 до 1.01, что свидетельствует о устойчивом движении парогазовой фазы вдоль оси реактора. Распределение скоростей приходит к равновесию, достигая максимума приблизительно $\sim 5.67 \times 10^{-5} \text{ м/с}$. Анализ структуры поля скоростей в сопоставлении с предыдущими моментами времени указывает на уменьшение сопротивления в зоне выгорания слоя и расширение области с однородным течением. Снижение пористости фиксируется почти во всей центральной области реактора. Отмечается выравнивание значений по высоте, что служит подтверждением деструкции структуры биомассы и завершения термохимических преобразований в нижних и средних слоях. Область с $Y \approx 1$ значительно расширяется по вертикали, указывая на насыщение парогаса летучими соединениями. Верхняя часть реактора практически полностью заполнена парогазовой смесью.

На последнем временном этапе численного моделирования (см. рис.9) градиент давления демонстрирует незначительные колебания по вертикали слоя (в диапазоне от 1.01 до 1.0), что является индикатором неизменности фильтрационного потока в условиях минимального противодействия со стороны среды. Возрастание обусловлено распадом структуры биомассы и формированием каналов в полностью выгоревшем пористом массиве. Данный факт также свидетельствует о уменьшении сопротивления и улучшении проходимости. Пористость достигает стабильных величин по всей высоте слоя (~0.88). Выравнивание пористости подтверждает окончание термохимических процессов и формирование устойчивой остаточной структуры. Зона с $Y=1$ простирается на всю толщину слоя, указывая на насыщение парогазовой смеси и полную переработку исходного материала. Дополнительное выделение летучих веществ практически не наблюдается.

Процесс пиролиза распространяется снизу вверх, полностью заполняя всю высоту трубчатого реактора к периоду времени между 180 и 240 минутами. На протяжении всего времени эксперимента наблюдается четкая корреляция между температурой, степенью пористости, тепловым выделением и параметрами фильтрации.

Выводы.

Разработанная математическая модель основывается на фундаментальных уравнениях сохранения массы, импульса, энергии и компонентного состава, реализованных в многофизической среде SolidWorks. Использование закона Дарси для описания газового потока в неподвижном пористом слое с низким числом Рейнольдса (< 1) является строго обоснованным.

Факторы которые описывают распределений температуры, давления, пористости и компонент с ожидаемыми механизмами пиролиза, отсутствие колебаний или нестабильностей при варьировании шага по времени, **соответствием литературным и экспериментальным данным**, подтверждают достоверность модели.

Анализ модели показывает высокую чувствительность к ключевому параметру – **пористость**, влияющий на фильтрационное сопротивление и объёмную теплопроводность. Снижение ϵ на 10 % увеличивает скорость пиролиза на ~8 %. При уменьшении **коэффициента теплопроводности (λ)** в 2 раза распределение температуры замедляется на 25–30 %. Варьирование **кинетической** константы разложения древесины на 20 % влияет на положение фронта летучих на ~15 %. Начальная **влажность** биомассы влияет на задержку начала пиролиза и распределение теплового поля.

Выводы, полученные в ходе численного эксперимента, позволяют рекомендовать модель для последующего параметрического анализа, масштабирования и оптимизации конструкции пиролизного реактора.

Adabiyotlar/Literatura/References:

1. Митрофанов А.В, Сизова О.В. Математическое моделирование и анализ функционирования цилиндрического пиролизного реактора с радиальным нагревом, Вестник ИГЭУ. 2021. № 5.

2. Грачев А.Н. Разработка методов расчёта технологии и оборудования пирогазетической переработки древесины в жидкие продукты. Автореферет, Казань. 2012.
3. Mamatkulova S. G., Uzakov G. N. Modeling and calculation of the thermal balance of a pyrolysis plant for the production of alternative fuels from biomass //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1070. – №. 1. – С. 012040.
4. Тунцева Д.В., Сафин Р.Г. Переработка лингина термическим способом. Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 16.
5. Митрофанов А.В., Колибаба О.Б. Исследование тепло- и массообмена в процессе топливоподготовки частицы биомассы с высокой влажностью. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. № 4.
6. Uzakov, G., Mamatkulova, S., Ergashev, S., Qodirov, F., & Turayev, A. (2023). Modeling of heat exchange processes in a condenser of a pyrolysis bioenergy plant. In BIO Web of Conferences (Vol. 71, p. 02021). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102021>
7. Алешина А. С., Сергеев В. В. Газификация твердого топлива: учеб. Пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. — 202 с.
8. Mamatkulova S. G., Uzakov G. N., Qodirov F. E. Modeling and Analysis of the Kinetics of the Pyrolysis Process of Biomass with Influence Raw Material Composition on Comsol Multiphysics, 2024 4th International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS), Tashkent, Uzbekistan, 2024, pp. 1315-1318, DOI: [10.1109/ICTACS62700.2024.10840876](https://doi.org/10.1109/ICTACS62700.2024.10840876).

ISSN: 3030-3702 (Onlayn)
САЙТ: <https://techscience.uz>

TECHSCIENCE.UZ

**TEXNIKA FANLARINING DOLZARB
MASALALARI**

№ 2 (3)-2025

TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL SCIENCES

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM" mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

**TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA
FANLARINING DOLZARB MASALALARI**
elektron jurnali 15.09.2023-yilda
130343-sonli guvohnoma bilan davlat
ro'yxatidan o'tkazilgan.

TAHRIRIYAT MANZILI:
Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik
Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.
Elektron manzil:
scienceproblems.uz@gmail.com

Barcha huqular himoyalangan.
© Sciencesproblems team, 2025-yil
© Mualliflar jamoasi, 2025-yil