
АВТОМАТТАНДЫРУ, ТЕЛЕМЕХАНИКА, БАЙЛАНЫС, КОМПЬЮТЕРЛІК
ҒЫЛЫМДАР
AUTOMATION, TELEMCHANICS, COMMUNICATIONS, COMPUTER SCIENCE
АВТОМАТИЗАЦИЯ, ТЕЛЕМЕХАНИКА, СВЯЗЬ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

УДК 544.272

DOI 10.52167/1609-1817-2024-134-5-124-133

Е.Н. Амиргалиев[✉], Т.Ж. Мерембаев, В. Рудаков

Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК,
Алматы, Казахстан
E-mail: amir_ed@mail.ru

**РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА СОСТАВ ГАЗА ПРИ
КОМПРИМИРОВАНИИ**

Аннотация. Процесс компримирования биогаза играет ключевую роль в его использовании как возобновляемого источника энергии. Компримирование, или сжатие, биогаза необходимо для улучшения его транспортабельности, хранения и последующего использования в различных энергетических системах.

Моделировать процесс компримирования является сложным процессом, так как имеется множество динамических параметров в установке биогазовой установки. В частности, изменения давления в физическом процессе компримирования влияет на физические свойства газа, но и на его химический состав. В данном исследовании рассматриваются подходы к моделированию с точки зрения энергетической системы, а также с точки зрения оптимизации процессов установки. Мы используем язык Python для среды моделирования процесса компримирования, в частности мы моделируем изменения давления на состав газа при компримировании. Данная разработанная среда моделирования позволяет визуализировать изменения в составе газа в трехмерном пространстве и времени. Разработанная информационная система позволяет моделировать и визуализировать изменения в составе газа при его компримировании под воздействием повышения давления. Данная модель может быть полезной для моделирования и последующего влияния процесса компримирования на химический состав газа и его потенциальное использование в различных приложениях.

Ключевые слова. Биогаз, моделирование, анаэробное сбраживание, энергетическая система, выбросы углекислых газов.

Введение.

Процесс компримирования биогаза играет важную роль в его использовании как источника энергии и топлива. Однако изменение давления влияет не только на физические свойства газа, но и на его химический состав. В данной научной статье мы представляем созданную программу на Python, которая моделирует влияние повышения давления на состав газа при компримировании. Программа позволяет визуализировать изменения в составе газа в трехмерном пространстве и времени.

В обзорной статье [1] обсуждаются стратегии моделирования как с точки зрения энергетической системы, так и с точки зрения оптимизации процессов. В нем исследуются преимущества и недостатки, связанные с включением комплексных и тщательно исследованных моделей процессов в модели энергетических систем. Кроме того, он

подчеркивает потенциал создания динамичных и изменяемых бизнес-моделей использования биогаза.

Материалы и методы.

В этой исследовательской работе [2] объединение модели анаэробного сбраживания № 1 с моделью газификации ANN привело к созданию набора интегрированных моделей, предназначенных для эффективного моделирования технологии интеграции анаэробного сбраживания и газификации биомассы. Исследование выявило значительное ускорение сокращения выбросов углерода в течение первых 15 дней анаэробного сбраживания, достигая своего пика на 15-й день.

Авторы решают задачу оптимального определения размеров генератора, работающего на биогазе, на животноводческой ферме, создавая модели процесса анаэробного варочного котла и резервуара для хранения газа [3]. Полученные данные показывают, что повышение параметра неприятия риска приводит к снижению мощности как генераторов биогаза, так и резервуара для хранения, что в конечном итоге приводит к снижению общей прибыли.

Одной из задач моделирования является сбор и хранение данных биогазовой установки. В статьях [4-6] авторы описали несколько подходов к сбору и анализу данных биогазовой установки. Рассмотрены несколько оптимальных вариантов сбора и хранения временных рядов с различных датчиков биогазовой установки, рисунок 1 и 2.

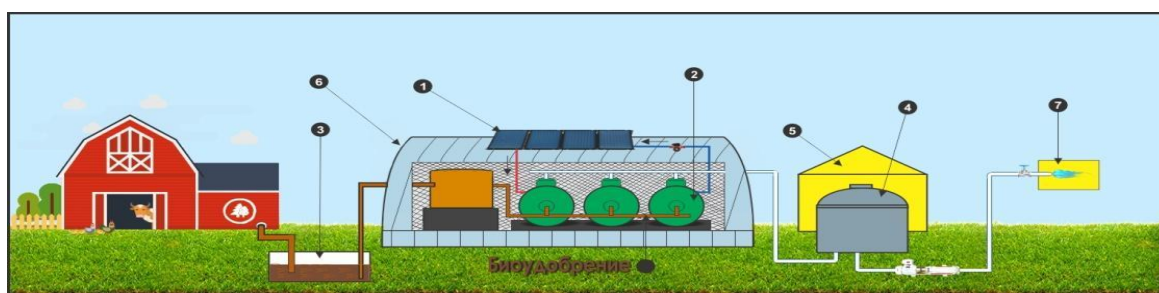


Рисунок 1 – Иллюстрация биогазового комплекса. 1 – Гелиоколлектор. 2 – Реакторный блок. 3 – Гомогенизатор. 4 – Газгольдер. 5 – Ангар для хранения биогаза. 6 – Ангар для реакторного блока. 7 – Выход биометана и биоудобрения

В биогазовом комплексе все технологические процессы автоматизированы. Управление и мониторинг функционированием биогазового комплекса осуществляются с помощью мониторинга основных показателей через dashboard биогазовой установки.

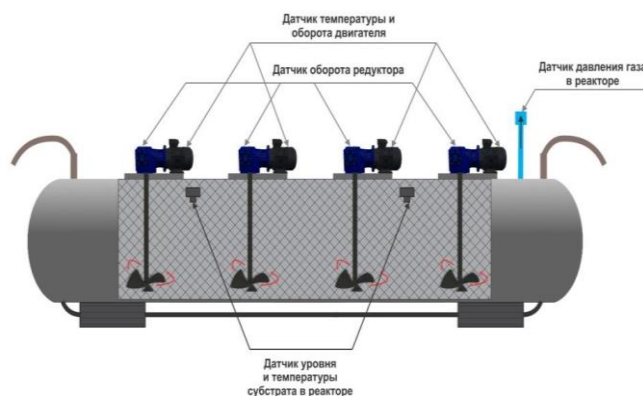


Рисунок 2 – Реактор модельной биогазовой установки

Модель компримирования и химического состава газа.

Ниже представлены основные компоненты реализации приложения для визуализации и моделирования :

1. Инициализация параметров: инициализация начальных условий моделирования, таких как давление, время, количество позиций, структуры данных для хранения временных точек, давления, а также состава газа.

2. Моделирование процесса:

а) Расчет давления: использование данных с биогазовой установки по изменению давления и состава газа.

б) Обработка состава газа: при изменении содержания CO₂ в зависимости от текущего давления - редактирование значений в формулах.

3. Фильтрация и ограничение: применение ограничений к давлению и составу газа, учитывая критические значения.

4. Визуализация данных:

а) Создание трехмерного графика для наглядного представления изменений давления газа во времени и пространстве.

б) Отображение состояния газа: предоставление текстового описания изменений в составе газа на основе результатов моделирования.

Для реализации предложена следующая структура данных и алгоритмы:

1) Использование массивов для эффективного хранения и обработки больших объемов данных.

2) Применение векторизованных операции для расчетов, улучшая производительность.

3) Интегрирование математических и статистических функции для моделирования физических процессов.

В архитектуре разрабатываемой программы применяются передовые методы обработки и анализа данных, а также алгоритмические решения, обеспечивающие высокую точность и производительность моделирования. Использование многомерных массивов и матриц обеспечивает эффективную обработку большого объема данных, получаемых в ходе экспериментов на биогазовых установках. Алгоритмические решения включают в себя сложные математические модели для понимания и расчёта физических процессов в биогазовой установке, и визуализации данных, что позволяет достоверно моделировать реальные условия эксплуатации и вносить основанные на данных прогнозы относительно эффективности биогазовой установки и процесса компримирования. Методы векторизации и оптимизации вычислений обеспечивают высокую скорость обработки данных, что критически важно для анализа сложных процессов в реальном времени.

Результаты и обсуждение.

Моделирование давления в биогазовой установке.

Давление в биогазовой установке моделируется как функция пространственных и временных параметров, используя как реальные измеренные значения, так и математические модели. Основная формула давления интегрирует реальные значения давления, полученные от датчиков, с синусоидальными функциями, что позволяет моделировать динамическое поведение давления в пространстве и времени. Это подход позволяет учитывать как геометрические особенности установки, так и временные изменения в рабочих условиях.

Динамика состава газа.

Содержание CO₂ в газе изменяется в зависимости от давления, особенно при достижении определенных критических значений. Модель предполагает, что с

увеличением давления доля CO_2 в газовой смеси возрастает. Формула учитывает коэффициент влияния давления, который определяет степень изменения концентрации CO_2 в зависимости от давления. Эта часть модели важна для прогнозирования изменений в химическом составе газа при различных рабочих режимах установки.

Анализ критических условий.

Определение критического давления, при котором происходят значительные изменения в составе газа, является ключевым аспектом модели. Это позволяет определять границы безопасной и эффективной эксплуатации установки, а также прогнозировать возможные риски и изменения в производительности при различных условиях работы.

Моделирование давления.

Давление моделируется как функция времени и пространства, используя синусоидальные функции и реальные изменения давления в биогазовой установке.

Давление = Начальное давление + Реальное значение давления $\times \sin(2\pi \times \text{позиция}) \times \sin(2\pi \times \text{время} / \text{время моделирования})$

Содержание CO_2 динамически изменяется в зависимости от давления, особенно при превышении критического уровня.

При высоких значениях давления CO_2 увеличивается пропорционально давлению.

К критическим условиям относится определение критического давления, при котором происходят значительные изменения в составе газа.

Доля $\text{CO}_2 = \text{Доля } \text{CO}_2 + \text{Коэффициент влияния давления} \times (\text{Давление} / \text{Максимальное давление})$, где "Коэффициент влияния давления" определяет, насколько сильно давление влияет на изменение доли CO_2 в газе.

Программа основана на следующей модели компримирования газа:

1) Начальные параметры задаются, включая начальное давление, максимальное давление, время моделирования, количество временных точек и позиций.

```
initial_pressure_pascals = 0 # начальное давление в Паскалях
max_pressure_pascals = 30000 # максимальное давление в Паскалях (увеличено)
simulation_time = 10 # время моделирования (в единицах времени)
num_time_points = 50 # количество временных точек
num_positions = 50 # количество позиций
```

2) Создаются массивы для записи изменений давления, времени, позиции и химического состава газа.

```
time_points = np.linspace(0, simulation_time, num_time_points)
positions = np.linspace(0, 1, num_positions)
pressure_values = np.empty((num_positions, num_time_points))
```

3) Моделируется изменение давления с учетом колебаний и химического состава газа. В данном разделе ПО помещаются текущие параметры системы компримирования биогаза, такие как: химический состав, содержание CO_2 (углекислого газа), далее на их основе моделируется поведение и состав газа, при изменении его давления.

```
for i, position in enumerate(positions):
    for j, time in enumerate(time_points):
        pressure = initial_pressure_pascals + gas_deformations * np.sin(2 * np.pi * position)
        * np.sin(2 * np.pi * time / simulation_time)
        methane_fraction = gas_composition[i, j, 0]
        co2_fraction = gas_composition[i, j, 1]
```

```
# Логика для фильтрации газа (пример: уменьшение давления при большом  
содержании CO2)
```

```
if co2_fraction > 0.5:
```

```
    # Пример: увеличение содержания CO2 при высоком давлении  
    co2_fraction += gas_deformations * (pressure / max_pressure_pascals)  
    co2_fraction = min(co2_fraction, 1.0) # Ограничиваем до 1.0
```

```
# Ограничение давления в диапазоне от 0 до max_pressure_pascals (включая  
критическое давление)
```

```
pressure = np.clip(pressure, 0, max_pressure_pascals)  
pressure_values[i, j] = pressure
```

Программа создает 3D график, который отображает изменение давления в зависимости от времени и позиции. Давление представлено на вертикальной оси, время - на горизонтальной оси, а позиция - на горизонтальной плоскости. Цветовая шкала позволяет оценить значения давления.

```
# Создаем сетки времени и позиции
```

```
time_grid, position_grid = np.meshgrid(time_points, positions)
```

```
# Создаем 3D график
```

```
fig = plt.figure(figsize=(10, 6))
```

```
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
```

```
# Строим поверхность изменения давления
```

```
surf = ax.plot_surface(time_grid, position_grid, pressure_values, cmap='viridis')
```

```
# Настройка цветовой шкалы
```

```
fig.colorbar(surf)
```

```
# Настройка осей
```

```
ax.set_xlabel('Время')
```

```
ax.set_ylabel('Позиция')
```

```
ax.set_zlabel('Давление (Па)')
```

```
# Вывод графика
```

```
plt.title("Моделирование изменения давления и фильтрации биогаза")
```

```
plt.show()
```

Пример модели:

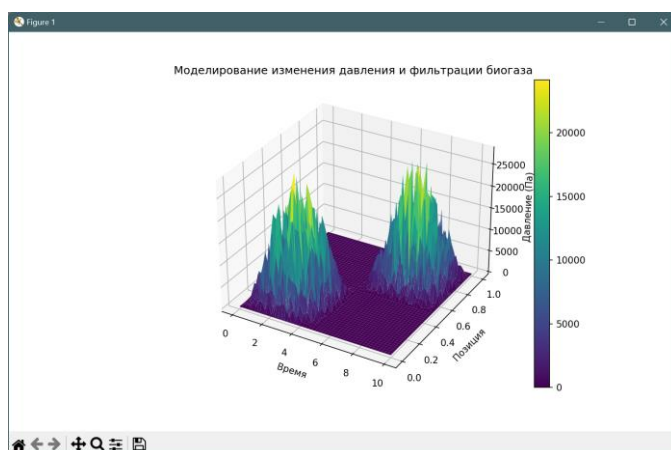


Рисунок 3 – Пример 3D визуализации данных

Данная программа также выводит данные по изменениям уровня содержания CO₂ и Метана по мере увеличения/уменьшения давления.

```
При давлении в 737.71 Па  
Содержание CO2: 0.20  
Содержание метана: 0.63  
При давлении в 1301.32 Па  
Содержание CO2: 0.20  
Содержание метана: 0.87
```

Рисунок 4 – Пример результатов моделирования одного блока биогазовой установки

В рамках исследования была разработана дополнительная программа на языке программирования Python, которая позволяет моделировать процесс компримирования газа и визуализировать изменения его физических и химических свойств в трехмерном пространстве. Программа состоит из двух основных частей: графического интерфейса пользователя (GUI) и модуля симуляции, который выполняет расчеты и строит 3D графики.

GUI предоставляет пользователю возможность ввода начальных параметров для симуляции: начальное давление, начальную температуру, начальный объем и показатель адиабаты. Ввод данных осуществляется через текстовые поля, после чего, нажатием кнопки "Запустить симуляцию", начинается процесс моделирования.

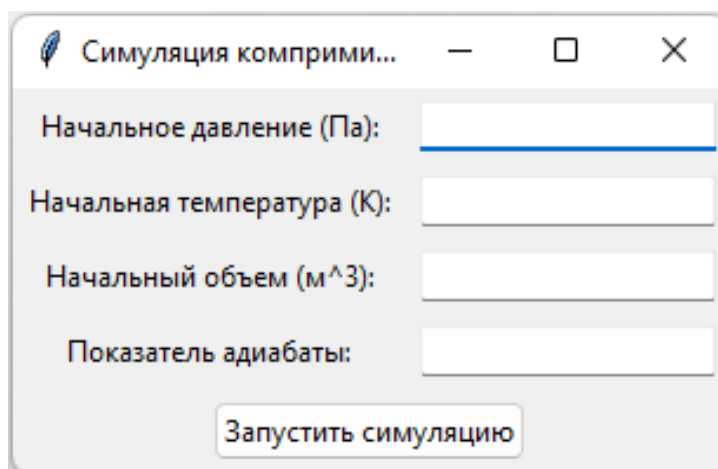


Рисунок 5 – Интерфейс ввода данных для запуска моделирования

Часть исходного кода программы:

```
root = tk.Tk()
root.title("Симуляция компримирования газа")
p_label = ttk.Label(root, text="Начальное давление (Па):")
p_label.grid(column=0, row=0, padx=5, pady=5)
p_entry = ttk.Entry(root)
p_entry.grid(column=1, row=0, padx=5, pady=5)

t_label = ttk.Label(root, text="Начальная температура (К):")
t_label.grid(column=0, row=1, padx=5, pady=5)
t_entry = ttk.Entry(root)
t_entry.grid(column=1, row=1, padx=5, pady=5)
```

```
v_label = ttk.Label(root, text="Начальный объем (м^3):")  
v_label.grid(column=0, row=2, padx=5, pady=5)  
v_entry = ttk.Entry(root)  
v_entry.grid(column=1, row=2, padx=5, pady=5)  
  
gamma_label = ttk.Label(root, text="Показатель адиабаты:")  
gamma_label.grid(column=0, row=3, padx=5, pady=5)  
gamma_entry = ttk.Entry(root)  
gamma_entry.grid(column=1, row=3, padx=5, pady=5)  
  
start_button = ttk.Button(root, text="Запустить симуляцию",  
command=start_simulation)  
start_button.grid(column=0, row=4, columnspan=2, pady=5)  
root.mainloop()
```

После получения начальных параметров от пользователя, модуль симуляции использует их для расчета изменений давления, объема и температуры газа в процессе компримирования. Расчеты основаны на адиабатическом процессе, где предполагается, что отсутствует теплообмен с окружающей средой. Используя уравнение $PV^\gamma = const$, программа вычисляет конечные значения давления, объема и температуры при различных условиях компримирования.

Для визуализации результатов симуляции используется 3D график, на котором по осям отображены давление, объем и температура. Это позволяет наглядно представить, как изменение одного из параметров влияет на другие.

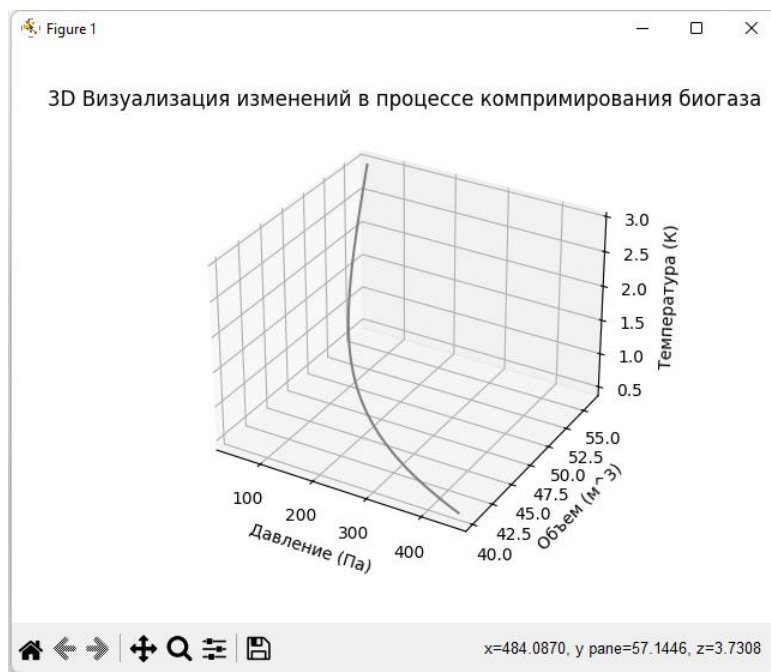


Рисунок 6 - 3D визуализация изменения компримирования в одном из реактора биогазовой становки

Заключение.

Разработанные программы представляют собой инструмент для исследования процессов компримирования газов, позволяя глубже понять влияние различных

параметров на поведение газовых систем. Возможность визуализации в трехмерном пространстве значительно упрощает анализ сложных процессов и способствует более эффективному проектированию и оптимизации систем компримирования газов.

Созданное ПО обладает значительным научным и практическим потенциалом. В научной сфере оно может использоваться для моделирования и анализа различных газовых смесей, а также для исследования физических и химических процессов, происходящих при изменении давления. В практическом применении ПО может найти свое применение в энергетике, химической промышленности и экологическом мониторинге, где важно контролировать и оптимизировать процессы компримирования газов.

Будущие исследования могут включать разработку алгоритмов машинного обучения для предсказания изменений в составе газа при различных условиях компримирования, что позволит еще более повысить точность и эффективность моделирования. Также важным фактом является интеграция программы с реальными датчиками и системами управления процессами на производстве, что позволяет осуществлять реальный мониторинг и адаптацию процессов в соответствии с получаемыми данными.

В контексте устойчивого развития и экологической безопасности, программа может способствовать разработке более эффективных и экологичных методов обработки и использования газов, сокращая выбросы вредных веществ в атмосферу и способствуя более рациональному использованию природных ресурсов.

Благодарность. Данная работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP14871625).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Heiker, M., Kraume, M., Mertins, A., Wawer, T., & Rosenberger, S. (2021). Biogas plants in renewable energy systems—A systematic review of modeling approaches of biogas production. *Applied Sciences*, 11(8), 3361. doi: 10.3390/app11083361
- [2] Ge, Y., Tao, J., Wang, Z., Chen, C., Liang, R., Mu, L., ... & Chen, G. (2023). Simulation of integrated anaerobic digestion-gasification systems using machine learning models. *Bioresource Technology*, 369, 128420. doi: 10.1016/j.biortech.2022.128420
- [3] Younessi, H. S., Bahramara, S., Adabi, F., & Golpîra, H. (2023). Modeling the optimal sizing problem of the biogas-based electrical generator in a livestock farm considering a gas storage tank and the anaerobic digester process under the uncertainty of cow dung. *Energy*, 270, 126876. doi: 10.1016/j.energy.2023.126876
- [4] Rudakov, V., Timur, M., Yedilkhan, A., & Perizat, O. (2023, August). Time Series Analysis of Biogas Monitoring with Deep Learning Approaches. In *2023 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI)* (pp. 1-4). IEEE. doi: 10.1109/PCI60110.2023.10325955
- [5] Rudakov, V., Timur, M., & Yedilkhan, A. (2023, June). Comparison of Time Series Databases. In *2023 17th International Conference on Electronics Computer and Computation (ICECCO)* (pp. 1-4). IEEE. doi: 10.1109/ICECCO58239.2023.10147153
- [6] Merembayev, T., & Amanbek, Y. (2022, June). Time-series event prediction for the uranium production wells using machine learning algorithms. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2022). ARMA. doi: doi.org/10.56952/ARMA-2022-0415

Едилхан Амиргалиев, т.ғ.д., профессор, ҚР ҰИА академигі, ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан, amir_ed@mail.ru

Тимур Мерембаев, PhD, ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан, merembaevt@gmail.com

Владислав Рудаков, ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан, leesiczin@gmail.com

ҚЫСУ КЕЗІНДЕ ГАЗ ҚҰРАМЫНА ҚЫСЫМНЫҢ ЖОҒАРЫЛАУЫНЫҢ ӘСЕРІН ВИЗУАЛИЗАЦИЯЛАУ ЖӘНЕ МОДЕЛЬДЕУГЕ АРНАЛҒАН ҚОСЫМША ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Биогазды қысу процесі оны жаңартылатын энергия көзі ретінде пайдалануда шешуші рөл атқарады. Биогазды сығымдау немесе қысу оның тасымалдануын, сақталуын және кейіннен әртүрлі энергетикалық жүйелерде қолданылуын жақсарту үшін қажет.

Қысу процесін модельдеу қиын процесс, өйткені биогаз қондырғысын орнатуда көптеген динамикалық параметрлер бар. Атап айтқанда, қысудың физикалық процесінде қысымның өзгеруі газдың физикалық қасиеттеріне, сонымен қатар оның химиялық құрамына әсер етеді. Бұл зерттеу энергетикалық жүйе тұрғысынан, сондай-ақ орнату процестерін оңтайландыру тұрғысынан модельдеу тәсілдерін қарастырады. Біз Python тілін сығымдау процесін модельдеу ортасы үшін қолданамыз, атап айтқанда сығымдау кезінде газ құрамындағы қысымның өзгеруін модельдейміз. Бұл әзірленген модельдеу ортасы үш өлшемді кеңістік пен уақыттағы газ құрамындағы өзгерістерді визуализациялауға мүмкіндік береді. Әзірленген ақпараттық жүйе қысымның жоғарылауының әсерінен газдың құрамындағы өзгерістерді модельдеуге және визуализациялауға мүмкіндік береді. Бұл модель газдың химиялық құрамына және оның әртүрлі қосымшаларда әлеуетті қолданылуына қысу процесінің модельдеуі және кейінгі әсері үшін пайдалы болуы мүмкін.

Түйінді сөздер. Биогаз, модельдеу, анаэробты ашыту, энергетикалық жүйе, көмірқышқыл газының шығарындылары.

Yedilkhan Amirgaliyev, Professor, Academician of NEA RK, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan, amir_ed@mail.ru

Timur Merembayev, PhD, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan, merembaevt@gmail.com

Vladislav Rudakov, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan, leesiczin@gmail.com

DEVELOPMENT OF APPLICATION FOR VISUALIZATION AND MODELING OF THE PRESSURE INCREASE EFFECT ON THE COMPOSITION OF GAS DURING COMPRESSION

Abstract. The process of biogas compression plays a key role in its use as a renewable energy source. Compression, or compression, of biogas is necessary to improve its transportability, storage and subsequent use in various energy systems.

Modeling the compression process is a complex process, since there are many dynamic parameters in the installation of a biogas plant. In particular, pressure changes in the physical

compression process affect the physical properties of the gas, but also its chemical composition. This study examines modeling approaches from the point of view of the energy system, as well as from the point of view of optimizing installation processes. We use the Python language for the compression process modeling environment, in particular, we simulate pressure changes on the gas composition during compression. This developed modeling environment allows you to visualize changes in the composition of a gas in three-dimensional space and time. The developed information system allows you to simulate and visualize changes in the composition of the gas when it is compressed under the influence of increased pressure. This model can be useful for modeling and subsequent effects of the compression process on the chemical composition of the gas and its potential use in various applications.

Keywords. Biogas, modeling, anaerobic digestion, energy system, greenhouse gas emissions.

Получено: 09 июль 2024 г.; принято: 09 сентябрь 2024 г.