

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ТЕОРИИ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Д.А. ПЕТРОСОВ¹, Н.В. ПЕТРОСОВА², И.В. МИРОШНИЧЕНКО², В.А. ЛОМАЗОВ²

¹ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»,
г. Москва;

²ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина»,
г. Белгород

Ключевые слова и фразы: биогазовая установка; имитационное моделирование; математическое моделирование; системный анализ; теория сетей Петри; технологические процессы.

Аннотация: Целью работы является создание имитационной модели прототипа биогазовой установки, позволяющей описать технологические процессы с использованием математического аппарата теории сетей Петри. В качестве гипотезы рассматривается возможность применения графо-аналитических средств в задачах моделирования технологических процессов с применением биогазовых установок. В качестве методов исследования предложено применение таких расширений теории сетей Петри, как ингибиторные и цветные сети. В работе рассматривалась работа биогазовой установки Белгородского государственного аграрного университета, которая способна перерабатывать имеющиеся отходы сельскохозяйственного производства в «зеленую» электроэнергию, тепло и удобрения. В качестве результатов исследования предложена имитационная модель на основе выбранного математического аппарата, которая описывает процессы загрузки сырья в биогазовую установку, работу реактора по выработке газа, удобрений и охлаждения двигателя, сжигание полученного газа с целью его преобразования в «зеленую» электроэнергию и формирования тепла, которое частично используется самой установкой в качестве катализатора процессов брожения, а также для внешней среды. Предложенная модель учитывает возможность дополнительной загрузки сырья для работы биогазовой установки, а также выгрузку удобрений.

В качестве среды для разработки имитационной модели использовалось бесплатное программное обеспечение *PIPE v4.3.0*.

В настоящее время широкое распространение получает применение биогазовых установок в сельском хозяйстве. Данная технология позволяет преобразовать отходы, полученные в результате сельскохозяйственной деятельности, в тепловую и электрическую энергию, а также получить удобрения, которые могут быть использованы при выращивании сельскохозяйственных культур.

Работа биогазовой установки базируется на процессе брожения субстратов и инокулюма, в результате которого выделяется газ. Данный газ преобразуется в электроэнергию путем сжигания. В процессе сжигания газа в двигателе биогазовой установки возникает тепло, которое может быть использовано как во внешней сре-

де, так и в качестве катализатора для процессов брожения. Брожение субстратов позволяет сформировать органическое удобрение, которое целесообразно использовать в технологических процессах выращивания сельскохозяйственных культур [1].

Все вышеперечисленное говорит о пользе представленной технологии, но эффективность ее применения в рамках предприятия или отрасли требуется оценить. Оценку целесообразности позволяет провести имитационное моделирование. Использование данного подхода требует описания технологических процессов, протекающих в объекте моделирования. Именно эта задача решается в данной статье.

Одним из современных математических

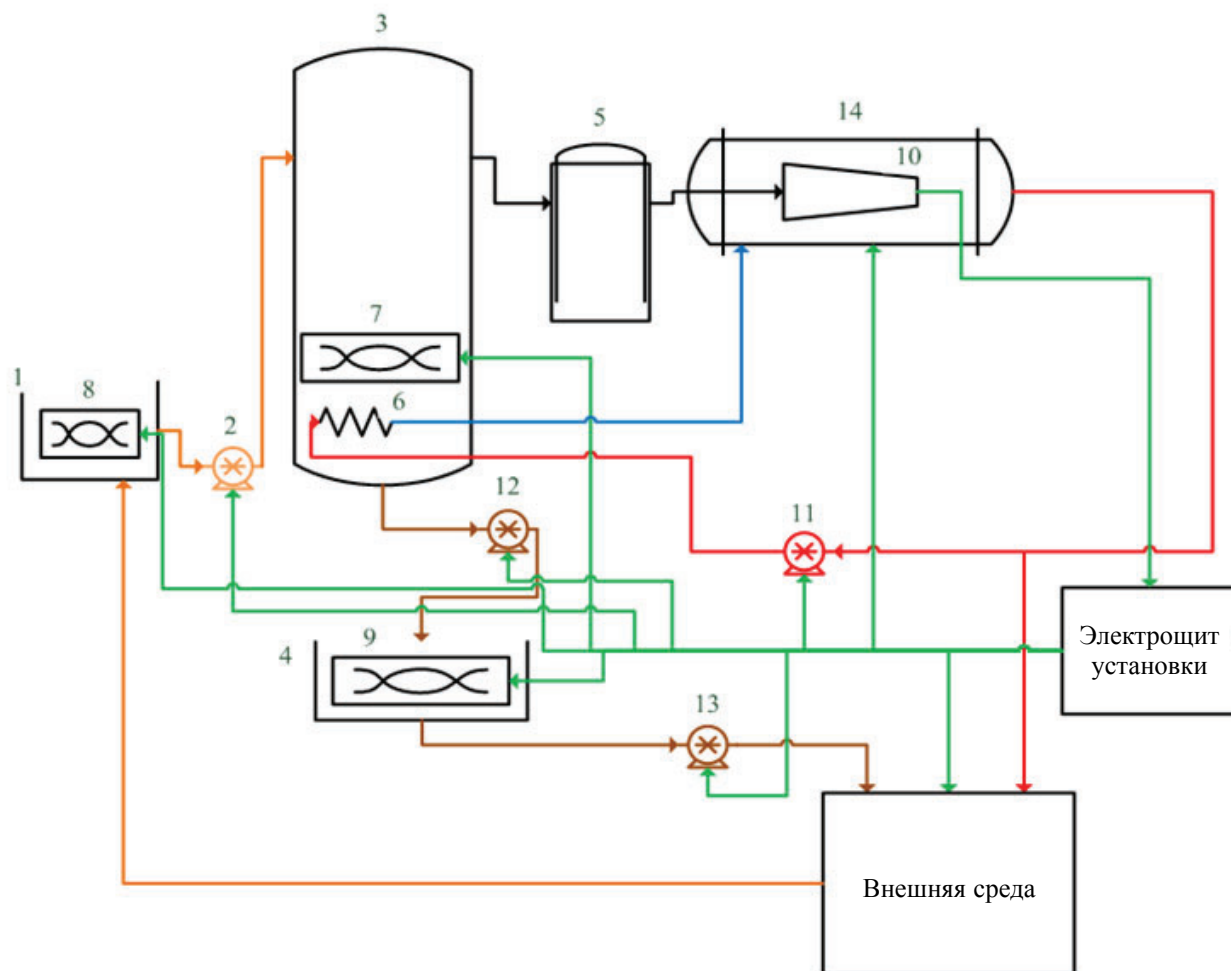


Рис. 1. Схема прототипа биогазовой установки Белгородского ГАУ имени В.Я. Горина:
1 – приемник смеси; 2, 11, 12, 13 – насос; 3 – биореактор; 4 – хранилище для удобрений; 5 – газгольдер; 6 – обогреватель; 7, 8, 9 – смеситель; 10 – преобразователь газа в электроэнергию (двигатель); 14 – теплообменник

аппаратов, применяемых в имитационном моделировании, является теория сетей Петри. Данный математический аппарат обладает широкими возможностями благодаря большому количеству разрешений, разработанных для решения задач в различных предметных областях, а также развитию программных средств из области имитационного моделирования, которые поддерживают данный подход [2].

Таким образом, можно говорить о целесообразности разработки имитационной модели, описывающей технологические процессы функционирования биогазовой установки, с применением математического аппарата теории сетей Петри.

Для решения данной задачи опишем основные функциональные особенности биогазовой установки. В качестве примера рассмотрен про-

тотип установки Белгородского государственного аграрного университета имени В.Я. Горина (рис. 1). Функционирование данной установки можно описать следующим образом:

1) в качестве сырья для биореактора используется пять компонентов: куриный помет, свиной навоз, конский навоз, силос, овечий навоз;

2) для катализации процесса брожения применяется горячая вода, которая обогревает смесь в биореакторе (применение дополнительных катализаторов не рассматривается в данной публикации);

3) загрузка сырья и выгрузка удобрений производится три раза в сутки;

4) горячая вода, использованная в биореакторе, применяется для охлаждения теплообменника и может повторно использоваться как

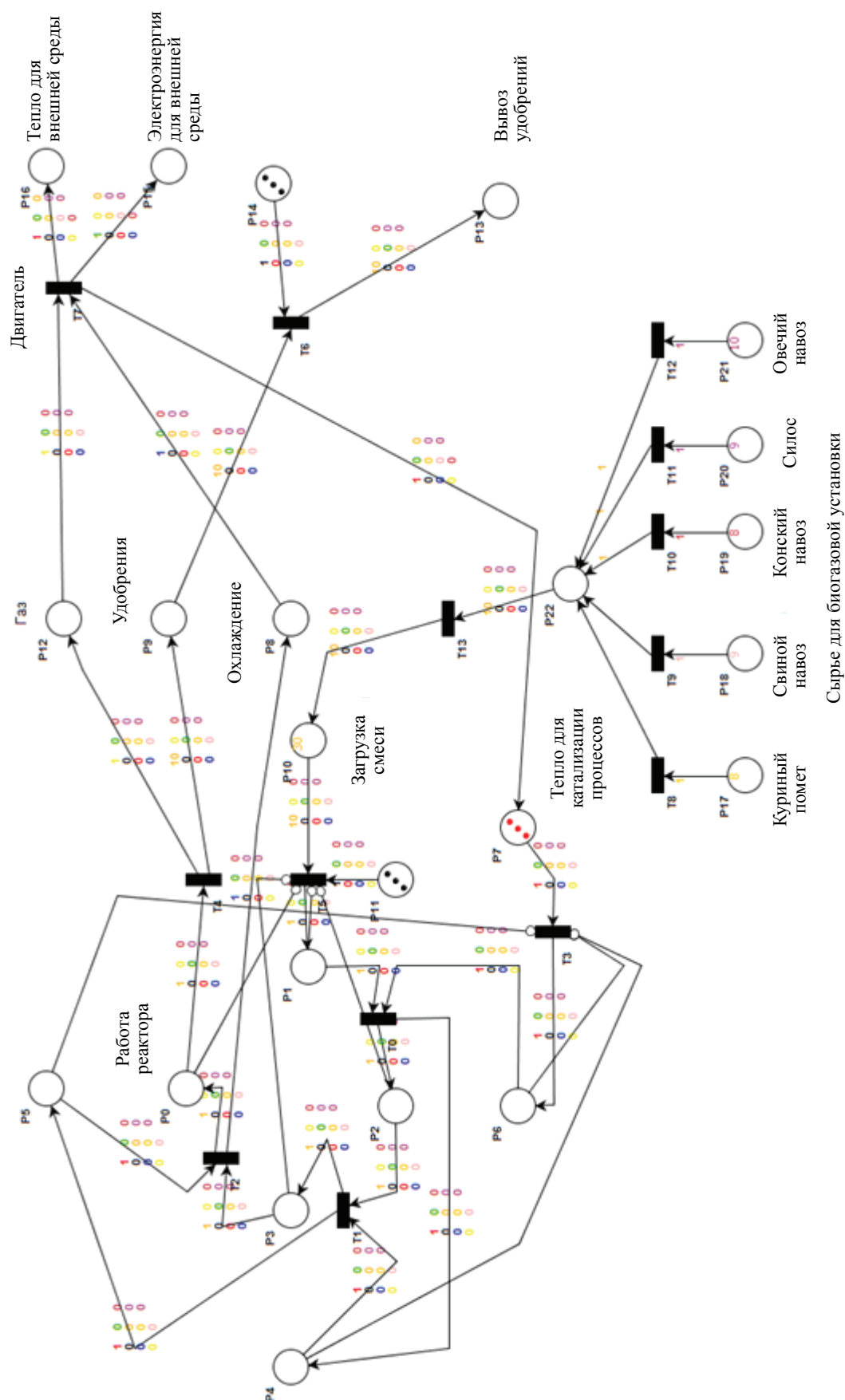


Рис. 2. Имитационная модель прототипа биогазовой установки Белгородского ГАУ имени В.Я. Горина

в биореакторе, так и во внешней среде;

5) электроэнергия, полученная в результате сгорания газа в двигателе, распределяется электрошитом установки для собственного функционирования и подается во внешнюю среду [3].

На рис. 2 показана полученная имитационная модель на основе теории сетей Петри с учетом специфики работы прототипа, имеющая возможность расширения спецификаций биогазовых установок.

В предложенной модели использовались такие расширения сетей Петри, как ингибиторный и цветные. Использование ингибиторов обусловлено спецификой запретов срабатывания переходов, а применение расширения цветных сетей Петри позволяет сепарировать метки по типу вещества и энергии. В соответствии с условием работы прототипа количество загрузок сырья (три раза в сутки, что соответствует количеству меток в данной позиции) моделирует позиция P11. Позиции P17, P18, P19, P20 и P21 служат для хранения пяти типов сырья. Резервуар для горячей воды в прототипе моделируется позицией P7. За выгрузку удобрений (также три раза в сутки, что соответствует количеству меток в данной позиции) отвечает условие с по-

зицией P14. В качестве газгольдера выступает позиция P12, удобрения, в рамках биореактора, хранятся в позиции P9. Охлажденная вода для теплообменника моделируется P8. Работу насосов прототипа обеспечивают переходы T0, T3, T5, T6, T13. Работа двигателя смоделирована переходом T7. Процессы в биореакторе моделируют следующие позиции: P0, P1, P2, P3, P4, P5 и P6, а также переходы T1, T2 и T4.

Таким образом, получена имитационная модель функционирования биогазовой установки с применением математического аппарата теории сетей Петри, которая адекватна представленным требованиям в соответствии с прототипом биогазовой установки. Использование таких расширений теории, как ингибиторные и цветные сети Петри, позволило определить условия срабатывания переходов и сепарировать (за счет использования различных цветов) метки с различными видами сырья и энергии. Предложенная модель позволяет выполнить моделирование работы биогазовой установки и может быть расширена с применением функций расчета в соответствующих переходах. Расширение предложенной модели позволит выполнять оценку экономической эффективности использования биогазовых установок.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-47-310008.

Литература

1. Хамоков, М.М. Производственная и энергетическая эффективность использования биогазовой установки / М.М. Хамоков, Ю.А. Шекихачев, В.З. Алоев и др. // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 76 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvennaya-i-energeticheskaya-effektivnost-ispolzovaniya-biogazovoy-ustanovki>.
2. Игнатенко, В.А. Моделирование динамики функционирования систем управления технологическим процессом с использованием математического аппарата сетей Петри / В.А. Игнатенко, Д.А. Петросов // Информационно-аналитические системы и технологии : материалы V международной конференции, 2018. – С. 34–39.
3. Петросов, Д.А. Разработка имитационной модели биогазовой установки в условиях биологического земледелия / Д.А. Петросов, Н.В. Петросова, И.В. Мирошниченко // Наука и бизнес: пути развития. – Тамбов : ТМБпринт. – 2019. – № 2(92). – С. 31–38.

References

1. KHamokov, M.M. Proizvodstvennaya i energeticheskaya effektivnost ispolzovaniya biogazovoy ustanovki / M.M. KHamokov, YU.A. SHekikhachev, V.Z. Aloev i dr. // Nauchnyj zhurnal KubGAU. – 2012. – № 76 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvennaya-i-energeticheskaya-effektivnost-ispolzovaniya-biogazovoy-ustanovki>.
2. Ignatenko, V.A. Modelirovanie dinamiki funktsionirovaniya sistem upravleniya tekhnologicheskim protsessom s ispolzovaniem matematicheskogo apparata setej Petri / V.A. Ignatenko, D.A. Petrosov // Informatsionno-analiticheskie sistemy i tekhnologii : materialy V mezhdunarodnoj

konferentsii, 2018. – S. 34–39.

3. Petrosov, D.A. Razrabotka imitatsionnoj modeli biogazovoj ustanovki v usloviyakh biologicheskogo zemledeliya / D.A. Petrosov, N.V. Petrosova, I.V. Miroshnichenko // Nauka i biznes: puti razvitiya. – Tambov : TMBprint. – 2019. – № 2(92). – S. 31–38.

© Д.А. Петросов, Н.В. Петросова, И.В. Мирошниченко, В.А. Ломазов, 2020