

УДК 519.714.5

Д.А. ПЕТРОСОВ, Н.В. ПЕТРОСОВА, И.В. МИРОШНИЧЕНКО

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

г. Белгород

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ БИОЛОГИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Ключевые слова: агроэкосистемы; биологическое земледелие; имитационное моделирование; системный анализ; теория сетей Петри.

Аннотация: В настоящее время в Российской Федерации существует проблема повышения количества и качества сельскохозяйственной продукции. Данная проблема обусловлена современными реалиями внешнеполитической ситуации и, как следствие, решением правительственной задачи импортозамещения в целом и в области сельского хозяйства в частности. Одной из проблем является оптимизация применения биогазовых установок, которые позволяют утилизировать отходы пищевой и агропромышленной продукции в тепловую, электрическую энергию, а также производить удобрения в рамках применения биологического земледелия. Одним из подходов для решения данной задачи является применение средств имитационного моделирования, которое позволяет проводить вычислительные эксперименты до этапа внедрения биогазовых установок в сельскохозяйственное производство с целью расчета эффективности их применения в различных регионах Российской Федерации. В данной работе проводится анализ процессов, протекающих в биогазовой установке, и предлагается подход для построения имитационных моделей с использованием современного математического аппарата теории сетей Петри.

Применение биогазовых установок в современных агроэкосистемах обусловлено тем, что данная технология позволяет перерабатывать отходы, полученные в результате функционирования пищевой и сельскохозяйственной продукции, в тепловую, электрическую энергию,

а также в удобрения [1–4]. Все перечисленные виды энергии, как и полученные в результате брожения субстратов и инокулюма удобрения, могут быть использованы в аграрном производстве. Тем самым возможно создание замкнутого биологического агропроизводства, которое будет способствовать уменьшению себестоимости, повышению количества и качества продукции. Следует отметить, что применение данной технологии должно быть обусловлено экономическими, технологическими и техническими возможностями региона, в котором планируется внедрение. Поэтому становится актуальной задача по разработке имитационных моделей, которые могли бы способствовать предварительной оценке возможности получения эффекта от использования биогазовых установок при построении эффективных агроэкосистем.

В качестве основного средства имитационного моделирования целесообразно применение такого математического аппарата, который позволил бы проводить моделирование графоаналитических моделей с возможностью визуализации, технологических процессов [5], интеллектуальных методов структурно-параметрического синтеза, а также обладал бы возможностями поддержки параллелизма, который может быть использован при разработке высокопроизводительных интеллектуальных систем поддержки принятия решений с применением современной технологии *GPGPU* (*General-purpose computing on graphics processing units* – неспециализированные вычисления на графических процессорах). Таким инструментальным средством можно назвать теорию сетей Петри. На основе данного математического аппарата и предлагается выполнять моделирование работы биогазовой установки.

При построении имитационных моделей следует уделять внимание подробному исследо-

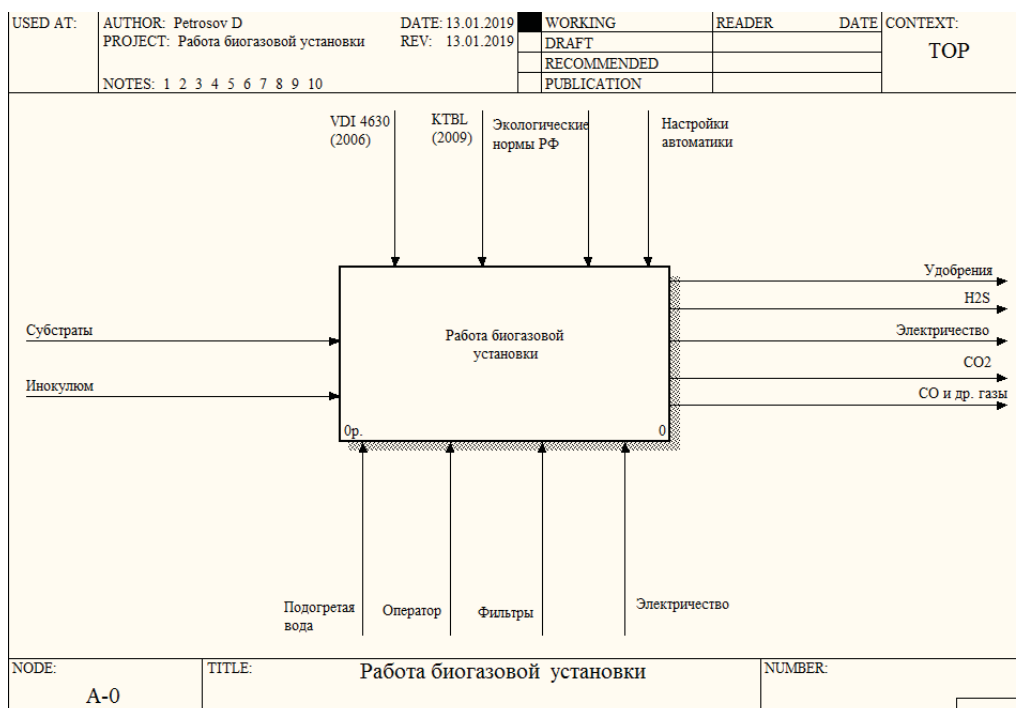


Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса «Работа биогазовой установки»

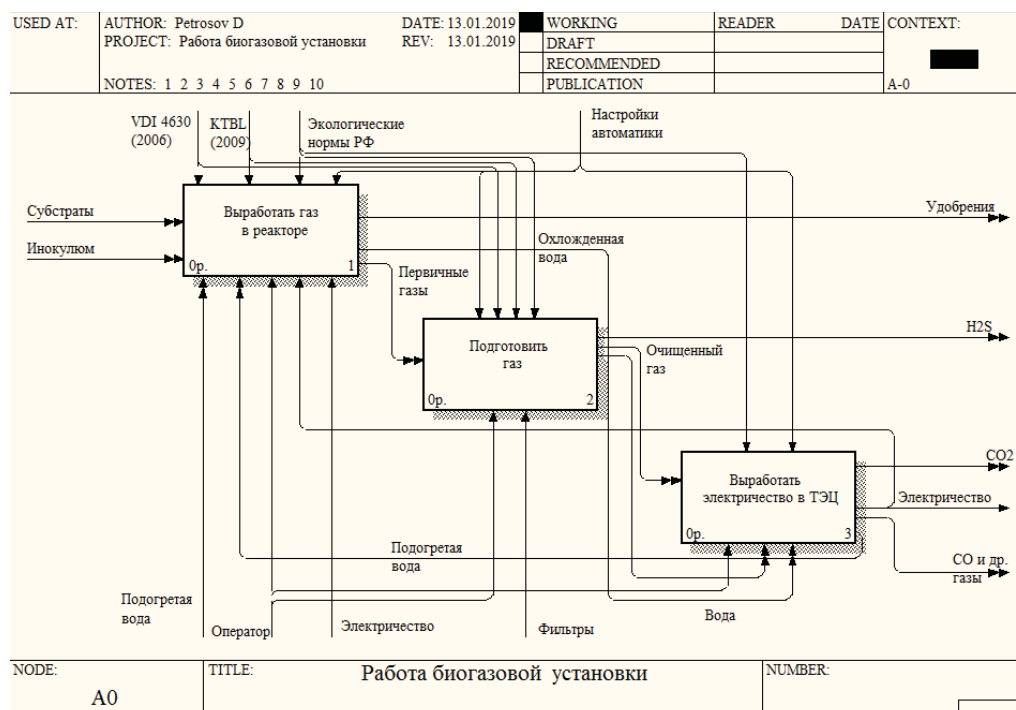


Рис. 2. Декомпозиция процесса «Работа биогазовой установки»

ванию предметной области. Для этого целесообразно применять современные методологии описания процессов, к которым можно отнести *IDEF0* и *IDEF3*. На основе данных подходов

были получены модели, описывающие работу биогазовой установки.

На рис. 1 показана контекстная диаграмма «Работа биогазовой установки» на

основе *IDEF0*. В качестве входов (экзогенных переменных) для разрабатываемых имитационных моделей на основе сетей Петри предлагается рассматривать субстраты и инокулюм, в результате брожения которых вырабатываются удобрения и газ, используемый для получения электричества. Управление процессами, протекающими в устройстве, осуществляется с помощью: *VDI – Vergärung organischer Stoffe; Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche 4630* (2006 г.), *KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.* (2009 г.), экологические нормы РФ и настройки автоматики. В роли механизмов предлагается использование подогретой воды, оператора установки, фильтров и электричества.

Выходами для модели являются: удобрения, газ H_2S , электричество, газ CO_2 (результат горения), CO и другие газы.

Для детального описания предметной области требуется провести декомпозицию контекстной диаграммы (рис. 2).

Предлагается рассмотрение контекстного процесса через три подпроцесса: выработать газ в реакторе, подготовить газ, выработать электричество в ТЭЦ. Для подпроцесса «Выработать газ в реакторе» в качестве входов используются субстраты и инокулюм, управлением являются *VDI 4630, KTBL*, экологические нормы РФ и настройки автоматики. Механизмами, с помощью которых выполняется подпроцесс, являются подогретая вода (используется как катализатор брожения, в начале функционирования может приходиться из внешней среды, в процессе работы возможно поступление после охлаждения двигателя ТЭЦ), оператор установки, электричество (используется для функционирования реактора, в начале работы поступает из внешней среды, в ходе работы установка может снабжать реактор собственным электричеством). Результатами работы данного подпроцесса являются первичные газы (направляются в подпроцесс «Подготовить газ») и охлажденная вода (используется для охлаждения двигателя ТЭЦ).

Подпроцесс «Подготовить газ» использует в качестве входа первичные газы, которые очищаются с помощью фильтров под контролем оператора в соответствии с *VDI 4630, KTBL*, экологическими нормами РФ и настройками автоматики. В результате деятельности данного подпроцесса очищенный газ поступает в под-

процесс «Выработать электричество в ТЭЦ», вода, полученная в результате сушки газа, используется для охлаждения двигателя ТЭЦ, а во внешнюю среду отправляется газ H_2S .

Для выработки электрической энергии используется подпроцесс «Выработать электричество в ТЭЦ», входом для которого является очищенный газ, в качестве управления используются настройки автоматики и экологические нормы РФ. Механизмами, используемыми в подпроцессе, являются: охлажденная вода (из подпроцесса «Выработать газ в реакторе»), вода (полученная в результате сушки газа в подпроцессе «Подготовить газ») и оператор установки. На выходе подпроцесс генерирует: электричество, газ CO_2 (результат горения), а также газ CO и другие газы.

Для детализации работы подпроцесса «Выработать газ в реакторе» целесообразно использование методологии *IDEF3*, которая обладает логическими перекрестками, что позволяет моделировать логику работы установки. Полученная модель показана на рис. 3.

Процесс декомпозирован на шесть подпроцессов: «Подготовить смесь», «Перемешивать смесь», «Подогреть смесь», «Добавить субстраты», «Удалить сброженную массу» и «Удалить первичные газы». Для описания логики процесса используется два логических перекрестка – асинхронное «ИЛИ» ($J1$ и $J2$), так как подпроцессы могут быть запущены в различной комбинации от одного до всех (объясняет использование перекрестка типа «ИЛИ») и данные подпроцессы не должны быть запущены и окончены одновременно (объясняет использование асинхронного перекрестка). Входы и выходы данной модели с применением методологии *IDEF3* полностью соответствуют декомпозированному процессу «Выработка газа в реакторе».

Для построения адекватной имитационной модели процесс «Подготовить газ» также нуждается в детализации (рис. 4). Предлагается рассматривать данный процесс как состоящий из двух подпроцессов: «Осушить газ» и «Очистить газ от H_2S ». Первичный газ, полученный в результате функционирования «Выработать газ в реакторе», поступает в подпроцесс «Осушить газ», результатом функционирования данного подпроцесса являются вода и «сухой газ».

«Сухой газ» отправляется в подпроцесс «Очистить газ от H_2S », после чего H_2S отправляется во внешнюю среду, а очищенный газ (в

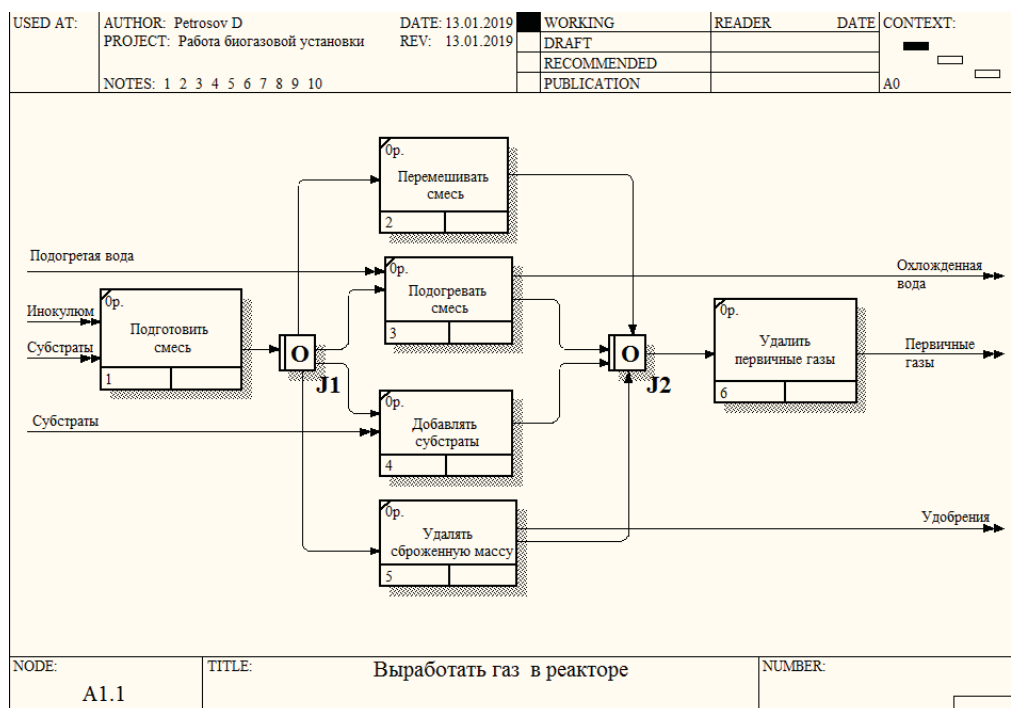


Рис. 3. Декомпозиция процесса «Выработать газ» с использованием методологии IDEF3

качестве входа) и вода (в качестве механизма) поступают в процесс «Выработать электричество в ТЭЦ».

Последним процессом, который нуждается в детализации перед созданием имитационной модели, описывающей работу биогазовой установки на основе теории сетей Петри, является процесс «Выработать электричество в ТЭЦ». Декомпозиция данного процесса показана на рис. 5. Процесс предлагается рассматривать на основе двух основных подпроцессов: «Сжечь очищенный газ» и «Охладить двигатель».

Очищенный газ поступает на вход подпроцессу «Сжечь очищенный газ», в результате горения образуются: электричество (которое может быть отправлено частично в энергетическую сеть предприятия, а также на поддержку работы реактора биогазовой установки) и продукты, полученные в результате горения CO_2 , CO и других газов, которые отправляются во внешнюю среду. В результате работы данного процесса также должно быть сформировано требование к охлаждению двигателя, которое запускает подпроцесс «Охладить двигатель».

Для охлаждения двигателя в качестве механизмов используются: охлажденная вода (полученная в результате деятельности процесса «Выработать газ в реакторе») и вода (получен-

ная в результате деятельности процесса «Подготовить газ»). В результате работы данного процесса образуется подогретая вода, которая отправляется в процесс «Выработать газ в реакторе» и используется в качестве катализатора процесса брожения смеси.

На основе полученных моделей, построенных с использованием методологии IDEF0 и IDEF3, выполняется построение имитационной модели данного технологического процесса с использованием теории сетей Петри. Для выполнения данных работ целесообразно воспользоваться специализированным программным средством *PIPE v 4.5*, которое является бесплатным и дает возможность использования различных расширений выбранного математического аппарата.

В общем виде, в соответствии с контекстной диаграммой процесса «Работа биогазовой установки», имитационная модель может быть представлена следующим образом:

$$M_6 = \langle Input, React, Clear, Tec, Output \rangle,$$

где M_6 – модель биогазовой установки; *Input* – экзогенные переменные для модели (входные потоки процесса: субстраты, инокулюм; механизмы процесса: подогретая вода, оператор,

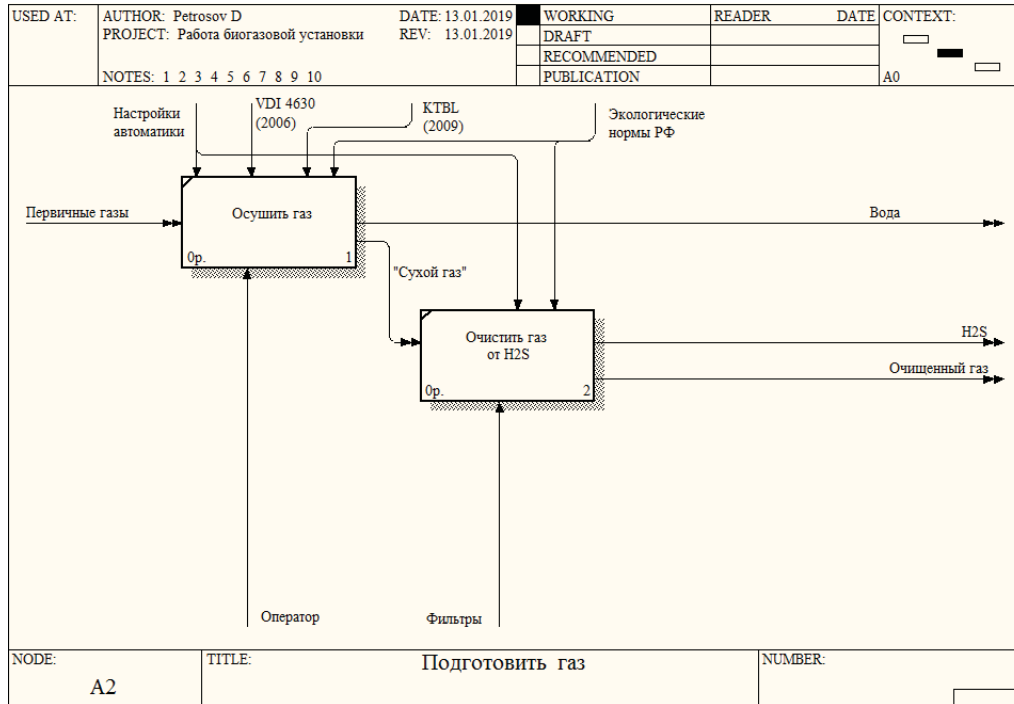


Рис. 4. Декомпозиция процесса «Подготовить газ»

электричество, фильтры; управление процесса: *VDI 4630* (2006 г.), *KTBL* (2009 г.), экологические нормы РФ и настройки автоматики); *React* – реактор биогазовой установки; *Clear* – блок очищения первичного газа; *Tec* – блок преобразования газа в электрическую энергию; *Output* – экзогенные переменные (удобрения, H_2S , CO_2 , CO и другие газы, электричество).

Модель реактора на основе описанного методологией *IDEF3* процесса «Выработать газ в реакторе» может быть представлена как:

$$React = \langle Input_{react}, Smes, Mech, Podog, Add_{sub}, Del_{smes}, Del_{gas}, Output_{react} \rangle,$$

где *Input_{react}* – экзогенные переменные для реактора (подогретая вода, субстраты, инокулюм, электричество, оператор, *VDI 4630* (2006 г.), *KTBL* (2009 г.), экологические нормы РФ и настройки автоматики); *Smes* – модуль подготовки смеси (из экзогенных переменных на вход подаются: субстраты, инокулюм; выходом является смесь); *Mech* – модуль перемешивания смеси (на вход подаются: смесь, электричество, оператор, *VDI 4630* (2006 г.), *KTBL* (2009 г.), экологические нормы РФ и настройки автоматики; выходом является смесь после переработки); *Podog* – модуль подогрева смеси (на вход моду-

лю подаются: смесь, подогретая вода, настройки автоматики; выходом являются: первичные газы и охлажденная вода); *Add_{sub}* – используется для добавления в смесь субстратов; *Del_{smes}* – вывод смеси (удобрения); *Del_{gas}* – модуль вывода первичного газа; *Output_{react}* – эндогенные переменные блока реактора (удобрения, охлажденная вода и первичные газы).

$$Clear = \langle Input_{clear}, Sush, Clr_{gas}, Output_{clear} \rangle,$$

где *Input_{clear}* – экзогенные переменные для модуля (первичный газ); *Sush* – модуль сушки газа (экзогенная переменная – первичный газ, эндогенные переменные – вода, «сухой газ»); *Clr_{gas}* – модуль очистки газа (экзогенная переменная – «сухой газ», эндогенные переменные – H_2S , очищенный газ); *Output_{clear}* – эндогенные переменные модуля *Clear* (вода, H_2S , очищенный газ).

$$Tec = \langle Input_{tec}, Fire, Cold, Output_{tec} \rangle,$$

где *Input_{tec}* – экзогенные переменные для модуля (очищенный газ, охлажденная вода, вода, оператор, экологические нормы РФ и настройки автоматики); *Fire* – модуль сжигания очищенного газа, на вход которому подается очищен-

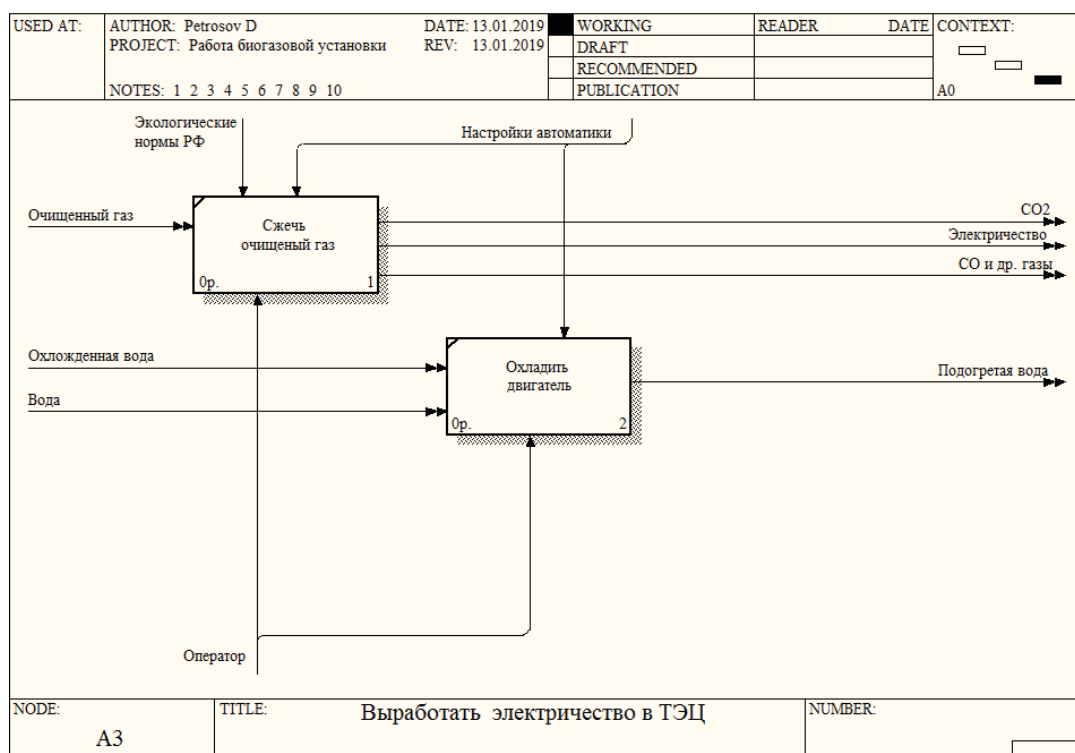


Рис. 5. Декомпозиция процесса «Выработать электричество в ТЭЦ»

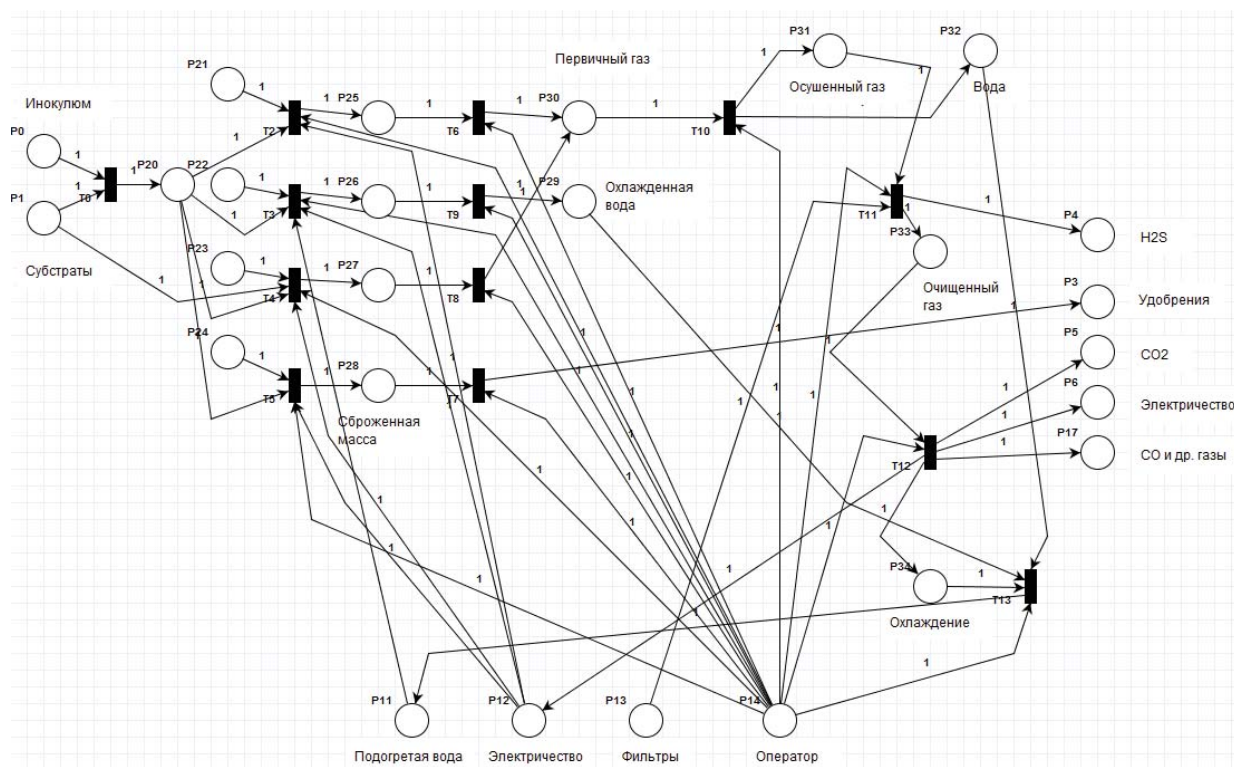


Рис. 6. Имитационная модель биогазовой установка на основе сетей Петри

ный газ, выходом являются: CO_2 , CO и другие газы, электричество; *Cold* – модуль охлаждения двигателя, на вход которому подаются: охлажденная вода, вода, оператор и настройки автоматики, выходом для данного модуля является подогретая вода; $Output_{tec}$ – экзогенные переменные модуля *Tec* (CO_2 , электричество, CO и другие газы, подогретая вода).

При моделировании с помощью сетей Петри следует определить использование дуг, переходов, позиций и меток. В данном случае переходы будут моделировать действия, позиции будут служить для хранения входных, выходных и промежуточных переменных, дуги предлагается использовать для соединения между составляющими модели, а метки моделируют

вещество и разные виды энергии.

На рис. 6 показана полученная модель, построенная с учетом моделей на основе методологий *IDEF0* и *IDEF3*, а также с учетом формализации.

Применение теории сетей Петри, обладающих свойством параллелизма, в задачах создания имитационных моделей дает возможность использования технологии *GPGPU* при программной реализации интеллектуальных систем поддержки принятия решений в области агротехнологий. Такого рода системы должны способствовать внедрению новых подходов в области сельского хозяйства, а также позволят повысить качество, количество и экологическую чистоту отечественной продукции.

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

Список литературы

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 – Scientific Journal of KubSAU. – 2012. – № 76 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvennaya-i-energeticheskaya-effektivnost-ispolzovaniya-biogazovoy-ustanovki> (дата обращения: 13.01.2019).
2. Садчиков, А.В. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок / А.В. Садчиков // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10-1. – С. 83–87 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40813> (дата обращения: 13.01.2019).
3. Вандышева, М.С. Биогаз альтернативный источник энергии / М.С. Вандышева // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 6(37) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/biogaz-alternativnyy-istochnik-energii> (дата обращения: 13.01.2019).
4. Рогозина, М.В. Технологические особенности переработки фузы в биогаз / М.В. Рогозина, И.В. Мирошниченко // В книге: Молодежный аграрный форум – 2018. Материалы международной студенческой научной конференции. – 2018. – С. 267.
5. Игнатенко, В.А. Моделирование динамики функционирования систем управления технологическим процессом с использованием математического аппарата сетей Петри / В.А. Игнатенко, Д.А. Петросов // В сборнике: Информационно-аналитические системы и технологии Материалы V международной конференции. – 2018. – С. 34–39.

References

1. Hamokov, M.M. Proizvodstvennaya i jenergeticheskaja jeffektivnost' ispol'zovaniya biogazovoj ustanovki / M.M. Hamokov, Ju.A. Shekihachev, V.Z. Aloev i dr. // Nauchnyj zhurnal KubGAU – Scientific Journal of KubSAU. – 2012. – № 76 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvennaya-i-energeticheskaya-effektivnost-ispolzovaniya-biogazovoy-ustanovki> (data obrashhenija: 13.01.2019).
2. Sadchikov, A.V. Povyshenie jenergeticheskoy jeffektivnosti biogazovyh ustanovok / A.V. Sadchikov // Fundamental'nye issledovanija. – 2016. – № 10-1. – S. 83–87 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40813> (data obrashhenija: 13.01.2019).
3. Vandysheva, M.S. Biogaz al'ternativnyj istochnik jenergii / M.S. Vandysheva // Vestnik

NGIJeI. – 2014. – № 6(37) [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://cyberleninka.ru/article/n/biogaz-alternativnyy-istochnik-energii> (data obrashhenija: 13.01.2019).

4. Rogozina, M.V. Tehnologicheskie osobennosti pererabotki fuzy v biogaz / M.V. Ragoza, I.V. Miroshnichenko // V knige: Molodezhnyj agrarnyj forum – 2018. Materialy mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii. – 2018. – S. 267.

5. Ignatenko, V.A. Modelirovanie dinamiki funkcionirovanija sistem upravlenija tehnologicheskimi processom s ispol'zovaniem matematicheskogo apparata setej Petri / V.A. Ignatenko, D.A. Petrosov // V sbornike: Informacionno-analiticheskie sistemy i tehnologii Materialy V mezhdunarodnoj konferencii. – 2018. – S. 34–39.

*D.A. Petrosov, N.V. Petrosova, I.V. Miroshnichenko
V.Ya. Gorin Belgorod State Agrarian University, Belgorod*

Development of the Imitation Model of Biogas Installation in Conditions of Biological Farming

Keywords: agro-ecosystems; biological farming; simulation modeling; system analysis; theory of Petri nets.

Abstract: Currently, in the Russian Federation there is a problem of increasing the quantity and quality of agricultural products. This problem is due to the modern realities of the foreign policy situation and, the government task of import substitution in general and in the field of agriculture. One of the problems is to optimize the use of biogas plants, which allow utilization of waste food and agro-industrial products into thermal, electrical energy, as well as produce fertilizers, as part of the use of biological farming. One of the approaches to solve this problem is the use of simulation tools that allow computational experiments to be carried out before the introduction of biogas plants in agricultural production, in order to calculate the effectiveness of their use in various regions of the Russian Federation. This paper analyzes the processes occurring in a biogas plant and proposes an approach for building simulation models using the modern mathematical apparatus of the theory of Petri nets.

© Д.А. Петросов, Н.В. Петросова, И.В. Мирошнichenko, 2019