

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
НИТРАТОВ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

*О. Т. Шипина, В. К. Мингазова, Я. А. Фомин*

**THE USE OF MATHEMATICAL APPARATUS  
OF MODIFIED PETRI NETS FOR MODELING  
THE PRODUCTION OF CELLULOSE NITRATES**

*O. T. Shipina, V. K. Mingazova, Ya. A. Fomin*

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Работа посвящена проблеме подготовки специалистов химической отрасли с применением электронного образовательного ресурса. Моделирование процессов производства химических веществ является полезным и современным средством обучения. Цель работы – используя принципы моделирования техпроцессов с помощью сетей Петри, создать наглядные модели аппаратов для производства нитратов целлюлозы (НЦ), разработать программное обеспечение и смоделировать процесс производства НЦ. *Материалы и методы.* Реализация задач была достигнута за счет использования математического аппарата сетей Петри. *Результаты.* В работе приведены результаты работы программы в графическом виде. Разработана программная реализация модели производства. *Выводы.* Внедрение и использование программного комплекса дает возможность модернизировать и улучшить качество образовательных услуг, использовать все современные технологии в обучающем процессе и соответствовать стратегии развития обучающего процесса в вузе.

**Ключевые слова:** моделирование технологических процессов, программное обеспечение, сети Петри, производство нитратов целлюлозы.

**Abstract.** *Background.* Work is devoted to a problem of training of specialists of chemical branch with application of an electronic educational resource. Simulation of processes of production of chemicals is the useful and modern tutorial. The purpose of this study is using the principles of modeling of technological processes via the Petri nets in order to create visual models of apparatuses for production of cellulose nitrates, develop software and simulate the production process of cellulose nitrates. *Materials and methods.* The implementation of the research objective was achieved by the use of mathematical apparatus of Petri nets. *Results.* The article presents the results of the program in graphical form. The program of the introduction of a model of production is developed. *Conclusions.* The introduction and use of the software package will allow to modernize and improve the quality of educational services, to use all modern technologies in the learning process and to correspond to the strategy of development of the teaching process in the higher educational institution.

**Key words:** modeling of technological processes, software, Petri nets, production of nitrates of cellulose.

## ***Введение***

Российское инженерное и естественнонаучное образование традиционно по праву считается одним из лучших в мире. Но в XXI в. сохранить преимущество нашей образовательной системы можно только при условии применения достижений в области информационных технологий. Это не просто обеспечение вузов компьютерами и подключение их к Интернету. Приобретение технических средств и овладение ими студентами и преподавателями – самый первый и самый простой шаг к использованию информационных технологий в образовании. Следующий шаг – изучение преподавателями новейших достижений в области инженерных технологий (ИТ), создание образовательных ресурсов (учебников, лекционных курсов, программ, пособий) и обеспечение доступа к ним.

Наряду с этим в настоящее время актуальна проблема подготовки специалистов с применением электронного образовательного ресурса, которые смогут работать, в частности, на производстве нитратов целлюлозы (НЦ).

Для процесса обучения будут полезны средства, позволяющие моделировать процессы производства химических веществ. Современное химическое производство представляет собой сложную химико-технологическую систему (ХТС), состоящую из большого количества аппаратов и технологических связей между ними. Следовательно, разработка и эксплуатация производства требует знания как общего подхода к проблеме, так и большого количества вопросов, непосредственно связанных с ХТС.

При разработке новой химико-технологической системы или модернизации существующей основная задача заключается в создании высокоэффективного химического производства, т.е. такого объекта химической промышленности, который позволит получать продукцию заданного качества в требуемом объеме наиболее экономически целесообразным путем. При эксплуатации существующей ХТС необходимо таким образом управлять производством, чтобы при высокой производительности и низких капитальных затратах и текущих расходах обеспечить получение продукта требуемого качества.

С использованием принципов моделирования техпроцессов с помощью сетей Петри созданы наглядные модели аппаратов для производства нитратов целлюлозы [1–5]. Разработано программное обеспечение для моделирования производств нитратов целлюлозы. Исследован и смоделирован процесс производства нитратов целлюлозы.

Объектом исследования в данной работе является химико-технологическая система производства НЦ, ее материальные и информационные потоки [6]. Предмет исследования – методы и алгоритмы моделирования и оптимизации полунепрерывных производственных систем.

### ***Модель производства нитратов целлюлозы на сетях Петри***

Производство НЦ может быть отнесено к классу дискретно-непрерывных (ДН) химико-технологических систем.

Согласно принципу селективности нами рассматривается техпроцесс лишь по одному продукту – нитрату целлюлозы, без учета вспомогательного оборудования, производства регенерации кислот, очистных сооружений и т.д.

Считается, что время обработки промежуточных продуктов не зависит от качества сырья, внешних условий и влияния внешней среды.

Для количественной оценки системы вводится понятие «состояние». Под состоянием ДНХТС НЦ понимается состояние всех аппаратов-элементов ДНХТС: аппарат загружается, реализует техпроцесс или разгружается. Входными параметрами в модели являются дискретные потоки исходного сырья (целлюлозы), выходными – порции готового продукта – нитрат целлюлозы.

Конечная цель создания математических моделей – установление функциональных зависимостей между переменными. Функциональная зависимость для каждой конкретной модели может принимать строго определенный вид. Создание математической модели требует знания присутствующих в системе элементов и их взаимосвязей.

Производство НЦ состоит из совокупности аппаратов, поэтому модель его будет составной моделью. Модель ДНХТС производства синтезируется из моделей элементов – аппаратов, образующих данное производство.

Все системы существуют во времени и в пространстве. Математически это значит, что время и пространственные переменные могут рассматриваться в качестве независимых переменных. Но учет всех независимых переменных приводит к усложнению модели. Поэтому в качестве независимых переменных берем одну или две переменные. Примерами такого подхода относительно непрерывных динамических систем могут служить системы, моделью которых является система дифференциальных уравнений с независимой переменной  $t$ .

Для формирования СП-модели цеха производства НЦ построены СП-модели основных аппаратов данного производства. Общая СП-модель цеха получена подстановкой СП-моделей отдельных аппаратов в структурную схему цеха и генерацией соответствующей системы приоритетов и схемы взаимодействия данных аппаратов как в пределах отдельных стадий, так и на межстадийном уровне.

Рассмотрим схему на примере процесса дозирования олеума (рис. 1,а) в смеситель. Переход  $t_1$  – вход смесителя. Полагаем, что в хранилище свежих кислот они всегда есть. Маркировка  $M(p_1)$  определяет количество свежей кислоты, которое необходимо загрузить в смеситель, моделируемый позицией  $p_{10}$  согласно заданию.  $M(p_9)$  определяет вместимость мерника. Если  $M(p_1) > M(p_9)$  – задание на загрузку больше вместимости мерника, то дозирование реализуется в несколько этапов, соответственно, и переход  $t_1$  срабатывает многократно. Так как  $M(p_2) \neq 0$ , посредством ингибиторной дуги блокируется срабатывание перехода  $t_4$  (вход смесителя). По окончании загрузки смесителя срабатывание перехода  $t_3$  обнуляет позицию  $p_2$ , тем самым снимает блокировку на линиях.

Позиции  $p_2, p_6$  – сигнальные, информирующие о занятости мерника одним из смесителей. Позиции  $p_1, p_5$  – информационные, в них формируется задание на смешение согласно плану. Позиция  $p_3$  моделирует мерник в ожидании загрузки, а  $p_4$  – мерник в ожидании разгрузки. Переход  $t_3$  – выход мерника, его срабатывание интерпретируется как разгрузка мерника в смеситель.

Аналогично моделируется процесс дозирования в мерник купоросного масла. Граф модели мерника купоросного масла представлен на рис. 1,б.

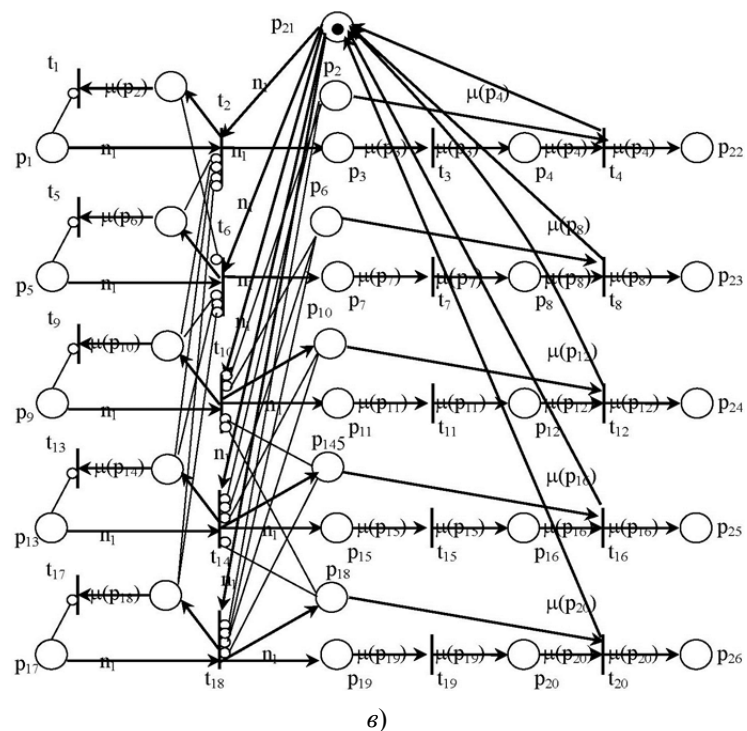
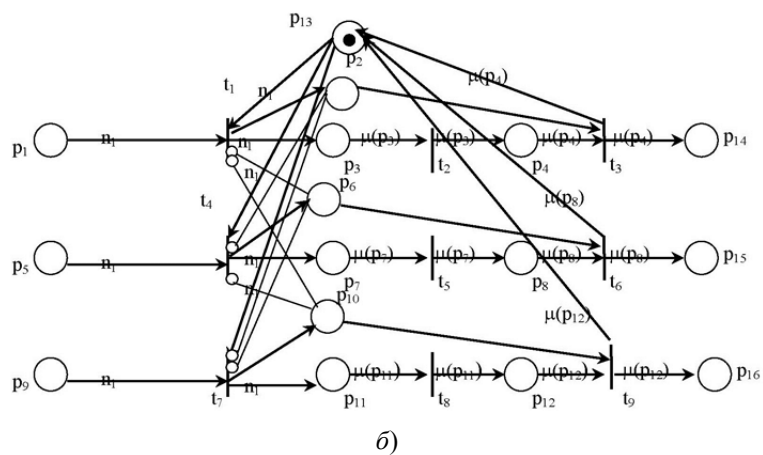
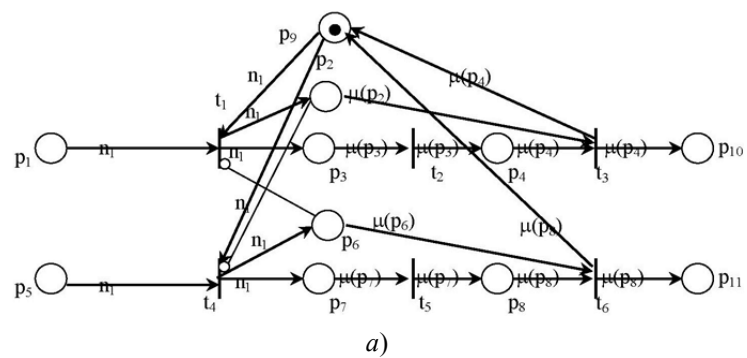


Рис. 1. СП-модели мерников кислот:  
*a* – олеума; *б* – купоросного масла; *в* – азотной кислоты

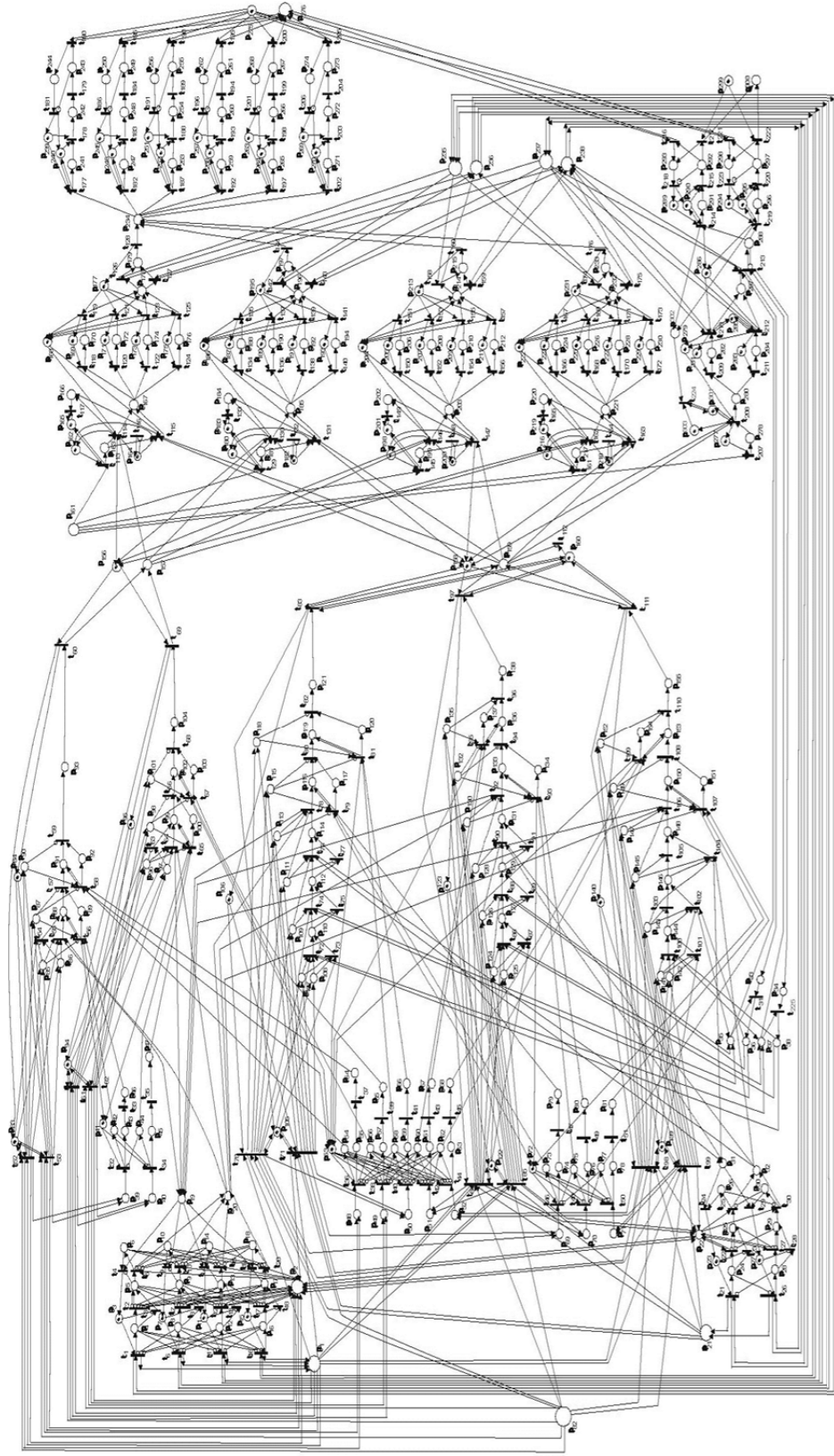


Рис. 2. СП-модель стадии этерификации и рекуперации

Интерпретация модели мерника купоросного масла аналогична модели мерника олеума. Отличия заключаются в том, что мерник дозирует купоросное масло в один из трех смесителей НКС № 2, соответственно, и в модели выделены три схемы дозирования:  $\{t_2, t_3, t_4\} \cup \{p_3, p_4, p_{14}\}$  – для смесителя  $p_{14}$ ,  $\{t_6, t_7, t_8\} \cup \{p_7, p_8, p_{15}\}$  – для смесителя  $p_{15}$ ,  $\{t_{10}, t_{11}, t_{12}\} \cup \{p_{11}, p_{12}, p_{16}\}$  – для смесителя  $p_{16}$ .

Граф модели мерника азотной кислоты также представлен на рис. 1,в. Интерпретация модели мерника азотной кислоты аналогична модели мерника олеума. Отличия в том, что мерник дозирует азотную кислоту в один из пяти смесителей. Соответственно, в модели мерника выделены 5 схем дозирования:  $\{t_1, t_2, t_3, t_4\} \cup \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_{22}\}$  – для смесителя 1,  $\{t_5, t_6, t_7, t_8\} \cup \{p_5, p_6, p_7, p_8, p_{23}\}$  – для смесителя 2,  $\{t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}\} \cup \{p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{24}\}$  – для смесителя 3,  $\{t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16}\} \cup \{p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16}, p_{25}\}$  – для смесителя 4,  $\{t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}\} \cup \{p_{17}, p_{18}, p_{19}, p_{20}, p_{25}\}$  – для смесителя 5.

Полный граф сети Петри для всего производства формируется путем подстановки моделей в структурную схему цеха и генерации соответствующей системы приоритетов и схем межстадийного взаимодействия. На рис. 2 представлена модель сети Петри для стадии этерификации и рекуперации.

### ***Java – платформа программного обеспечения***

Программа «Моделирование производства НЦ» позволяет осуществлять моделирование производственных линий производства НЦ. В программе имеется набор моделей аппаратов, позволяющих составлять различные технологические нити. Каждый аппарат имеет свойства, которые пользователь может изменять в зависимости от поставленной задачи.

Программный продукт обладает рядом свойств:

- имеет удобный интерфейс, который не вызывает негативной реакции у пользователей;
- позволяет выполнять все работы, заложенные в программе, быстро и удобно;
- облегчается усвоение учебного материала;
- восполняется нехватка учебных материалов;
- экономится время, затрачиваемое на изучение материала;
- есть возможность использования приложения на любой платформе;
- отсутствуют проблемы с лицензированием программного обеспечения;
- существует возможность модернизации; при этом студенты смогут без труда работать с программным комплексом, имея минимальные навыки работы с ПК.

Рабочее окно программы представлено на рис. 3 (результат работы).

Рабочее окно программы имеет следующие основные составные части:

I. Главное меню (содержит пункты меню «Файл» и «Справка»).

1. Меню «Файл» включает пункты:

- «Запуск САМ» – служит для запуска модуля САМ;
- «Сохранить» – позволяет сохранить результаты работы в файл;
- «Загрузить» – позволяет загрузить ранее сохраненную работу.

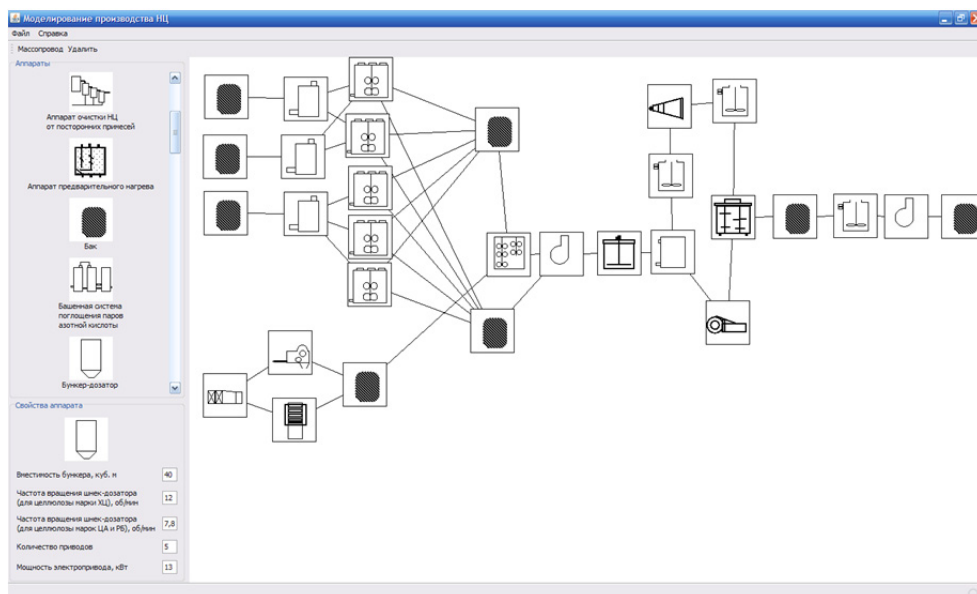


Рис. 3. Главное окно программы

2. Меню «Справка» состоит из следующих пунктов:

- «Примеры схем» – открывает окно, содержащее модели схем производства изготовления коллоксилинов по полунепрерывной технологии, производства НЦ по периодической и по полунепрерывной технологиям;
- «Пояснение» – открывает окно с текстом анализа производства НЦ, поясняющим схемы;
- «О программе» – вызывает окно с информационными данными о программном продукте.

II. Панель инструментов (содержит кнопки «Массопровод» для установки режима соединения аппаратов массопроводами и «Удалить» для установки режима удаления элементов схемы).

III. Рабочую область (служит для построения схем).

IV. Палитру компонентов «Аппараты» (отображает всю коллекцию имеющихся аппаратов) (рис. 4).

V. Панель «Свойства аппарата» (отображает свойства активного аппарата) (рис. 5).

Система автоматизированного моделирования позволяет наглядно изобразить на экране компьютера модель сети Петри, а также выполнить заданное количество шагов сети Петри.

Построение модели сети Петри осуществляется путем транспортировки мышью примитивов сети Петри в область рисования.

В режиме редактирования возможно выполнение одного или нескольких шагов сети Петри.

Шаг сети Петри – это выполнение всех разрешенных переходов в порядке возрастания их номеров.

Платформой и языком для разработки была выбрана Java. Java – объектно-ориентированный язык программирования. Приложения Java компилиру-

ются в специальный байт-код, поэтому они могут работать на любой виртуальной Java-машине (JVM) вне зависимости от компьютерной архитектуры.

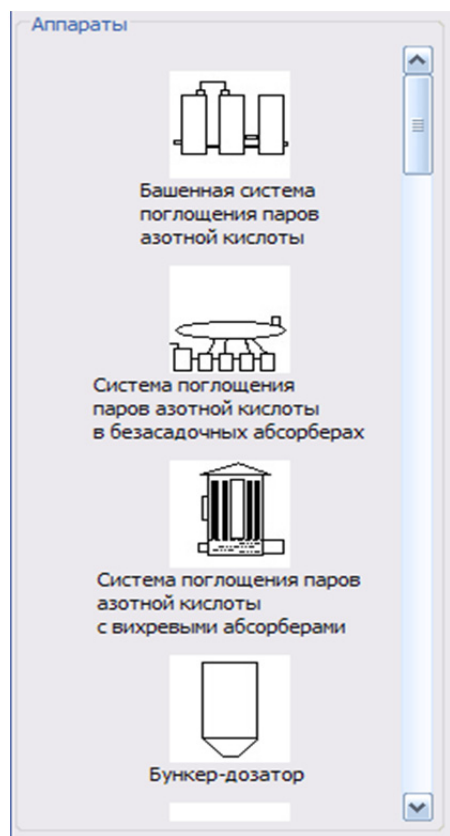


Рис. 4. Палитра компонентов «Аппараты»

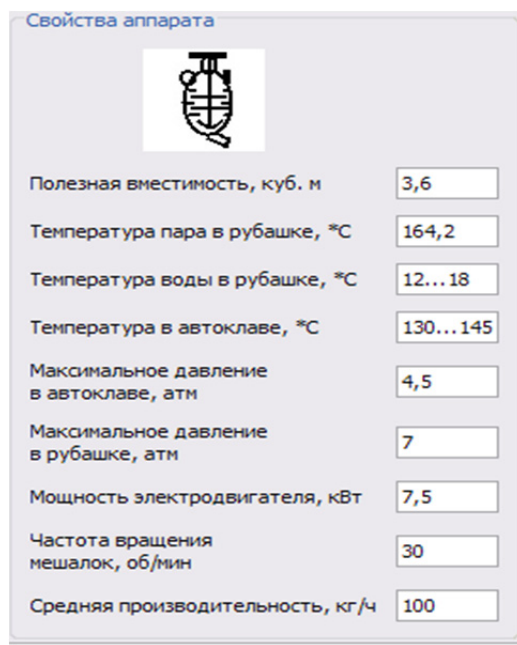


Рис. 5. Панель «Свойства аппарата»

### Заключение

Разработано программное обеспечение для моделирования аппаратов и технологических схем.

Разработано подробное руководство пользователя по работе с разработанным программным обеспечением.

Построенные модели аппаратов позволяют получить достаточно полную картину производства нитратов целлюлозы.

Разработана программная реализация модели производства.

Несмотря на то, что в данной работе полностью решен рассматриваемый вопрос, возможны следующие пути развития продукта:

- применение передовых технологий в области компьютерной графики для интерактивного отображения технологического процесса;
- увеличение объема справочной информации;
- применение архитектуры «клиент-сервер» для централизованного контроля преподавателем работы студентов.



### **Библиографический список**

1. Проектирование гибких технологических процессов получения нитратов целлюлозы (с использованием математического аппарата модифицированных сетей Петри) : учеб. пособие / А. В. Косточко, О. Т. Шипина, И. Р. Басыров, О. М. Матренина, В. А. Петров. – Казань : Казан. гос. технол. ун-т, 2006. – 84 с.
2. Сети Петри. – URL: [http://www.iacp.dvo.ru/lab\\_11/otchet/ot2000/pn3.html](http://www.iacp.dvo.ru/lab_11/otchet/ot2000/pn3.html)
3. Википедия. – URL: <http://ru.wikipedia.org>
4. Математическое моделирование. – URL: [http://mat.1september.ru/2003/14/no14\\_1.htm](http://mat.1september.ru/2003/14/no14_1.htm)
5. Дейтел, Х. М. Технологии программирования на Java 2 : пер. с англ. // Х. М. Дейтел, П. Дж. Дейтел, С. И. Сантри. – М. : Бином-Пресс, 2003. – 1680 с.
6. Гиндич, В. И. Производство нитратов целлюлоз / В. И. Гиндич, Л. В. Забелин, Г. Н. Марченко. – М. : ЦНИИНТИ, 1984. – 360 с.

---

#### **Шипина Ольга Терентьевна**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра химии и технологии  
высокомолекулярных соединений,  
Казанский национальный  
исследовательский университет  
E-mail: [shipina.olga@yandex.ru](mailto:shipina.olga@yandex.ru)

#### **Shipina Olga Terentievna**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of chemistry and technology  
of macromolecular compounds,  
Kazan National Research University

#### **Мингазова Венера Каямтиновна**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра химии и технологии  
высокомолекулярных соединений,  
Казанский национальный  
исследовательский университет  
E-mail: [venera-m@inbox.ru](mailto:venera-m@inbox.ru)

#### **Mingazova Venera Kayamtinovna**

candidate of technical sciences,  
associate professor,  
sub-department of chemistry and technology  
of macromolecular compounds,  
Kazan National Research University

#### **Фомин Ярослав Александрович**

студент,  
Казанский национальный  
исследовательский университет  
E-mail: [shipina.olga@yandex.ru](mailto:shipina.olga@yandex.ru)

#### **Fomin Yaroslav Alexandrovich**

student,  
Kazan National Research University

---

УДК 519.87:66.0

**Шипина, О. Т.**

**Использование математического аппарата модифицированных сетей Петри для моделирования производства нитратов целлюлозы / О. Т. Шипина, В. К. Мингазова, Я. А. Фомин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3 (23). – С. 186–194.**