

А. В. Мушнин, А.В. Долганов, Д. В. Елизаров, В. В. Елизаров

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ И РАСХОДА В РЕЗЕРВУАРЕ С ЖИДКОСТЬЮ В КОМПЬЮТЕРНОМ ТРЕНАЖЕРЕ***Ключевые слова: математическая модель, ПИД-регулятор, компьютерный тренажер.**Описывается уровень разработки математических моделей конструктора для моделирования пуска, останова и аварийных ситуаций на предприятиях химии и нефтехимии. Рассматривается разработка типовых математических моделей емкости, ПИД-регулятора, регулирующего клапана.**Keywords: mathematical model, PID control, computer simulator.**Describes the level of development of mathematical models to simulate the design of start, stop and emergency situations in the chemical and petrochemical enterprises. We consider the development of standard mathematical models of tanks, PID control valve.***Введение**

Усложнение и постоянная интенсификация химико-технологических процессов требуют модернизации как технических средств автоматизации, так и алгоритмов управления. Перекладывая все большие задачи на автоматизированные системы разработчикам необходимо беспокоиться и о повышении уровня подготовки человека-оператора, ведь грамотно разработанная система управления не допускает ошибок, обладает высокой степенью надежности и различными встроенными алгоритмами диагностики и оптимизации. Современный уровень развития средств автоматизации обязывает человека принимать участие в управлении и контроле за химико-технологическими процессами (ХТП). Т.о., именно человек становится слабым звеном сложной цепочки в системе управления, что подтверждается исследованиями и статистическими данными в вопросе возникновения аварийных ситуаций на производстве. Человеческий фактор становится одним из главных для повышения безопасности и надежности систем управления [1].

В совокупности с предписаниями общих правил взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (ПБ 09-540-03) [2] задача разработки компьютерных тренажеров, как средств обучения операторов ХТП является весьма актуальной, учитывая, в частности, низкую оснащенность предприятий подобными комплексами.

**Теоретическая часть**

В работе представлено описание математических моделей технологических объектов, разработанных на базе «Конструктора для моделирования пуска, останова и аварийных ситуаций на предприятиях химии и нефтехимии» [3,4]. Протекание технологического процесса на объектах химической технологии состоит из работы отдельных аппаратов, поэтому для моделирования работы технологического узла необходимо разработать математические модели этих аппаратов, проверить их адекватность и применимость. После

этого можно приступать к составлению общей схемы технологического узла.

Первым шагом стала разработка математических моделей простейших аппаратов ХТ, к которым относятся резервуары, ручные арматуры и регулирующие клапана. Рассмотрим принципы разработки данных математических моделей, из сочетания которых составлена математическая модель узла: емкость, оснащенная регулятором уровня по расходу входящего продукта, а также регулятором расхода вытекающего продукта.

Исследование математических моделей на инструментари конструктора предшествует выполнению работ по разработке компьютерного тренажера и позволяет создать базу моделей, использование которых возможно при выполнении тренажерных комплексов различных производств.

В работе описывается уровень разработки математических моделей. Модуль обработки математических моделей осуществляет выполнение вложенной в блок математической модели, применяя текущее состояние процесса, т.е. обрабатывает параметры, используемые математической моделью, с текущими значениями и регистрирует изменения.

Описание математической модели начинается на уровне функциональных блоков, где каждый блок соответствует определенному объекту химической технологии. Из данных блоков составляется логическая структура, соответствующая функциональной схеме. Для каждого блока может быть задано необходимое количество переменных, которые являются входами-выходами из аппарата, внутренними параметрами модели, используемыми в расчетах, выводятся на верхний уровень визуализации и контроля или применяются для передачи управляющих и контролируемых сигналов.

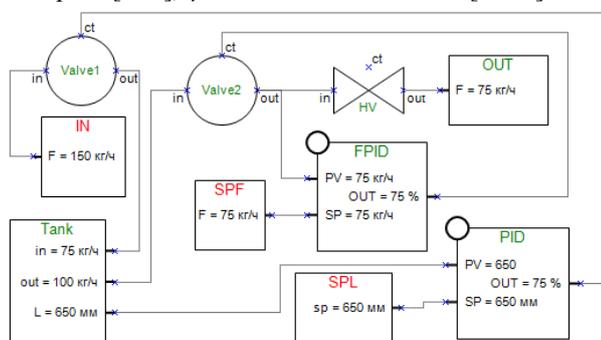
Рассмотрим простейшие конструктивные элементы – блоки ввода и вывода данных о расходе продукта, «IN» и «OUT», представленные на рис 1. Данные блоки представляют собой простейшие элементы, используемые при разработке математической модели технологического узла. С помощью таких блоков происходит ввод или вывод информации о необходимом параметре. В конкретном случае блоки служат для задания

необходимого расхода поступающего продукта и вывода информации о расходе уходящего продукта. Основное предназначение таких блоков это ввод или вывод информации, задание уставок регуляторам, ввод управляющих воздействий. Блок является граничным элементом технологической схемы, так как служит только для односторонней передачи информации. У каждого блока имеется индивидуальное имя, которое используется для инициализации параметра и передачи данных.

Следующим структурным элементом рассматриваемой модели является емкость «Tank». Рассмотрим математическую модель открытой емкости для хранения жидкости в виде уравнения для определения уровня в резервуаре[5]:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{V_{in} - V_{out}}{3600S} \rho,$$

где  $V_{in}$ ,  $V_{out}$  – расходы поступающего в емкость и вытекающего из емкости продуктов [кг/час],  $L$  – текущее значение уровня [мм],  $S$  – сечение аппарата [мм<sup>2</sup>],  $\rho$  – плотность жидкости [кг/м<sup>3</sup>].



**Рис. 1 – Структура математической модели емкости с регуляторами уровня и расхода**

Для моделирования работы емкости была использована описанная выше математическая модель. Расчет изменения уровня жидкости ведется один раз в секунду, тем самым, моделируется работа аппарата в динамике. Были выбраны следующие параметры аппарата, отображаемые в структурной схеме: входной параметр – величина расхода поступающего продукта, выходной параметр – величина расхода вытекающего продукта, рассчитываемый параметр – уровень продукта в емкости. Внутренние переменные:  $dl$  – изменение уровня в емкости за единицу времени,  $S$  – площадь аппарата.

Высота аппарата – 1000 мм, в основании квадрат размером 100 x 100 мм. Тем самым площадь основания равна 10000<sup>2</sup> мм, предел изменения уровня  $dl$  от 0 до 1000 мм. Задание нижней и верхней границы связано с тем, что при превышении данного параметра вычисляемая или измеряемая величина приравнивается максимальному или минимальному значению. Изменение расходов входного и выходного потоков возможно в диапазоне от 0 до 150 кг/час.

Математическая модель регулирующего клапана «Valve» включает в себя три отображаемых переменных и одну внутреннюю. Параметры  $in$ ,  $out$  используются для учета расхода продукта до и после регулирующего органа, соответственно.

Параметр  $ct$  необходим для принятия управляющего воздействия от регулятора. После изменения поступающего сигнала происходит перерасчет внутреннего параметра  $dout$ , показывающего необходимое изменение степени открытия регулирующего органа. Параметр  $dout$  изменяется в пределах от -100 до 100%, параметр  $ct$  от 0 до 100%, а параметры  $in$ ,  $out$  изменяются в интервале, определяемом возможными изменениями входного потока. Заложено следующий алгоритм работы регулирующего органа: Рассчитывается  $dout$  как разность управляющего воздействия  $ct$  и степени открытия клапана  $out$ . Запоздывание и инерционность регулирующего органа реализованы следующим образом: при значении  $dout > 15\%$  в следующем такте происходит изменение степени открытия клапана на 5%, при значении  $dout > 7\%$  степень открытия клапана изменяется на 3%, в противном случае величина степени открытия клапана приравнивается значению управляющего воздействия  $ct$ . Данный алгоритм работы исполнительного устройства наиболее близко описывает работу реального объекта и позволяет изучать разрабатываемые математические модели системы управления и других технологических объектов.

*Ручная запорная арматура HV.* Данный блок имеет три параметра, отображаемых на структурной схеме:  $in$  – вход,  $out$  – выход,  $ct$  – управляющее воздействие. В математической модели данного блока не учитывается падение давления, создаваемое запорной арматурой. В общем случае управляющее воздействие может иметь два значения: 0 и 1, закрыто или открыто. Запись модели выглядит следующим образом: « $out.Value := ct.Value * in.Value$ ». Данная запись означает, что значение на выходе получается перемножением значения на входе на величину управляющего воздействия (0 или 1) и означает отсутствие или наличие потока. Т.о. на выходе возможно наличие двух величин: 0 – когда арматура закрыта, значение входного потока  $in$ , когда арматура открыта.

*ПИД-регулятор расхода*[6]. Данный блок имеет следующие отображаемые параметры:  $SP$  – уставка (кг/ч),  $PV$  – текущее значение регулируемого параметра (кг/ч),  $OUT$  – процент открытия регулирующего клапана (%). Отображаемые переменные  $kp$ ,  $ki$ ,  $kd$  ( $e$ ,  $int$ ,  $dif$ ) показывают рассогласование, влияющее на вклад пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-закона регулирования. Используемые дополнительные внутренние переменные:  $Spold$ ,  $Spnew$  – старое и новое значение уставки, используемое в алгоритме работы регулятора,  $time$  – время,  $auto$  – параметр, отвечающий за режим работы регулятора (ручной или автоматический),  $e$ ,  $e0$  – текущая и прошлая ошибка (разница  $sp$  и  $pv$ ).

Применяется следующий алгоритм работы ПИД-регулятора[7]:

1. Запоминается прошлая ошибка:  $e0=e$ .
2. Рассчитывается новое рассогласование:  $e=sp-pv$ .

- Интегрируется ошибка, при этом рассчитывается полусумма разности (разностная схема):  $int=int+(e0+e)/2$
- Дифференцируется ошибка:  $dif=e-e0$ .
- Рассчитывается управляющее воздействие:  $out=out+e*kp+int/ki+dif*kd$ .

После расчета нового управляющего воздействия оно передается на регулирующий орган. Задание уставки регулятору производится с помощью отдельного блока, тогда как настройка коэффициентов ПИД-регулятора происходит в коде программы.

In	ID	Type	Side	Value	DefValu	LoLo	Lo
1	PV	Число	Left	650	0	0	0
2	SP	мм	Left	650	0	0	0
3	OUT	%	Right	75,0000	0	0	0
4	SPol	Число	None	0	0	0	0
5	kp	Число	None	0,45	0	0	0
6	ki	Число	None	0	0	-1000	-1000
7	kd	Число	None	0	0	-1000	-1000

Рис. 2 – Окно задания свойств функциональных блоков

В окне задания свойств функциональных блоков, представленном на Рис. 2 отражаются все существующие параметры для данного блока. Во вкладке «Params» происходит настройка каждого параметра, ввод значения по умолчанию, определение единиц измерения, задание шкалы диапазона, при необходимости значения предупредительной и критической сигнализаций. Количество параметров в каждом блоке зависит от сложности решаемой задачи. Для каждого параметра имеется возможность установки нескольких свойств, приведенных в верхней горизонтальной строке: ID – имя параметра, Type – единицы измерения, Side – отображаемость параметра на функциональном блоке и его расположение, Value – текущее значение параметра, DefValue – значение параметра по умолчанию, LoLo, Lo, Hi, HiHi – значение нижней критической, нижней предупредительной, верхней предупредительной, верхней критической уставок соответственно, Min, Max – определяют нижнюю и верхнюю границу возможного диапазона для данного параметра. Вкладка «Code» содержит математическую модель, записанную на Паскале подобном языке, что не вызывает сложностей в работе пользователя, имеющего минимальный уровень подготовки. Пользователь создает математические модели для каждого аппарата, которые могут использоваться в разработке последующих продуктов. Таким образом, каждый пользователь может не только создавать новые математические модели, но и использовать ранее созданные, т.е. производить их настройку, изменение и модернизацию, в соответствии с конкретными задачами. Открытость математических моделей является ключевой особенностью данного комплекса.

Моделируемый узел начинается с контура регулирования уровня в емкости расходом

поступающего продукта. Расход продукта, вытекающего из емкости регулируется ПИД-регулятором расхода. Два регулятора работают независимо, тогда как емкость объединяет их в единое целое. В представленной структурной схеме каждый блок соответствует определенному объекту, участвующему в технологическом процессе: Tank – емкость; FPID, LPID – регуляторы расхода и уровня; Valve1, Valve2 – регулирующие клапаны; SPL, SPF – блоки задания уставок регуляторам уровня и расхода; IN – блок задания расхода поступающего продукта; OUT – блок вывода расхода уходящего продукта. Расположение параметров справа/слева/сверху/снизу является условным и необходимо для более удобного размещения блоков на структурной схеме. Описание каждого блока представлено выше.

Между собой блоки соединяются двумя способами – соединительными линиями, по которым передаются данные от одного блока другому или при записи программного кода блока. Отсутствие соединительных линий в некоторых случаях обусловлено усложнением структурной схемы при отображении всех существующих связей. Подробное описание работы данного комплекса представлено в работах [1,2].

Таким образом, был рассмотрен процесс разработки математической модели технологического узла. Аналогичным образом разрабатываются модели технологических узлов любой сложности и объема. Результаты, полученные на данном этапе, согласуются с поставленными целями создания распределенного тренажерного комплекса.

## Результаты

Результаты получены на программном обеспечении, зарегистрированном федеральным институтом промышленной собственности [8,9].

Моделирование переходных процессов представлено на рис. 3, 4. Кривая 1 отображает изменение уровня и расхода поступающего продукта при изменении уставки регулятору уровня с 500 до 550 мм при следующих параметрах настройки ПИД-регулятора:  $kp=0,45$ ,  $ki=0,1$ ,  $kd=2$ . Кривая 2 отображает изменение уровня и расхода поступающего продукта при изменении уставки регулятору уровня с 550 до 500 мм при следующих параметрах настройки ПИД-регулятора:  $kp=0,3$ ,  $ki=0,1$ ,  $kd=5$ .

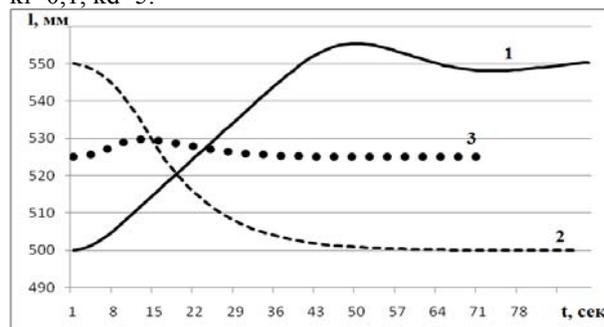
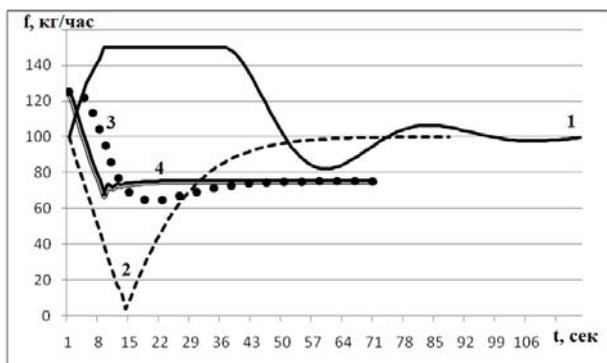


Рис. 3 – Зависимость уровня в емкости L от времени.



**Рис. 4 – Зависимость расхода поступающего (1,2,3) и выходящего (4) продукта от времени.**

Кривая 3 отображает изменение уровня и расхода поступающего продукта при изменении уставки регулятора расхода вытекающего продукта с 125 до 75 кг/час (кривая 4) при следующих параметрах настройки ПИД-регулятора уровня:  $k_p=0,45$ ,  $k_i=0,1$ ,  $k_d=2$ ; ПИД-регулятора расхода:  $k_p=0,2$ ,  $k_i=0,1$ ,  $k_d=0,3$ .

*Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-*

*педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение №14.В37.21.0591).*

### Литература

1. В. М. Дозорцев, *Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов*. Синтег, Москва, 2009, 372 с.
2. ПБ 09-540-03. *Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств*.
3. А.В. Мушнин, Д. В. Елизаров, В. В. Елизаров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 15. 8. 348–351 (2012).
4. А.В. Мушнин, *Вестник Сарат. гос. технич. ун-та*, 64.2. 230–234 (2012).
5. А. Г. Колмогоров, Н.С. Благодарный, *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 26. 2. 51–56 (2010).
6. А.В. Долганов, В. В. Елизаров, В. И. Елизаров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 14. 19. 180–188 (2011).
7. Д.В. Елизаров, А.В. Мушнин, В.В. Елизаров, *ММТТ-25*. 9. 31-33 (2012).
8. Авт. свид. РФ 2012615831 (2012)
9. Авт. свид. РФ 2012615832 (2012)

© **А. В. Мушнин** – аспирант кафедры информационных систем и управления информационными ресурсами ФГБОУ ВПО «КНИТУ», [aleksey\\_muschinin@mail.ru](mailto:aleksey_muschinin@mail.ru); **А. В. Долганов** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»; **Д. В. Елизаров** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»; **В. В. Елизаров** – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов и производств НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»