

## Разработка математической модели вулканизационного котла

*Т.А. Маслова, Е.Ю. Силаева*

*Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградский государственный технический университет, г. Волжский*

**Аннотация:** Статья посвящена вопросу разработки математической модели вулканизационного котла, а именно – контуру регулирования температуры внутри котла. Математическая модель котла получена методом Ротача в виде передаточной функции. Имитационное моделирование выполнено в программном средстве VisSim. Доказана адекватность и устойчивость модели и получены числовые значения критериев качества переходного процесса. Полученная модель предназначена для определения оптимальных настроек регулятора системы управления процессом вулканизации.

**Ключевые слова:** передаточная функция, вулканизационный котел, переходный процесс, процесс вулканизации, время запаздывания, длинномерный рукав.

Эффективная реализация современных производств требует оснащения их системами контроля и оперативного управления, обеспечивающими получение продукции заданного качества, снижение её себестоимости, комфортные условия труда для обслуживающего персонала. Для разработки подобных систем контроля и управления необходимо произвести расчет математической модели объекта управления. Особенно это важно для энергоёмких объектов, таких как вулканизационный котёл. Поэтому задачи по определению математической модели вулканизационного котла являются актуальными в области автоматизации технологических процессов производства резинотехнических изделий.

Следует отметить, что в настоящее время большинство систем управления процессом вулканизации поддерживают только контроль температуры в котле-вулканизаторе, считая, что регулирование температуры подаваемого теплоносителя достаточно для обеспечения требуемой температуры. В данной статье предлагается добавить контур регулирования температуры непосредственно в вулканизационном котле для обеспечения более высокого качества вулканизации. Для этого необходимо определить математическую модель котла-вулканизатора.

---

Рассмотрим вулканизационный котёл (рис.1), в котором происходит процесс вулканизации длинномерных рукавов. Рукава поступают в процесс вулканизации, который предназначен для вулканизации изделий из резиновой смеси [1] в вулканизационном котле тупикового типа при температуре  $151^{\circ}\text{C}$  под давлением  $0,6\text{Мпа}$  в течение  $50\text{мин}$ . Температуру в котле необходимо поддерживать с помощью обогревателя, управляемого регулятором. В нижней части котла имеется отводной штуцер для сброса давления и отвода конденсата.

После окончания процесса перекрывается линия подачи пара в котёл и открывается линия сброса пара, которая остаётся открытой в течение  $3-5\text{мин}$ . При этом давление в вулканизационном котле уменьшается до  $0.001\text{Мпа}$ . Иначе крышку котла нельзя будет открыть – при достижении этого значения давления открывается байонетный затвор и крышка вулканизационного котла [2,3], тележка выкатывается, барабаны снимаются.

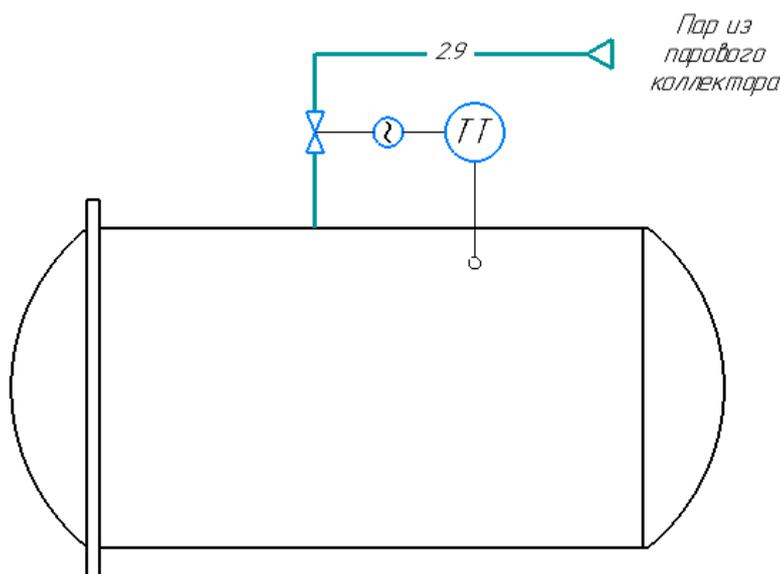


Рис. 1. – Схема объекта управления

Для определения передаточной функции объекта управления получена экспериментальная кривая разгона (рис. 2).

Передаточная функция объекта управления определяется методом, предложенным Ротачем В.Я. [4]. Зависимость температуры в вулканизационном котле от подачи пара из парового коллектора в котёл можно описать передаточной функцией, представленной в виде формулы (1):

$$W(p) = \frac{k}{(Tp + 1)^n} \cdot e^{-p\tau}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент усиления;  $T$  – постоянная времени;  $\tau$  – время запаздывания;  $n$  – порядок объекта.

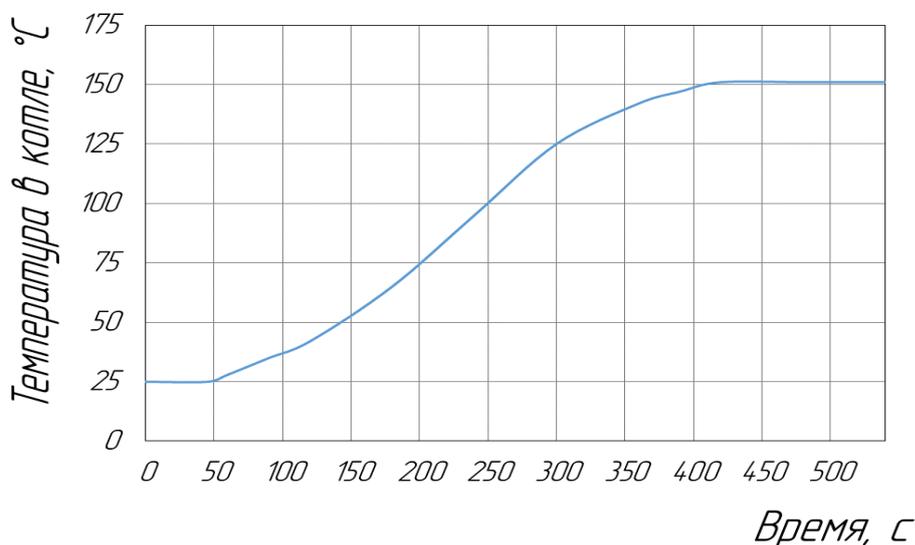


Рис. 2. – Исходный график переходного процесса

Исходная кривая разгона преобразуется в относительные координаты, изменяющиеся в диапазоне от 0 до 100% (рис. 3).

По заданной кривой разгона (рис. 3) определяется значение отрезков времени  $T_{ab}$  и  $T_{bd}$ . Для этого проводится касательная к исходной кривой разгона. Длиной отрезка от места пересечения касательной с осью времени и началом координат является длина отрезка  $T_{ab}$ .

Коэффициент усиления определяется следующим образом:

$$k = \frac{\Delta y(\infty)}{\Delta x}, \quad (2)$$

где  $\Delta x$  - величина входного возмущающего воздействия представляет собой изменение расхода пара,  $\Delta x = 50\%$ .

Подставив значение в формулу (2), получим:

$$k = \frac{100\%}{50\%} = 2.$$

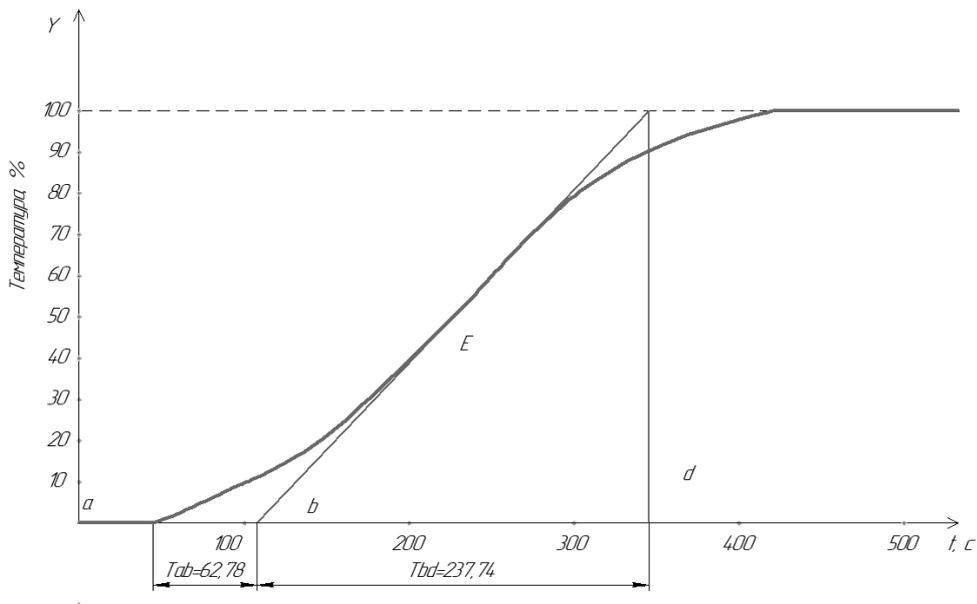


Рис. 3. - Определение передаточной функции объекта управления

Таблица 1

Значения коэффициентов и порядка системы передаточной функции

$T_{ab}/T_{bd}$	$n$	$k_1$	$k_2$
0	1	1	0
0,104	2	2,718	0,282
0,218	3	3,695	0,805
0,319	4	4,463	1,425
0,41	5	5,119	2,1

По отношению  $T_{ab}/T_{bd}$  из таблицы 1 определяется порядок системы  $n$  и коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ .

$$Tab = 62,78.$$

$$Tbd = 237,74.$$

$$\frac{T_{ab}}{T_{bd}} = 0,264.$$

Таблица значений коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  и порядка системы передаточной функции  $n$ . Если в таблице нет полученного отношения  $T_{ab}/T_{bd}$ , то из неё выбирается ближайшее наименьшее число.

Проанализировав данные из таблицы, получим следующие значения коэффициентов:

$$n = 3,$$

$$k_1 = 3,695,$$

$$k_2 = 0,805,$$

Коэффициенты передаточной функции рассчитываются по формулам (3) - (5):

$$T = \frac{T_{bd}}{k_1}, \quad (3)$$

где  $T$  - постоянная времени;

$$\tau_y = T \cdot k_2, \quad (4)$$

где  $\tau_y$  - условное время запаздывания;

$$\tau = T_{ab} - \tau_y, \quad (5)$$

где  $\tau$  – абсолютное время запаздывания.

Откуда:

$$T = \frac{237,74}{3,695} = 64,34,$$

$$\tau_y = 64,34 \cdot 2,1 = 51,79,$$

$$\tau = 62,78 - 51,79 = 10,99.$$

Таким образом, передаточная функция объекта управления, согласно расчётам, имеет вид:

---

$$W(p) = \frac{2}{266344p^3 + 12419p^2 + 193p + 1} \cdot e^{-10,99p} \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что объект имеет третий порядок и обладает временем запаздывания 10.99 сек.

По рассчитанной передаточной функции объекта в программном средстве VisSim строится график переходного процесса (рис. 4) [5-8].

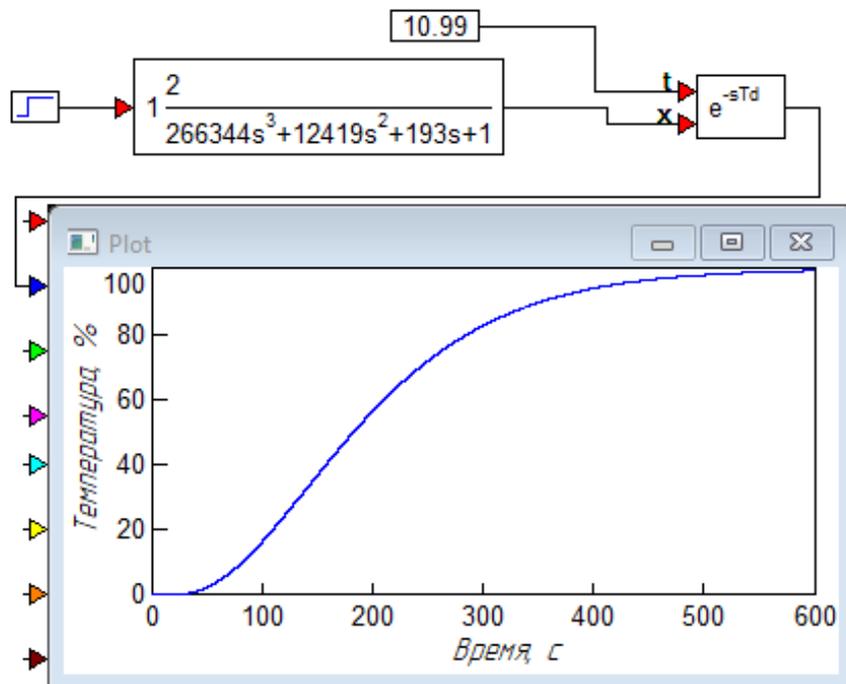


Рис. 4. – Графическое изображение переходного процесса передаточной функции третьего порядка

По графику, построенному в программном средстве VisSim, выяснено, что объект управления является устойчивым и за 550 секунд достигает заданного значения.

Для проверки адекватности модели [9,10] рассчитывается величина относительной погрешности по формуле (7):

$$\delta = \left| \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right| \cdot 100\%, \quad (7)$$

где  $S_1$  – площадь под исходным графиком переходного процесса,  $S_1=412,7$ ;  
 $S_2$  – площадь под расчетным графиком переходного процесса,  $S_2=432,5$ .

Таким образом:

$$\delta = \left| \frac{412,7 - 432,5}{412,7} \right| \cdot 100\% = 4,8\%.$$

Так как величина  $\delta$  не превышает 10 %, то рассчитанная передаточная функция адекватна исходному объекту управления.

Таким образом, определена математическая модель вулканизационного котла для построения контура регулирования температуры внутри котла. Доказана адекватность и устойчивость модели и получены числовые значения критериев качества переходного процесса.

Следует сделать вывод, что с помощью полученной модели можно разрабатывать систему управления процессом вулканизации с учётом дополнительного регулирования температуры внутри котла-вулканизатора. Это позволит повысить требуемое качество вулканизационного процесса, а в некоторых случаях снизить затраты на производство пара.

Следовательно, дальнейшие исследования будут посвящены вопросу применения полученной модели для определения настроек оптимального регулятора системы.

### Литература

1. Карпов В.Н. Оборудование предприятий резиновой промышленности. М.: Химия, 1987, 336 с.
2. Kurochkin A.A., Shaburova G.V., Gordeev Equipment and automation of processing industries. KolosS, 2007, 259p.
3. Иванов А.А. Автоматизация технологических процессов и производств: Учебное пособие. - М.: Форум, 2012. – 224с.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для студентов ВУЗов. М.: МЭИ, 2008. 400 с.



5. Astrom K.J. Advanced PID control. – ISA. Triangle Park, 2006. – P. 446.
6. Абрамов К.В. Методика определения коэффициентов ПИД-контроллера при моделировании автоматизированных систем управления ректификационной колонной с применением пакета ChemCAD // Инженерный вестник Дона, 2011, №2. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/444](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/444)
7. Медведева Л.И., Семенова И.А. Анализ структуры и состава системы управления технологическими параметрами в процессе рекуперации бензина // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032)
8. Дьяконов, В.П. VisSim+MathCAD+Matlab. Визуальное математическое моделирование. М.: СОЛОН Пресс, 2004. 384 с.
9. Боргоякова Т.Г., Лозицкая Е.В. Математическое моделирование: определение, применимость при построении моделей образовательного процесса // Интернет – журнал «Науковедение». 2017. № 2(9). URL: [naukovedenie.ru / PDF / 82TVN 217.pdf](http://naukovedenie.ru / PDF / 82TVN 217.pdf).
10. Боргоякова Т.Г., Лозицкая Е.В. Системный анализ и математическое моделирование // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_34\\_Borgoyakova\\_Lozitskaya.pdf\\_d7bd110751.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_34_Borgoyakova_Lozitskaya.pdf_d7bd110751.pdf)

### References

1. Karpov V.N. Oborudovanie predpriyatij rezinovoj promyshlennosti. [Equipment for rubber industry enterprises] М.: Himija, 1987, 336 p.
2. Kurochkin A.A., Shaburova G.V., Gordeev Equipment and automation of processing industries. KolosS, 2007, 259p.
3. Ivanov A.A. Avtomatizacija tehnologicheskikh processov i proizvodstv [Automation of technological processes and production]: Uchebnoe posobie. М.: Forum, 2012. 224p.



4. Rotach, V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: [Theory of Automatic Control] Uchebnik dlya studentov VUZov. M.: MYeI, 2008. 400 p.
5. Astrom K.J. Advanced PID control. ISA. Triangle Park, 2006. 446 p.
6. Abramov K.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/444](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/444)
7. Medvedeva L.I., Semenova I.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032)
8. Dyakonov, V.P. VisSim+MathCAD+Matlab. Vizual'noe matematicheskoe modelirovanie [Visual math modeling]. M.: SOLON Press, 2004. 384 p.
9. Borgojakova T.G., Lozickaja E.V. Internet – zhurnal «Naukovedenie», 2012, №2 (9). URL: [naukovedenie.ru / PDF / 82TVN 217.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/82TVN_217.pdf).
10. Borgojakova T.G., Lozickaja E.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_34\\_Borgoyakova\\_Lozitskaya.pdf\\_d7bd110751.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_34_Borgoyakova_Lozitskaya.pdf_d7bd110751.pdf)