Гоппе Гарри Генрихович

Киргин Дмитрий Сергеевич

Похомчикова Елена Олеговна

Погодаева Анастасия Николаевна

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ В АВТОКЛАВЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАРОВОЙ СРЕДЫ

Ключевые слова: *математическое моделирование, технологический процесс, тепловой баланс, вулканизация, автоклав.*

В данном монографическом исследовании представлено описание математических моделей системы управления технологическим процессом термообработки резиновых деталей в автоклаве, при паровом способе нагрева. Произведен расчет потерь энергии при паровом нагреве. Представлена методика расчета потерь энергии при паровом способе нагрева в автоклаве.

Keywords: *mathematical modeling, technological process, heat balance, vulcanization, autoclave.*

This monographic research describes the mathematical models for heat treatment of rubber products by steam heating in the autoclave. Also the calculation methods of energy losses by steam heating in the autoclave are described. The technique of calculating the energy loss during heating with steam in an autoclave is explored.

1. Определение количества пара, затраченного на процесс вулканизации

Технологическим процессом вулканизации резиновых изделий в исследуемой установке (автоклаве) называется процесс, в котором происходит управление нарастанием температуры и давления на первом этапе и стабилизации этих величин на втором. Источником тепла в данном процессе является пар. Согласно регламенту технологии вулканизации регулирование температуры является приоритетным. Регулирование давления считается второстепенной задачей вследствие того, что значение температуры и давления пара связаны между собой и регулирование отдельно каждым из этих параметров является затруднительным.

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Пар несет в себе большое количество тепла, но при поступлении в относительно холодную емкость он конденсируется, отдавая энергию на нагрев конструкций, в окружающую среду, на реакцию вулканизации, постепенно превращаясь в воду. Если бы пар, поступающий в автоклав, не менял своих свойств (не превращался бы в конденсат), то изменение давления в установке было бы таким же, как при подаче в автоклав воздуха. Физическая картина перехода пара из газообразного состояния в жидкое является сложной. Она определяется различными теплофизическими факторами: степенью нагрева металла, скоростью подачи пара в автоклав, внешними условиями охлаждения и так далее. Процесс усложняется тем, что на этапах нарастания и стабилизации давления в автоклаве устанавливается разное значение встречного давления ($H_{вст}$) и, соответственно, законы перехода водяного пара в конденсат будут различными. Поэтому было принято решение имитировать процессы конденсации пара математическими моделями, основанными на использовании экспериментальных данных. При этом критерием сходимости данных, определенных с помощью эксперимента на реальной установке и полученных при помощи математической модели, было принято считать равенство количества пара. Также необходимо учитывать то обстоятельство, что тепло, поступившее с паром, тратится на нагрев конструкции, отдачу в окружающую среду, реакцию вулканизации, а количество пара, поступившее в автоклав за все время технологического процесса, имеет разные законы конденсации. На рис. 1 показан экспериментальный график зависимости давления и температуры от величины подачи пара в автоклав. Управление параметрами технологического процесса производилось релейным способом и сводилось к дискретной подаче пара в автоклав в зависимости от значения температуры. При открытии клапана давление повышалось и происходила конденсация пара. При закрытии клапана скорость образования конденсата нарастала. На графике рис. 1 видно, что после прекращения подачи пара давление интенсивно снижается. При построении математической модели процесса изменения давления паровой среды в автоклаве было принято решение аппроксимировать графики реального процесса.

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

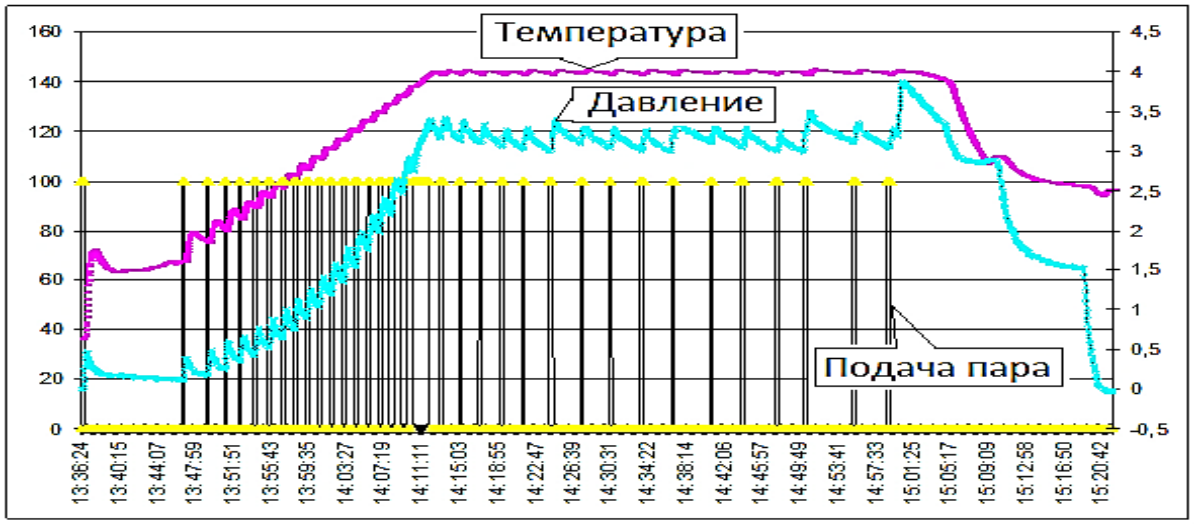

Рис. 1. График зависимости температуры и давления
от величины подачи пара в автоклав

Для расчета производительности по пару воспользуемся математической моделью движения потоков жидкости и газов в трубопроводных магистралях в статике. Первый вариант записи математической модели представлен в виде выражения (1) и позволяет определить величину давления через скорость перемещения пара в трубопроводе. Второй вариант записи математической модели (2) позволяет определить объем пара, поступающего в автоклав.

$$H = \left[1 + \lambda \frac{L}{D_{ус}} + \sum \xi_c + \xi_c(\bar{y})\right] \frac{V^2 \cdot \gamma}{2g}, \qquad (1)$$

где H – давление пара, подаваемого из коллектора, *Па*;

V – скорость передвижения пара в трубопроводе, $\frac{м}{с}$.

Коэффициент $\sum \xi_c$ зависит от числа местных сопротивлений. В частности, каждый поворот трубопровода на угол 90^0 добавляет к $\sum \xi_c$ величину, равную *0,1*.

$\xi_{тр} = \lambda \frac{L}{D_{ус}}$ – коэффициент трения жидкости о стенки трубы;

λ – удельный коэффициент гидравлического сопротивления трубы длиной 1 м, $\lambda = (1.14 + 2\lg(D_в / ш))^{-2}$;

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

$ш$ – эквивалентная шероховатость внутренней поверхности трубы. Для стальных бесшовных труб $ш = (0{,}18 - 0{,}22) мм$, для сварных $ш = 0{,}3 мм$;

L – длина трубы, *м*;

D_y – условный внутренний диаметр трубы, *м*;

$\sum \xi_c$ – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления, вызванный наличием поворотов и сужений на трубе;

$\xi_a(\bar{y})$ – коэффициент гидравлического сопротивления, вносимый регулирующим органом- краном, задвижкой и т. д.;

$0 \le \bar{y} \le 1$ – относительное положение регулирующего органа (0 – закрыт, 1 полностью открыт);

γ – удельный вес пара, $\frac{Н}{м^3}$; g – ускорение силы тяжести, $\frac{м}{с^2}$.

$$H = \left[1 + \lambda \frac{L}{D_{ус}} + \sum \xi_c + \xi_a(\bar{y})\right] \frac{Q^2 \gamma}{2 g S_{ус}^2}, \qquad (2)$$

где $S_{ус}$ – площадь внутреннего сечения трубопровода, $м^2$;

Q – производительность пара, $\frac{Дж}{с}$.

Из формулы (2) найдем содержимое квадратной скобки:

$$\left[1 + \lambda \frac{L}{D_{ус}} + \sum \xi_c + \xi_c(\bar{y})\right] = \frac{2g \cdot H}{V^2 \cdot \gamma} = \frac{2 * 9{,}8 \frac{м}{с^2} \cdot 500000 Па}{(43 \frac{м}{с})^2 \cdot 2{,}607 \frac{кг}{м^3} \cdot 9{,}8 \frac{м}{с^2}} = 198{,}8.$$

Поскольку в емкость поступает пар и внутри нарастает давление этой среды, то давление на входе в трубопровод будет иметь вид:

$$\Delta H = H - H_{вст},$$

где $H_{вст}$ – давление внутри автоклава.

С учетом этого из (1) можно выразить расход пара Q:

$$Q = \sqrt{\frac{2g \cdot S_{ус}^2 \cdot (H - H_{вст})}{\left[1 + \lambda \frac{L}{D_{ус}} + \sum \xi_c + \xi_c(\bar{y})\right] \cdot \gamma}} = 0{,}0003106 \cdot \sqrt{\Delta H}. \qquad (3)$$

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Полученное выражение дает возможность рассчитать массу пара, которая поступила в автоклав за время варки.

$$m_{пара} = Q \cdot t_{отк} \cdot \rho_{пара} = 0{,}0003106 \cdot t_{отк} \cdot \sqrt{\Delta H} \cdot 2.607 = 0{,}00081 \cdot \sqrt{\Delta H} \cdot t_{отк}, \quad (4)$$

где $t_{отк}$ – время, при котором вентиль подачи пара полностью открыт.

Зная время подачи пара и значение давления при этих включениях, можно рассчитать количество пара, поданного за время вулканизации. Для примера в таблице 1 приведен расчет количества пара для одного из периодов полностью открытого клапана пара. Расчеты производились с помощью программного продукта Excel.

В первом столбце табл. 1 показано время технологического процесса. Во втором указывается положение рабочего органа (100 – открыто, 0 – закрыто). В третьем столбце записаны значения давления автоклава ($H_{вст.}$) в атмосферах. В четвертом столбце показан расчет разности давлений магистрального (500000 Па) и встречного в автоклаве ($H_{вст.}$) в паскалях. Расчет массы пара, поданного а автоклав за каждую секунду, представлен в пятом столбце. Так как периодичность записи данных цикла вулканизации идет через две секунды, в шестом столбце приведен результат умножения на два каждого соответствующего значения пятого столбца. В седьмом столбце показана общая масса пара, поступившего за время одного цикла.

Таблица 1

Время	Вкл. Подачи	Н (атм.) – давление	sqrt (500000–Н*1000000)	m пара ($м^3$)	m пара*2 сек ($м^3$)	m пара. общ. (кг)
14:10:15	0	2,82	466,9047	0	0	
14:10:17	100	2,8	469,0416	0,379924	0,759847	34,96931
14:10:19	100	2,79	470,1064	0,380786	0,761572	
14:10:21	100	2,78	471,1688	0,381647	0,763293	
14:10:23	100	2,77	472,2288	0,382505	0,765011	
14:10:25	100	2,76	473,2864	0,383362	0,766724	
14:10:27	100	2,75	474,3416	0,384217	0,768433	
14:10:29	100	2,75	474,3416	0,384217	0,768433	
14:10:31	100	2,78	471,1688	0,381647	0,763293	
14:10:33	100	2,82	466,9047	0,378193	0,756386	
14:10:35	100	2,84	464,758	0,376454	0,752908	

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

14:10:37	100	2,87	461,5192	0,373831	0,747661	
14:10:39	100	2,89	459,3474	0,372071	0,744143	
14:10:41	100	2,91	457,1652	0,370304	0,740608	
14:10:43	100	2,93	454,9725	0,368528	0,737055	
14:10:45	100	2,95	452,7693	0,366743	0,733486	
14:10:47	100	2,97	450,5552	0,36495	0,729899	
14:1049	100	2,98	449,4441	0,36405	0,728099	
14:10:51	100	3	447,2136	0,362243	0,724486	
14:10:53	100	3,01	446,0942	0,361336	0,722673	
14:10:55	100	3,02	444,9719	0,360427	0,720854	
14:10:57	100	3,04	442,7189	0,358602	0,717205	
14:10:59	100	3,05	441,588	0,357686	0,715373	
14:11:01	100	3,06	440,4543	0,356768	0,713536	
14:11:03	100	3,07	439,3177	0,355847	0,711695	
14:11:05	100	3,09	437,0355	0,353999	0,707997	
14:11:07	100	3,1	435,8899	0,353071	0,706142	
14:11:09	100	3,11	434,7413	0,35214	0,70481	
14:11:11	100	3,12	433,5897	0,351208	0,702415	
14:11:13	100	3,12	433,5897	0,351208	0,702415	
14:11:15	100	3,14	431,2772	0,349335	0,698669	
14:11:17	100	3,15	430,1163	0,348394	0,696788	
14:11:19	100	3,16	428,9522	0,347451	0,694903	
14:11:21	100	3,17	427,785	0,346506	0,693012	
14:11:23	100	3,17	427,785	0,346506	0,693012	
14:11:25	100	3,19	425,4409	0,344607	0,689214	
14:11:27	100	3,2	424,2641	0,343654	0,687308	
14:11:29	100	3,21	423,0839	0,342698	0,685396	
14:11:31	100	3,21	423,0839	0,342698	0,685396	
14:11:33	100	3,23	420,7137	0,340778	0,681556	
14:11:35	100	3,23	420,7137	0,340778	0,681556	
14:11:37	100	3,24	419,535	0,339814	0,679628	
14:11:39	100	3,25	418,33	0,338847	0,677695	
14:11:41	100	3,26	417,1331	0,337878	0,675756	
14:11:43	100	3,27	415,9327	0,336905	0,673811	
14:11:45	100	3,28	414,7288	0,33593	0,671861	
14:11:47	100	3,29	413,5215	0,334952	0,669905	
14:11:49	100	3,3	412,3106	0,333972	0,667943	
14:11:51	100	3,31	411,0961	0,332988	0,665976	
14:11:53	100	3,32	409,878	0,332001	0,664002	

Результаты расчета количества пара, поступившего в течение всего технологического процесса вулканизации, отображены в таблице 2.

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Таблица 2

Включение	m пара (кг)	m пара кг. Подъем до T=143 ºC	Общая m пара (кг)
1	1,14322		342,32079
2	6,7970536		
3	7,8694314		
4	8,9143953		
5	7,7352222		
6	10,920158		
7	11,861644		
8	10,64513		
9	11,529574		
10	11,355553		
11	12,157949		
12	11,888086		
13	13,542058		
14	14,061626		
15	12,742256		
16	13,141204		
17	14,268781		
18	17,39487		
19	34,969311	232,93752	
20	7,5733741	m пара (кг). Стабилизация T=143 ºC	
21	6,2691787		
22	5,6286355		
23	4,9855402		
24	6,4584394		
25	7,8803969		
26	7,0502174		
27	6,4291657		
28	7,2102565		
29	7,5734822		
30	7,0353067		
31	6,4051841		
32	5,7795348		
33	7,5329231		
34	7,7283334		
35	7,8432998	109,383268	

Пояснение к табл. 2.

Столбец №1: Количество включений за весь технологический процесс.

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Столбец №2: Значение массы пара, поступившего в емкость за каждое включение.

Столбец №3:

1) суммарное количество пара, затраченное на подъем температуры автоклава до отметки 143 °С;

2) суммарное количество пара, затраченное на стабилизацию температуры автоклава на отметке 143 °С.

Столбец №4: Общая масса пара, затраченного за весь цикл вулканизации.

2. Разработка математической модели процесса изменения давления пара в автоклаве

Математическая модель движения потоков жидкости и газов трубопроводных магистралях в динамике [1]:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{HS_{yc}q}{L\gamma} - \left[1 + \lambda\frac{L}{D_{yc}} + \sum\xi_c + \xi_a(\bar{y})\right]\frac{Q^2}{2LS_{yc}}. \qquad (5)$$

Когда действует встречный (статический) напор, то уравнение (2) и (5) изменяются к виду:

$$H = \left[1 + \lambda\frac{L}{D_{yc}} + \sum\xi_c + \xi_a(\bar{y})\right]\frac{Q^2\gamma}{2gS_{yc}^2} + H_{cm}, \qquad (6)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{[H - H_{cm}]S_{yc}q}{L\gamma} - \left[1 + \lambda\frac{L}{D_{yc}} + \sum\xi_c + \xi_a(\bar{y})\right]\frac{Q^2}{2LS_{yc}}, \qquad (7)$$

где H_{cm} – встречный статический напор (давление), *Па.*

В форме приращений уравнение (7), имеет вид:

$$dQ = \left[(H - H_{cm})\cdot\frac{S_{yc}q}{L\gamma}\right]dt - Q^2\left[\left(1 + \lambda\frac{L}{D_{yc}} + \sum\xi_c + \xi_a(\bar{y})\right)\cdot\frac{1}{2LS_{yc}}\right]dt, \qquad (8)$$

Для того, чтобы использовать данное уравнение при создании математической модели давления пара в автоклаве, необходимо сопоставить значение полного открытия рабочего органа $\bar{y}$ со значением открытого вентиля подачи пара в автоклав. Наличие в программной среде Matlab блока Signal Builder дает возможность имитировать открытие вентиля пара так же, как эксперименте. На рис. 2 изображена диаграмма значений положения регулирующего органа $\bar{y}$, соответствующая значениям открытия вентиля пара в автоклаве. На оси ординат

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

на рис. 2 показана величина открытия регулирующего органа в случае управления подачей пара клапаном с пневмоприводном: степень открытия будет равна 100% (клапан открыт) или 0%, (клапан закрыт). По оси абсцисс на рис. 2 отложено время в секундах.

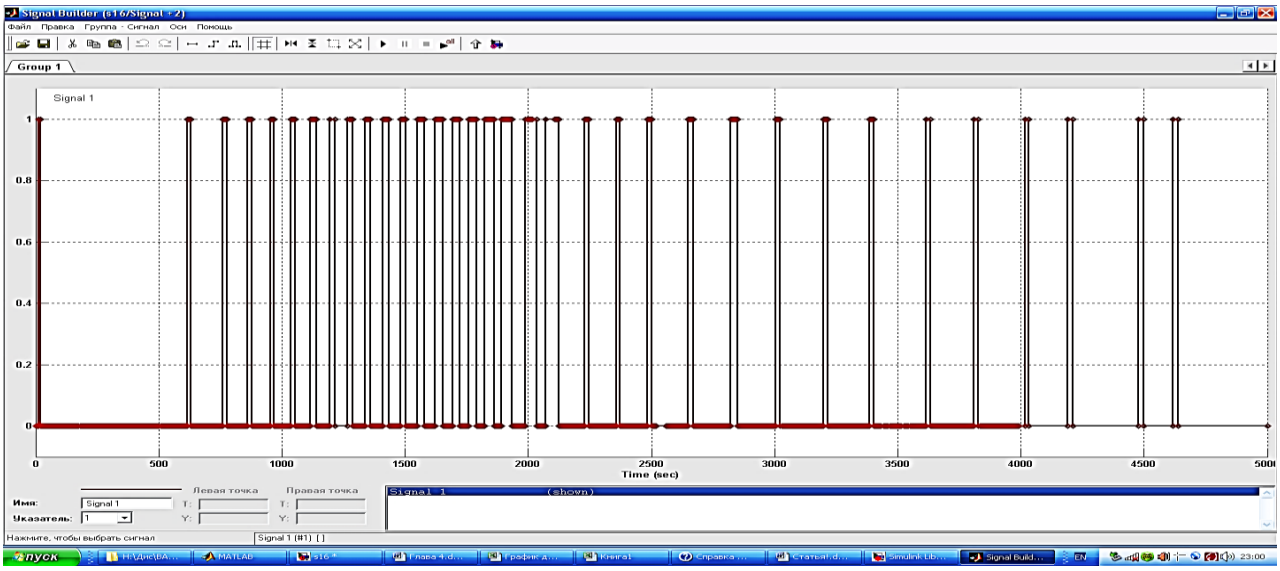

Рис. 2. Диаграмма подачи пара в автоклав

В уравнении (8) выражение $\frac{20g \cdot S_{yc}^2}{(Q_{yc} \cdot \bar{y})^2}$ является составляющей гидравлического сопротивления регулирующего органа – $\xi_a(\bar{y})$, где Q_{yc} – условная пропускная способность для данной задвижки или клапана, которая показывает какой объем пара прошел через полностью открытый регулирующий орган в единицу времени при перепаде давления на нем в 0,1 *МПа*, $\bar{y}$ – относительное положение регулирующего органа. Если $\bar{y} = 0$, то регулирующий орган полностью закрыт, $\xi_a(\bar{y}) = \xi(0) = \infty$ и производительность равна нулю. Если $\bar{y} = 1$, то регулирующий орган полностью открыт и коэффициент $\xi_{à}(1)$ минимальный. Для используемого регулирующего клапана в открытом состоянии $\xi(1) = 0.3$ [2]. Следовательно, $\xi_a(1) = \frac{20g \cdot S_{yc}^2}{(Q_{yc} \cdot \bar{y})^2} = 0{,}3$. Определим из этого уравнения значение условной пропускной способности $Q_{yc} : Q_{yc} = \sqrt{\frac{20g \cdot S_{yc}^2}{0{,}3 \cdot 1^2}} = 0{,}1277 \ \frac{м^3}{сек}$.

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

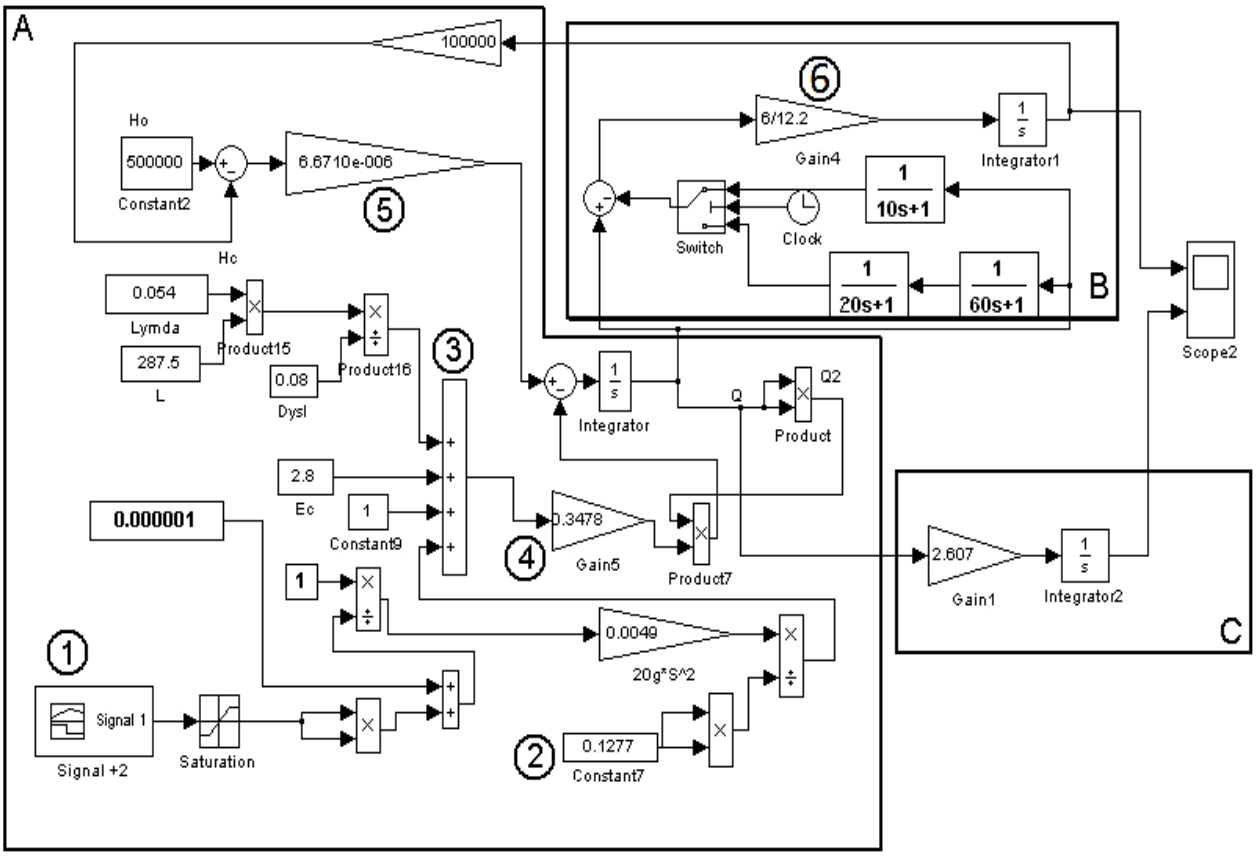

Рис. 3. Модель процесса изменения давления пара в автоклаве

На рис. 3 показана модель процесса изменения давления пара в автоклаве, реализованная в программной среде Matlab.

В секторе «А» приведена математическая модель, характеризующая движение потоков газов в трубопроводных магистралях в динамике.

Блок «1» устанавливает значение регулирующего органа $\bar{y}$, соответствующее открытию вентиля подачи пара в автоклав (блок Signal Builder).

Блок «2» организует запись значения Q_{yc}.

Блок «3» вычисляет выходное значение $\left[\left(1+\lambda\frac{L}{D_{yc}}+\sum\xi_c+\frac{20g\cdot S_{yc}^2}{(Q_{yc}\cdot\bar{y})^2}\right)\right]$.

Блок «4» вычисляет значение: $\left[\frac{1}{2LS_{yc}}\right]$.

Блок «5» вычисляет значение: $\left[\frac{S_{\text{об}}\cdot q}{L\cdot\gamma}\right]$.

Технологический процесс, протекающий в автоклаве в два этапа (этап нарастания температуры и давления; этап стабилизации этих двух величин),

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

имеет разную степень конденсации входящего пара. На первом этапе, когда температура корпуса автоклава невелика, пар будет активно конденсироваться. На втором этапе процесса вулканизации корпуса автоклава будет достаточно нагрет и конденсация пара снизится по сравнению с первым этапом.

В секторе «В» показаны модели формирования конденсата для двух вышеупомянутых этапов протекания технологического процесса. Постоянные времени выбирались из тех соображений, чтобы количество пара и конденсата соответствовали тому количеству пара и конденсата, которые были получены при обработке экспериментальных данных. В блоке «6» приведено уравнение нарастания давления внутри автоклава:

$$P = \frac{1}{V}\int Q(t)dt, \qquad (9)$$

где $Q(t)$ – расход пара при абсолютном давлении,

P – давление в автоклаве,

V – полезный объем емкости автоклава.

Объем автоклава составляет $V_{емкости}$=12,5 $м^3$. Так как часть емкости занимает тележка с профилями и резиновыми изделиями, полезный объем будет меньше. Тележка с металлическими профилями имеет массу m=1200 *кг,* плотность материала (сталь 20) $\rho = 7800 \ \frac{кг}{м^3}$ [3]. Масса резиновых деталей: m=100 *кг,* плотность материала (синтетический каучук) $\rho = 1230 \ \frac{кг}{м^3}$ [4]. Следовательно, $V_{стали20} = \frac{1200}{7800} = 0{,}15 \ \ (м^3)$; $V_{резины} = \frac{100}{1230} = 0{,}08 \ \ (м^3)$. Полезный объем будет равен: $V = 12{,}5 - 0{,}15 - 0{,}08 = 12{,}27 \ \ (м^3)$.

На рис. 4 изображена структурная схема сектора «В» (рис. 3).

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

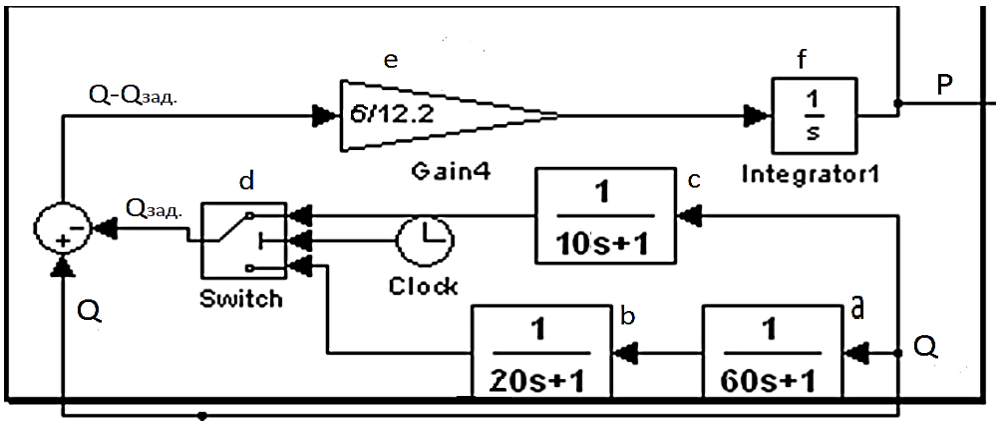

Рис. 4. Структурная схема сектора «B»

Здесь видно, что процесс конденсации пара и нарастания давления заключается в следующем: поступающий пар Q подается на вход апериодических звеньев *a*, *b* и *c*. Блок d «Switch» является ключом, который переключается из нижнего положения (сигнал звеньев *a* и *b*) на верхнее (сигнал *c*) в тот момент, когда продолжительность технологического процесса станет равной t = 2100 *сек*. Таким образом, на этапе подъема температуры и давления технологического процесса действуют апериодические звенья *a* и *b*, задающие закон конденсации пара на этом этапе. На втором этапе, характеризующимся постоянными значениями температуры и давлении, задается второй закон конденсации пара (звено *c*). Апериодические звенья формируют объем конденсата $Q_{конд}$, который вычитается из значения расхода пара Q. Сигнал $Q - Q_{конд}$ поступает на вход блока «*e*», в котором реализуется уравнение:

$$dP = \frac{6}{V}\int [Q - Q_{конд}](t)dt\ .$$

Сектор «C» включает в себя блок задания плотности пара ($\rho = 2{,}607\ \frac{кг}{м^3}$) [5], на вход которого подается расход пара ($Q\ \frac{м^3}{сек}$), изменяющийся во времени. Затем сигнал интегрируется и на выходе сектора получается количество пара, которое поступило за время технологического процесса ($m_{пара}\ \ кг$).

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

На рис. 5 изображены два графика: верхний график показывает нарастание давления пара в автоклаве; нижний график – количество пара, поступившего в автоклав за цикл вулканизации.

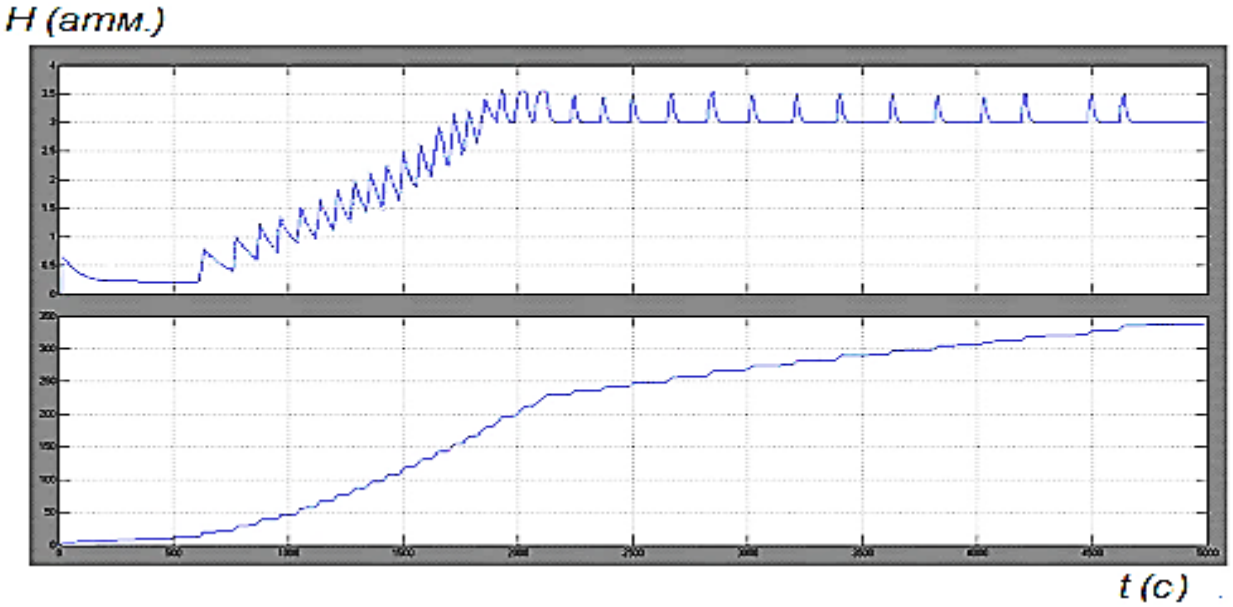

Рис. 5. Графики нарастания давления в автоклаве и количества пара, поступившего в автоклав.

Сравнивая массы пара, реально поступившего в автоклав, с данными математических моделей технологического процесса, получим следующие результаты. По окончании первой части цикла (*t = 35 мин = 2100 сек*) ошибка составляет 4,01% (экспериментальные данные – *232,9 кг*; моделирование – *223,9 кг*); по окончании всего цикла ошибка составляет 0,9% (экспериментальные данные – *342,3 кг*; моделирование – *339,1 кг)*.

3. Определение теплового баланса технологического процесса вулканизации в автоклаве

Данные по количеству пара, поступившего в автоклав за цикл вулканизации, позволяют определиться с распределением тепла в автоклаве. Известно, что из котельной выходит пар со следующими параметрами: температура $T_{пара} = 160^{o}C$ и давление $P_{пара} = 500000Па$. При таких параметрах

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

энтальпия равна $h = 2767,4\ \frac{кДж}{кг}$. Тогда теплота, поступившая в автоклав с паром за время процесса, равна:

$$W_{общ.} = m_{общ.пар} \cdot h = 342,3 \cdot 2767,4 = 947280\ \ (кДж).$$

Тепло расходуется на нагрев конструкции установки; на реакцию вулканизации; на отдачу тепла в окружающую среду; на унос энергии с конденсатом.

Нагрев конструкции подразумевает нагрев стальной емкости, толщиной 18 *мм*; крышки автоклава; байнетового затвора, тележки и других металлических частей установки. Общая масса всей конструкции составляет 12500 *кг*, материал – сталь 20, удельная теплоемкость материала $0,48\ \frac{кДж}{кг \cdot {}^{o}C}$ [6]. Для расчета количества теплоты, которое требуется для нагрева конструкции, используем формулу:

$$W_{констр} = m_{констр} \cdot C \cdot \tau, \qquad (10)$$

где $W_{констр}$ – энергия, необходимая для нагрева конструкции автоклава ($кДж$);

$m_{констр}$ – масса конструкции ($кг.$);

C – удельная теплоемкость «стали 20» ($\frac{кДж}{кг \cdot {}^{o}C}$);

τ – величина перегрева конструкции от начальной температуры технологического процесса (^{o}C) [7].

Величина τ определяется из экспериментальных данных процесса вулканизации. Перед проведением технологического процесса производится удаление скопившегося конденсата в паропроводе следующим образом: в емкость с открытой крышкой открывается вентиль подачи пара в автоклав, затем струи конденсата с паром поступают в емкость и прогревают стенки сосуда. Начальное значение температуры конструкции составляет $35\,^{o}C$. Следовательно, перегрев

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

конструкции составит: $\Delta T = 143 - 35 = 108\ ^{o}C$. Подставляя полученные значения в формулу (10), получим:

$$W_{констр} = m_{констр} \cdot C \cdot \Delta T = 12500 \cdot 0{,}48 \cdot 108 = 648000\ \ (кДж)\ .$$

Потери энергии, унесенной с конденсатом, заключаются в том, что поступающий пар со временем охлаждается и превращается в воду, в то время, как технологический процесс требует подачи свежего пара и удаления скопившейся жидкости. Поэтому часть тепловой энергии уходит вместе с конденсатом в канализацию. Исходя из экспериментальных данных, потери энергии на сброс конденсата составили:

$$W_{конд} = m_{пара} \cdot C \cdot \tau = 342{,}3 \cdot 4{,}18 \cdot 140 = 200313\ \ (кДж)\,,$$

где $m_{пара}$ – масса подаваемого пара (кг);

C – удельная теплоемкость воды ($\frac{кДж}{сек \cdot ^{o}C}$);

τ – температура конденсата (^{o}C).

Расход энергии на реакцию вулканизации. В [8] описан химический процесс соединения (сшивания, структурирования) молекул полимеров при действии на них тепла. Процессы сшивания широко применяются для вулканизации каучуков. Продолжительность процесса вулканизации, необходимая для достижения оптимальных значений наиболее важных для данного изделия свойств, называется *оптимумом вулканизации.* В настоящее время для вулканизации используют серу и другие компоненты. Ее проводят при нагревании до 410–460^{0} *К* смесей каучука с необходимыми ингредиентами и серой. Основное значение для разных видов каучуков с двойными связями в макромолекулах имеет вулканизация серой. Сера в обычных условиях состоит из циклов S_8 (с энергией межатомных связей *243–260* $\frac{кДж}{моль}$), которые при $413^{0}К\ (140\,^{o}C)$ распадаются. При содержании связанной серы до 3–5% обычно образуются мягкие, прочные резины, более 25–30% – образуется хрупкий эбонит. При процессе вулканизации средняя загрузка

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

резиновых изделий составляет $m_{резины} \approx 100\ кг$, соответственно с учетом содержания 5% серы в каучуке: $m_{серы} \approx 5\ кг$. Молярная масса серы: $M_{серы} = 32\ \frac{г}{моль}$. Следовательно, энергия, затраченная на распад связей серы в исследуемых резиновых изделиях, будет составлять: $W_{реак.вулкан.} = \frac{m_{серы}}{M_{серы}} \cdot 250 = \frac{5000}{32} \cdot 260 = 40625\ \ (кДж)$.

Отдача тепла в окружающую среду. Исходя из произведенных расчетов, справедливо предположить, что оставшееся количество теплоты рассеивается в окружающую среду:

$$W_{окр.ср.} = W_{общ.} - W_{констр.} - W_{конден} - W_{реакц.вулкан.} = 947280 - 648000 - 200313 - 40625 = 58342\ \ (кДж)$$

4. Выводы

Основные результаты данной работы заключаются в следующем.

1. Разработана математическая модель процесса изменения давления пара в автоклаве.

2. Разработана методика расчета потерь энергии при паровом способе нагрева в автоклаве.

Список литературы

1. Гоппе Г.Г. Управление потоками жидкостей и газов электроприводами с регулируемой частотой вращения / Г.Г. Гоппе, В.Е. Павлов // Сборник материалов региональной НТК «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». – Иркутск: ИПИ, 1992. – С. 28–29.

2. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей / Ю.М. Голоднов, А.Х. Хоренян. – М.: Энергия, 1974. – 144 с.

3. Арзамасов Б.Н. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений [и др.] / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

4. Кузнецов Д.А. Общая химическая технология / Д.А. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1970.

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

5. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара / М.П. Вукалович. – М.: Энергоатомиздат, 1999.

6. Волков А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Современная школа, 2005. – 608 с.

7. Дьяков В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию / В.И. Дьяков. – М.: Высшая школа, 1991.

8. Тугов И.И. Химия и физика полимеров / И.И. Тугов, Г.И. Костыгина. – М.: Химия, 1989. – 430 с.

Гоппе Гарри Генрихович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Россия, Иркутская область, г. Иркутск.

Киргин Дмитрий Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Россия, Иркутская область, г. Иркутск.

Похомчикова Елена Олеговна – канд. экон. наук, доцент кафедры «Технологии продуктов питания и химии» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Россия, Иркутская область, г. Иркутск.

Погодаева Анастасия Николаевна – магистрант ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Россия, Иркутская область, г. Иркутск.

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)