

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СМЕШАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ УСТАНОВКИ ПОДДЕРЖАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИОЛА

А. М. Шмырин, А. Г. Ярцев

Липецкий государственный технический университет

Поступила в редакцию 03.06.2018 г.

Аннотация. Представлены структурная модель установки поддержания оптимальной температуры полиола и существенные компоненты её окрестностной модели. Проведена идентификация окрестностных моделей с одним кортежем данных и с набором кортежей данных. Представлена методика проведения теплотехнического расчета. Выполнено смешанное управление окрестностной модели для определения коэффициента теплопередачи. Представлены графики отклонений результатов определения коэффициента теплопередачи в процессе смешанного управления от результатов теплотехнического расчета. Выполнено сравнение точности смешанного управления окрестностных моделей с одним и с набором кортежей данных.

Ключевые слова: окрестностная модель, идентификация, нормализация, смешанное управление, кортежи данных, теплотехнический расчет, среднеквадратическое отклонение.

Annotation. A structural model of an installation for maintaining the optimal temperature of a polyol and the essential components of its neighborhood model are presented. Identification of neighborhood models with one data tuple and a set of data tuples were carried out. The technique of carrying out heat engineering calculation is presented. A mixed control of the neighborhood model was performed to determine the heat transfer coefficient. The graphs of the deviations of the results of the determination of the heat transfer coefficient in the process of mixed control from the results of heat engineering calculation are presented. A comparison of the accuracy of mixed control of neighborhood models with one and with a set of data tuples is made.

Keywords: neighborhood model, identification, normalization, mixed control, data tuples, heat engineering calculation, mean square deviation.

ВВЕДЕНИЕ

В химической промышленности, машиностроении, при производстве строительных материалов полиол используется в качестве добавки для получения пенополиуретанов нового поколения. Полиол дает возможность существенно повысить качество готовых изделий, то есть несущую способность и упругость пены, повысить качество технологии ее переработки, увеличить срок эксплуатации и внешний вид изделий. Помимо этого, полиол даёт возможность регулировать физико-механические свойства пенополиуретанов.

Особенностью при производстве пенополиуретана является возможность вспенива-

ния и затвердевания полиола при температуре около +20 °С, поэтому необходимо поддерживать температуру полиола выше этого значения в заданном диапазоне.

При производстве материалов и изделий с применением полиола, для поддержания его оптимальной температуры подбираются теплообменные аппараты, в которых нужно знать требуемый коэффициент теплопередачи. В практике проектирования и подбора теплообменников проводят теплотехнический расчет. Для подогрева полиола, чаще всего, применяются кожухотрубчатые теплообменники. Полиол протекает внутри горизонтальных цилиндрических трубок, греющий теплоноситель протекает поперечно трубкам в межтрубном пространстве за несколько ходов.

Коэффициент теплопередачи является переменной величиной, так как температура исходного полиола, греющего теплоносителя, а также их расходы могут меняться в процессе производства пенополиуретанов. В связи с этим в системе управления процессом нагрева и поддержания заданной температуры необходимо оперативно определять значение коэффициента теплопередачи.

Определение коэффициента теплопередачи теплотехническим расчетом это точный, но довольно трудоемкий процесс, так как включает много расчетных формул. Применение окрестностных моделей позволяет ускорить и упростить этот процесс с достаточной для управления точностью.

Целью данной работы является демонстрация методики для простого и быстрого определения коэффициента теплопередачи теплообменного аппарата с помощью окрестностных моделей, когда одним из теплоносителей является жидкость с высокой вязкостью, и сравнение полученных результатов с результатами теплотехнического расчета.

1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ БИЛИНЕЙНОЙ ОКРЕСТНОСТНОЙ МОДЕЛИ С ОДНИМ КОРТЕЖЕМ ДАННЫХ

Структурную модель установки поддержания оптимальной температуры полиола можно условно представить в виде пяти основных узлов, связь между которыми представлена в виде графа на рис. 1, где 1 – емкость для хранения полиола; 2 – насос для перекачки полиола; 3 – теплообменный аппарат; 4 – потребитель полиола; 5 – холодильная машина.

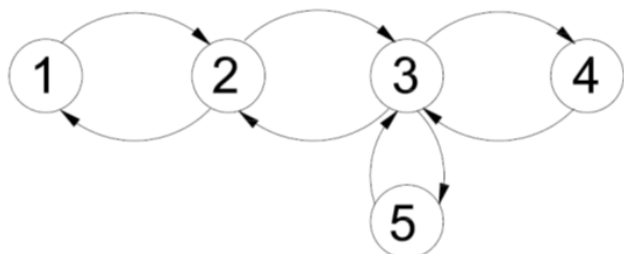


Рис. 1. Граф установки поддержания оптимальной температуры полиола

Для билинейной окрестностной модели выделены существенные компоненты состо-

яния и управления, которые представлены в табл. 1.

Значения компонентов состояния и управления, в соответствии с технологическими параметрами работы установки поддержания температуры полиола, равны:

- $x[1]=40\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- $x[2]=13,2\text{ тонны/сутки}$,
- $x[3]=71,2\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$,
- $x[4]=22\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- $x[5]=5\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- $v[1]=22\text{ тонны}$,
- $v[2]=319\text{ об/мин}$,
- $v[3]=22\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- $v[4]=11,9\text{ тонн/сутки}$,
- $v[5]=27,5\text{ тонн/сутки}$.

Билинейная окрестностная модель установки поддержания оптимальной температуры полиола имеет вид [1]:

$$\begin{aligned}
 &w_x[1,1] \cdot x[1] + w_x[1,2] \cdot x[2] + w_v[1,1] \cdot v[1] + \\
 &+ w_v[1,2] \cdot v[2] + w_{xv}[1,1,1] \cdot x[1] \cdot v[1] + \\
 &+ w_{xv}[1,1,2] \cdot x[1] \cdot v[2] + w_{xv}[1,2,1] \cdot x[2] \cdot v[1] + \\
 &+ w_{xv}[1,2,2] \cdot x[2] \cdot v[2] = 0; \\
 &w_x[2,1] \cdot x[1] + w_x[2,2] \cdot x[2] + w_x[2,3] \cdot x[3] + \\
 &+ w_v[2,1] \cdot v[1] + w_v[2,2] \cdot v[2] + w_v[2,3] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[2,1,1] \cdot x[1] \cdot v[1] + w_{xv}[2,1,2] \cdot x[1] \cdot v[2] + \\
 &+ w_{xv}[2,1,3] \cdot x[1] \cdot v[3] + w_{xv}[2,2,1] \cdot x[2] \cdot v[1] + \\
 &+ w_{xv}[2,2,2] \cdot x[2] \cdot v[2] + w_{xv}[2,2,3] \cdot x[2] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[2,3,1] \cdot x[3] \cdot v[1] + w_{xv}[2,3,2] \cdot x[3] \cdot v[2] + \\
 &+ w_{xv}[2,3,3] \cdot x[3] \cdot v[3] = 0; \\
 &w_x[3,2] \cdot x[2] + w_x[3,3] \cdot x[3] + w_x[3,4] \cdot x[4] + \\
 &+ w_x[3,5] \cdot x[5] + w_v[3,2] \cdot v[2] + w_v[3,3] \cdot v[3] + \\
 &+ w_v[3,4] \cdot v[4] + w_v[3,5] \cdot v[5] + \\
 &+ w_{xv}[3,2,2] \cdot x[2] \cdot v[2] + w_{xv}[3,2,3] \cdot x[2] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[3,2,4] \cdot x[2] \cdot v[4] + w_{xv}[3,2,5] \cdot x[2] \cdot v[5] + \\
 &+ w_{xv}[3,3,2] \cdot x[3] \cdot v[2] + w_{xv}[3,3,3] \cdot x[3] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[3,3,4] \cdot x[3] \cdot v[4] + w_{xv}[3,3,5] \cdot x[3] \cdot v[5] + \\
 &+ w_{xv}[3,4,2] \cdot x[4] \cdot v[2] + w_{xv}[3,4,3] \cdot x[4] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[3,4,4] \cdot x[4] \cdot v[4] + w_{xv}[3,4,5] \cdot x[4] \cdot v[5] + \\
 &+ w_{xv}[3,5,2] \cdot x[5] \cdot v[2] + w_{xv}[3,5,3] \cdot x[5] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[3,5,4] \cdot x[5] \cdot v[4] + \\
 &+ w_{xv}[3,5,5] \cdot x[5] \cdot v[5] = 0;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &w_x[4,3] \cdot x[3] + w_x[4,4] \cdot x[4] + w_v[4,3] \cdot v[3] + \\
 &+ w_v[4,4] \cdot v[4] + w_{xv}[4,3,3] \cdot x[3] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[4,3,4] \cdot x[3] \cdot v[4] + w_{xv}[4,4,3] \cdot x[4] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[4,4,4] \cdot x[4] \cdot v[4] = 0; \\
 &w_x[5,3] \cdot x[3] + w_x[5,5] \cdot x[5] + w_v[5,3] \cdot v[3] + \\
 &+ w_v[5,5] \cdot v[5] + w_{xv}[5,3,3] \cdot x[3] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[5,3,5] \cdot x[3] \cdot v[5] + w_{xv}[5,5,3] \cdot x[5] \cdot v[3] + \\
 &+ w_{xv}[5,5,5] \cdot x[5] \cdot v[5] = 0.
 \end{aligned}$$

В связи с разным порядком входных данных произведем их нормализацию [2, 3], отдельно для компонента состояния и компонента управления:

$$x' = \frac{x - \bar{x}}{\sigma},$$

где x – нормализуемое значение, \bar{x} – среднее арифметическое, σ – среднеквадратическое отклонение значений.

В результате получаем следующие значения:

$$\begin{aligned}
 x'[1] &= 0,41309; & v'[1] &= -0,49013; \\
 x'[2] &= -0,72588; & v'[2] &= 1,99824; \\
 x'[3] &= 1,73906; & v'[3] &= -0,49013; \\
 x'[4] &= -0,35189; & v'[4] &= -0,57392; \\
 x'[5] &= -1,07438; & v'[5] &= -0,44405.
 \end{aligned}$$

В результате идентификации были получены следующие значения коэффициентов модели:

$$\begin{aligned}
 w_x[1,1] &= -1,32065; & w_x[1,2] &= -0,03573; \\
 w_v[1,1] &= -0,325; & w_v[1,2] &= 0,09835; \\
 w_{xv}[1,1,1] &= 0,00996; & w_{xv}[1,1,2] &= 0,04063; \\
 w_{xv}[1,2,1] &= 0,01751; & w_{xv}[1,2,2] &= -0,08411;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_x[2,1] &= -0,08723; & w_x[2,2] &= -0,50894; \\
 w_x[2,3] &= -0,36723; & w_v[2,1] &= 0,1035; \\
 w_v[2,2] &= 1,96296; & w_v[2,3] &= 0,1035; \\
 w_{xv}[2,1,1] &= 0,04275; & w_{xv}[2,1,2] &= -0,17431; \\
 w_{xv}[2,1,3] &= 0,04275; & w_{xv}[2,2,1] &= -0,07513; \\
 w_{xv}[2,2,2] &= 0,30629; & w_{xv}[2,2,3] &= -0,07513; \\
 w_{xv}[2,3,1] &= 0,17999; & w_{xv}[2,3,2] &= -0,73381; \\
 w_{xv}[2,3,3] &= 0,17999; & & \\
 w_x[3,2] &= -0,16663; & w_x[3,3] &= -4,20988; \\
 w_x[3,4] &= -0,08078; & w_x[3,5] &= -0,24663; \\
 w_v[3,2] &= 0,4587; & w_v[3,3] &= -1; \\
 w_v[3,4] &= -0,13175; & w_v[3,5] &= -0,10193; \\
 w_{xv}[3,2,2] &= -0,33296; & w_{xv}[3,2,3] &= 0,08167; \\
 w_{xv}[3,2,4] &= 0,09563; & w_{xv}[3,2,5] &= 0,07399; \\
 w_{xv}[3,3,2] &= 0,79771; & w_{xv}[3,3,3] &= -0,19566; \\
 w_{xv}[3,3,4] &= -0,22911; & w_{xv}[3,3,5] &= -0,17727; \\
 w_{xv}[3,4,2] &= -0,16141; & w_{xv}[3,4,3] &= 0,03959; \\
 w_{xv}[3,4,4] &= 0,04636; & w_{xv}[3,4,5] &= 0,03587; \\
 w_{xv}[3,5,2] &= -0,53293; & w_{xv}[3,5,3] &= 0,13072; \\
 w_{xv}[3,5,4] &= 0,15307; & w_{xv}[3,5,5] &= 0,11843; \\
 w_x[4,3] &= 0,07574; & w_x[4,4] &= -0,25368; \\
 w_v[4,3] &= -0,02135; & w_v[4,4] &= 0,53937; \\
 w_{xv}[4,3,3] &= -0,03712; & w_{xv}[4,3,4] &= -0,04347; \\
 w_{xv}[4,4,3] &= 0,00751; & w_{xv}[4,4,4] &= 0,00879; \\
 w_x[5,3] &= -0,52098; & w_x[5,5] &= -1,61637; \\
 w_v[5,3] &= 0,14683; & w_v[5,5] &= 0,47534; \\
 w_{xv}[5,3,3] &= 0,25535; & w_{xv}[5,3,5] &= 0,23134; \\
 w_{xv}[5,5,3] &= -0,15775; & w_{xv}[5,5,5] &= -0,14292.
 \end{aligned}$$

Таблица 1

Компоненты состояния и управления установки поддержания оптимальной температуры полиола

x[1]	Температура полиола в емкости для хранения, °С
x[2]	Расход полиола, т/сутки
x[3]	Коэффициент теплопередачи теплообменника, Вт/(м ² ·К)
x[4]	Температура полиола, идущего к потребителю, °С
x[5]	Разность температур теплоносителя до и после теплообменного аппарата, °С
v[1]	Запас полиола в емкости для хранения, т
v[2]	Частота вращения вала насоса, об/мин
v[3]	Температура полиола после теплообменного аппарата, °С
v[4]	Расход полиола, идущего к потребителю, т/сутки
v[5]	Расход теплоносителя, т/сутки

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ БИЛИНЕЙНОЙ ОКРЕСТНОСТНОЙ МОДЕЛИ С НАБОРОМ КОРТЕЖЕЙ ДАННЫХ

Для проведения идентификации окрестностной модели с набором кортежей данных требуется решить систему из уравнений типа F_n^m , где n – номер узла, к которому записывается уравнение, m – номер кортежа данных, входящих в уравнение.

Система состоит из m уравнений, соответствующих каждому отдельному узлу n , в которых значения коэффициентов одинаковы, а значения компонентов состояния и управления отличаются:

$$\begin{aligned}
 & F_1^1 = w_x[1,1] \cdot x^1[1] + w_x[1,2] \cdot x^1[2] + \\
 & + w_v[1,1] \cdot v^1[1] + w_v[1,2] \cdot v^1[2] + \\
 & + w_{xv}[1,1,1] \cdot x^1[1] \cdot v^1[1] + \\
 & + w_{xv}[1,1,2] \cdot x^1[1] \cdot v^1[2] + \\
 & + w_{xv}[1,2,1] \cdot x^1[2] \cdot v^1[1] + \\
 & + w_{xv}[1,2,2] \cdot x^1[2] \cdot v^1[2]; \\
 & \dots \\
 & F_1^{10} = w_x[1,1] \cdot x^{10}[1] + w_x[1,2] \cdot x^{10}[2] + \\
 & + w_v[1,1] \cdot v^{10}[1] + w_v[1,2] \cdot v^{10}[2] + \\
 & + w_{xv}[1,1,1] \cdot x^{10}[1] \cdot v^{10}[1] + \\
 & + w_{xv}[1,1,2] \cdot x^{10}[1] \cdot v^{10}[2] + \\
 & + w_{xv}[1,2,1] \cdot x^{10}[2] \cdot v^{10}[1] + \\
 & + w_{xv}[1,2,2] \cdot x^{10}[2] \cdot v^{10}[2]; \\
 & \dots \\
 & \dots \\
 & F_5^1 = w_x[5,3] \cdot x^1[3] + w_x[5,5] \cdot x^1[5] + \\
 & + w_v[5,3] \cdot v^1[3] + w_v[5,5] \cdot v^1[5] + \\
 & + w_{xv}[5,3,3] \cdot x^1[3] \cdot v^1[3] + \\
 & + w_{xv}[5,3,5] \cdot x^1[3] \cdot v^1[5] + \\
 & + w_{xv}[5,5,3] \cdot x^1[5] \cdot v^1[3] + \\
 & + w_{xv}[5,5,5] \cdot x^1[5] \cdot v^1[5]; \\
 & \dots
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & F_5^{10} = w_x[5,3] \cdot x^{10}[3] + w_x[5,5] \cdot x^{10}[5] + \\
 & + w_v[5,3] \cdot v^{10}[3] + w_v[5,5] \cdot v^{10}[5] + \\
 & + w_{xv}[5,3,3] \cdot x^{10}[3] \cdot v^{10}[3] + \\
 & + w_{xv}[5,3,5] \cdot x^{10}[3] \cdot v^{10}[5] + \\
 & + w_{xv}[5,5,3] \cdot x^{10}[5] \cdot v^{10}[3] + \\
 & + w_{xv}[5,5,5] \cdot x^{10}[5] \cdot v^{10}[5].
 \end{aligned}$$

Идентификация проводится отдельно для уравнений, соответствующих конкретному узлу n .

Значения коэффициентов модели находятся из условия минимума среднеквадратического отклонения:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (F_n^i)^2}{m}} \rightarrow \min.$$

Наборы кортежей данных и соответствующие им значения компонентов состояния и управления представлены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

Кортежи данных состояния

№ кортежа	x[1], °C	x[2], т/сут	x[3], Вт/(м²·К)	x[4], °C	x[5], °C
1	40	13,2	71,2	22	5
2	40	1	27,3	22	5
3	40	25	89,7	22	5
4	40	1	32,5	22	1
5	40	25	100,3	22	1
6	40	1	21,2	22	20
7	40	25	75,4	22	20
8	25	13,2	49	22	5
9	25	1	17,5	22	5
10	25	25	62,7	22	5

Таблица 3

Кортежи данных управления

№ кортежа	v[1], т	v[2], об/мин	v[3], °C	v[4], т/сут	v[5], т/сут
1	2	3	4	5	6
1	22	319	22	11,9	27,5
2	22	24,2	22	0,9	2,1
3	22	604,2	22	22,5	52,1
4	22	24,2	22	0,9	10,4

1	2	3	4	5	6
5	22	604,2	22	22,5	260,7
6	22	24,2	22	0,9	0,5
7	22	604,2	22	22,5	13
8	22	319	22	11,9	4,6
9	22	24,2	22	0,9	0,4
10	22	604,2	22	22,5	8,7

В результате получены следующие значения коэффициентов:

$w_x[1,1]=1;$	$w_x[1,2]=0,11948;$
$w_v[1,1]=-0,33684;$	$w_v[1,2]=-0,0353;$
$w_{xv}[1,1,1]=2,79616;$	$w_{xv}[1,1,2]=0,00341;$
$w_{xv}[1,2,1]=0,00852;$	$w_{xv}[1,2,2]=-0,00022;$
$w_x[2,1]=-0,01468;$	$w_x[2,2]=-0,29554;$
$w_x[2,3]=0,94282;$	$w_v[2,1]=4,69343;$
$w_v[2,2]=1;$	$w_v[2,3]=4,6934;$
$w_{xv}[2,1,1]=0,00509;$	$w_{xv}[2,1,2]=0,00671;$
$w_{xv}[2,1,3]=0,00493;$	$w_{xv}[2,2,1]=4,07779;$
$w_{xv}[2,2,2]=-0,00288;$	$w_{xv}[2,2,3]=4,07788;$
$w_{xv}[2,3,1]=1,32303;$	$w_{xv}[2,3,2]=0,00046;$
$w_{xv}[2,3,3]=1,32234;$	
$w_x[3,2]=0,3266;$	$w_x[3,3]=1;$
$w_x[3,4]=0,07263;$	$w_x[3,5]=0,13817;$
$w_v[3,2]=-0,15114;$	$w_v[3,3]=-1;$
$w_v[3,4]=0,16185;$	$w_v[3,5]=-0,26622;$
$w_{xv}[3,2,2]=0,01758;$	$w_{xv}[3,2,3]=-0,11604;$
$w_{xv}[3,2,4]=-0,15218;$	$w_{xv}[3,2,5]=0,09702;$
$w_{xv}[3,3,2]=-0,04713;$	$w_{xv}[3,3,3]=0,88182;$
$w_{xv}[3,3,4]=1,15971;$	$w_{xv}[3,3,5]=0,22022;$
$w_{xv}[3,4,2]=0,03069;$	$w_{xv}[3,4,3]=-0,02581;$
$w_{xv}[3,4,4]=-0,03285;$	$w_{xv}[3,4,5]=0,05404;$
$w_{xv}[3,5,2]=-0,01534;$	$w_{xv}[3,5,3]=-0,04908;$
$w_{xv}[3,5,4]=-0,06522;$	$w_{xv}[3,5,5]=0,43539;$
$w_x[4,3]=-0,05243;$	$w_x[4,4]=-0,11145;$
$w_v[4,3]=-0,57061;$	$w_v[4,4]=0,53902;$
$w_{xv}[4,3,3]=0,01863;$	$w_{xv}[4,3,4]=-0,10521;$
$w_{xv}[4,4,3]=0,11582;$	$w_{xv}[4,4,4]=0,20664;$
$w_x[5,3]=-0,22091;$	$w_x[5,5]=-0,92476;$
$w_v[5,3]=-0,80286;$	$w_v[5,5]=0,47589;$
$w_{xv}[5,3,3]=0,07848;$	$w_{xv}[5,3,5]=-0,50619;$
$w_{xv}[5,5,3]=-1,37988;$	$w_{xv}[5,5,5]=-1,08902.$

Сравнение точности окрестностных моделей по предложенным методикам идентификации с одним и с набором кортежей данных представлено в [4].

3. МЕТОДИКА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Цель теплотехнического расчета состоит в нахождении коэффициента теплопередачи теплообменного аппарата, исходя из заданных значений расхода полиола и теплоносителя, и разности температур полиола и теплоносителя до и после теплообменника, при этом должен соблюдаться тепловой баланс:

$$Q = G_{\text{пол}} \cdot c_{\text{пол}} \cdot \Delta t_{\text{пол}} = G_{\text{тн}} \cdot c_{\text{тн}} \cdot \Delta t_{\text{тн}},$$

где Q – количество теплоты, Вт;

$G_{\text{пол}}$ – расход полиола, кг/с;

$c_{\text{пол}}$ – теплоемкость полиола, Дж/(кг·К) [4];

$\Delta t_{\text{пол}}$ – разность температур полиола до и после теплообменника, °С;

$G_{\text{тн}}$ – расход теплоносителя, кг/с;

$c_{\text{тн}}$ – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К);

$\Delta t_{\text{тн}}$ – разность температур теплоносителя до и после теплообменника, °С.

В качестве греющего теплоносителя принимаем воду.

Средняя скорость течения полиола определяется как:

$$w_{\text{пол}} = \frac{4 \cdot G_{\text{пол}}}{\rho_{\text{пол}} \cdot n \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}}^2},$$

где $w_{\text{пол}}$ – средняя скорость течения полиола, м/с;

$\rho_{\text{пол}}$ – плотность полиола, кг/м³ [5];

n – количество трубок;

$d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубки, м.

Число Рейнольдса для полиола [6]:

$$Re_{\text{пол}} = \frac{w_{\text{пол}} \cdot d_{\text{вн}}}{\nu_{\text{пол}}},$$

где $\nu_{\text{пол}}$ – кинематическая вязкость полиола, м²/с [5].

Число Грасгофа для полиола [6]:

$$Gr_{\text{пол}} = \frac{g \cdot d_{\text{вн}}^3 \cdot \beta_{\text{пол}} \cdot \Delta t_{\text{пол}}}{\nu_{\text{пол}}^2},$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\beta_{\text{пол}}$ – температурный коэффициент объемного расширения полиола, К⁻¹ [5].

Число Рэлея для полиола [6]:

$$Ra_{\text{пол}} = Gr_{\text{пол}} \cdot Pr_{\text{пол}},$$

где $Pr_{\text{пол}}$ – число Прандтля для полиола [5].

В результате расчетов получаем число Рейнольдса меньше 2300, а число Рэлея больше 800000, что соответствует вязкостно-гравитационному режиму течения. Тогда критериальное уравнение будет иметь вид [7]:

$$Nu_{пол} = 0,15 \cdot Re_{пол}^{0,33} \cdot Pr_{пол}^{0,33} \cdot Ra_{пол}^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_{пол}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_1,$$

где $Pr_{ст}$ – число Прандтля для полиола при температуре стенки трубы [5];

ε_1 – поправочный коэффициент, учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена [7].

Коэффициент теплоотдачи полиола составит [6]:

$$\alpha_{пол} = \frac{Nu_{пол} \cdot \lambda_{пол}}{d_{вн}},$$

где $\alpha_{пол}$ – коэффициент теплоотдачи полиола, Вт/(м²·К);

$\lambda_{пол}$ – коэффициент теплопроводности полиола, Вт/(м·К) [5].

Средняя скорость течения теплоносителя определяется как:

$$w_{тн} = \frac{G_{тн}}{\rho_{тн} \cdot F_{тн}},$$

где $w_{тн}$ – средняя скорость течения теплоносителя, м/с;

$\rho_{тн}$ – плотность теплоносителя, кг/м³;

$F_{тн}$ – средняя площадь поверхности течения, м²:

$$F_{тн} = \frac{D}{2} \cdot \frac{l}{z} - F_{тр},$$

где D – диаметр кожуха теплообменника, м;

l – длина теплообменника, м;

z – количество ходов по теплоносителю;

$F_{тр}$ – средняя площадь поверхности трубок, ограничивающих течение теплоносителя, м².

Число Рейнольдса для теплоносителя [6]:

$$Re_{тн} = \frac{w_{тн} \cdot d_{нар}}{\nu_{тн}},$$

где $d_{нар}$ – наружный диаметр трубки, м;

$\nu_{тн}$ – кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с.

В результате расчетов получаем числа Рейнольдса в диапазоне от 100 до 1000. Соглас-

но [8], при таких числах Рейнольдса, пучки с большим и умеренным продольным шагом имеют теплоотдачу, равную теплоотдаче одиночной трубки, критериальное уравнение для которой имеет вид:

$$Nu_{тн} = 0,52 \cdot Re_{тн}^{0,5} \cdot Pr_{тн}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{тн}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25},$$

где $Pr_{ст}$ – число Прандтля для теплоносителя при температуре стенки трубы.

Коэффициент теплоотдачи теплоносителя составит [6]:

$$\alpha_{тн} = \frac{Nu_{тн} \cdot \lambda_{тн}}{d_{нар}},$$

где $\alpha_{тн}$ – коэффициент теплоотдачи теплоносителя, Вт/(м²·К);

$\lambda_{тн}$ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К).

Коэффициент теплопередачи составит [6]:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{пол} d_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \cdot \ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}} + \frac{1}{\alpha_{тн} d_{нар}} \right) \cdot \frac{d_{вн} + d_{нар}}{2}},$$

где K – коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата, Вт/(м²·К);

$\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности стенки трубы, Вт/(м·К).

Результаты теплотехнического расчета представлены в табл. 4.

4. СМЕШАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При смешанном управлении задается часть параметров состояния и управления, а остальные параметры требуется определить, исходя из условия минимума среднеквадратического отклонения окрестностной модели [9]:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i)^2}{n}} \rightarrow \min.$$

Для смешанного управления окрестностной модели установки поддержания оптимальной температуры полиола заданными считались компоненты $x[1]$, $x[2]$, $x[4]$, $x[5]$, $v[1]$, $v[3]$, причем значения некоторых из них соответствовали номинальным и в процессе смешанного управления не изменялись:

$x[1]=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v[1]=22$ тонны,
 $x[4]=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v[3]=22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Определению подлежали компоненты $x[3]$, $v[2]$, $v[4]$, $v[5]$.

Результаты определения коэффициента теплопередачи с помощью смешанного управления представлены в табл. 4.

Относительные отклонения значений коэффициента теплопередачи, найденных в про-

цессе смешанного управления от значений, полученных в результате теплотехнического расчета, представлены на рис. 2–4.

Важным параметром окрестностной модели является её точность [10]. Для сравнения точности в табл. 5 приведены значения среднеквадратических отклонений, полученных в результате смешанного управления.

Таблица 4

Полученные значения коэффициента теплопередачи, Вт/(м²·К)

Заданные значения		Теплотехнический расчет	Смешанное управление	
$x[2]$, т/сут	$x[5]$, °С		Один кортеж данных	Набор кортежей данных
5	5	49,8	43,5	46,4
10	5	64,3	57,8	64,6
15	5	74,6	72,9	82,8
20	5	82,7	76,8	85,4
25	5	89,7	79,9	87
5	10	45,4	42,7	38,8
10	10	59	56	57
15	10	68,7	72,9	69,7
20	10	76,5	76,8	74,7
25	10	83,1	79,9	78,1
5	20	40,3	40,9	39,6
10	20	52,9	51,9	55,3
15	20	61,9	70	69,7
20	20	69,2	76,8	78,1
25	20	75,4	79,9	85,3

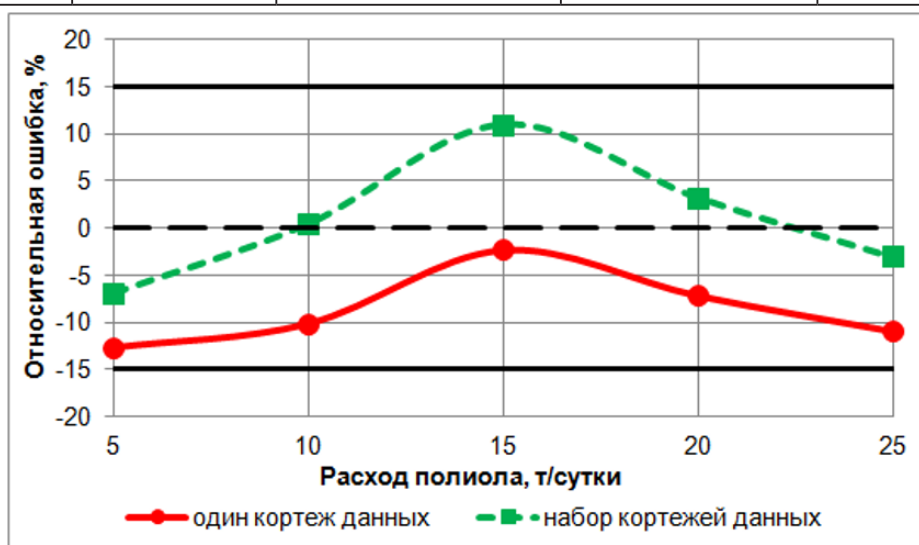


Рис. 2. Относительное отклонение результатов при значении разности температур теплоносителя $x[5] = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

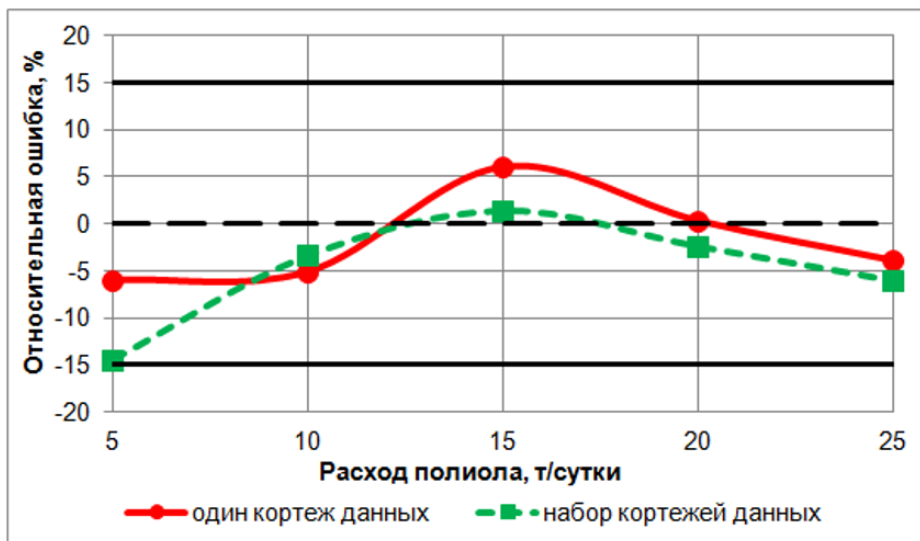


Рис. 3. Относительное отклонение результатов при значении разности температур теплоносителя $x[5] = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

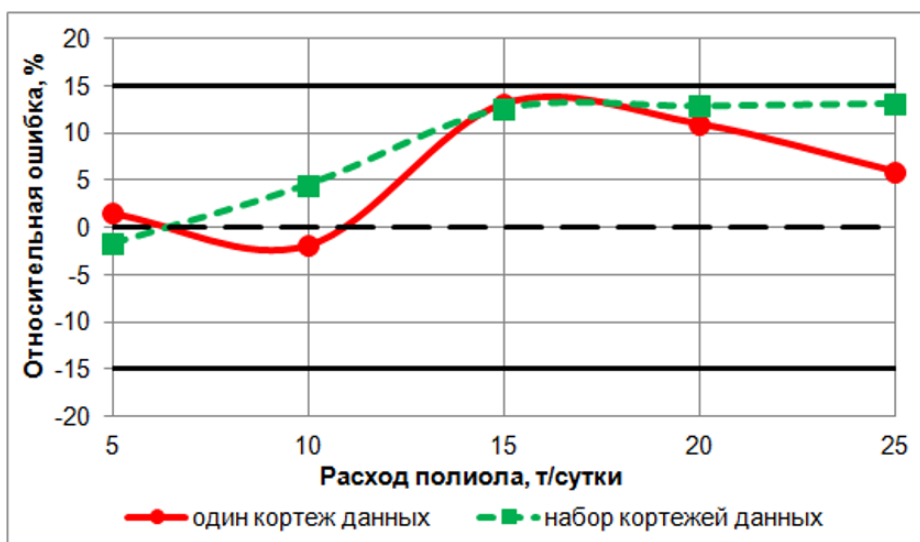


Рис. 4. Относительное отклонение результатов при значении разности температур теплоносителя $x[5] = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 5
Значения среднеквадратических отклонений

Заданные значения		Смешанное управление	
$x[2]$, т/сут	$x[5]$, $^{\circ}\text{C}$	Один кортеж данных	Набор кортежей данных
1	2	3	4
5	5	0,32133	0,007277
10	5	0,23505	0,009259
15	5	0,16258	0,00732
20	5	0,63522	0,004447
25	5	1,12057	0,002762
5	10	0,26477	0,0041

1	2	3	4
10	10	0,19382	0,004888
15	10	0,19507	0,003173
20	10	0,66179	0,001628
25	10	1,14159	0,003406
5	20	0,20926	0,008008
10	20	0,33537	0,006366
15	20	0,27709	0,003296
20	20	0,62237	0,001202
25	20	1,06536	0,005171

Отклонение в результате смешанного управления окрестностной модели на основе идентификации с набором кортежей данных

на два порядка ниже, чем на основе идентификации с одним коротежем данных.

Значения коэффициента теплопередачи, определенные в результате двух вариантов смешанного управления, не превышают допустимую погрешность 15 %, которую имеют критериальные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи [11]. Данный факт говорит о возможности использования окрестностных систем для моделирования и управления теплообменными установками, в которых протекают жидкости с высокой вязкостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрирована методика определения коэффициента теплопередачи с помощью смешанного управления окрестностной модели. Значения коэффициента теплопередачи, полученные в двух вариантах смешанного управления, соответствуют значениям, найденным в процессе теплотехнического расчета.

Смешанное управление окрестностной модели, получаемой в результате идентификации с набором коротежей данных, показало заметно меньшее среднеквадратическое отклонение.

Применение окрестностных систем является перспективным для моделирования и управления установками подобного рода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-07-00854 а)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блюмин, С. Л. Билинейные окрестностные системы / С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин, О. А. Шмырина. – Липецк: ЛГТУ, 2006. – 131 с.

2. Параметрическое окрестностное моделирование печи обжига клинкера / А. М. Шмырин [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, № 3. – С. 927–930.

3. Два подхода к исследованию общего параметрического уравнения окрестностной модели печи обжига клинкера / А. М. Шмырин [и др.] // Системы управления и инфор-

мационные технологии. – 2015. – №1.1(59). – С. 185–189.

4. *Shmyrin, A. M.* Algorithms of identification of neighborhood systems by the example of simulation of an installation for maintaining the optimum temperature of the polyol / А. М. Шмырин, А. Г. Ярцев // Modern informatization problems in the techological and telecommunication systems analysis and synthesis: Proceedings of the XXIII-th International Open Science Conference (Yelm, WA, USA, January 2018). – Science Book Publishing House, 2018. – P. 277–286.

5. *Варгафтик, Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – Москва: Наука, 1972. – 720 с.

6. *Исаченко, В. П.* Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва: Энергия, 1975. – 488 с.

7. *Михеев, М. А.* Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – Москва: Госэнергоиздат, 1956. – 392 с.

8. *Жукаускас, А.* Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости / А. Жукаускас, В. Макарявичюс, А. Шланчяускас. – Вильнюс: Минтис, 1968. – 192 с.

9. *Шмырин, А. М.* Исследование окрестностных моделей печи обжига клинкера с учетом ограничений на переменные и специальной функции цели / А. М. Шмырин, А. Г. Ярцев // Информационные технологии моделирования и управления. – 2015. – №5(95). – С. 410–418.

10. *Шмырин, А. М.* Смешанное управление процессом формирования температуры смотки горячекатаной полосы на основе трилинейной окрестностной модели / А. М. Шмырин, А. Г. Ярцев // Информационные технологии моделирования и управления. – 2016. – №4(100). – С. 290–297.

11. *Романков, П. Г.* Теплообменные процессы химической технологии / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов. – Ленинград: Химия, 1982. – 288 с.

Шмырин А. М. – д-р техн. наук, заведующий кафедрой высшей математики ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».
E-mail: amsh@lipetsk.ru

Shmyrin A. M. – Doctor of Technical Sciences, Head of the Mathematics Department at the Lipetsk State Technical University.
E-mail: amsh@lipetsk.ru

Ярцев А. Г. – аспирант кафедры высшей математики ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».
E-mail: yartsevlekha@mail.ru

Yartsev A. G. – graduate student of the Mathematics Department at the Lipetsk State Technical University.
E-mail: yartsevlekha@mail.ru