

УДК 621.314  
© 2010

**Е.В. ЗОЛотовская,**  
ассистент

**А.С. МИРОНОВ,**  
кандидат технических наук

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ  
БИОМАССЫ  
НА КАЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ  
ПИРОЛИЗНОГО ГАЗА**

*Наведено експериментальні дані, на підставі яких було вивчено вплив різних чинників на якість паливного газу. Приводиться математична модель впливу цих чинників на показники, за допомогою яких можна прогнозувати технологічні режими термобробки біомаси.*

Одним из актуальных в настоящее время направлений энергетического использования биомассы является производство топливного газа, полученного путем термического разложения частиц биомассы. Технологии утилизации биомассы находятся в начале своего развития в Украине и имеют обнадеживающие перспективы для коммерциализации, особенно в свете резкого повышения стоимости природного газа. Большой интерес к энергетическому использованию биомассы связан не только с экономическими предпосылками, но и с желанием снизить выбросы парниковых газов при сжигании ископаемого топлива. Использование биомассы в качестве топлива – одна из немногих реальных альтернатив снижения парникового эффекта, так как растительные отходы являются нейтральным по отношению к балансу CO<sub>2</sub> в атмосфере. То есть при их сжигании выделяется такое же количество, какое было поглощено в процессе роста растений.

Наряду с прямым сжиганием и газификацией [1], пиролиз является эффективным методом термохимической переработки рас-

тительной биомассы и одновременно одной из наименее развитых технологий энергетического использования биомассы в Украине. Данная технология позволяет получать качественное, экологически безопасное газообразное топливо практически из любого сырья, содержащего органические вещества, так как использование относительно низких температур означает, что в атмосферу попадает малое количество загрязнителей.

Исследование большого числа пиролизных установок различной конструкции показало, что многие из них не отвечают основным требованиям технологии пиролиза. В научной литературе описывается получение топливного газа [1–4]. Однако приведенные способы и устройства имеют ряд недостатков. Это несовершенство технологических режимов с малым выходом газообразного топлива (30–40 % от массы органического вещества), осуществляемых без учета изменения влажности. Не рассматриваются и тепломассобменные процессы при термическом разложении органического сырья. В работах В.Н. Кожурина [3], А.Н. Стеблини-

**1. Уровни варьирования факторов**

Фактор	Код	Уровень варьирования					Δ
		-1,411	-1	0	1	1,414	
Содержание воздуха в пиролизном газе, %	X <sub>1</sub>	50	57,5	65	72,5	80	7,5
Температура воздуха, °С	X <sub>2</sub>	140	200	260	320	380	60
Влажность частицы, %	X <sub>3</sub>	6	10	20	30	36	10
Перепад давления в камере, МПа	X <sub>4</sub>	0,06	0,1	0,2	0,3	0,36	0,1

на [4] не предусмотрены меры оперативного реагирования на текущее изменение физико-механических свойств в потоке сырья и коррекции параметров технологического процесса пиролиза с целью достижения требуемых оптимальных результатов. Поэтому при производстве топливного газа следует решать оптимизационные задачи, позволяющие прогнозировать уровень значений параметров, которые могут повысить количество и качество пиролизного газа.

**Целью** данной работы является определение влияния различных параметров на об-

разование летучих компонентов в исследуемом газе.

Исследование технологических режимов термического разложения частиц биомассы показали, что бурный распад биомассы происходит при нагреве с образованием основной массы продуктов разложения в пределах температур 200–400 °С. Для всех исследуемых образцов повышение температуры до 420 °С приводит к увеличению выхода газообразных продуктов пиролиза. Процесс пиролиза протекает при существенно изменяющемся давлении, поэтому при дости-

## 2. Матрица планирования экспериментов

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$
1	1	1	1	1	1	1,5	1,6	3,5	0,0937	1,90	0,2562
2	-1	1	1	1	6	4	5	2,1	0,0693	3,5	0,1375
3	1	-1	1	1	0,3	0,8	0,9	5,9	0,3562	1,42	0,8134
4	-1	-1	1	1	1,9	0,5	0,6	4,85	0,225	1,39	0,7051
5	1	1	-1	1	5	3	4	2,09	0,0072	3,9	0,2341
6	-1	1	-1	1	5,3	4,29	5,7	1,78	0,059	4,01	0,1948
7	1	-1	-1	1	0,8	1,2	1,5	4,1	0,269	2,1	0,5561
8	-1	-1	-1	1	0,1	0,59	0,71	6,23	0,3781	1,25	0,9437
9	1	1	1	-1	3	3,45	4,28	4,15	0,258	3,55	0,6589
10	-1	1	1	-1	8	6	7	3,49	0,0937	5	0,5013
11	1	-1	1	-1	1	1,2	1,31	8	0,4000	1,31	1
12	-1	-1	1	-1	3,4	3,68	4,09	7,8	0,3890	3,41	0,9934
13	1	1	-1	-1	7	5	6	3	0,1375	4,34	0,4282
14	-1	1	-1	-1	7,3	5,35	6,43	2,1	0,1009	4,99	0,3197
15	1	-1	-1	-1	2,8	4,5	5,98	8	0,4000	3,85	1
16	-1	-1	-1	-1	0,5	1	1,1	2,5	0,2640	1,94	0,2019
17	-1,414	0	0	0	7	5	6	2	0,0673	4,59	0,2
18	1,414	0	0	0	3	3,5	3,9	3	0,0951	1,3	0,31
19	0	-1,414	0	0	3	3,5	3,9	3	0,0951	1,3	0,31
20	0	1,414	0	0	8	6	7	1	0,0500	5	0,1
21	0	0	-1,414	0	6	4	5	2	0,2000	4,1	0,2
22	0	0	1,414	0	7	5	6	2,5	0,2390	4,9	0,325
23	0	0	0	-1,414	8	6	7	1,45	0,0911	5	0,2125
24	0	0	0	1,414	3	3,5	4	3	0,3000	3,4	0,32
25	0	0	0	0	4	3,9	4,3	2,9	0,2900	3,92	0,3

### 3. Оценки коэффициентов в моделях, характеризующих степень влияния факторов и их взаимодействия на показатели

Факторы и их взаимодействие на показатели	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$
$X_1$	-0,3322	-0,132	-0,1574	0,3238	0,0184	0,0746	0,0186
$X_2$	0,1	0,0634	0,0713	-0,126	-0,0063	0,0138	-0,0071
$X_3$	-0,3157	-0,2561	-0,2484	0,4642	0,00747	-0,2996	0,007
$X_4$	-0,1415	-0,5382	-0,5969	-0,5341	-0,0408	-0,3309	-0,0707
$X_1^2$	-1,0483	-0,7641	-0,8307	0,9044	-0,013	-0,6834	0,0286
$X_2^2$	-0,7983	-0,5143	-0,5808	0,6544	-0,0174	-0,58097	0,0983
$X_3^2$	-0,02985	-0,6392	-0,5558	-0,7794	0,0561	-0,0938	0,0127
$X_4^2$	-0,7983	-0,5142	-0,5558	0,7669	0,0441	-0,05613	0,1289
$X_1X_2$	0,1698	0,0673	-0,1068	-0,0844	0,00431	-0,2838	-0,00631
$X_1X_3$	-0,9813	-0,6063	-0,7588	-0,0794	0,0159	-0,04425	-0,0105
$X_1X_4$	-0,0938	-0,0625	-0,185	-0,4143	-0,01803	0,09375	-0,0745
$X_2X_3$	0,1071	-0,0988	-0,05439	-0,0906	0,00539	-0,1025	-0,0078
$X_3X_4$	-0,0328	0,0175	0,085	0,1219	-0,00447	-0,01125	-0,0568

жении предельной температуры возможно воспламенение частиц. Для поддержания требуемой температуры в пиролизной камере следует обеспечить оптимальное соотношение значений теоретически необходимого количества воздуха и подаваемого сырья. Следовательно, наблюдается влияние температуры и количества воздуха на термическое разложение биомассы, с соответствующим влажосодержанием. Регулируя давление, можно регулировать и состав получаемой смеси газа с воздухом [5]. Таким образом, основными параметрами, влияющими на интенсивность образования пиролизного газа и его качественный состав, являются температура теплоносителя, количество воздуха, влажность и давление.

Для оценки влияния термических режимов переработки органического сырья на качество и состав получаемого газа разработана математическая модель.

В качестве показателей процесса были взяты летучие компоненты исследуемого газа: водород  $Y_1$ , метан  $Y_2$ , оксид углерода  $Y_3$ ,

двуокись углерода  $Y_4$ , азот  $Y_5$ , тяжелые углеводороды  $Y_6$ , сероводород  $Y_7$ . Среди факторов, влияющих на показатели  $Y$ , использованы количество воздуха  $X_1$ , температура воздуха  $X_2$ , влажность материала  $X_3$  и перепад давления воздуха  $X_4$  (табл. 1, 2).

Для построения моделей использовали ортогональный центральный композиционный план второго порядка с ядром 24 [6].

После проведенных расчетов по алгоритму метода были получены оценки коэффициентов в моделях (табл. 3).

Для проверки зависимости влияния факторов и их взаимодействия на показатели, а также адекватности полученных ошибок наблюдений  $S^2$  были проведены четыре повторных опыта в "нулевой" точке  $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 0$ . (табл. 4).

Оценку дисперсии ошибок наблюдений можно представить следующим образом:

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (Y_i - \hat{Y})^2,$$

где  $Y_i$  – наблюдаемое значение показателя  $Y$  в  $i$ -ом повторном опыте;  $\hat{Y}$  – среднее значение

#### 4. Значение повторных опытов и дисперсий ошибок для показателей $Y$

Показатель	Значение показателя в повторных опытах				Дисперсия ошибок наблюдений
	1	2	3	4	
$Y_1$	3,8	4	3,9	4,1	0,02
$Y_2$	3,6	3,9	3,7	4	0,04666667
$Y_3$	4	4,3	4,1	4,4	0,04666667
$Y_4$	2,6	2,9	2,8	3,1	0,04666667
$Y_5$	0,25	0,29	0,27	0,3	0,0007
$Y_6$	3,77	3,92	3,89	4,2	0,03393333
$Y_7$	0,24	0,3	0,29	0,33	0,00153333

$Y$  в “нулевой” точке, получили дисперсии ошибок наблюдений (табл. 4).

“Пороги значимости” для оценок коэффициентов, характеризующих силу влияния факторов и их эффектов взаимодействия, находились как  $h_i \cdot S$ , где  $S$  – среднее квадратичное отклонение ошибки наблюдения;  $h_i = t_{кр}(\alpha; \varphi) \cdot \sqrt{c_p} \cdot t_{кр}(\alpha; \varphi)$  – критическое значение распределения Стьюдента для уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы  $\varphi$ . В проведенных исследованиях  $\varphi = 3$ ,  $c_1 = 0,05$  для  $x_i$ ,  $c_2 = 0,125$  для  $x_i^2$ ,  $c_3 = 0,0625$  для  $x_i \cdot x_j$ ,  $i, j = 1, \dots, 4$  [7]. В ре-

#### 5. “Пороги значимости” для факторов и их взаимодействий

Показатель	Порог значимости		
	$X_i$	$X_i^2$	$X_i X_j$
$Y_1$	0,018467702	0,132590072	0,04361435
$Y_2$	0,02820988	0,202534681	0,06662201
$Y_3$	0,02820988	0,202534681	0,06662201
$Y_4$	0,02820988	0,202534681	0,06662201
$Y_5$	0,003454991	0,024805331	0,0081595
$Y_6$	0,011055318	0,172706734	0,05681037
$Y_7$	0,005113475	0,036712529	0,01207627

зультате расчетов получены “пороги значимости” для показателей  $Y_i$  (табл. 5).

Исключив из моделей факторы и их взаимодействия, величина коэффициентов которых по модулю меньше указанных “порогов значимости”, для уровня значимости  $\alpha = 0,5$  получили следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_1 &= 4,124 - 0,3322X_1 + 0,1X_2 - 0,3157X_3 - \\ &\quad - 0,1415X_4 - 1,0483X_1^2 - 0,7983X_2^2 - \\ &\quad - 0,2985X_3^2 - 0,7983X_4^2 - 0,5563X_1X_2 - \\ &\quad - 0,98125X_1X_3 - 0,09377X_1X_4 - 0,1071X_2X_3; \\ \dot{Y}_2 &= 3,4584 - 0,1319X_1 + 0,0634X_2 - \\ &\quad - 0,2561X_3 - 0,5382X_4 - 0,764X_1^2 - \\ &\quad - 0,514X_2^2 - 0,639X_3^2 - 0,514X_4^2 + \\ &\quad + 0,1251X_1X_2 - 0,606X_1X_3 - 0,0987X_2X_3; \\ \dot{Y}_3 &= 4,132 - 0,1574X_1 + 0,0713X_2 - \\ &\quad - 0,2484X_3 - 0,55969X_4 - 0,8307X_1^2 - \\ &\quad - 0,581X_2^2 - 0,556X_3^2 - 0,556X_4^2 - 0,1068X_1X_2 - \\ &\quad - 0,759X_1X_3 - 0,185X_1X_4 - 0,085X_2X_3; \\ \dot{Y}_4 &= 3,6176 + 0,3238X_1 - 1,1171X_2 + \\ &\quad + 0,2484X_3 - 0,5341X_4 + 0,9044X_1^2 + \\ &\quad + 0,6544X_2^2 + 0,7794X_3^2 + 0,7669X_4^2 - \\ &\quad - 0,0844X_1X_2 - 0,0794X_1X_3 - 0,4144X_1X_4 - \\ &\quad - 0,0906X_2X_3 + 0,122X_2X_4 - 0,356X_3X_4; \\ \dot{Y}_5 &= 0,1997 + 0,0184X_1 - 0,087X_2 + \\ &\quad + 0,0075X_3 - 0,4082X_4 + 0,56X_1^2 + 0,0441X_2^2 + \\ &\quad + 0,016X_1X_3 - 0,018X_1X_4 - 0,017X_2X_3; \\ \dot{Y}_6 &= 3,2532 + 0,075X_1 + 0,462X_2 - \\ &\quad - 0,2996X_3 - 0,331X_4 - 0,6834X_1^2 - \\ &\quad - 0,581X_2^2 - 0,284X_1X_2 - 0,044X_1X_3 + \end{aligned}$$

#### 6. Расчетные и табличные значения статистики Фишера

Показатель	Значения		
	$S_{ост2}$	$F_{расч}$	$F_{табл.}$
$Y_1$	0,1487998	7,43999004	8,703
$Y_2$	0,33527388	7,18444028	8,703
$Y_3$	0,34675065	5,20474581	8,703
$Y_4$	0,29740749	6,37301754	8,703
$Y_5$	0,00398906	5,69866169	8,703
$Y_6$	0,2636452	7,76950483	8,703
$Y_7$	0,01242015	8,10010041	8,703

$$+ 0,094X_1X_4 - 0,1025X_2X_3 - 0,0775X_3X_4;$$

$$\hat{Y}_7 = 0,4488 + 0,0186X_1 - 0,0071X_2 -$$

$$- 0,0708X_4 + 0,0983X_2^2 + 0,129X_4^2 -$$

$$- 0,075X_1X_4 - 0,057X_2X_4 - 0,0365X_3X_4.$$

Проверку адекватности полученных моделей проводили по критерию Фишера  $F$ . Расчетное значение  $F$  статистики находили по формуле:

$$F_p = \frac{S_{ост}^2}{S^2}.$$

Для полученных моделей остаточную дисперсию определяли как

$$S_{ост}^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2,$$

где  $n = 25$  – число опытов;  $m$  – число коэффициентов в модели.

Полученные остаточные дисперсии, расчетные и табличные значения статистики Фишера приведены в табл. 6. Так как расчетное значение статистики Фишера  $F_p$  для всех моделей меньше табличного значения  $F_{табл.}$ , то обе модели адекватны с надежностью 0,95 истинной зависимости и могут быть использованы для технологического анализа процесса и прогноза значений показателей  $Y$ .

### Выводы

Выполненные исследования позволяют решить математические модели, с помощью которых можно определить  $Y_1$ – $Y_7$  и влияние на них факторов  $X_1$ – $X_4$ . Проверка

на адекватность уравнений физического процесса подтверждает достоверность расчетных результатов в пределах изменений влияющих факторов (табл. 1).

### Библиография

1. Гелетуха Г.Г. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железна // Промышленная теплоэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 78–85.
2. Карпенко Е.М. Основные этапы совершенствования способов сжигания твердых топлив и их наиболее перспективные современные направления / Е.М. Карпенко, В.Е. Мессерле, В.С. Перегудов // Теплоэнергетика. – 2003. – № 12. – С. 42.
3. Кожурин В.Н. Пиролизный газ из отходов растениеводства / В.Н. Кожурин // Энергообеспечение и энергоснабжение в сельском хозяйстве. – 2006. – № 4. – С. 319–324.
4. Стеблинин А.Н. Технология быстрого низкотемпературного превращения растительного сырья в жидкое топливо / А.Н. Стеблинин, И.Э. Миневич // Энергообеспечение и энергоснабжение в сельском хозяйстве. – 2006. – № 4. – С. 345–349.
5. Золотовская Е.В. Моделирование теплообмена в камере пиролиза / Е.В. Золотовская // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2009. – № 2. – С. 208–211.
6. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман. – М. : Мир, 1977. – 552 с.
7. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.