

УДК 633.002.68: 620.9

**Осьмак А.А.**,  
ассистент**Серегин А.А.**,  
д.т.н., профессор**Сегай А.М.**,  
к.т.н., доцент

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

*Проведен системный анализ технологической схемы для утилизации отходов органического происхождения с помощью газогенерационного энергетического комплекса. Оптимизацию технологического процесса газификации осуществлено путем разработки параметрической схемы центральной подсистемы, организации полного факторного эксперимента и статистической обработки результатов.*

*Ключевые слова: утилизация отходов, газогенерация, газификация, биомасса*

**Осьмак О.О.**,  
асистент**Серьогін О.О.**,  
д.т.н., професор**Сегай О.М.**,  
к.т.н., доцент

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

*Проведено системний аналіз технологічної схеми для утилізації відходів органічного походження за допомогою газогенерационного енергетичного комплексу. Оптимізацію технологічного процесу газифікації здійснено шляхом розробки параметричної схеми центральної підсистеми, організації повного факторного експерименту і статистичної обробки результатів.*

*Ключові слова: утилізація відходів, газогенерация, газифікація, біомаса*

**Osmak O.O.**,  
assistant**Seregin O.O.**,  
Ph.D., professor**Segaj A.M.**,  
Ph.D., associate professor

## OPTIMISATION OF PLANT BIOMASS GASIFICATION PROCESS

*A systematic analysis of the technological scheme for the recycling of organic waste with the help of the energy complex gasification. Optimization of the gasification process carried out by the development of parametric circuit of the central subsystem, the organization of full factorial experiment and statistical processing of results.*

*Key words: recycling waste hazoheneratsiya, gasification, biomass*

*Постановка проблемы.* Оптимизация в широком смысле находит применение в науке, технике и любой другой области человеческой деятельности. В настоящее время считают, что оптимизация – это целенаправленная деятельность, заключающаяся в получении наилучших результатов при соответствующих условиях [1,3].

Расчеты процессов и аппаратов пищевых производств, как правило, связаны с необходимостью выбора лучшего варианта из многих возможных. В условиях пищевого производства этот выбор осуществляется на основе субъективной оценки и накопленного опыта технологов. Но даже самые опытные работники не могут рассмотреть и оценить все различные варианты, которые могут возникнуть в процессе производства. Решение проблемы становится возможным благодаря постановке задачи оптимизации и нахождению оптимальных результатов с помощью компьютерной техники.

Постановка задачи оптимизации требует:

- наличие объекта оптимизации и обнаружения цели оптимизации;
- наличие ресурсов оптимизации, под которыми понимают возможность выбора значений некоторых параметров объекта. Объект должен иметь определенные степени свободы – управляющие воздействия, позволяющие изменять его состояние в зависимости от требований и условий производства;
- возможность оценки количественной величины, поскольку только при этом условии можно сравнивать эффекты от выбора тех или иных управляющих воздействий.

Оптимальный, или лучший, вариант любого объекта, должен измеряться количественной мерой – критерием оптимальности. На основе выбранного критерия оптимальности составляется целевая функция, которая зависит от параметров процесса и должна быть записана в аналитическом виде. Задача оптимизации сводится к определению ее экстремума (максимума или минимума).

Критерий оптимальности детерминированного процесса в общем виде может быть представлен как функция входных, выходных и управляющих параметров [2,3].

Для решения задачи оптимизации необходимо найти экстремум критерия оптимальности: максимум или минимум. Кроме того, в большинстве задач оптимизации возникают ограничения на параметры, налагаемых технологическими, эксплуатационными, конструктивными требованиями.

Таким образом, для решения задач оптимизации необходимо выполнить следующие условия (рис. 1).

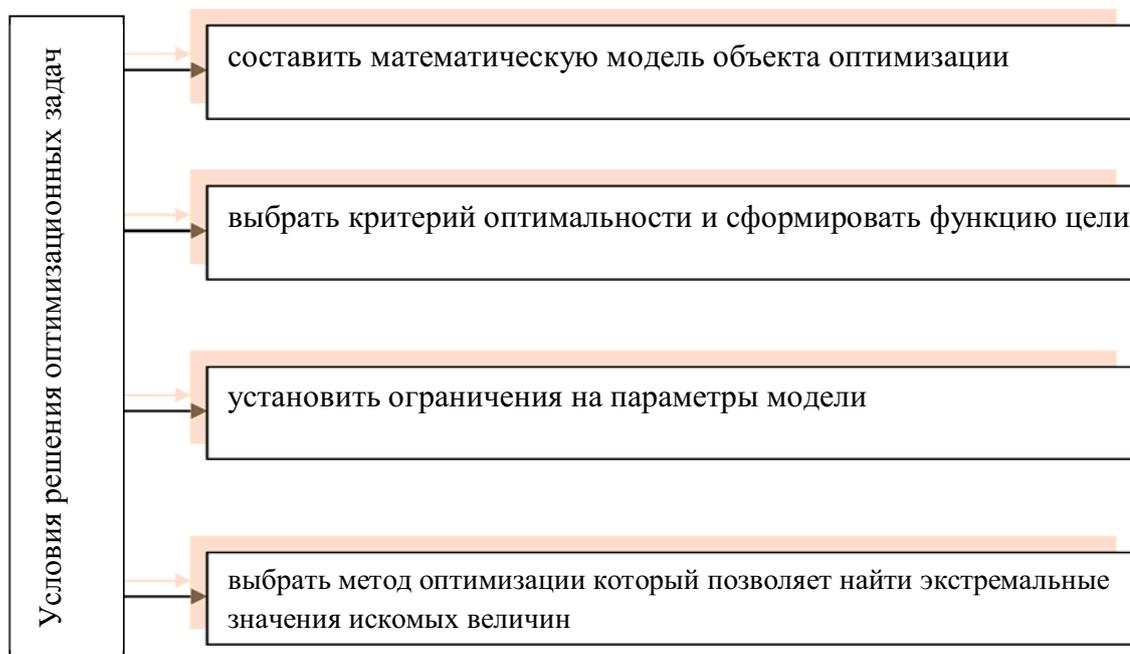


Рис. 1. Основные условия решения оптимизационных задач

Наиболее часто описанной постановкой оптимальной задачи служит выражение критерия оптимальности в виде экономической оценки (например, производительность, себестоимость продукции). Однако в отдельных задачах оптимизации, когда объект является частью технологического процесса (аппарат или агрегат в масштабе цеха, завода, комбината), не всегда удастся, или не всегда целесообразно, выделить прямой экономический показатель, который характеризовал бы эффективность работы рассматриваемого объекта. В таких случаях критерием оптимальности может служить технологическая характеристика.

*Изложение основного материала.* В свое время для газификации различного топлива были разработаны и введены в эксплуатацию различные газогенераторные установки, которые конструктивно адаптировались для достижения конкретных эксплуатационных задач: получение тепла, электроэнергии, синтез-газа, рудных концентратов редких металлов и так далее.

Газогенерационный энергетический комплекс ГЕКА-3 (Блок А на рис 2) является основной составляющей частью целого спектра оборудования для утилизации дисперсных органических отходов. Результаты, полученные при газификации в нем различных видов низкосортного и высокозольного топлива, показали перспективность применения технологии газификации для решения задач изменения агрегатного состояния растительной биомассы.



Схема на рис. 2 является одним из предлагаемых технологических вариантов применения ГЕКА-3. Комплекс работает следующим образом: с приемной площадки топливо (18) грейфером (3) с помощью монорельса (1) и электрической тали (2) подают в буферную емкость для отходов (4), откуда направляется через шлюз-дозатор (5) в газогенератор (6) на газификацию. После чего, минеральный остаток в виде золы через люк выгрузки золы (8) отгружают в бункер золы (17), после чего его отправляют потребителям. Для осуществления процесса газификации в газогенератор (6), подают воздух, получаемый от воздухоподводящей машины (7). Полученный генераторный газ через патрубок газа (9) направляют в циклон (10) для очистки от вислых частиц, циклон периодически разгружают через специальное устройство в бункер (17). Далее газ попадает в радиатора (11), где охлаждается. Затем, генераторный газ направляется в фильтр тонкой очистки газа (12) для удаления тонкодисперсных твердых частиц и дополнительного охлаждения до температуры ниже 45...60 °С и конденсированных паров смолы и воды. Подготовленный таким образом генераторный газ подают через устройства дополнительной очистки (14) до потребителя. В роли потребителя производителем рекомендуется использование агрегата отопительного модульного АВМ-02,5 в комбинации с горелкой типа ДСГМ-30 (15), или двигатель внутреннего сгорания типа ДГМА-75 (16) и другое.

Важным этапом моделирования технологического процесса является системный анализ исследуемой технологической системы [1,2]. Технологическая схема для утилизации отходов органического происхождения с помощью газогенерационного энергетического комплекса ГЕКА-3 нужно рассматривать как сложную большую систему, которую целесообразно анализировать выделением в ней более простых подсистем.

*Целью проведенной работы* было установление оптимальных параметров процесса газификации растительной биомассы (лузга подсолнечника).

Для установления оптимальных параметров целесообразно более подробно рассмотреть подсистему газификации (рис. 3).



Рис. 3. Параметрическая схема подсистемы газификации растительной биомассы

Проанализировав подсистему газификации растительной биомассы установлено, что главными управляющими параметрами данной подсистемы, которые существенно влияют на качественные характеристики процесса являются: температура, влажность и гранулометрический состав биосырья.

Выбор целевой функции подсистемы зависит от целей функционирования системы [3,5]. Цель данной подсистемы – создать оптимальные условия для проведения процесса газификации. Исходным управляемым показателем, который наиболее полно характеризует данную технологическую операцию показатель теплотворной способности.

Наиболее полно исследовать как степень влияния каждого из показателей, так и их взаимодействие позволяет проведение ортогонального композиционного планирования второго порядка (ОКП) [4,5]. Исходными данными для проведения ОКП являются:

$x_1$  – гранулометрический состав 6 мм, интервал варьирования 4 мм;

$x_2$  – влажность топлива 40%, интервал варьирования 30%;

$x_3$  – температура 1200 °С, интервал варьирования 300 °С.

Количество опытов для ОКП рассчитывается по формуле:

$$N = N_0 + 2k + n_0,$$

где  $N$  – количество опытов,  $n_0$  – количество опытов у центре планирования,  $k$  – число факторов,  $N_0$  – число опытов полного факторного эксперимента  $2^k$ .

$$\text{То есть, } N = 8 + 2 \cdot 3 + 1 = 15.$$

Натуральные значения факторов перевели в кодированные переменные по формуле (1) [4,5]:

$$x_i = \frac{C_i - C_{i0}}{\alpha_i}, \quad (1)$$

где  $C_i$ ,  $C_{i0}$  – значение фактора в натуральных величинах, соответственно на верхнем, нижнем и нулевом уровне;

$\alpha_i$  – интервал варьирования фактора;

$i$  – номер фактора.

Матрица ОКП представлена в таблице 1.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента в кодированных переменных

№ досліду	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-1,215	0	0
10	1,215	0	0
11	0	-1,215	0
12	0	1,215	0
13	0	0	-1,215
14	0	0	1,215
15	0	0	0

Проверку однородности полученных данных производился по формуле (2) [4,5]

$$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{m-1} \quad (2),$$

Для проверки гипотезы об однородности оценок дисперсий пользовались критерием Кохрена, который определяется по формуле (3) [4,5]

$$G_{\max} = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{n=1}^N S_u^2} \quad (3),$$

После реализации эксперимента осуществлена статистическая обработка результатов, которая заключается в получении коэффициентов

регрессии математической модели и оценке ее адекватности исследовательской процесса. Известно, что один из факторов больше влияет на изменение состояния системы, чем другой [4]. Итак, на основе результатов исследований была поставлена цель – определить коэффициенты регрессии, провести оценку их значимости и проверить адекватность полученной модели.

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитывали по формулам (4) и (5) [4,5].

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iu} \cdot y_u}{N} \quad (4),$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u}{N} \quad (5),$$

Коэффициенты уравнения регрессии считаются значимыми, если выполняется следующее неравенство:

$$t_{ip} > t_{табл.},$$

де  $t_{ip}$  – расчетный критерий Стьюдента;

$t_{табл.}$  – табличное значение критерия Стьюдента.

Провели расчет критерия Стьюдента для каждого из коэффициентов регрессии по формуле (6) [4,5]:

$$t_{ip} = \frac{b_i}{S_{bi}} \quad (6)$$

Проверку адекватности уравнения регрессии проводят по критерию Фишера.

Дисперсию адекватности рассчитывали по формуле (7) [4,5]:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (\bar{y}_u - y_u)^2}{f} \quad (7)$$

Проверку адекватности уравнения проводят по формуле (8) [4,5]:

$$F = \frac{S_{ag}^2}{S^2} \quad (8)$$

Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2

	Ycp	(Ycp-Y) <sup>2</sup>	Yp	(Yp-Ycp) <sup>2</sup>			
1	960	880	920	920	3200	901,6657	336,1455
2	440	440	440	440	0	342,9083	9426,796
3	960	980	960	966,6666	266,6666	1055,013	7805,155
4	500	500	440	480	2400	496,2560	264,2589
5	880	920	840	880	3200	875,1058	23,95294
6	1760	1840	1820	1806,6666	3466,6666	1809,681	9,090686
7	880	1040	980	966,6666	13066,6666	1028,453	3817,62
8	2020	2040	2120	2060	5600	1963,029	9403,283
9	1960	1920	1900	1926,6666	1866,6666	1766,909	25522,43
10	1880	1880	1960	1906,6666	4266,6666	1995,218	7841,513
11	1360	1340	1340	1346,6666	266,6666	1405,989	3519,178
12	1680	1680	1700	1686,6666	266,6666	1592,306	8903,781
13	620	600	700	640	5600	611,9847	784,8537
14	1480	1480	1520	1493,3333	1066,6666	1486,914	41,20169
15	1760	1840	1880	1826,6666	7466,6666	1881,064	2959,082
<b>сумма</b>				52000		80658,34	
				$S_{\sigma} = 3466,667$		$S_{\text{ад}} = 10082,29$	

$b_0$	1881,06411222	Расчётный студент
$b_1$	93,9546250686	5,281019376
$b_2$	76,6738644473	4,309699106
$b_3$	360,053382272	20,23794877
$b_{12}$	20	0,960768922
$b_{13}$	373,3333333333	17,93435322
$b_{23}$	11,0000000000	1,521217461
$b_{11}$	11,0000000000	0,428067950
$b_{22}$	-258,711267008	9,176401656
$b_{33}$	-563,338578268	19,98142396

Табличный Студент **4,3**

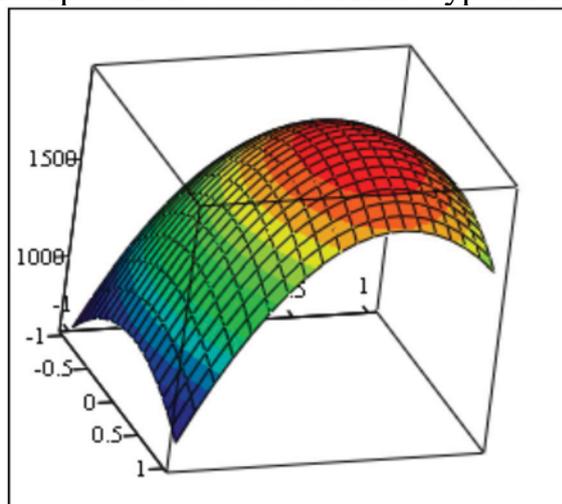
Расчетный Фишер **2,908353814606**

Посчитать коэф.      Показать план

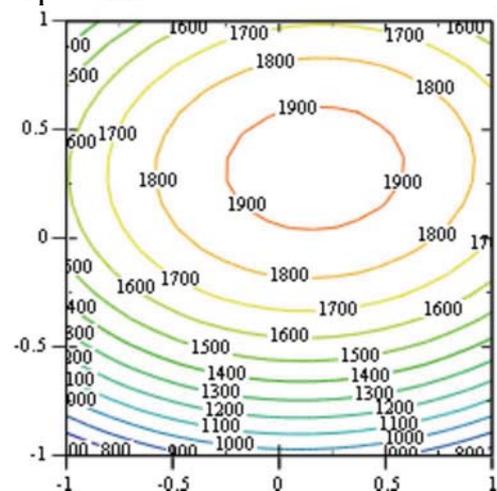
Как видно, для коэффициентов  $b_{12}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{11}$  условие  $t_{ip} > t_{\text{табл.}}$  не выполняется, то есть коэффициенты необходимо считать не существенными [4,5]. Уравнения регрессии в кодированной форме приобрело вид:

$$y = 1881,064 + 93,955 x_1 + 76,674 x_2 + 360,053 x_3 + 20 x_1 x_2 + 373,333 x_1 x_3 + 31,667 x_2 x_3 + 12,069 x_1^2 - 258,711 x_2^2 - 563,339 x_3^2$$

На рис. 4, 5, 6 отражены полученные поверхности и линии уровня построены в соответствии с уравнением регрессии.

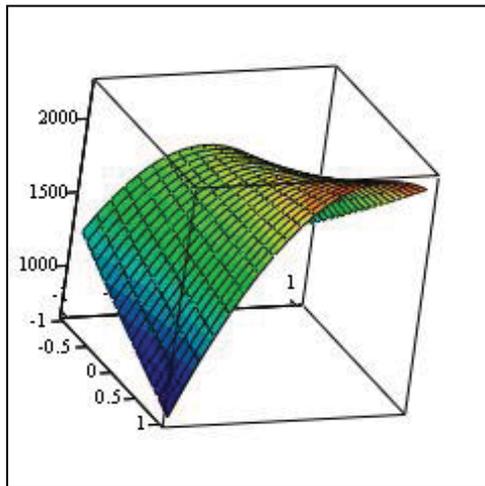


а)



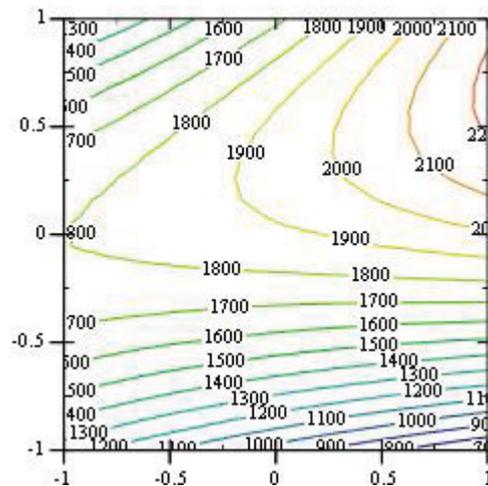
б)

Рис.4. Влияние температуры и влажности растительной биомассы на теплотворную способность синтез-газа. а) график поверхности, б) график контура.



M1

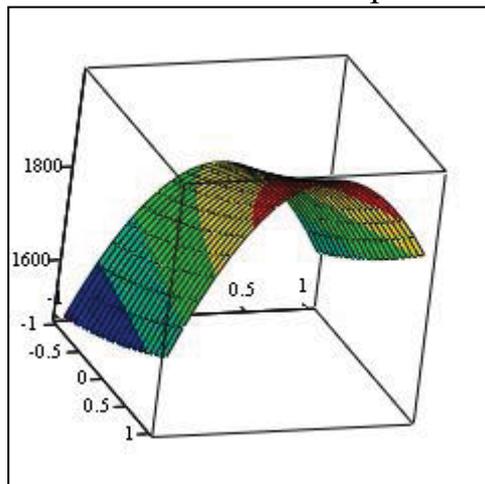
а)



M1

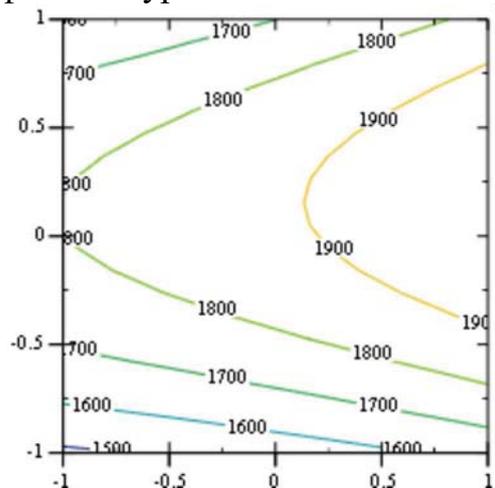
б)

Рис.5. Влияние температуры и гранулометрического состава растительной биомассы на теплотворную способность синтез-газа. а) график поверхности, б) график контура.



M2

а)



б)

Рис.6. Влияние гранулометрического состава и влажности растительной биомассы на теплотворную способность синтез-газа. а) график поверхности, б) график контура.

### Выводы

Доказано адекватность уравнения регрессии процесса газификации растительной биомассы, поскольку выполняется условие  $F_p < F_T$ , так как  $2,908 < 3,01$ .

Из анализа экспериментальных данных работы газогенераторной установки следует, что на теплотворную способность синтез-газа существенное влияние имеют избранные управляемые показатели. В частности, существенное влияние оказывает, в первую очередь, влажность

растительного сырья и температура в зоне горения. Поэтому, для повышения эффективности работы газогенератора целесообразно проводить предварительную сушку исходного сырья высокотемпературными продуктами сгорания газа на выходе из энергетического оборудования.

***Использованные источники информации:***

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий \ Ю.П. Адлер и др. – М.: Наука, 1976 – 280 с.
2. Математическая теория планирования эксперимента./ Под ред. С.М. Ермакова.-М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 392 с.
3. Налимов В.Н. Логические основания планирования эксперимента: учебник Е.А. Шалыгина -2-е изд. – М.: Колос, 2001.
4. Планирование эксперимента – Режим доступа: URL: [http://opds.sut.ru/electronic\\_manuals/pe/f053.htm](http://opds.sut.ru/electronic_manuals/pe/f053.htm)
5. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: конспект лекции Н.А. Спирина – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004.- 257 с.

***References:***

1. Adler, Yu.P. Planirovaniye eksperymenta pry poyske optymal'nykh uslovyj \ Yu.P. Adler y dr. – М.: Nauka, 1976 – 280 s.
2. Matematycheskaia teoryia planirovaniya eksperymenta./ Pod red. S.M. Ermakova.-M.: Nauka. Hlavnaia redaktsiya fyzyko-matematyeskoj lyteratury, 1983. 392 s.
3. Nalymov V.N. Lohycheskye osnovaniya planirovaniya eksperymenta: uchebnyk E.A. Shalyhyina -2-e yzd. – М.: Kolos, 2001.
4. Planirovaniye eksperymenta – Rezhym dostupa: URL: [http://opds.sut.ru/electronic\\_manuals/pe/f053.htm](http://opds.sut.ru/electronic_manuals/pe/f053.htm)
5. Spyrin N.A., Lavrov V.V. Metody planirovaniya y obrabotky rezul'tatov ynzhenernoho eksperymenta: konspekt lektsyy N.A. Spyrina – Ekaterynburh: HOU VPO UHTU – UPU, 2004.- 257 s.

*Рецензент: д.т.н., проф. Василенко С.М.*