

## Математическая модель рабочего процесса паросиловой установки для получения тепла и электрической энергии

*М.А. Таранов, А.С. Касьянов*

*Азово-Черноморский инженерный институт*

**Аннотация:** В статье рассматривается разработка математической модели в детерминированной форме записи основных зависимостей, определяющих процесс парообразования в паросиловой установке с целью получения тепла и электроэнергии при использовании в качестве источника энергии биотоплива. Теоретически были рассчитаны параметры рабочего процесса установки; термический коэффициент полезного действия турбины; и т.д. Используя представленную математическую модель приведенную в статье и данные федеральной службы государственной статистики получаем численные значения рабочего процесса установки работающей на биотопливе. Для удобства все сводные теоретические данные численных значений основных теоретических зависимостей математической модели рабочего процесса макета паросиловой установки для получения тепла и электрической энергии был занесены в таблицу. Таким образом, теоретические исследования показывают возможность производства электроэнергии требуемого качества при использовании биотоплива для получения пара высокого давления.

**Ключевые слова:** Математическая модель, рабочий процесс давление - объём, паросиловая установка, получения тепла и электрической энергии, биотопливо, коэффициент общего использования тепла.

Математическая модель в детерминированной форме записи основных зависимостей, определяющих процесс парообразования в паросиловой установке с целью получения тепла и электроэнергии[1,2], строилась следующим образом.

Рабочий процесс был рассмотрен в координатах «р-V». Термический КПД турбины определяется следующим образом

$$\eta = \frac{q_{нач}}{q_1} \quad (1)$$

Здесь:  $q_{нач}$  - количество полезного использованного тепла;  $q_1$  - количество подведённого к рабочему телу (пару) тепла;

Теплоту, полезно использованную в котельном агрегате[3,4], относительно к 1ч его работы выражают соотношением

$$BQ_1 = D \cdot Q_{Ka} \quad (2)$$

где  $B$  - часовой расход твердого топлива на котельном агрегате;  $D$  - часовая паропроизводительность котельного агрегата;  $Q_{ka}$  - количество теплоты полученное в котельном агрегате питательной водой, при её превращении в пар, вырабатываемый в котле, отнесённое к 1 кг произведённого пара[5,10];

Для перегретого пара

$$Q'_{ka} = D \left[ (i_{n.n} - i_{n.с}) + \frac{P_{H.ПП}}{100} \cdot (i' - i_{n.с}) \right] \quad (3)$$

где  $i_{n.n} - i_{n.с}$ ,  $i$  - соответственно, энтальпия (теплосодержание) перегретого пара, питательной воды и котловой воды;  $P_{H.ПП}$  - процент непрерывной продувки, колеблющейся в пределах (2-5%) от  $D$ ; Коэффициент полезного действия котла, выраженный в процентах

$$q_1 = \frac{D \cdot Q_{ka} \cdot 100\%}{B \cdot Q_P^P} \quad (4)$$

$Q_P^P$  - располагаемая теплота, приходящаяся на 1 кг топлива;

Процент потери тепла с уходящими газами[6]

$$q_2 = \frac{(i_{y.x} - \alpha_{y.x} \cdot i_{x.с}) \cdot (100 - q_4)}{Q_P^P} \quad (5)$$

$i_{y.x}$  - энтальпия уходящих газов;  $\alpha_{y.x}$  - коэффициенте избытка воздуха;  $q_4$  - проценты потери тепла от механической неполноты сгорания; Расчётный часовой расход твёрдого топлива

$$B_P = B \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) \quad (6)$$

Чистый КПД котла

$$\eta_{k.a}^{HT} = \eta_{k.a}^{бр} \cdot \left( 1 - \frac{Q_{c.n}^{эл} + Q_{c.n}^n}{Q_{k.a}} \right) \quad (7)$$

Здесь :  $Q_{c.n}^{эл}$  - количество тепла, содержащегося в паре, затраченного на выработку электрической энергии;  $Q_{c.n}^n$  - количество тепла, идущее на отопление;

Годовое количество тепла, получаемое при сжигании массы пожнивных остатков

$$Q_2 = M_c \cdot i_c \quad (8)$$

где  $M_c$  - годовой запас топлива;  $i_c$  - энтальпия (теплосодержание) 1кг топлива;

Теоретическая температура сгорания пожнивных остатков

$$t_{теор} = \frac{Q_H^P \cdot \eta'}{V_v \cdot c_v}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

Здесь :  $Q_H^P$  - низшая теплота сгорания топлива на единицу количества топлива;  $\eta'$  - коэффициент тепловыделения;

Действительная скорость пара в сопле Лаваля[7,11](Методические рекомендации и типовые программы энергетических обследований систем коммунального энергоснабжения / Госстрой России. - М., 2005. - 46 с. - Утв. приказом Госстроя России от 10.06.2003 №202. - 306-50.)

$$c_1' = \varphi \cdot c_{1t}' \quad (10)$$

Здесь :  $\varphi$  - скоростной коэффициент сопла;  $c_{1t}'$  - теоретическая скорость пара;

Потери тепла в сопле



$$h_c \cong 0,5 \cdot A \cdot z_c \cdot c_{1t}^2 \quad (11)$$

Здесь :  $z_c$  - коэффициент потери энергии пара в сопле;  $A$  - теоретический коэффициент потерь тепла в сопле от шероховатостей внутренней его поверхности

Степень влажности выходящего пара из сопла не должна превышать 12÷14%

$$1 - \chi \quad (12)$$

Расход пара

$$D_H^T = \frac{860 \cdot N_{\text{Э}}}{h_0 \cdot \eta_{0\text{Э}}} \quad (13)$$

Здесь :  $N_{\text{Э}}$  - номинальная электрическая мощность турбины, кВт;  $\eta_{0\text{Э}}$  - относительный электрический КПД;  $h_0$  - адиабатное теплопадение; 860 - тепловой эквивалент единицы работы.

Удельный расход пара при номинальной нагрузке турбины кг/кВт\*ч[8]

$$d_H = \frac{860 \cdot}{h_0 \cdot \eta_{0\text{Э}}} \quad (14)$$

Действительный расход пара

$$D_H^q = \chi \cdot d_H \cdot N_{\text{Э}} + (1 - \chi) \cdot d_H \cdot N \quad (15)$$

Коэффициент холостого хода турбины в долях единице

$$\chi = \frac{D_{\chi}}{D_H} \quad (16)$$

Здесь :  $D_H'$  - расход пара при работе турбины без нагрузки (при холостом ходе),  $\chi = 0,03-0,08$  без отбора пара,  $\chi = 0,8-0,12$  с отбором пара;

Удельный расход пара на 1 кВт\*ч при мощности турбины  $N$

$$d = \chi \cdot d_H \cdot \frac{N_H}{N} + (1 - \chi) \cdot d_H \quad (17)$$

Усилие, действующие со стороны пара на лопатки

$$P = (c_x - c_y) \cdot M \quad (18)$$

$c_x$  - проекция вектора скорости пара на ось  $x$ ;  $c_y$  проекция вектора скорости пара на ось  $y$ ;  $M$  - массовый расход пара.

Секундная работа пара на лопатках активной турбины

$$L_{0a} = u \cdot (c'_1 \cdot \cos \alpha_1 - u) \cdot \left( 1 + \psi \cdot \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} \right) \quad (19)$$

Максимальный КПД активной турбины

$$\eta_{\max} = \frac{\varphi^2}{2} \cos^2 \alpha_1 \cdot \left( 1 + \psi \cdot \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} \right) \quad (20)$$

Здесь :  $\beta_1$  и  $\beta_2$  - углы наклона лопатки турбины;

Число оборотов ротора турбины

$$n \cong 10 \cdot \frac{U}{R} \quad (21)$$

Здесь :  $U$  - окружная скорость лопатки турбины;  $R$  - расстояние от оси вращения ротора турбины до центра её рабочей лопатки.

Давление пара на лопатку

$$P_n = \frac{P}{S'} \quad (22)$$

Здесь :  $P$  - сила пара, действующего на лопатку;  $S'$  - рабочая площадь лопатки.

Форму и параметры лопатки определяются с помощью многофакторного эксперимента. Определение силы тока от напряжения и частоты вращения ротора генератора

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot c}\right)^2}} \quad (23)$$

Используя детерминированную математическую модель, приведенную выше и данные федеральной службы государственной статистики, рассчитываем численные значения рабочего процесса установки (таблица 1)[9].

Таблица № 1

Сводные теоретические данные численных значений основных теоретических зависимостей математической модели рабочего процесса макета паросиловой установки для получения тепла и электрической энергии.

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение и размерность	Численное значение
1	Коэффициент общего использования тепла (по диаграмме "V-P")	$\eta$	0,7
2	Теплоту, полезно использованное в котельном агрегате, относительно к 1ч его работы	$Q_1, \frac{\text{ккал}}{\text{ч}}$	103
3	Часовой расход твердого топлива на котельном агрегате	$B, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$	6,0
4	Количество теплоты полученное в котельном агрегате	$Q'_{ka}, \frac{\text{ккал}}{\text{ч}}$	$1,85 \cdot 10^4$
5	Коэффициент непрерывной продувки	$P_{н.пп}, \%$	1,8



6	Коэффициент полезного действия котла	$q_1, \%$	25
7	Процент потери тепла с уходящими газами	$q_2, \%$	2,5
8	Проценты потери тепла от механической неполноты сгорания	$q_4, \%$	2,5
9	Расчётный часовой расход твёрдого топлива	$B_p, \frac{кг}{ч}$	5,85
10	Чистый КПД котла	$\eta_{k.a}^{HT}$	$\approx 0,35$
11	Количество тепла, содержащегося в паре, затраченного на выработку электрической энергии	$Q_{c.n}^{эл}, \frac{ккал}{ч}$	$0,9 \cdot 10^4$
12	Количество тепла, идущее на отопление помещений	$Q_{c.n}^n, \frac{ккал}{ч}$	$0,95 \cdot 10^4$
13	Годовое (возможное) количество тепла, получаемое при сжигании массы пожнивных остатков	$Q_2, ккал$	$17,5 \cdot 10^7$
14	Годовой запас соломы	$M_c, кг$	146380
15	Энтальпия (теплосодержание) 1кг пожнивных остатков	$i_c, ккал/кг$	1200
16	Теоретическая температура сгорания пожнивных остатков	$t_{теор}, ^\circ C$	1050
17	Низшая теплота сгорания	$Q_H^p, \frac{МДж}{кг}$	17,5



18	Теоретическая скорость пара	$c'_{1t}, \frac{м}{с}$	14,25
19	Потери тепла в сопле паротурбины	$h_c, ккал$	61,35
20	Общий расход пара для паротурбины	$D_H^T, \frac{кг}{ч}$	35
21	Действительны расход пара для паротурбины	$D_H^q, \frac{кг}{ч}$	30,45
22	Расход пара для паротурбины на её холостом ходу с отбором пара на теплосеть	$D_H', \frac{кг}{ч}$	9,96
23	Усилие, действующие со стороны пара на лопатки паротурбины	$P, Н$	433,9
24	Секундная работа пара на лопатках активной турбины	$L, \frac{Н \cdot м}{с}$	61,6
25	Максимальный КПД активной турбины	$\eta_{max}$	0,67
26	Число оборотов паротурбины	$n, \frac{об}{мин}$	1400
27	Ориентировочно радиус лопаток турбины	$R, м$	0,1
28	Ориентировочно площадь лопаток паротурбины	$S', м^2$	$5 \cdot 10^{-3}$
29	Давление пара на площадь лопатки паротурбины(ориентировочно)	$P_d, Па$	$86 \cdot 10^3$
30	Сила тока на генераторе	$I, А$	22



---

---

	турбины		
31	Напряжение на генераторе турбины	U', В	220

Таким образом, теоретические исследования показывают возможность производства электроэнергии требуемого качества при использовании соломы для получения пара высокого давления.

### Литература

1. Байнес Я.М. Подobie моделирование в химической и нефтехимической технологии. Гостоптехиздат, 1961. -56 с.
2. Дмитриева В.Ф. Физика. Под редакцией В.Л. Прокофьева. М. "Высшая школа", 1993.- 102 с.
3. Шегельман И.Р., Васильев А.С. Анализ путей повышения конкурентоспособности энергетической биомассы // Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1769](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1769)
4. Амерханов Р.А, Бессараб А.С., Драганов Б.Х., Рудобашта С.П, Шишко Г.Г. Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства. М.: Колос-Пресс, 2002.- 420 с.
5. Средства механизации для производства и переработки сельскохозяйственной продукции в малых формах хозяйствования : каталог / ФГНУ "Росинформагротех". - М.: Росинформагротех, 2008. - 280 с.
6. Сидельников, В.И, Мирская С.Ю. Математическое моделирование автономных систем теплового снабжения: монография. - Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 2004. - 167 с.: ил. - Библиогр.: с.160-162.
7. Проектирование систем энергообеспечения: учебник / Р. А. Амерханов [и др.]; под ред. Р.А. Амерханова. - 2-е изд, перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2010. - 548 с.: ил. - (Учебники и учебные пособия для



студентов вузов). - Библиогр.: с.488-489. - Прил.: с.490-542. - Рек. М-вом сельского хозяйства РФ.

8. Жуков, В.В. Короткие замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ. - М.: МЭИ, 2004. - 192 с.: ил. - Библиогр.:с.186-189. - Прил.:с.180-185.

9. Касьянов А.С. Энергетический потенциал соломы как биотоплива // Инженерный вестник Дона, 2014, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2225.

10. Udo Hemmerling und Silke Naß, Deutscher Bauernverband Christian Alter. //Agrimente 2009 . Situationsbericht 2009, URL: situationsbericht.de Dezember 2008 (Redaktionsschluss: November 2008).

11. Nikolaisen L., Nielsen C., Larsen M.G. Straw for Energy Production. Technology Environment. Economy. - Aarhus: EN- TRYK 2006. - 46 p.

### References

1. Bajnes Ja.M. Podobie modelirovanie v himicheskoj i neftehimicheskoj tehnologii. [Similarity modeling in chemical and petrochemical technology] Gostoptehizdat, 1961. 56 p.

2. Dmitrieva V.F. Fizika. [Physics]. Pod redakciej V.L. Prokof'eva. M. "Vysshaja shkola", 1993. 102 p.

3. Shegel'man I.R., Vasil'ev A.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1769

4. Amerhanov R.A., Bessarab A.S., Draganov B.H., Rudobashta S.P., Shishko G.G. Teplojenergeticheskie ustanovki i sistemy sel'skogo hozjajstva [Thermal power units and systems of agriculture]. M.: Kolos-Press, 2002. 420 p.

5. Sredstva mehanizacii dlja proizvodstva i pererabotki sel'skohozjajstvennoj produkcii v malyh formah hozjajstvovanija: catalog [Mechanization means for production and processing of agricultural products in small forms of management: catalogue]. FGNU "Rosinformagroteh. M.: Rosinformagroteh, 2008. 280 p.



6. Sidel'nikov, V.I., Mirskaja S. Ju. Matematicheskoe modelirovanie avtonomnyh sistem teplotovogo snabzhenija: monografija [Mathematical modeling of Autonomous systems, teplotaha supply: monograph]. Rostov-na-Donu: SKNC VSh, 2004. 167 p.: il. Bibliogr: pp.160-162.

7. Proektirovanie sistem jenergoobespechenija: uchebnik [Design of power supply systems: textbook]. Amerhanov R. A. [i dr.]; pod red. R.A. Amerhanova. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Jenergoatomizdat, 2010. 548 p.: il. (Uchebniki i uchebnye posobija dlja studentov vuzov). Bibliogr.: pp.488-489. Pril.: pp.490-542. Rek. M-vom sel'skogo hozjajstva RF.

8. Zhukov, V.V. Korotkie zamykanija v jelektroustanovkah naprjazheniem do 1 kV [Short circuit in the electrical voltage up to 1 kV] M.: MJeI, 2004. 192 p.: il. Bibliogr.: pp.186-189. Pril.: pp.180-185.

9. Kas'janov A.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2225](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2225).

10. Udo Hemmerling und Silke Naß, Deutscher Bauernverband Christian Alter. Agrimente 2009. Situationsbericht 2009, URL: [situationsbericht.de](http://situationsbericht.de) Dezember 2008 (Redaktionsschluss: November 2008).

11. Nikolaisen L., Nielsen C, Larsen M.G. Straw for Energy Production. Technology Environment. Economy. Aarhus: EN- TRYK 2006. 46 p.