

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ПАЛИВА ПАРОГЕНЕРАТОРНИМИ УСТАНОВКАМИ НАФТОГАЗОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

<sup>1</sup>Ф.В.Козак, <sup>2</sup>Б.Д.Процюк, <sup>2</sup>М.І.Богатчук, <sup>3</sup>Л.О.Богатчук

<sup>1</sup> ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42111,  
e-mail: trans@nuing.edu.ua

<sup>2</sup> ЦНЕД ВАТ "Укрнафта", 76000, м. Івано-Франківськ, вул. Незалежності, 93, тел. (0342) 962220,  
e-mail: bobo1983@meta.ua

<sup>3</sup> Івано-Франківська експедиція з геофізичних досліджень в свердловинах ДГП "Укргеофізика",  
76000, Івано-Франківськ, вул. Українських Декабристів, 54, тел. (0342) 552363;  
e-mail: bobo1983@meta.ua

Виконано аналіз техніко-експлуатаційних характеристик пересувних установок парогенераторів нафтогазового технологічного транспорту. Розглянуто методику розрахунку витрати палива під час експлуатації парогенераторів у різних режимах генерації і подавання вологої насиченої пари і киплячої води споживачам. Запропоновано поліноміальне рівняння для визначення витрати палива для будь-яких режимів експлуатації, рекомендованих заводом-виготовлювачем залежно від тиску пари. Запропонована методика може бути використана для експресного визначення витрати палива підприємствами, що експлуатують установку.

Ключові слова: технологічний транспорт, парогенератор, пара, тиск, температура, паливо, розрахунок, витрата.

Выполнен анализ технико-эксплуатационных характеристик передвижных парогенераторных установок нефтегазового технологического транспорта. Рассмотрена методика расчета расхода топлива при эксплуатации парогенераторных установок при разных режимах генерации и подачи влажного насыщенного пара и кипящей воды потребителям. Предложено полиномиальное уравнение для определения расхода топлива при любых режимах эксплуатации, рекомендованных заводом-изготовителем в зависимости от давления пара. Предложенная методика может быть использована для экспрессного определения расхода топлива эксплуатирующими установку предприятиями.

Ключевые слова: технологический транспорт, парогенератор, пар, давление, температура, топливо, расчет, расход.

The analysis of the technical and exploitation characteristics had done. The method of calculation of expense of fuel is considered during exploitation of vapor generator devices on the different modes of generation and using of the moist saturated vapor and boiling water to the customers. The polynomial balance is offered for determination of expense of fuel on any modes of exploitation, recommended a factory by a manufacturer depending on pressure of vapor. The offered method can be used for express determination of expense of fuel by device exploiting enterprises.

Keywords: technological transport, vapor generator, vapor, pressure, temperature, fuel, calculation, consumption.

### Вступ

Мобільні парогенераторні установки, типу ППУ-3, ППУ-3М, ППУА-1200/100, ППУА-1600/100 та інші [1-7] призначені для депарафінізації привибійної зони свердловин, трубопроводів, резервуарів, арматури, підземного та наземного нафтогазопромислового обладнання, а також інших потреб як, наприклад, мийки автомобілів, відпарюванням землі і трубопроводів водопостачання, тепlopостачання тощо. Наведені вище установки мають один режим експлуатації. Виробниками ППУА 1600/100 (нової моделі) [7] передбачено додатковий режим II, призначений для операцій з обігрівання, миття тощо вологою насиченою парою низького тиску. Деякі техніко-експлуатаційні характеристики цих установок наведені в таблиці 1.

Як видно із таблиці 1, модифікована парогенераторна установка ППУА-1600/100 [7] має додатковий режим II, що характеризуються такими параметрами: максимальний тиск вихідної рідини  $p_m=0,78$  МПа; температура  $t=175$  °С; паропродуктивність  $D=1600$  кг/год і витратою палива  $B=35$  кг/год. Установки типу ППУ-3 і ППУ-3М майже не експлуатуються, так як вони зняті з виробництва.

### Аналіз та постановка проблеми

Що стосується норм на витрати палива парогенераторними установками, то вони для однієї і тієї ж установки (за різними інформаційними джерелами різні (табл. 2).

За аналізом даних таблиці 2 деякі галузеві нормативи витрат палива нижчі за нормативи,

**Таблиця 1 – Техніко-експлуатаційні характеристики установок типу ППУ**

Параметри	Тип установки				
	ППУ-3 [2, 3]	ППУ-3М [4]	ППУА- 1200/100 [5]	ППУА- 1600/100 [6]	ППУА- 1600/100 [7](модеф) режими I/II
Паропродуктивність, кг/год	1000	1000	1200	1600	1600
Тиск пари, МПа	10	10	10	10	10 / 0,78
Температура пари, °С	310	310	310	310	310 / 175
Теплопродуктивність (розрахункова), кДж/год (ккал/год)	-	-	-	3929200 (940000)	3929200 (940000)/ 1178760 (282000)
Жорсткість живильної води, мкг-екв/кг (мг-екв/л), не більше	10 (0,01)	10 (0,01)	10 (0,01)	10 (0,01)	10 (0,01)
Температура живильної води, °С, не нижче	5	5	5	5	5
Час, необхідний для отримання пари з моменту пуску установки, хв., не більше	-	-	-	20	20/20
Витрата палива паровим котлом, кг/год, не більше	82	82	83,2	110	110/35
Паливо для роботи установки	Дизельне ГОСТ 305-82	Дизельне ГОСТ 305-82	Дизельне ГОСТ 305-82	Дизельне ГОСТ 305-82	Дизельне ГОСТ 305-82

**Таблиця 2 – Витрати палива парогенераторними установками**

Тип установки	Встановлені витрати палива паровим котлом, кг/год (л/год), не більше			
	За інструкціями з експлуатації та інформаційними джерелами	За галузевим стандартом ДК “Укргаз- видобування”	За галузевим стандартом ВАТ “Укрнафта”	За галузевим стандартом ДК “Укртрансгаз”
ППУ-3 1000/100	82 кг/год [3]	*	*	*
ППУ-3М 1000/100	85 кг/год [4], 82 кг/год [3]	*	*	*
ПУУА-1200/100	83,2 кг/год [5]	33 л/год	31 л/год	*
ППУА-1600/100	110 кг/год [6]	61,9 л/год	56 л/год	133,3л/год
ППУА-1600/100 (модифікована) [7]:				
I-режим	110 кг/год [7]	*	56 л/год	133,3л/год
II-режим	35 кг/год [7]	*	37 л/год	42,4 л/год

Примітка: \* інформація відсутня.

встановлені інструкціями з експлуатації та інформаційними джерелами [1-7]. Мабуть, галузеві нормативи складені із врахуванням того, що установки можуть працювати в інших режимах і виробляти пару з нижчими фізичними параметрами, ніж це подано в роботі [8]. На даний час у зв'язку з енергетичною залежністю такий підхід до нормування витрат палива для парогенераторних установок є некоректним. Для всіх споживачів (експлуатаційників) норми витрат палива повинні бути єдиними і обчис-

люватись на одиницю виробленої пари або годину роботи парогенераторної установки у сталих режимах (за тиску  $p$ , температури  $t$  і міри сухості насиченої пари  $x$ ). Розбіжність в нормативах витрат палива, що передбачені інструкціями з експлуатації і галузевими нормами, можуть спонукати експлуатаційників до зловживань з витратами палива. Іншою причиною зловживань є те, що на установках даного типу відсутні вологоміри для визначення міри сухості на-

сиченої пари, за якою визначають витрату палива за різних її значень [8].

Стан вологості насиченої пари характеризується мірою сухості  $x$ . Міра сухості вказує на масову частку сухої насиченої пари у вологій насиченій парі. Величину  $(1-x)$  називають мірою вологості даної пари.

Експлуатаційні і теоретичні дослідження свідчать, що міра сухості пари суттєво впливає на надійну і безаварійну роботу парогенератора. Для запобігання інтенсивному відкладенню накипу в змійовиках котла інструкціями з технічної експлуатації парогенераторних установок і опублікованими науковими джерелами [3,4] рекомендується виробляти вологу насичену пару з мірою сухості до 80% за жорсткості води не більше 10 мкг-екв/кг.

Для побутових потреб (операцій з підігрівання, відігрівання, обігрівання, миття і пропарювання різних об'єктів та інших робіт вологою насиченою парою низького тиску в установках старого покоління [5,6] передбачена генерація пари в межах від  $t=179,4$  до  $309,53^{\circ}\text{C}$  з тиском пари в межах 30-50 кгс/см<sup>2</sup>, так як експлуатація установок в зазначених умовах на максимальних режимах недоцільна. Для згаданих режимів в інструкціях з експлуатації норми витрат палива відсутні. При депарафінізації свердловин або в інших випадках установок експлуатують на режимах передбачених в таблиці 1.

Реально парогенераторні установки часто використовують для отримання вологості і сухої насиченої пари за абсолютних тисків, нижчих 10 МПа (режим I) і 0,78 МПа (режим II), що вимагає меншої кількості теплоти порівняно з перетворенням 1 кг води в перегріту пару або киплячу воду. Слід зауважити, що установка [10] для режиму II конструктивно забезпечена окремою форсункою.

В технічних інструкціях з експлуатації [5-7] застерігається, що в установках типу ППУА відсутній прилад для визначення міри сухості пари, тому рекомендується керуватися наступним: температура пари не повинна перевищувати температури насичення за заданого абсолютного тиску. Режими роботи установок [5-7] наведені в табл. 3-6.

Аналізуючи рекомендовані режими (тиск і температуру) роботи парогенераторних установок [5-7], можна зробити висновок, що вони певною мірою за значеннями проміжних величин різні (не співпадають), але всі ці проміжні значення відповідають загальновідомим термодинамічним властивостям води і водяної пари в стані насичення (за тиском) [9].

Розбіжність між рекомендованими режимами експлуатації парогенераторних установок [5-7], а також їх конструктивна відмінність ускладнює формування єдиних норм та виконання розрахунків витрат палива для виробленої пари. Відхилення режимів роботи установок від лінії насичення (тобто за невідповідності термодинамічних температур і тисків стану насичення) дає можливість витрачати менше палива, але при цьому вироблена пара не від-

повідає необхідним фізичним властивостям. Для розв'язання згаданої проблеми, а також встановлення реальних витрат палива пропонується методика для визначення витрат палива та подаються рекомендації щодо належної експлуатації парогенераторних установок [5-7].

### Формування мети досліджень

З метою отримання проміжних значень (не занесених в рекомендовані в таблицях 3-6), на яких може працювати установка, використовують табличні значення термодинамічних властивостей води і водяної пари в стані насичення (за тиском) за джерелом [9] і будують графік залежності температури від тиску в діапазоні граничних значень, рекомендованих інструкціями з експлуатації установок [5-7]. Використовуючи ПЕОМ і програму "Excel" будують графік залежності температури від тиску за даними, наведеними в таблицях 3-6. Для прикладу вибрана установка нового покоління, яка може працювати у двох режимах [7]. Отримані графіки за допомогою програми "Excel" перетворюють в лінію тренда, зображену на рис. 1.

Лінія тренда описується поліномом четвертої степені з вірогідною апроксимацією не менше  $R^2 = 1$  (режим I, рис. 1а) і  $R^2 = 1$  (режим II, рис. 1б), що свідчить про високу точність і можливість використання отриманих рівнянь для розрахунку температури пари, що повинна відповідати заданому тиску на лінії насичення. За отриманими рівняннями (або побудованими графіками) можна визначити необхідну температуру в котлі, якої під час експлуатації установок мають дотримуватись оператори. В поліноміальній залежності замінивши  $x$  на  $p$  і  $y$  на  $t$  отримаємо такі рівняння:

(режим I) при  $R^2 = 1$

$$t_1 = -0,0132p_m^4 + 0,4069p_m^3 - 5,093p_m^2 + 39,231p_m + 153,81, \text{ } ^{\circ}\text{C}; \quad (1)$$

(режим II) при  $R^2 = 1$

$$t_2 = -108,59p_m^4 + 282,83p_m^3 - 301,89p_m^2 + 207,43p_m + 101,92, \text{ } ^{\circ}\text{C}, \quad (2)$$

де:  $t_1, t_2$  – відповідно розрахункова температура вологості насиченої пари на лінії насичення за сталого тиску  $p_m, \text{ } ^{\circ}\text{C}$  (установці ППУА-1600/100 режиму I ( $p_m = 1,96 \dots 9,8$  МПа;  $t = 213,85 \dots 310,26$   $^{\circ}\text{C}$ ) і режиму II ( $p_m = 0,098 \dots 0,79$  МПа;  $t = 119,62 \dots 174,53$   $^{\circ}\text{C}$ ) відповідно присвоєно індекси 1 і 2);  $p$  – тиск вологості насиченої пари в котлі, МПа.

Для зручності і полегшення роботи операторів (машиністів) установок під час роботи у проміжних режимах (тисків і температур), що відсутні в таблиці, наведеній в інструкції з експлуатації установок, можна оформити таблиці тисків і відповідних їм температур з малим кроком через 0,098 МПа, наприклад, від 0,098 до 9,8 МПа, скориставшись довідниковими даними термодинамічних таблиць [9], або з достатньо високою точністю температуру при відповідному тиску можна визначити за формулами (1, 2).

**Таблиця 3 – Режими, вихідні дані і розрахунки витрат палива парогенераторною установкою ППУА-1600/100 [7] (режим I) при  $x=0$ ;  $x=0,8$**

$P_m$ , МПа	$t$ , °C	$i'' \cdot x$ , кДж/кг ( $x=0,8$ )	$i'$ , кДж/кг	$q$ , кДж/кг ( $x=0,8$ )	$V_{x=0,8}$ , кг/ГОД	$q$ , кДж/кг ( $x=0$ )	$V_{x=0}$ , кг/ГОД
1,96	213,85	2238,4308	915,2345	2371,198	108,1728	864,9545	39,45877
2,06	216,23	2239,1006	926,1202	2374,045	108,3027	875,8402	39,95537
2,16	218,53	2239,4356	937,0058	2376,557	108,4173	886,7258	40,45197
2,25	220,75	2240,1055	947,0542	2379,236	108,5395	896,7742	40,91037
2,35	222,9	2240,4404	957,1025	2381,581	108,6465	906,8225	41,36877
2,45	224,99	2240,7754	966,7321	2383,842	108,7496	916,4521	41,80807
2,94	234,57	2241,4452	1011,95	2393,555	109,1927	961,6696	43,87087
3,43	243,04	2240,7754	1052,143	2400,924	109,5289	1001,863	45,70446
3,92	250,64	2239,4356	1088,987	2406,953	109,8039	1038,707	47,38526
4,41	257,56	2237,091	1122,9	2411,391	110,0064	1072,62	48,93236
4,9	263,93	2234,0765	1154,719	2414,74	110,1592	1104,439	50,38395
5,39	269,84	2230,727	1184,446	2417,336	110,2776	1134,166	51,74005
5,88	275,36	2226,7077	1212,916	2419,011	110,354	1162,636	53,03885
6,37	280,55	2222,3534	1239,711	2420,016	110,3999	1189,431	54,26125
6,86	285,44	2217,6642	1265,67	2420,518	110,4228	1215,39	55,44544
7,35	290,08	2212,3051	1290,79	2420,183	110,4075	1240,51	56,59144
7,84	294,48	2206,6111	1314,655	2419,262	110,3655	1264,375	57,68014
8,33	298,69	2200,917	1338,101	2418,257	110,3196	1287,821	58,74974
8,82	302,71	2194,5531	1360,71	2416,415	110,2356	1310,43	59,78114
9,31	306,56	2187,8542	1382,9	2414,154	110,1325	1332,62	60,79343
9,8	310,26	2181,1553	1404,671	2411,81	110,0255	1354,391	61,78663

**Таблиця 4 – Режими, вихідні дані і розрахунки витрат палива парогенераторною установкою ППУА-1600/100 [7] (режим II) при  $x=0$ ;  $x=0,8$**

$P_m$ , МПа	$t$ , °C	$i'' \cdot x$ , кДж/кг ( $x=0,8$ )	$i'$ , кДж/кг	$q$ , кДж/кг ( $x=0,8$ )	$V_{x=0,8}$ , кг/ГОД	$q$ , кДж/кг ( $x=0$ )	$V_{x=0}$ , кг/ГОД
0,098	119,62	2164,7431	502,0811	2516,128	101,0416	451,8011	20,61093
0,196	132,88	2179,4806	558,5191	2576,016	102,2289	508,2391	23,1856
0,29	142,92	2189,8639	601,6432	2620,898	103,096	551,3632	25,1529
0,39	151,11	2197,9025	636,8123	2657,072	103,7836	586,5323	26,7573
0,49	158,08	2204,2665	666,9572	2687,552	104,349	616,6772	28,1325
0,59	164,17	2209,6256	693,7528	2714,348	104,838	643,4728	29,35489
0,69	169,61	2213,9798	717,1988	2737,459	105,2505	666,9188	30,42449
0,79	174,53	2217,6642	738,9702	2758,56	105,6172	688,6902	31,41769

\*  $x$  – міра ступеня сухості пари. Наведені норми витрат палива нормативами бути не можуть

На практиці оператори (машиністи) парогенераторних установок часто не дотримуються вказаних режимів і відпускають споживачам вологу насичену пару за нижчих значень міри сухості ( $x < 80\%$ ), а також в режимах, за яких температура пари в котлі не відповідає термодинамічному тиску лінії насичення а, значить, для отримання 1 кг такої пари буде витрачена менша кількість теплоти і, разом з тим, витрачено меншу кількість палива порівняно з нормативною величиною.

З метою спрощення методики розрахунків питомої витрати палива парогенераторними установками будь-якого типу через параметри, що реєструються приладами тиску і температу-

ри, використовуємо термодинамічні властивості води і водяної пари в стані насичення (за тиском) [9]. Для цього розглянемо теоретичну розрахункову питому витрату палива при роботі установок у режимах, рекомендованих в роботі [7].

### Теоретичні основи

Для отримання сухої насиченої пари з води за температури  $t_B < t_S$  за умови сталого абсолютного тиску (суха насичена пара має температуру насичення  $t_S$ ) питома кількість теплоти складає [3, 10, 11]

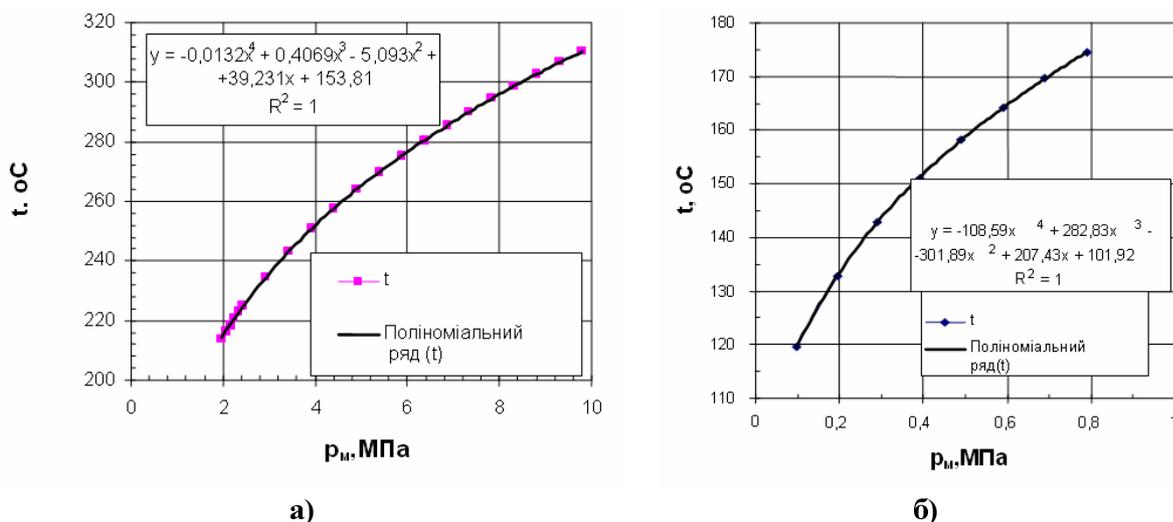
**Таблиця 5 – Режими, вихідні дані і розрахунки витрат палива парогенераторною установкою ППУА-1600/100 (старого покоління [6])**

$p_m, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$i''$ , кДж/кг	$i'$ , кДж/кг	$q$ , кДж/кг $x=0,8$	$V_{x=0,8}$ , кг/год	$q$ , кДж/кг $x=0$	$V_{x=0}$ , кг/год
1,078	179,04	2776,27	758,65	2322,4633	105,9496	708,3682	32,31539
1,568	197,36	2789,66	840,29	2349,5100	107,1834	790,0108	36,03988
2,058	211,38	2796,78	903,93	2367,9319	108,0238	853,6501	38,94308
2,548	222,9	2800,55	957,1	2381,5809	108,6465	906,8225	41,36877
3,038	232,76	2801,81	1003,2	2391,7967	109,1125	952,8773	43,46977
3,528	242,5	2801,39	1044,6	2399,7516	109,4754	994,3266	45,36066
4,018	249,18	2799,71	1081,9	2405,8644	109,7543	1031,5891	47,06056
4,508	256,23	2797,2	1116,2	2410,7210	109,9758	1065,9209	48,62676
4,998	262,7	2793,43	1148,4	2414,1542	110,1325	1098,1592	50,09745
5,488	268,69	2789,25	1178,6	2416,8338	110,2547	1128,3042	51,47265
5,978	274,29	2784,64	1207,5	2418,9272	110,3502	1157,1931	52,79055
6,468	279,54	2779,2	1234,7	2420,0157	110,3999	1184,4073	54,03205
6,958	284,48	2773,34	1260,6	2420,5182	110,4228	1210,3655	55,21624
7,448	289,17	2766,64	1285,8	2420,1832	110,4075	1235,4863	56,36224
7,938	293,62	2759,94	1310	2419,6808	110,3846	1259,7697	57,47004
8,428	297,86	2752,4	1333,5	2418,3410	110,3235	1283,2158	58,53964
8,918	301,92	2744,87	1356,1	2416,8338	110,2547	1305,8245	59,57104
9,408	305,8	2736,49	1378,3	2414,5729	110,1516	1328,0146	60,58333
9,898	309,53	2728,12	1400,1	2412,2283	110,0446	1349,7859	61,57653

**Таблиця 6 – Режими, вихідні дані і розрахунки витрат палива парогенераторною установкою ППУА-1200/100 [5]**

$p_m, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$i''$ , кДж/кг	$i'$ , кДж/кг	$q$ , кДж/кг $x=0,8$	$V_{x=0,8}$ , кг/год	$q$ , кДж/кг $x=0$	$V_{x=0}$ , кг/год
1,078	179,04	2776,27	758,65	2322,4633	80,1430	708,3682	24,4442
1,568	197,36	2789,66	840,29	2349,5100	81,0763	790,0108	27,2615
2,058	211,38	2796,78	903,93	2367,9319	81,7120	853,6501	29,4576
2,548	222,9	2800,55	957,1	2381,5809	82,1830	906,8225	31,2924
3,038	232,76	2801,81	1003,2	2391,7967	82,5355	952,8773	32,8817
3,528	242,5	2801,39	1044,6	2399,7516	82,8101	994,3266	34,3120
4,018	249,18	2799,71	1081,9	2405,8644	83,0210	1031,5891	35,5978
4,508	256,23	2797,2	1116,2	2410,7210	83,1886	1065,9209	36,7825
4,998	262,7	2793,43	1148,4	2414,1542	83,3071	1098,1592	37,8950
5,488	268,69	2789,25	1178,6	2416,8338	83,3995	1128,3042	38,9352
5,978	274,29	2784,64	1207,5	2418,9272	83,4718	1157,1931	39,9321
6,468	279,54	2779,2	1234,7	2420,0157	83,5093	1184,4073	40,8712
6,958	284,48	2773,34	1260,6	2420,5182	83,5267	1210,3655	41,7670
7,448	289,17	2766,64	1285,8	2420,1832	83,5151	1235,4863	42,6339
7,938	293,62	2759,94	1310	2419,6808	83,4978	1259,7697	43,4718
8,428	297,86	2752,4	1333,5	2418,3410	83,4515	1283,2158	44,2809
8,918	301,92	2744,87	1356,1	2416,8338	83,3995	1305,8245	45,0611
9,408	305,8	2736,49	1378,3	2414,5729	83,3215	1328,0146	45,8268
9,898	309,53	2728,12	1400,1	2412,2283	83,2406	1349,7859	46,5781

\*  $x$  – міра ступеня сухості пари. Наведені норми витрат палива нормативами бути не можуть



а – режим I ( $p_m = 1,96 \dots 9,8$  МПа;  $t = 213,85 \dots 310,26$  °C);  
 б – режим II ( $p_m = 0,098 \dots 0,79$  МПа;  $t = 119,62 \dots 174,53$  °C)

Рисунок 1 – Залежність температури  $t$  водяної пари від тиску  $p_m$  на лінії її насичення

$$q_{снт} = c_p \cdot (t_S - t_B) + r = c_p \cdot (t_S - t_B) + (i'' - i') = i'' - c_p \cdot t_B, \text{ кДж/(кгК)}, \quad (3)$$

де:  $c_p$  – питома масова ізобарна теплоємність води, кДж/(кгК); (для подальших розрахунків згідно рекомендацій [10] приймаємо  $c_p = 4,19$  кДж/(кгК));

$t_B$  – температура живильної води, яка в практичних умовах коливається в певних межах, °C; (далі приймаємо  $t_B = 12$  °C);

$t_S$  – температура сухої насиченої пари, °C;

$r$  – питома теплота пароутворення ( $r = i'' - i'$ ), кДж/кг;

$i''$  – ентальпія сухої насиченої пари, кДж/кг;

$i' = c_p \cdot t_S$  – ентальпія киплячої води, кДж/кг;

$i_B = c_p \cdot t_B$  – ентальпія живильної води, кДж/кг.

Для отримання 1 кг вологої насиченої пари з мірою сухості  $x$  з води, температурою  $t_B < t_S$ , витрата питомої теплоти складе [3, 10, 11]

$$q_x = c_p \cdot (t_S - t_B) + x \cdot r = i' \cdot (1 - x) + x \cdot i'' - i_B, \text{ кДж/(кгК)}, \quad (4)$$

де  $x$  – міра сухості вологої насиченої пари (може змінюватися від 0 до 1).

Підставивши в формулу 4 замість  $i_B$  значення  $c_p \cdot t_B$ , отримаємо кількість підведеної питомої теплоти до води для отримання 1 кг вологої насиченої пари

$$q_x = i''x + i' \cdot (1 - x) - c_p \cdot t_B, \text{ кДж/кг.} \quad (5)$$

### Основний матеріал досліджень

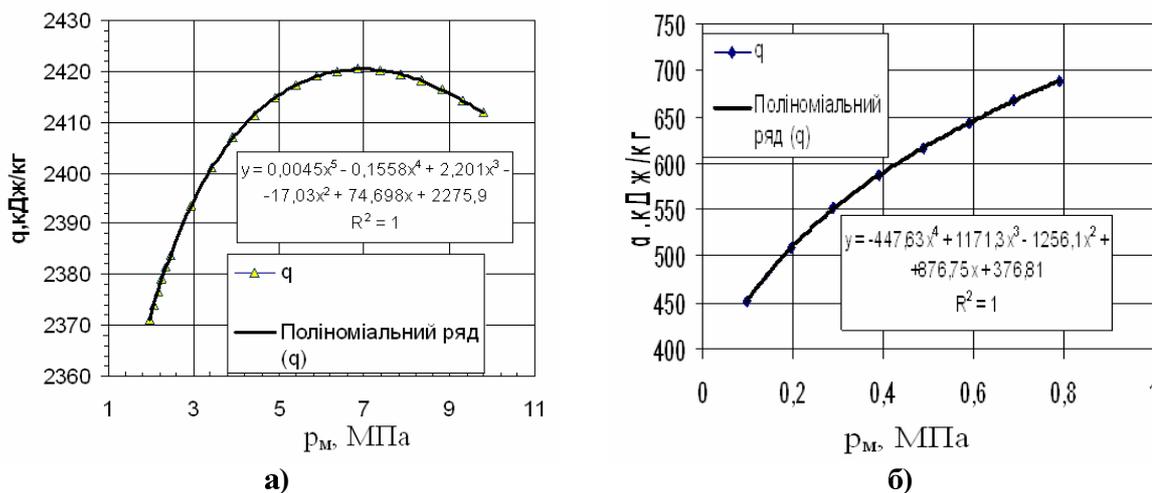
Кількість підведеної питомої теплоти до води для отримання 1 кг вологої насиченої пари, з метою спрощення механізму розрахунків і зручності використання методик визначення витрат палива парогенераторними установками за умови сталого абсолютного тиску і відповідних йому температур, які фіксуються приладами установок, можна отримати з допомогою графічно-аналітичних методів обробки значень термодинамічних таблиць [9] в графіки і емпіричні формули за допомогою ПЕОМ використавши програму “Excel”. Як приклад візьмемо установку нового покоління з двома режимами [7]. Для виконання розрахунків і побудови графіків використаємо ентальпії, і наведені в таблиці 3. За обчисленими значеннями кількості підведеної питомої теплоти до води для отримання 1 кг вологої насиченої пари за різних тисків будують графік витрат теплоти в залежності від тиску вологої насиченої пари в межах граничних значень, рекомендованих інструкціями з експлуатації установок [5-7]. Отримані графіки за допомогою програми “Excel” перетворюють в лінію тренда, яка описується поліноміальною залежністю зображеною на рис. 2.

Зображені на рис. 2 залежності можна записати наступним чином замінивши  $x$  на  $p$  і  $u$  на  $q_x$

$$q_x^1 = 0,0045p_m^5 - 0,1558p_m^4 + 2,201p_m^3 - 17,03p_m^2 + 74,698p_m + 2275,9, \text{ кДж/кг, при } R^2=1; \quad (6)$$

$$q_x^2 = -447,63p_m^4 + 1171,3p_m^3 - 1256,1p_m^2 + 876,75p_m + 376,81, \text{ кДж/кг, при } R^2 = 1. \quad (7)$$

де:  $q_x^1, q_x^2$  – кількість підведеної питомої теплоти до води для отримання 1 кг вологої насиченої пари відповідно для режиму 1 і 2, кДж/кг;  
 $p_m$  – тиск пароводяної суміші в котлі за показами манометра, МПа.



а – режим I ( $p_m = 1,96...9,8$  МПа;  $t = 213,85...310,26$  °С);  
 б – режим II ( $p_m = 0,098...0,79$  МПа;  $t = 119,62...174,53$  °С)

Рисунок 2 – Залежність кількості підведеної теплоти  $q$  до води від тиску  $p_m$  вологої насиченої пари

Наведені формули справедливі для тисків, яким відповідає температура лінії насичення пари (тобто для температур, вказаних в таблицях [3-5] і збігаються з [9]).

Слід зауважити, що дана методика може бути використана і для інших термодинамічних розрахунків пароводяних процесів.

Знаючи нижчу теплоту згоряння будь-якого палива за його робочою масою кДж/кг і кількість підведеної питомої теплоти до води для отримання 1 кг вологої насиченої пари, можна знайти масову теоретичну витрату (частку) палива на отримання 1 кг вологої насиченої пари за формулами:

(режим I,  $x=0,8$ )

$$q_m^1 = \frac{q_x^1}{Q_H^P} = (0,0045p_m^5 - 0,1558p_m^4 + 2,201p_m^3 - 17,03p_m^2 + 74,698p_m + 2275,9) / Q_H^P, \frac{\text{кг палива}}{\text{кг пари}}, \quad (8)$$

(режим II,  $x=0$ )

$$q_m^2 = \frac{q_x^2}{Q_H^P} = (-447,63p_m^4 + 1171,3p_m^3 - 1256,1p_m^2 + 876,75p_m + 376,81) / Q_H^P, \frac{\text{кг палива}}{\text{кг пари}}, \quad (9)$$

де:  $q_m^1, q_m^2$  – питома масова теоретична витрата (частка) палива на отримання 1 кг вологої насиченої пари відповідно для режиму 1 і 2, кДж/кг;

$Q_H^P$  – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг. Для дизельного палива згідно [5-7]  $Q_H^P = 42654$  кДж/кг.

Тоді масова питома теоретична витрата палива за годину роботи установки складатиме

$$B = \frac{q_m \cdot D}{\eta_{бр}} \text{ кг/год}, \quad (10)$$

де:  $D$  – продуктивність парогенераторної установки, кг/год. Згідно технічної характеристики продуктивність установки ППУА-1200/100 – 1200 кг/год [5], ППУА-1600/100 – 1600 кг/год [6,7];

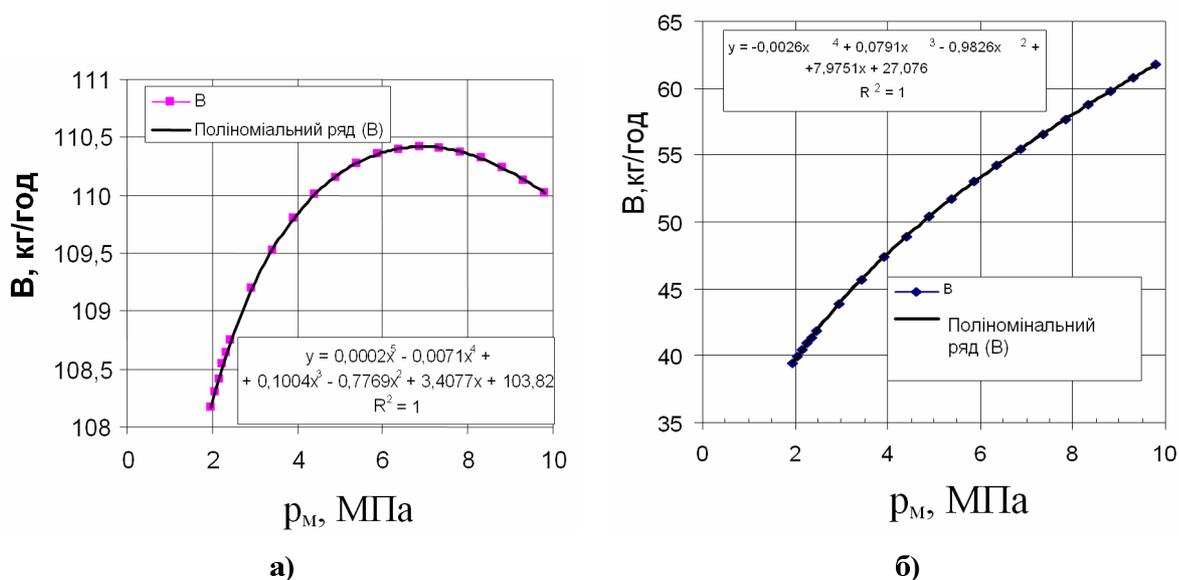
$\eta_{бр}$  – к.к.д. бруто парогенераторної установки. Відповідно коефіцієнт корисної дії бруто, визначений в роботі [8] за параметрами ( $p=10$  МПа,  $t=310$  °С,  $x = 0,8$  і  $t_g=12$  °С), для установок ППУА-1200/100 складатиме  $\eta_{бр} = 0,817$  і ППУА-1600/100  $\eta_{бр} = 0,824$ .

Узагальнивши вищенаведене, представимо формулу для визначення витрат палива парогенераторними установками

$$B = \frac{q_x \cdot D}{Q_H^P \cdot \eta_{бр}}, \text{ кг/год}. \quad (11)$$

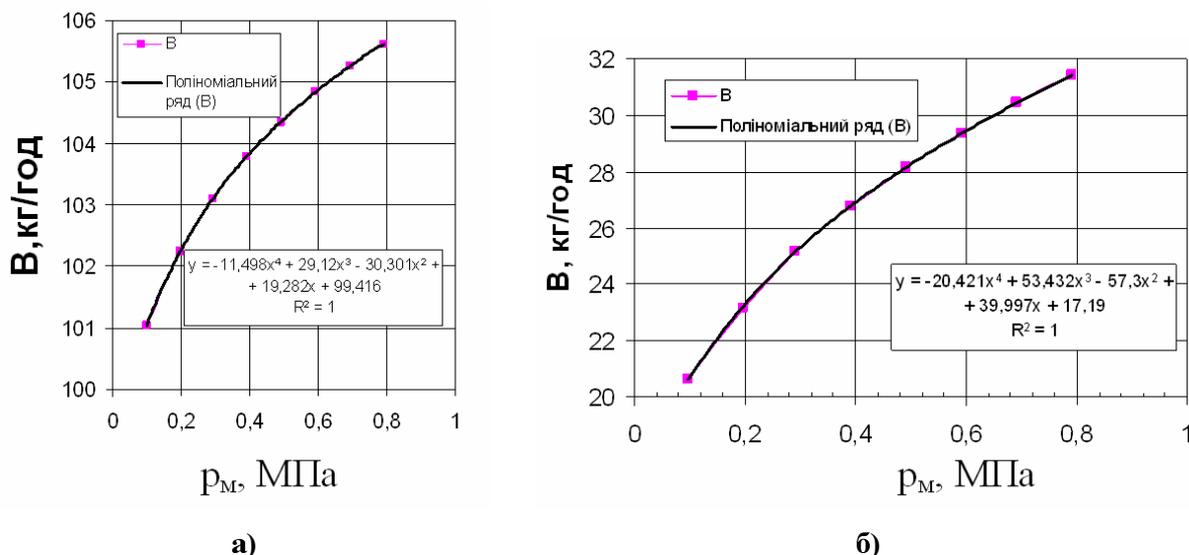
З метою спрощення розрахунків витрат палива організаціями, що експлуатують парогенераторні установки, і створення єдиної методики для їх визначення, а також усунення розбіжності в нормах витрат палива наведених в таблиці 2, використаємо вищенаведене і представимо залежність для визначення витрат палива в залежності від вихідних параметрів пари, а саме від тиску, якому відповідає температура на лінії насичення за міри сухості пари  $x = 0,8$  і  $x = 0$ .

Методика для визначення витрат палива у різних режимах експлуатації полягає в наступному. Спочатку для вказаних режимів за тиском пари, який фіксується манометром установки, за допомогою ПЕОМ і програми “Excel” будемо графіки залежності витрат палива, а після з допомогою графічно-аналітичних методів обробки отриманих значень перетворимо їх в емпіричні формули.



а – режим I ( $p_M - 1,96...9,8$  МПа;  $t - 213,85...310,26$  °С,  $x=0,8$ );  
 б – режим I ( $p_M - 1,96...9,8$  МПа;  $t - 213,85...310,26$  °С,  $x=0$ );

**Рисунок 3 – Залежність годинної витрати палива  $V$  від тиску  $p_M$  вологій насиченій парі установкою ППУА-1600/100**



а – режим II ( $p_M - 0,098...0,79$  МПа;  $t - 119,62...174,53$  °С,  $x=0,8$ );  
 б – режим II ( $p_M - 0,098...0,79$  МПа;  $t - 119,62...174,53$  °С,  $x=0$ );

**Рисунок 4 – Залежність годинної витрати палива  $V$  від тиску  $p_M$  вологій насиченій парі установкою ППУА-1600/100 [7]**

З метою отримання спрощених формул для розрахунку витрат палива парогенераторними установками за допомогою ПЕОМ (програми "Excel" і формули 11) проводимо розрахунки витрат палива за даними наведеними в таблицях 3-5 і прийнятих параметрах:  $t_B = 12$  °С,  $C_p = 4,19$  кДж/(кгК) і мірі сухості пари  $x = 0,8$  та  $x = 0$ . Для розрахунків візьмемо режими рекомендовані інструкціями з експлуатації [5-7]. При цьому використаємо термодинамічні властивості води і водяної пари в стані насичення (за тиском) використовуючи джерело [9].

Графіки витрат палива, лінія тренда та поліноміальна залежність витрат палива в залежності від манометричного тиску установки ППУА-1600/100 [7] – режим I зображені на рисунку 3.

Графіки витрат палива, лінія тренда та поліноміальна залежність витрат палива в залежності від манометричного тиску установки ППУА-1600/100 [7] – режим II зображені на рисунку 4.

Аналогічно наведеним вище графікам (рис. 3 а, б і 4 а, б), будуємо графіки витрат палива, лінію тренда та отримуємо поліноміальні

рівняння витрат палива залежно від манометричного тиску ( $p_m - 1,078...9,898$  МПа) і відповідній при цьому температурі ( $t - 179,04...309,53$  °C) для  $x=0,8$  і  $x=0,0$  установок ППУА-1600/100 (старого покоління [6]) та ППУА-1200/100 [5] за табличними даними таблиць 5,6.

Узагальнивши вищенаведене можна записати залежності витрат палива від тиску за температури лінії насичення. Для цього в поліноміальних залежностях, отриманих з графіків рисунків, замінимо  $x$  на  $p$  і  $y$  на  $B$ .

Витрата палива установкою ППУА-1200/100 [5] в діапазоні режимів ( $p_m - 1,078...9,898$  МПа;  $t - 179,04...309,53$  °C,) буде складати:

при  $x=0,8$  ( $R^2=1$ )

$$B_{x=0,8}^{1,2} = -0,00006p_m^6 + 0,0023p_m^5 - 0,0371p_m^4 +$$

$$+ 0,313p_m^3 - 1,5474p_m^2 + 4,6165p_m + 76,625, \text{ кг/год; (12)}$$

при  $x=0,0$  ( $R^2=1$ )

$$B_{x=0}^{1,2} = 0,0007p_m^5 - 0,241p_m^4 + 0,3163p_m^3 -$$

$$- 2,1581p_m^2 + 9,7991p_m + 16,06, \text{ кг/год. (13)}$$

Витрата палива установкою ППУА-1600/100 [6] в діапазоні режимів ( $p_m - 1,078...9,898$  МПа;  $t - 179,04...309,53$  °C,) буде складати:

при  $x=0,8$  ( $R^2=1$ )

$$B_{x=0,8}^{1,6} = -0,00008p_m^6 + 0,0031p_m^5 - 0,049p_m^4 +$$

$$+ 0,4138p_m^3 - 2,0456p_m^2 + 6,103p_m + 101,3, \text{ кг/год; (14)}$$

при  $x=0,0$  ( $R^2=1$ )

$$B_{x=0}^{1,6} = 0,001p_m^5 - 0,0318p_m^4 + 0,4182p_m^3 -$$

$$- 2,8531p_m^2 + 12,954p_m + 21,232, \text{ кг/год. (15)}$$

Витрата палива установкою ППУА-1600/100 режим-I [7] в діапазоні зміни параметрів ( $p_m - 1,96...9,8$  МПа;  $t - 213,85...310,26$  °C,) буде складати:

при  $x=0,8$  ( $R^2=1$ )

$$B_{x=0,8}^{1,6(I)} = 0,0002p_m^5 - 0,0071p_m^4 + 0,1004p_m^3 -$$

$$- 0,7769p_m^2 + 3,4077p_m + 103,82, \text{ кг/год, (16)}$$

при  $x=0,0$  ( $R^2=1$ )

$$B_{x=0}^{1,6(I)} = 0,0026p_m^4 + 0,0791p_m^3 - 0,9826p_m^2 +$$

$$+ 7,9751p_m + 27,076, \text{ кг/год. (17)}$$

Витрата палива установкою ППУА-1600/100 режим-II [7] в діапазоні зміни параметрів ( $p_m - 0,098...0,79$  МПа;  $t - 119,62...174,53$  °C,) буде складати:

при  $x=0,8$  ( $R^2=1$ )

$$B_{x=0,8}^{1,6(II)} = -11,498p_m^4 + 29,12p_m^3 - 30,301p_m^2 +$$

$$+ 19,282p_m + 99,416, \text{ кг/год, (18)}$$

при  $x=0,0$  ( $R^2=1$ )

$$B_{x=0}^{1,6(II)} = -20,421p_m^4 + 53,432p_m^3 -$$

$$- 57,3p_m^2 + 39,997p_m + 17,19, \text{ кг/год, (19)}$$

де:  $B_{x=0,8}^{1,}$ ,  $B_{x=0}^{1,}$ ,  $B_{x=0,8}^{1,6}$ ,  $B_{x=0}^{1,6}$ ,  $B_{x=0,8}^{1,6(I)}$ ,  $B_{x=0}^{1,6(I)}$ ,  $B_{x=0,8}^{1,6(II)}$ ,  $B_{x=0}^{1,6(II)}$  – відповідно годинна витрата палива для отримання пари за міри сухості ( $x=0,8$  і  $x=0$ ) установками позначеними: 1,2- ППУА-1200/100 [5]; 1,6- ППУА-1600/100 [6];

1,6(I)- ППУА-1600/100 (режим-I) [7] і 1,6(II)- ППУА-1600/100(режим-II) [7], кг/год;

$p_m$  – тиск вологої насиченої пари в котлі (пароводяної суміші за показами манометра), МПа.

За наведеними вище формулами 14-19 з достатньо високою точністю можна визначати витрати палива під час експлуатації парогенераторних установок у різних режимах.

### Приклад

Наприклад: необхідно визначити годинну витрату палива ППУА-1200/100 [5], якщо тиск пари  $p_m=4,998 \approx 5$  МПа, температура  $t=262,7$  °C при  $x=0,8$ . В формулу 12 замість  $p$  підставляємо цифру 4,998 і отримаємо:

$$B_{x=0,8}^{1,2} = -0,00006p_m^6 + 0,0023p_m^5 - 0,0371p_m^4 +$$

$$+ 0,313p_m^3 - 1,5474p_m^2 + 4,6165p_m + 76,625 =$$

$$= 83,2097 \text{ кг/год.}$$

За таблицею 6 для вказаних режимів  $B=83,3071$  кг/год, що на 0,0974 кг/год більше. Наведене свідчить про достатньо високу точність запропонованої методики, яка може бути використана під час експлуатації парогенераторних установок і для прогнозування потреби підприємств в паливних ресурсах на виконання запланованих обсягів робіт.

### Висновки та перспективи подальших досліджень

Проаналізувавши наведене вище, можна констатувати, що різні норми витрат палива на 1 год роботи установки, прийняті деякими організаціями некоректні з технічної і теоретичної точки зору. Як свідчать теоретичні розрахунки, неможливо отримати певну кількість пари при відповідних (встановлених) режимах роботи установки, витративши меншу кількість палива, ніж передбачено теоретичними розрахунками. Розроблена методика дасть можливість створити єдину методику для визначення витрат палива для різних режимів роботи установок і по можливості позбутися зниження або завищення норм витрат палива експлуатуючими установками організаціями.

До перспективи подальших досліджень слід віднести розробки методик визначення витрат палива парогенераторними установками при утворенні в котлі накипу та відпусканні пари споживачам з різною мірою сухості вологої насиченої пари.

### Література

- 1 Нефтепромысловое оборудование: справочник; под ред. Е.И. Бухаленко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 559 с.
- 2 Байбаков Н.К. Термоинтенсификация добычи нефти / Н.К. Байбаков, В.А. Брагин, А.Р. Гарушев, И.В. Толстой. – М.: Недра, 1971. – 280 с.

- 3 Поршаков Б.П. Основы термодинамики и теплотехники / Б.П. Поршаков, Б.Д. Романов. – М.: Недра, 1988. – 300 с.
- 4 Паровая передвижная установка ППУ-3М. Каталог. – М.: Недра, 1971. – 43 с.
- 5 Установка промышленная паровая передвижная ППУА-1200/100. Техническое описание и инструкция по эксплуатации (25.00.00.000 ТО). – 1989. – 72 с.
- 6 Установка промышленная паровая передвижная ППУА-1600/100. Техническое описание и инструкция по эксплуатации (35.00.00.000 ТО). – 2004. – 61 с.
- 7 Установка промышленная паровая передвижная ППУА-1600/100. Руководство по эксплуатации (ТУ 26-02-987-85). ОАО "Нальчикский машиностроительный завод". – Нальчик КБР, 2005. – 73 с.
- 8 Козак Ф.В. Про методику визначення витрат палива парогенераторними установками нафтогазового технологічного транспорту / Ф.В. Козак, Б.Д. Процюк, М.І. Богатчук // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2008. – № 2(18). – С. 89-93.
- 9 Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
- 10 Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка / О.Ф. Буляндра. – К.: Техніка, 2001. – 320 с.
- 11 Литвин А.М. Теоретические основы теплотехники / А.М. Литвин. – М.: Энергия, 1969. – 328 с.

*Стаття постуила в редакційну колегію  
14.05.10  
Рекомендована до друку професором  
Я. М. Дрогомирецьким*