

Загальна екологія

УДК 621.43.011.

Л. В. Лось

д. т. н.

Н. М. Цивенкова

провідний конструктор

Державний агроекологічний університет

ПРОБЛЕМА ЕНЕРГОНОСІВ ТА ЇЇ ВИРІШЕННЯ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ УКРАЇНИ БІОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ГАЗОГЕНЕРАТОРАМИ

Проаналізована проблема енергоносіїв. Виконано огляд технологій та конструкцій автотракторних газогенераторних установок для оцінки економічної та екологічної доцільності і технічної можливості їх виробництва і експлуатації в Україні. Проведена оцінка відновлювальних сировинних баз дешевих альтернативних палив в Україні та використання таких ресурсів у розвинених промислових країнах. Розроблена методика визначення впливу методів газифікації на експлуатаційно-функціональні характеристики генераторного газу.

Постановка проблеми

У наш час енергетичні потреби людства складають ≈ 11 – 12 млрд. т умовного палива (у. п.) в рік і задовольняються за рахунок нафти та газу на 58–60 %, вугілля – на 30 %, гідро- та атомної енергії – на 10–12 %.

В якості джерела енергії використовується також рослинна біомаса (БМ), деревина та ін. – біля 1 млрд. т у.п., чи біля 0,7 млрд. т нафтового еквіваленту (н. е.), що складає майже четверту частину щодо видобування та споживання нафти у світі (≈ 3 млрд. т) [1].

За даними XIII нафтового конгресу (1991 р.), розвідані запаси нафти у світі оцінюються в 140–145 млрд. т (160 млрд. м³), яких при сучасному її використанні може вистачити на 35–45 років [2].

У окремих регіонах проблеми з запасами нафти стоять більш гостро: 76 % запасів знаходяться на Близькому та Далекому Сході, в Латинській Америці. На решту регіонів залишається 24 %, з яких 6–7 % припадає на СНД. (Щодо СНД, то враховуючи рівень добування нафти у 2003 році, цих запасів може вистачити на 12–15 років).

В Україні потреба в нафті складає близько 30–40 млн. т, в цілому по СНД – 450 млн. т, і вона буде постійно збільшуватися, ініціюючи удосконалення методів енергетичного використання рослинної біомаси у зв'язку з обмеженістю запасів (для порівняння: США споживають біля 800 млн. т нафти).

Виробництво синтетичних палив у великих масштабах з метою заміни нафти – дуже складне завдання. Для виробництва 150 млн. т синтетичних палив (4-річна потреба України) необхідно біля 1 млрд. т бурого вугілля

© Л. В. Лось, Н. М. Цивенкова

(добування вугілля в 1990 році у Радянському Союзі складало біля 700 млн. т, у США – 800 млн. т).

Аналіз основних досліджень і публікацій

Доступною та відновлювальною сировиною для виробництва моторних палив є біомаса рослин. Наприклад, в Канаді лісова та лісопереробна промисловість більш ніж 70 % необхідної енергії отримує з відходів деревини (газифікацією та іншими методами).

У Радянському Союзі в 1940–1950 рр. були створені установки для отримання газоподібного моторного палива, які працювали на лісових та сільськогосподарських відходах. Щорічно вони виробляли 35 млрд. м³ енергетичних і технологічних газів [3].

Ресурси щорічно відновлювальної рослинної біомаси енергетично в 25 разів перевищують добування нафти. Щорічний приріст біомаси рослин на Землі складає від 170 до 200 млрд. т [4], тому в майбутньому передбачається суттєве розширення використання біомаси у вигляді газогенераторних палив.

В Україні за останні роки характерне зростання об'ємів місцевого палива і горючих відходів в енергозабезпеченні, доля яких разом з власною нафтою складає біля 20 %, тому актуальною є проблема ефективного використання альтернативних твердих палив.

Для сільськогосподарських виробництв України важким, але необхідним є переведення сільськогосподарської техніки на альтернативні види палива з невеликими капітальними вкладеннями. У структурі собівартості виробництва продукції енергетична складова досить вагома. Тому з урахуванням різкого подорожчання та дефіциту висококалорійних енергоносіїв на основі нафти в Україні виникла необхідність створення технологій та обладнання для отримання газогенераторних моторних палив на основі відновлювальних та місцевих видів палива (відходи деревообробки, с/г виробництва, рослинна біомаса і т.д.), вартість яких в наш час приблизно у 2–3 рази нижча від вартості нафтопродуктів.

Проведені дослідження показують, що вартість палива складає 30–40 % і 7–10 % від вартості продукції рослинництва і тваринництва відповідно. Отже, здешевлення палива у 2 рази приведе до зниження собівартості продукції рослинництва на 15–20 % і тваринництва – на 2,5–3,5 %.

Згідно зі статистичними даними, у 2002 р. для потреб сільського господарства в Україні було використано 4,3 млн. т пального нафтового походження на загальну суму близько 8 млрд. грн. У той же час потенційні ресурси надлишку соломи і стебел складають у середньому 21 млн. т, що еквівалентно 10,1 млн. т умовного палива (табл. 2). З вищенаведених даних видно, що для проведення сільськогосподарських робіт потенційні ресурси соломи і стебел приблизно у 2,6 разів перевищують річні потреби в паливі. Отже, тільки частина ресурсів соломи і стебел може бути використана для

потреб сільськогосподарської техніки, і це не враховуючи запаси деревини та інших аналогічних видів палива (див. табл. 2). Сумарні потенційні ресурси надлишку відходів деревини (включаючи кору) в лісовому господарстві та деревопереробних галузях промисловості становлять 3743 тис. м³, що еквівалентно 984 тис. т умовного палива [5]. Продаж сільськогосподарськими підприємствами надлишків лише соломи і стебел дав би їм змогу на отримані кошти (до 150 млн. грн., при вартості соломи 35 грн. за 1 т) придбати нову сільськогосподарську техніку, обладнання, матеріали, запчастини тощо.

У ряді країн (Італія, ФРГ, Аргентина та ін.) на землях, не придатних для сільського господарства, створені спеціальні енергетичні плантації швидкоростучих порід деревини. У Швеції плантації верби на заболочених землях дають 25 т деревини з 1 га у рік. Збирають деревину кожні два роки спеціальними комбайнами в зимову пору року, коли заболочена земля замерзає. Через рік після зрізання спостерігається максимальний приріст рослин – 10–11 т/га. Деревя подрібнюються на тріски розміром від 40 до 200 мм. З 1 млн. га виходить 15 млн. т деревини у вигляді сухого деревного палива, що еквівалентно 20 % енергії, яка необхідна для даної країни [6]. Очевидно, що потенціал України вищий.

У рамках Західно-Європейської програми розвитку відновлювальних енергоресурсів в Італії запущено біоенергетичний комплекс, розрахований на щорічну переробку 30 тис. т швидкоростучої БМ. Взагалі у Європі на долю БМ припадає 44,8 млн. т нафтового еквіваленту (н. е.) з перспективою зростання в найближчі роки до 135 млн. т н. е. [6].

При цьому технологія використання БМ крім економічного має також важливий соціальний аспект: створення нових робочих місць. Наприклад, в Австрії у наш час діяльність 10 тис. чол. пов'язана з підготовкою БМ (соломи, стебел та деревини) для подальшого використання в якості газогенераторного палива [7]. Така ж тенденція спостерігається і в інших країнах Європейського Союзу.

Важливим також є те, що сільськогосподарська техніка, яка працює на газогенераторному паливі, дозволяє значно зменшити викиди в атмосферу вихлопних і парникових газів, підвищуючи тим самим екологічність виробленої продукції. Вищенаведені економічні розрахунки не враховують потенційної можливості продажу одиниць зниження викидів CO₂ та інших парникових газів. Цього можна досягти, оснащуючи сільськогосподарську техніку газогенераторами (за попередніми розрахунками, ці заходи зменшать кількість шкідливих викидів до 38 млн. т за рік). Одиниці зниження викидів CO₂, що регламентовані Готськими квотами, купуються за ціною 9 євро/т CO₂ еквіваленту (наприклад, в рамках програми Ecu-PT, яка фінансується міністерством економіки Нідерландів) [8]. Приймаючи до уваги цю можливість, використання газогенераторів для сільськогоспо-

дарської техніки дозволить залучити додаткові кошти (≈ 200 млн. євро/рік), що можуть бути інвестовані в подальший розвиток використання альтернативних видів палива.

Таким чином, в Україні у найближчі роки найбільш перспективними для комерційного застосування будуть технології, які використовують транспортні та стаціонарні газогенератори. Впровадження у малі та середні фермерські господарства газогенераторних автомобілів в Україні, на відміну від ряду Західноєвропейських країн, визначається не жорсткою екологічною політикою, а економічною доцільністю використання місцевих видів палива. Вона може бути проілюстрована на прикладі, приведенному в таблиці 1, де можна побачити порівняльні характеристики застосування різних видів палива для здійснення перевезень вантажів в умовах сільської місцевості із застосуванням АТЗ типу ГАЗ-53А (найбільш розповсюджений вид рухомого складу сільських АТП).

Таблиця 1. Порівняльні характеристики застосування різних видів палива

Найменування показника	Бензин		Стиснутий газ		Біомаса	
	од. виміру	величина	од. виміру	величина	од. виміру	величина
Витрати пального	л/100км	24...30	л/100км	40...55	т/100км	0,11...0,16
Вартість пального	грн./л	2,4...2,6	грн./л	0,5...0,6	грн./т	36,5...37,5
Витрати на пальне	грн./100км	65...70	грн./100км	20...33	грн./100км	4,17...6
Витрати на транспортування	$\frac{\text{грн}}{\text{т} \cdot 100 \text{ км}}$	20...25	$\frac{\text{грн}}{\text{т} \cdot 100 \text{ км}}$	10...15	$\frac{\text{грн}}{\text{т} \cdot 100 \text{ км}}$	15...17
Вартість золи як мінерального добрива	-	-	-	-	грн./кг	4...4,5
Оплата праці водіїв	грн./год	1,7...2,3	грн./год	1,7...2,3	грн./год	2,7...3,3
Загальні експлуатаційні витрати	грн./100км	$\approx 59...90$	грн./100км	$\approx 40...60$	грн./100км	20...30

У транспортних газогенераторних установках можуть бути використані різні види місцевого палива рослинного чи копального походження (деревина, торф, хвоя, буре та кам'яне вугілля) та їх похідні (деревне вугілля, деревно-вугільні брикети, торф'яний кокс, торфобрикети, напівкокс тощо). Характеристики різних видів БМ як палива представлені в таблиці 3. Найбільш перспективним сьогодні є використання в якості газогенераторного палива соломи та сухих стебел, виходячи з їх низької вартості та значних запасів в Україні (табл. 2), а також палив на основі торфу, особливо для областей, які мають його великі запаси.

Таблиця 2. Ресурси БМ потенційно доступної для виробництва моторного палива по регіонах України [9]

Адміністративні одиниці	Потенційний надлишок соломи та стебел, тис. т				Можливе виробництво паливних брикетів з твердих побутових відходів, тис. т.	Можливий відбуток біогазу зі звальних твердих побутових відходів, тис. м ³	Можливе виробництво біогазу при переробці осаду каналізаційних стоків, тис. м ³	Можливе виробництво біогазу при переробці гною від тваринництва та птахівництва, тис. м ³	Ресурси дров, відходів деревини надлишку технологічної деревини, доступних для енергетичних потреб тис. м ³				Енергетичний еквівалент ресурсів биомаси, потенційно доступних для виробництва енергії, тис. т у. п.
	Надлишок соломи та стебел усіх культур	Потенційний надлишок соломи злаків	Потенційний урожай стебел кукурудзи	Потенційний урожай стебел та кошиків соняшнику					Всього	Лісотехнічні відходи	Відходи при переробці деревини	Кора від переробки деревини	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Україна	21119	11329	4863	4681	4119	2300	334,4	2308	7600	1628	1553	562	17503
Столичний економічний район: м. Київ	1346	954	340	40,9	619	279	72,8	337	1867	342	338	131	1910
Київська область	527	370	122	30,5	124	109	17,1	118	450	63	68	28	600
Житомирська область	361	326	31	1,0	88	70	6,9	106	795	187	124	53	555
Чернігівська область	457	259	187	9,4	88	100	5,0	114	536	89	95	41	4556
Північно-Східний економічний район	3354	2026	562	763,8	506	282	51,5	345	848	197	178	71	2541
Полтавська область	1217	538	397	281,6	123	112	8,8	130	212	47	57	27	869
Сумська область	617	514	56	46,4	113	64	8,1	95	364	91	62	27	561
Харківська область	1519	974	109	435,8	269	106	34,6	121	272	59	59	18	1111
Карпатський економічний район:	953	224	731	8,2	380	310	30,2	110	1872	549	394	130	1441
Львівська область	234	165	62	0,0	214	137	17,4	46	516	126	124	39	487
Івано-Франківська область	141	35	100	0,7	67	68	7,1	22	402	156	101	27	273
Закарпатська область	295	24	268	2,2	50	45	3,7	13	568	163	100	36	358
Чернівецька область	283	0,2	301	5,4	48	60	1,9	29	386	103	68	28	323
Північно-Західний економічний р-н	362	206	38	0,2	120	78	6,2	118	1145	210	251	81	675
Волинська область	198	75	6	0,0	59	37	23	61	511	103	77	31	328
Рівненська область	164	132	31	0,2	62	41	3,9	57	634	107	174	50	346
Придніпровський економічний р-н	3489	1752	471	1256	578	278	49,6	264	117	28	37	15	2392
Дніпропетровська область	1775	871	293	608,7	388	127	380	153	77	26	13	5	1277
Запорізька область	1714	861	178	647,7	190	151	11,7	111	40	2	24	10	1114
Центральний економічний район	2401	1230	663	500,8	171	122	12,3	223	366	61	73	27	1579

Закінчення таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Черкаська область	902	355	417	127,0	98	76	7,1	146	288	48	62	22	714
Кіровоградська область	1499	876	246	373,9	79	46	5,1	76	77	13	10	5	865
Подільський економічний район	1622	800	709	73,0	242	186	14,1	357	847	154	148	59	1501
Вінницька область	1034	531	410	64,3	98	70	5,1	152	310	49	58	18	782
Хмельницька область	299	112	174	7,0	89	56	5,4	138	350	67	56	26	416
Тернопільська область	289	157	125	1,7	55	60	3,5	67	187	38	35	15	304
Донецький економічний район	1739	570	281	888,3	873	301	53,4	196	296	51	88	33	1701
Донецька область	1090	436	115	537,5	592	187	38,1	120	101	16	51	21	1060
Луганська область	649	133	165	350,7	282	113	15,3	76	195	35	37	13	641
Причорноморський економ. р-н	5209	3053	1058	1067	419	312	31,0	274	187	29	33	12	3170
Одеська область	2453	1181	762	496,6	222	186	16,0	118	82	8	21	7	1525
Миколаївська область	1370	850	189	328,8	111	79	6,5	72	42	13	7	3	831
Херсонська область	1386	1022	107	242,2	85	48	8,5	84	63	7	5	2	815
Автономна республіка Крим	645	513	11	82,2	205	152	13,2	85	56	9	14	4	592
АР Крим	645	513	11	82,2	154	149	8,7	85	47	8	8	3	561
м. Севастополь	0	0	0	0	51	3	4,6	0	9	1	6	1	31

Як свідчить закордонний досвід, вартість деревної БМ залежить від відстані транспортування. Наприклад, у Швеції вартість деревної тріски/гранул для дрібних споживачів при транспортуванні на 50, 100 і 200 км складає відповідно 4,0/8,3; 4,4/8,6; 5,3/9,1 євро за 1 ГДж. У Фінляндії вартість відходів лісозаготівель складає від 2,3 євро за 1 ГДж, при транспортуванні на 20 км. і до 2,9 євро за 1 ГДж, при транспортуванні на 100 км. У Швеції вартість деревинної БМ складає (євро за 1 ГДж): відходів лісопильних заводів – 3,7; тріски лісової деревини – 4,3; деревних гранул – 6,0. У Данії вартість (євро за 1 ГДж): деревної тріски – 5,7; деревних гранул для великих споживачів – 6,7. Вартість деревної БМ в Австрії (євро за 1 ГДж): вологої кори – 2,8, сухої деревної тріски – 8,3. У Німеччині вартість відходів (євро за 1 ГДж): деревообробної промисловості – 1,8; відходів лісозаготівель – 4,9. З приведених даних можна побачити, що найбільш доцільно використовувати БМ власного виготовлення або місцевого.

Газогенераторні сільськогосподарські машини можна поділити на три групи:

1. Техніка, що тимчасово переведена для роботи на генераторному газі (для господарств, які знаходяться у фінансовій кризі, але мають змогу мати один причепний газогенератор для почергового обслуговування свого парку сільськогосподарської техніки).

2. Техніка, яку переобладнано для роботи на генераторному газі.

3. Техніка, спеціально виготовлена для роботи на генераторному газі.

Сучасні іноземні аналоги газогенераторів, які установлені на сільськогосподарських машинах третього типу, характеризуються питомою вагою газогенераторних установок $M=0,8 \text{ кг/м}^3$ газу. В сучасних умовах в Україні найбільш доцільно проектувати газогенераторні установки для техніки другого типу, тому вітчизняні розробки газогенераторів поступаються іноземним аналогам за питомою вагою $M=1,6 \text{ кг/м}^3$. Це обумовлено конструктивною специфікою двигунів, не призначених з самого початку для газогенераторного палива.

Дослідами було встановлено, що будь-який вид твердого палива, яке призначене для газогенераторних автомобілів, повинно мати: певний розмір кусків; певну вологість; мінімальну кількість шкідливих домішок, зокрема золи; температура плавлення попелу не повинна перевищувати певні межі; мінімальний вміст летючих речовин не повинен перевищувати норму; високі реакційні властивості; достатню механічну міцність; здатність до транспортування; високу теплотворну здатність в одиниці об'єму; невисоку вартість (включаючи вартість підготування та транспортування).

Причому перші сім показників забезпечують гнучкість та стійкість процесу газифікації (рис. 2), надійність роботи газогенератора та періодичність його дозавантажування. Досліджено вплив вмісту летючих в соломі на якість газу, отриманого в газогенераторі з оберненим процесом газифікації палива. Зі збільшенням кількості летючих з 4 до 22 % вміст у газі CO , H_2 , CO_2 та смол постійно зростає. В результаті цього теплотворна здатність газу збільшується на 22 %, підвищуючи потужність живленого двигуна внутрішнього згорання до 20 %. Максимальна кількість смол (при кількості летючих – 22 %) не перевищує $0,16 \text{ г/м}^3$, що є допустимим. При більшому вмісті летючих в паливі кількість смол в газі збільшується і переважає допустиму величину.

Встановлено, що вміст летючих в соломі більшою мірою залежить від її якості, що можна визначити за кольором. Так, у жовтій соломі летючих компонентів 65 % при фактичній теплоті згорання $13,5 \text{ МДж/кг}$, а в сірій соломі – до 75 % при фактичній теплоті згорання 15 МДж/кг , при цьому температура розм'якшення попелу збільшується з 1150 до 1500°C відповідно. Встановлено також, що кількість летючих, яка є в соломі в засушливе літо, менша, ніж в дощове приблизно на 15–18 %. Причому рівень концентрації лужних металів та сполук хлору теж залежить від її кольору. Зазвичай для зменшення корозії елементів обладнання та шлакових відкладень слід не менше ніж 5–7 днів витримувати солону у полі.

У залежності від методу газоутворення газогенератори поділяються на три типи:

- ✓ газогенератори прямого процесу газифікації;

- ✓ газогенератори оберненого процесу газифікації;
- ✓ газогенератори поперечного процесу газифікації.

Таблиця 3. Характеристика різних видів БМ як палива

Найменування палива	Вихідна сировина	Розмір кусків палива, мм	Вміст шкідливих домішок, % за вагою		Температура плавлення попелу, °С	Теплота згоряння кВт·г/кг		Об'ємна щільність*, кг/м ³	Енергетична щільність, кВт·год/м ³
			вологи W ^p	золи А ^c		вища ^{***}	нижча ^{***}		
Дизельне пальне	нафтопродукти	-	-	-	-	-	11,8		
Бензин АИ-93	нафтопродукти	-	-	-	-	-	12,2		
Дерев'яні цурки			20	1	1400	5,5	4,8		
Деревинне вугілля	Деревина, переважно	50×50×60 5-25 Ø20, n=15	20	до 3	1400	5,6	4,8		
Деревно-вугільні брикети	твердих порід		12	до 3	1400	10,5	8,5		
Дерев'яні гранули			10	1,5	1400	5,5	4,6	600	2756
Деревинні тріски твердих порід			50	1,5	1400	5,5	2,2	450	1009
Те ж, просушені***			30	1	1400	5,5	3,4	320	1094
Деревинні тріски м'яких порід			50	1,3	1350	5,5	2,3	350	785
Те ж, просушені***			30	0,8	1350	5,5	4	250	855
Торф'яний кокс	Торф верховий	10-25	5-8	$\frac{6}{4-8}$	1200	-	9,6	240	
Малозольний торф		50×60	30	до 4	1500	10	7,5		
Багатозольний торф		50×60	30	до 8	1500	10	7,5		
Хлібні злаки****			15	0,8	1050	5,2	4	175	703
Солома озимої пшениці**** ¹			15	0,8	1050	5,2	4	120	482
Кора			50	1,2	1150	5,6	2,3		727
Трава****			18	1	1050	5,1	3,8		750
Антрацит	АС	5-16	6	$\frac{6}{4-8}$	1250	-	13,5		

* Розрахунок за масою вологої сировини.

** Розрахунок за масою сухої сировини.

*** Сушка проводилась протягом 6 міс.

**** У вигляді сильно спресованих брикетів.

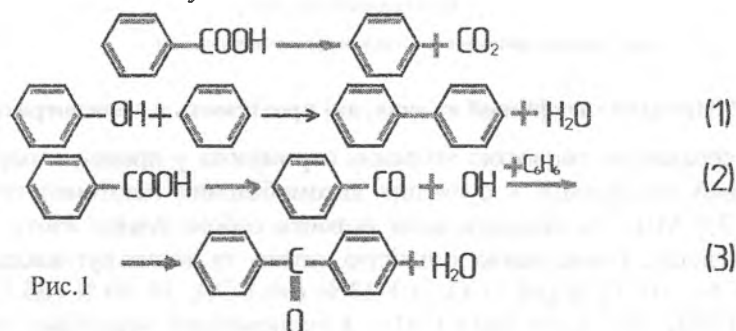
Мета, яку поставили перед собою автори – переведення сільськогосподарських машин на газогенераторні установки автомобільного типу, котрі працюють на альтернативних видах палива. В результаті їх широкого використання в Україні це дозволить зменшити собівартість сільськогосподарської продукції за рахунок низької собівартості таких палив та їх

великих запасів у регіонах і підвищити екологічну чистоту сільгосппродукції, яка забезпечується технологією газифікації твердих палив (наприклад, на основі таких новітніх технологій, як мембранне розділення повітря перед подачею до газогенератору).

Результати досліджень

Проведені експерименти показали, що найбільш перспективними з точки зору розширення номенклатури використаних палив є газогенератори з оберненим процесом газифікації, оскільки вони відмінно працюють на деревині, малозольному торфі, соломі, на деревному вугіллі та деревних брикетах, задовільно – на антрациті і коксі. Оскільки в Україні Житомирська область найбагатша щодо запасів торфу і деревних відходів, на базі створеного нами газогенератора проводяться випробування саме з цими видами палива, а також ведуться роботи щодо конструктивної оптимізації розробленого газогенератора для палива з різними властивостями, наприклад для деревини і антрациту.

Процес газифікації твердих палив в основному протікає за наступною схемою (рис. 2): спочатку при відносно низьких температурах (до 160 °С) випаровується волога, а потім починається термічне розкладання органічної маси. Під час перебігу процесу видаляється кисень, водень, азот, а залишок збагачується воднем.



На початкових стадіях, при температурах нижче 200°C, кисень в основному виділяється у вигляді двооксиду вуглецю і пірогенетичної води. У цьому температурному інтервалі відбувається відщиплення функціональних груп, що супроводжується реакціями конденсації радикалів, котрі залишаються (див. рис. 1, формули 1–3) [10]. Азот палива виділяється у вигляді аміаку, інших азотистих з'єднань і у вільному вигляді. Кисень, що міститься в паливі, крім зазначених продуктів, починає перетворюватися у феноли, жирні кислоти й інші речовини, що містять кисень.

Газ з низькою теплотою згоряння утворюється при використанні повітряного чи пароповітряного продування. У відповідності з цим його називають повітряним чи пароповітряним (змішаним). Він

характеризується великим вмістом баласту – азоту (до 40–50 % від загального об'єму), що обумовлює низьку теплоту згоряння. Такий газ отримували в автомобільних газогенераторах в 50-і роки минулого століття.



Рис. 2. Процеси газифікації палива, які протікають в газогенераторі

Гази з середньою теплотою згоряння отримують у процесах парової чи парокисневої газифікації в сучасних автомобільних газогенераторах під тиском 2–2,5 МПа. За складом вони являють собою суміші азоту, водню, оксидів вуглецю, з невеликою кількістю метану та інших вуглеводнів: 20–25 % (об.) N_2 ; 10–15 % (об.) CO_2 ; 10–13 % (об.) CO ; 38–40 % (об.) H_2 ; 10–12 % (об.) CH_4 ; 0,5–1,5 % (об.) C_nH_m . З економічних міркувань такі гази використовують в обмежених масштабах. Технологія отримання даних газів спочатку була заснована на використанні пароповітряного продування, причому повітря попередньо збагачувалося киснем до 40 % (об.). Можна підвищити теплоту згоряння повітря, проводячи газифікацію при підвищеному тиску. Інший спосіб отримання газів з середньою теплотою згоряння – газифікація твердих палив з використанням парового продування і попередньо підігрітого до 900–1100 °С твердого теплоносія. В якості останнього можна використовувати попіл, який залишився після спалювання частини палива у пальнику. Подібний варіант дозволяє отримувати газ, який складається в основному з CO та H_2 у співвідношенні близькому до 1:1, не враховуючи N_2 , однак даний метод випробуваний поки лише на невеликій кількості дослідно-промислових установок.

Газогенератори, що виробляють гази з високою теплотою згоряння, яка наближається за цим показником до теплоти згоряння парів бензину, в наш час у промислових масштабах поки ще не виробляють. Однак, подекуди технологія їх виробництва впроваджена в якості дослідно-промислових установок. Основа підвищення теплоти згоряння газу – збагачення його метаном за рахунок проведення газифікації при підвищеному тиску, завдяки чому інтенсифікується взаємодія вуглецю і його оксидів з воднем, який утворюється в шарі палива.

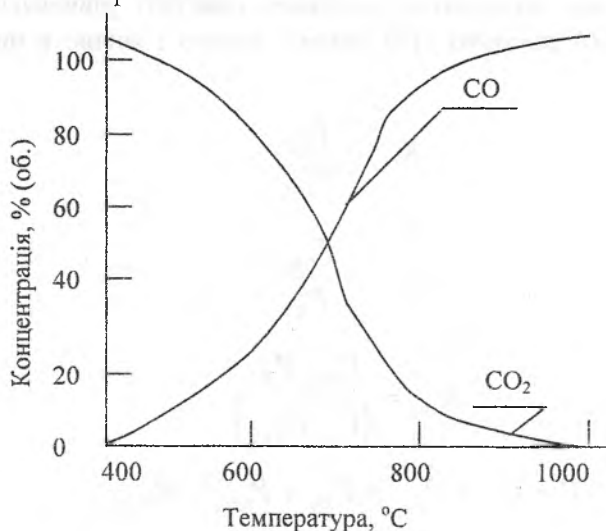


Рис. 3. Крива Будуара

Продуктом цих реакцій є метан. Розроблено також декілька варіантів багатоступневих газогенераторів, в яких передбачено максимальне вилучення летучих продуктів з палива та наступна газифікація вуглецевої решти з використанням газів, що містять водень в якості газифікуючого агента (гідрогазифікація).

Основна вимога до сучасних газогенераторів – одержання генераторного газу заданого складу (рис. 3). Це досягається шляхом підбору концентрації CO і зменшення вмісту вихідної речовини CO₂. В інтервалі 950–1000°C рівновага в реакції практично цілком зміщена вправо, а при 400–450°C – вліво. Реакції (5) і (6) (рис. 2) екзотермічні, тому для них збільшення температури приводить до зменшення виходу одержуваних продуктів.

Зміна тиску по-різному позначається на перебігу розглянутих реакцій. Процес (4) проходить зі збільшенням об'єму, тому при підвищенні тиску рівновага повинна зміщуватися у бік вихідної речовини CO₂ і вміст CO у вихідному газі повинен зменшуватися. Реакція (5), навпаки, протікає зі зменшенням об'єму (рис. 2, 3), тому для неї підвищення тиску сприятливе, так як приводить до збільшення виходу метану. У реакції (6) об'єм

реагуючих речовин не змінюється, тому склад рівноважної суміші не залежить від тиску.

На практиці, не звертаючись до експерименту, часто буває необхідно визначити склад газу при різних температурах, тиску і складових частинах продування. Ця задача вирішується шляхом розрахунку рівноваги системи. Для прогнозування складу газу, що містить п'ять основних компонентів (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 і H_2O), які є невідомими, потрібно п'ять незалежних рівнянь. До них відносяться рівняння констант рівноваги (7–9), закон Дальтона (10) і рівняння (13) балансу водню і кисню в продуванні та у пальнику:

$$K_{(4)} = \frac{P_{\text{CO}}^2}{P_{\text{CO}_2}} \quad (7)$$

$$K_{(5)} = \frac{P_{\text{CH}_4}}{P_{\text{H}_2}^2} \quad (8)$$

$$K_{(6)} = \frac{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}}{(P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}})} \quad (9)$$

$$P = P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{CH}_4} + P_{\text{H}_2\text{O}} \quad (10)$$

При відомому складі продування ($P'_{\text{H}_2\text{O}}$ та P'_{O_2}) атомне співвідношення Н:О в продуванні (A') дорівнює:

$$A' = \frac{H}{O} = \frac{2P'_{\text{H}_2\text{O}}}{P'_{\text{H}_2\text{O}} + 2P'_{\text{O}_2}} \quad (11)$$

Це ж співвідношення для газоподібних продуктів реакції має вигляд:

$$A' = \frac{H}{O} = \frac{2P_{\text{H}_2} + 4P_{\text{CH}_4} + 2P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{CO}} + 2P_{\text{CO}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (12)$$

Так як весь кисень та водень продування переходить в газоподібні продукти реакції, можна прирівняти вирази (11) та (12):

$$\frac{P'_{\text{H}_2\text{O}}}{P'_{\text{H}_2\text{O}} + 2P'_{\text{O}_2}} = \frac{P_{\text{H}_2} + 2P_{\text{CH}_4} + P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{CO}} + 2P_{\text{CO}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}}} = A \quad (13)$$

Розв'язання системи рівнянь (7–13) дозволяє знайти шукані невідомі при різних температурах, тисках і складах продування. Розрахунок полягає в наступному:

З рівнянь (7) – (9) можна знайти P_{CO_2} , P_{CH_4} і P_{H_2O} :

$$P_{CO_2} = \frac{P_{CO}^2}{K_{(4)}} \quad (14)$$

$$P_{CH_4} = \frac{K_{(5)}}{P_{H_2}^2} \quad (15)$$

$$P_{H_2O} = \frac{P_{CO}P_{H_2}}{(K_{(4)}K_{(6)})} \quad (16)$$

Якщо підстановити парціальні тиски CO_2 , CH_4 і H_2O в рівняння (13), то після нескладних перетворень одержують вираз, що містить два невідомих (P_{CO} і P_{H_2}):

$$\frac{2A}{K_4} P_{CO}^2 + \left[A + \frac{(A-1)P_{H_2}}{K_4 \cdot K_6} \right] P_{CO} - (1 + 2K_5 P_{H_2}) P_{H_2} = 0 \quad (17)$$

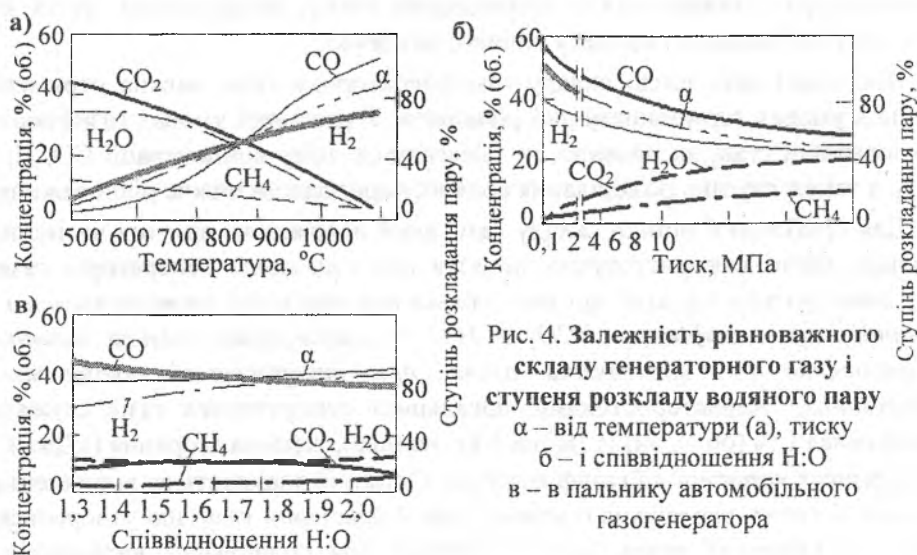


Рис. 4. Залежність рівноважного складу генераторного газу і ступеня розкладу водяного пару α – від температури (а), тиску б – і співвідношення Н:О в – в паливнику автомобільного газогенератора

Задаючись величиною P_{H_2} , за рівняннями (14–17) знаходять парціальні тиски інших компонентів. Для перевірки обчислень використовують залежність (10).

На рис. 4 приведені розрахункові дані, отримані за описаною методикою, які ілюструють вплив основних умов газифікації (температура,

тиск, співвідношення водню і кисню при продуванні) на рівноважний склад одержуваного газу. На рис. 4а видно, що при збільшенні температури зменшуються концентрації двооксиду вуглецю, водяної пари і метану при відповідному зростанні вмісту водню й оксиду вуглецю. В області температур вище 950°C сумарна кількість CO₂, H₂O і CH₄ не перевищує 5 % (об.) і рівноважна суміш складається практично лише з CO і H₂ у співвідношенні, близькому до 2:1. Аналізуючи вплив тиску (мал. 4б) на рівноважний склад одержуваного газу, можна бачити, що у цьому випадку спостерігаються зворотні залежності: збільшення тиску приводить до зростання частки метану, водяної пари і двооксиду вуглецю за рахунок зниження кількостей водню й оксиду вуглецю. Зміна складу дуття (мал. 4в) відбивається на рівноважному складі газу в меншому ступені, ніж зміни температури і тиску. Проте збільшення співвідношення Н:О в дутті сприяє деякому підвищенню концентрацій H₂, H₂O і CH₄ і зниженню концентрації CO і CO₂. В усіх випадках рівноважні концентрації водяної пари і двооксиду вуглецю близькі між собою.

На мал. 4(а) поряд зі складами газу приведені дані щодо рівноважного ступеня розкладання водяної пари. З графіків видно, що в умовах рівноваги ступінь розкладання водяної пари істотно зростає при збільшенні температури і знижується з підвищенням тиску. Зміна складу дуття на розглянутий параметр процесу впливає незначно.

Приведені дані щодо складу газогенераторних газів можна отримати лише в умовах термодинамічної рівноваги. У реальних умовах газифікації рівноважний стан, як правило, не досягається, тому концентрації CO, H₂ і CH₄, а також ступінь розкладання водяної пари завжди нижче рівноважних.

Для приблизної оцінки складу газу, який одержують при тих чи інших умовах, часто використовують поняття про «ідеальні» генераторні гази. Під ними розуміють гази, що утворюються при взаємодії чистого вуглецю і агентів, що газифікують CO₂ і H₂O з одержанням тільки палих компонентів (не враховуючи азоту при використанні повітряного продування). Характеристиками «ідеальних» генераторних газів служать їхній склад [% (об.)], вихід (м³ на 1 кг. палива), теплота згоряння (кДж/м³) і коефіцієнт корисної дії газифікації (η). Останній знаходять як відношення кількості тепла, яке можна одержати при спалюванні газу, що утвориться, (Q₁), до кількості тепла, що виділяється при спалюванні витраченого палива (Q₂). У випадку ендотермічного процесу знаменник повинен бути збільшений на величину теплового ефекту реакції (Q₃):

$$\eta = \frac{Q_1}{(Q_2 + Q_3)} \quad (18)$$

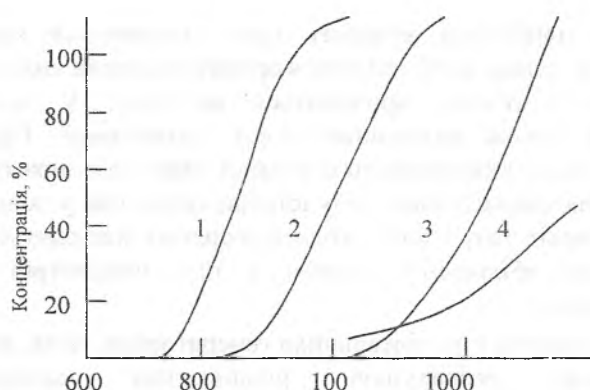


Рис. 5. Вплив температури на підтримування рівня CO в газі, який утворюється при взаємодії різних видів палива із CO₂

1 – торф'яний кокс, 2 – деревне вугілля, 3 – кам'яновугільний кокс, 4 – антрацит

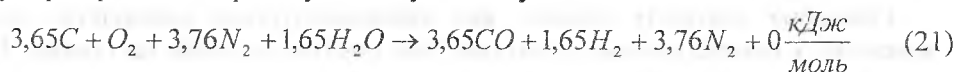
Існує кілька типів «ідеальних» генераторних газів.

Повітряний газ може бути отриманий при взаємодії вуглецю з киснем повітря за реакцією (19) (рис. 2).

Водяний газ – продукт взаємодії вуглецю з водяною парою за реакцією (20).

Ця реакція ендотермічна (132,8 кДж), тому кількість тепла, що затрачається на її проведення, повинно бути враховане при розрахунку коефіцієнта корисної дії газифікації.

Напівводяний газ одержують на пароповітряному дутті. При цьому одночасно протікають реакції (19) і (20), причому основна умова полягає в тому, що все тепло, що виділяється за реакцією (19), повинно витратитися за реакцією (20). Для дотримання цієї умови з 2 моль вуглецю, що реагує за реакцією (19), повинно взаємодіяти 1,65 моль вуглецю за реакцією (20). Сумарне рівняння процесу в цьому випадку має вигляд:



Основні характеристики «ідеальних» генераторних газів представлені в таблиці 4.

Таблиця 4. Ідеальні генераторні газы

Газ	Склад, % (об.)			Вихід газу, м ³ /кг	Теплота згоряння газу, кДж/м ³	ККД, %
	CO	H ₂	N ₂			
Повітряний	34,7	-	65,3	5,39	4400	72,2
Водяний	50,0	50,0	-	3,73	11770	≈ 100,0
Напівводяний	40,3	18,2	41,5	4,63	7080	≈ 100,0
Оксиводяний	68,9	31,1	-	2,71	12150	≈ 100,0

Державний аграрний університет (м. Житомир)
БІБЛІОТЕКА
ІНВ. №.....

Видно, що найбільша кількість газу утворюється при одержанні повітряного газу, однак його теплота згоряння невелика внаслідок того, що майже $2/3$ його обсягу приходить на азот. У цьому випадку спостерігається також найменший к.к.д. газифікації. При одержанні генераторних газів з використанням водяної пари к.к.д. прямує до 100 %, а теплота згоряння одержуваного газу істотно вища, ніж у повітряного. Слід зазначити, що вихід газу і його теплота згоряння знаходяться у зворотній залежності: при збільшенні одного з цих параметрів відбувається зменшення іншого.

Дані, що відносяться до «ідеальних» генераторних газів, як і результати термодинамічних розрахунків рівноважних складів, можна використовувати для орієнтовної оцінки результатів газифікації при різних умовах.

Поряд з термодинамікою важливе значення має кінетика газифікації твердих палив.

Для газогенераторів зі щільним шаром палива співвідношення між максимальним і мінімальним розмірами часток не повинно бути більше 2:1. При цьому нижня межа визначається механічною міцністю палива. Для бурого вугілля, що має низьку механічну міцність, мінімальний розмір часток складає ≈ 25 мм., для кам'яних ≈ 10 –12 мм, для коксу й антрациту ≈ 6 мм.

Для газогенераторів із псевдоожиженим шаром застосовують частки більш широкого діапазону розмірів – від 1 до 10 мм.

Для зазначених способів газифікації вкрай небажана присутність у паливі дріб'язку і пилу (часток з розмірами менше 1 мм), тому що при цьому процес газифікації протікає нестабільно, інтенсифікується шлакування газогенератора. Вміст пилу і дріб'язку не повинний перевищувати 10–12 %.

Реакційна здатність палива, яка характеризується швидкістю його взаємодії з газифікуючими агентами, теж помітно впливає на процес. На рис. 5 приведені дані, що ілюструють вплив температури на швидкість взаємодії різних палив із CO_2 при часі контакту реагентів ≈ 1 с. Термодинамічні розрахунки (див. мал. 3) показують, що ця реакція повинна цілком завершитися при $\approx 950^\circ\text{C}$, однак в реальних умовах, в залежності від властивостей вихідного палива, потрібна різна температура. При використанні найбільш реакційно спроможного палива – торф'яного коксу отримані результати максимально наближені до термодинамічних даних. Для деревного вугілля кінцева температура реакції дорівнює 1150°C , для коксу – 1300°C , а для антрациту при 1300°C вміст оксиду вуглецю в газі складає менше половини від потенційно можливого.

Причини зазначеного явища дотепер остаточно не з'ясовані. Вважається, що реакційна здатність різних вуглецевих матеріалів пов'язана

з неоднорідністю їхньої поверхні, яка зумовлена наступними причинами [10]:

1. Нерівномірність хімічних зв'язків між атомами, що складають структуру вуглецевого матеріалу. Відомо, що різні грані кристалітів вуглецю мають неоднакову реакційну здатність. Зокрема, швидкості окислювання кристаліту вздовж і впоперек базисних площин розрізняються у 15–20 разів (а за деякими оцінками навіть у 200 разів).

2. Неоднорідність пористої структури, різна доступність внутрішньої поверхні вуглецевого матеріалу для дифузії газів. З. Ф. Чуханов установив, що горіння і газифікація вуглецю протікає не лише на зовнішній, контурній поверхні часток, але й усередині пор. В міру реагування частинки її реакційна здатність міняється – спочатку зростає до деякого максимуму, а потім падає, тому що змінюються кількість і розмір пор.

3. Хімічна неоднорідність реагуючої поверхні, яка крім вуглецю містить атоми водню, кисню, азоту, а також компоненти золи, здатні чинити каталітичний вплив.

У залежності від реакційної здатності різних видів палива визначають доцільність їхньої газифікації тим чи іншим способом. Зокрема, такі палива, як торф, збагачене буре вугілля, мають високу активність до агентів, що газифікують, тому найбільш придатні для газифікації в дрібнозернистому вигляді (у псевдоожигненому шарі і пиловугільному факелі) і при підвищеному тиску. Палива з низькою реакційною здатністю (антрацит, незбагачене кам'яне вугілля, кокс), який необхідно переробляти при більш високих температурах, доцільніше газифікувати в газогенераторах з рідким шлаковидаленням.

Сучасні досягнення в галузі електроніки дозволяють контролювати і скеровувати процеси газифікації палив у пальнику (температуру, турбонаддув, об'ємні витрати газогенераторного газу), в поєднанні з новими видами фільтрів в газогенераторній установці, значно підвищують якість газогенераторного газу. Ці заходи, наряду з підвищенням ступеня стискання (до 130–150 одиниць), дозволяють перевести бензинові та дизельні двигуни сільськогосподарських машин на газогенераторні практично без втрати потужності.

Обмеженням компенсації втраченої потужності в даному випадку є міцність кривошипно-шатунного механізму двигуна та теплова напруженість, особливо це стосується закордонної техніки з обмеженим запасом міцності.

Нами встановлені деякі недоліки автомобільних газогенераторних установок:

- ✓ на відміну від бензинових, газогенераторні автомобілі вимагають більш частого заправлення паливом, що пов'язано з його меншою теплотворною здатністю в одиниці об'єму;

- ✓ інерція газогенераторного процесу, яка особливо помітна при переході з режимів малих навантажень на режими максимального відбирання газу, негативно впливає на розгін автомобіля та його здатність долати перешкоди.

Найкращі показники роботи газогенераторного автомобіля досягаються в приміських умовах експлуатації, коли відбирання газу постійне та близьке до максимального. Отже, на даний момент найбільш доцільно використовувати газогенераторні установки для сільгосптехніки, такої як трактори, комбайни та інші, ніж на транспортних засобах у містах. Подальші роботи доцільно направити на усунення вказаних недоліків, що створить тенденцію переважного використання газогенераторних установок, у першу чергу, в сільському господарстві.

Висновки

1. Україна має великий потенціал БМ, доступний для отримання газоподібних моторних палив. БМ (без долі, яка використовується іншими секторами економіки) може на 100 % забезпечити загальні потреби сільського господарства України в моторному паливі.

2. Впровадження автотракторних газогенераторних установок в сільському господарстві технічно можливе, економічно вигідне, екологічно доцільне.

3. Технологія використання біомаси в якості газогенераторного моторного палива досягла комерційного рівня, отримує широке використання в розвинутих промислових країнах та необхідна Україні.

4. Пріоритетне використання біомаси в якості моторного палива передбачено в “Енергетичній стратегії України на період до 2020 року та подальшу перспективу”, та в Національній енергетичній програмі України до 2010 року, на основі закону “Про альтернативні види рідкого та газоподібного палива” (№ 1391-XIV від 14.01.2000 р.), відповідно до якого даний напрямок може отримувати інвестиційну підтримку від держави, а тому має високу ймовірність успішного впровадження.

5. Розвиток використання автотракторних газогенераторів в сільському господарстві приведе до заміни приблизно 4,3 млн. т у.п. на місцеві відновлювальні ресурси БМ та зменшення викидів CO₂-еквіваленту на 22 млн. т. за рік, що дозволить отримати до 200 млн. євро додаткових коштів.

6. Розвиток автотракторних газогенераторних технологій зменшить залежність України від імпортованих енергоносіїв, збільшить її енергетичну безпеку за рахунок організації паливостачання на базі місцевих відновлюваних ресурсів, створивши значну кількість нових робочих місць (переважно в сільських районах), зробить значний вклад в покращення екологічної ситуації. Крім того гроші, які заплачено

споживачами палива залишаться в регіоні і сприятимуть його розвитку, так як зменшиться імпорт енергоносіїв, що дуже важливо для сільськогосподарських регіонів (таких, наприклад, як Житомирщина).

Перспективою подальших розробок у даному напрямку є визначення основних конструктивних параметрів транспортних газогенераторів автомобільного типу і технологічних параметрів процесу газифікації твердих палив в таких газогенераторах; конструктивна оптимізація пальника, виходячи з умови оптимального протікання процесу газифікації, яка дозволяє проводити спалювання палива без шурування та забезпечує можливість роботи газогенератора на суміші різних видів палива; підвищення калорійності генераторного газу шляхом очищення його від атмосферного азоту на стадії подачі повітря в газогенератор тощо.

Література

1. *Bernard B.* Alternative kinds of energy. // *Afrique exp.* – 1984. – № 4. – P. 44.
2. *Masters S. D.* World Petroleum Congress, Buenos Aeres. 1991.
3. *Шугуров Л. М.* Автомобили России и СССР. – М.: ИЛБИ, 1993. – Т.1. – 256 с.
4. *Kross R.* Renewable Sources of Energy // *World Wood.* – 1981. – V 22., № 13 – P. 20.
5. *Жовнір М. М., Недовесов В. І., Смірнов О. П., та ін.* Перспективи і напрямки енергетичного використання біомаси в Україні // *Енергетика и электрификация.* 2002. – № 9 – С. 29–34.
6. *Гелетуха Г. Г., Железная Т. А.* Обзор современных технологий сжигания древесины с целью выработки тепла и электроэнергии // *Экотехнологии и ресурсосбережение.* – 1999. – Ч.І. – № 5. С. 3–12.
7. *Energy for the Future: Renewable Sources of Energy. White Paper for a Community Strategy and Action Plan.*-Bruxelles, 1997. – 53 p.
8. *Гелетуха Г. Г., Железная Т. А., Тишаев С. В., Кобзарь С. Г.* Развитие биоэнергетической технологии в Украине // *Экотехнологии и ресурсосбережение.* 2002. – № 3 – С. 3–11.
9. *Жовнір М. М., Недовесов В. І., Смірнов О. П., та ін.* Ресурси біомаси для енергетичного використання в Україні // *Енергетика и электрификация,* 2002. – № 6 – С. 38–44.
10. *Печуро Н. С., Капкин В. Д., Песин О. Ю.* Химия и технология синтетического жидкого топлива и газа. – М.: Химия, 1986. – 215 с.