

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ САРЫАДЫРСКОГО УГЛЯ

Н.У Нурғалиев\*, А.Ж.Хамит, Э.Б. Жунусова, Х.Б. Омаров, А.А.Ахаева, А.К. Жумабекова,  
А.И. Иварай

Казахский университет технологии и бизнеса, г. Астана, Казахстан,  
nurgaliev\_nao@mail.ru

В статье проведено моделирование процесса получения синтетического газа из Сарыадырского угля (пласт «Пятиметровый») при паро-воздушном и паро-кислородном дутьях. Для расчета разработано специальное программное обеспечение, позволяющее при заданных значениях количества газовых реагентов и объемных соотношений  $H_2/CO$  определять основные химико-технологические параметры получаемого газа. Расчет проводили таким образом, чтобы в модельном газе, полученном из угля, объемные соотношения  $H_2/CO$  составляли от 1:1 до 2:1, так как обычно такие соотношения используют в органическом синтезе для получения различных углеводородных продуктов. Для получения соответствующих соотношений  $H_2/CO$  проводили варьирование подачи водяного пара, воздуха или кислорода. В результате проведения моделирования изучено влияние газовых реагентов на элементный состав и выход газа, коэффициент полезного действия газификации, теплотворную способность газа. Полученные результаты представляют определенный практический интерес для оптимизации процесса слоевой газификации угля для использования его в качестве генераторного газа ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $C_nH_m$ ) или синтез-газа ( $CO$ ,  $H_2$ ).

**Ключевые слова:** уголь, слоевая газификация, газ, паро-воздушное дутье, паро-кислородное дутье, горючие компоненты, объемное соотношение  $H_2/CO$

## САРЫАДЫР КӨМІРІН ҚАБАТТЫ ГАЗДАНДЫРУ ҮРДІСІМЕН МОДЕЛЬДЕУ

Н.У.Нурғалиев\*, А.Ж. Хамит, Э.Б.Жунусова, Х.Б.Омаров, А.А.Ахаева, А.К. Жумабекова,  
А.И. Иварай

Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан  
nurgaliev\_nao@mail.ru

Мақалада бу-ауа және бу-оттегі үрлеу арқылы Сарыадыр көмірінен синтетикалық газды ("бес метрлік" қабат) алу модельдеу үрдісінде жүргізілді. Есептеу үшін газ реагенттері санының және  $H_2/CO$  көлемдік арақатынасының берілген мәндері кезінде алынатын газдың негізгі химика-технологиялық параметрлерін анықтауға мүмкіндік беретін арнайы бағдарламалық қамтамасыз ету әзірленді. Есептеу көмірден алынған модельдік газда  $H_2/CO$  көлемдік қатынасы 1:1-ден 2:1-ге дейін болатындай етіп жүргізілді, өйткені әдетте мұндай қатынастар әртүрлі көмірсутек өнімдерін алу үшін органикалық синтезде қолданылады. Тиісті  $H_2/CO$  арақатынасын алу үшін су буының, ауаның немесе оттегінің берілуі әр түрлі болды. Модельдеу нәтижесінде газ реагенттерінің газдың элементтік құрамы мен шығуына әсері, газдандырудың пайдалы әсер ету коэффициенті, газдың калориялық мәні зерттелді. Алынған нәтижелер көмірді генераторлық газ ретінде пайдалану үшін қабатты газдандыру процесін оңтайландыру үшін белгілі бір практикалық қызығушылық тудырады ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $C_nH_m$ ) немесе синтез газы ( $CO$ ,  $H_2$ ).

**Түйінді сөздер:** көмір, қабатты газдандыру, газ, бу-ауа үрлеуі, бу-оттегі үрлеуі, жанғыш компоненттер,  $H_2/CO$  көлемдік қатынасы

## SIMULATION OF THE PROCESS OF LAYERED GASIFICATION SARYADYR COAL

N.U. Nurgaliyev\*, A.Zh.Khamit, E.B.Zhunusova, Kh.B.Omarov, A.A.Akhaeva, A.K. Zhumabekova,  
A.I. Ivaray

Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,  
nurgaliev\_nao@mail.ru

The article simulates the process of obtaining synthetic gas from Saryadyr coal (Pyatimetrovy seam) with steam-air and steam-oxygen blasts. Special software has been developed for the calculation, which makes it possible to determine the main chemical and technological parameters of the resulting gas for given values of the amount of gas reagents and volumetric ratios of  $H_2/CO$ . The calculation was carried out in such a way that in the model gas obtained from coal, the volume ratios of  $H_2/CO$  were from 1:1 to 2:1, since such ratios are usually used in organic synthesis to obtain various hydrocarbon products. To obtain the appropriate  $H_2/CO$  ratios, the supply of water vapor, air, or oxygen was varied. As a result of the simulation, the influence of gas reagents on the elemental composition and gas yield, the efficiency of gasification, and the calorific value of the gas were studied. The results obtained are of certain practical interest for optimizing the process of layered coal gasification for its use as a generator gas ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $C_nH_m$ ) or synthesis gas ( $CO$ ,  $H_2$ ).

**Keywords:** coal, layered gasification, gas, steam-air blast, steam-oxygen blast, combustible components,  $H_2/CO$  volume ratio

**Введение.** В настоящее время перспективным в области глубокой переработки угля является процесс газификации с получением газа, пригодного для использования в качестве генераторного газа ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $C_nH_m$ ) или синтез-газа ( $CO$ ,  $H_2$ ). Генераторный газ используют для получения тепловой и электрической энергии, а синтез-газ может быть сырьем для производства моторных топлив и ценных химических продуктов. Это позволяет увеличить эффективность использования первичной энергии твердых топлив по сравнению с процессом прямого сжигания [1].

Анализ конструктивных особенностей и принципов действия современных газификаторов показал, что их удельную производительность можно повысить, используя следующие способы, основанные на интенсификации процессов тепло- и массообмена [2]:

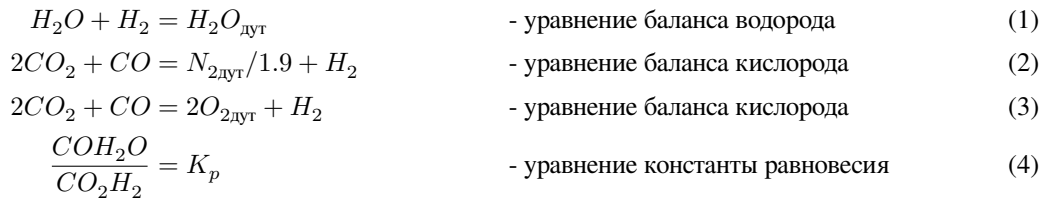
- повышение расхода дутья (увеличение скорости потока);
- уменьшение размера частиц, увеличение реакционной поверхности топлива;
- изменение состава дутья, использование кислорода, паро-воздушных смесей в качестве газифицирующего агента.

Характерной особенностью современных методов разработки новых процессов газификации является широкое применение математического моделирования для проведения численных экспериментов, как на стадии проектирования с целью сокращения сроков внедрения процессов, так и на стадии эксплуатации для оптимизации технологических режимов [3].

Созданию моделей газификации и горения твердых частиц посвящены работы [4–13], в которых описываются стационарные и нестационарные модели тепло- и массопереноса в газификаторе, физико-химические процессы в окислительной и восстановительной зонах газификатора и методы их интенсификации. Расчетные модели газификации позволяют повысить производительность процесса и калорийность газа. При этом, состав и калорийность газа варьируются в зависимости от типа газификатора, свойств угля и применяемого газового дутья (пар, воздух, кислород и т.д.).

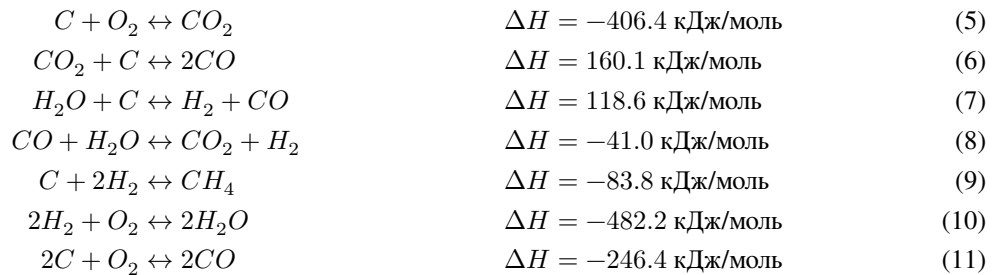
Целью данной работы является расчет процессной слоевой газификации угля месторождения «Сарыадыр» (пласт «Пятиметровый») (Казахстан) с использованием паро-воздушного (ПВ) и парокислородного (ПК) дутья.

**Материалы и методы.** Среди различных методов расчета был выбран метод Н.Н. Доброхотова [14], который используется при расчетах газификации каменных и бурых углей, и впоследствии усовершенствовался [15]. В этом методе расчет ведется отдельно по обеим стадиям: стадии сухого разложения без доступа воздуха (в верхней части газификатора) и основного процесса газификации (в нижней части газификатора). При расчете, исходя из практических данных, задаются распределением содержащихся в топливе элементов ( $C$ ,  $O$ ,  $H_2$ ) между компонентами газа ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и др.). Для определения количества каждого из этих компонентов решают следующую систему уравнений (для стадии газификации) [14]:



где  $n_C$  - количество углерода (моль), поступившего в зону газификации из зоны сухого разложения;  $H_2O_{\text{дут}}$  - количество водяного пара (моль), введенного с дутьем;  $N_{2/1,9}$  - количество кислорода, введенного с воздухом для паровоздушного дутья (моль);  $O_{\text{дут}}$  - количество кислорода, введенного с дутьем для парокислородного дутья (моль);  $K_p$  - значение константы равновесия в температурных условиях реакционной зоны.

При данном расчете газификации угля используют основные уравнения реакций [2]:



Константу равновесия  $K_p$  из уравнения (5) определяют по формуле:

$$\lg K_p = \left( -\frac{2203.24}{T} \right) - 5.1588 \cdot 10^{-5}T - 2.5426 \cdot 10^{-7}T^2 + 7.461 \cdot 10^{-11}T^3 + 2.3 \quad (12)$$

Теплотворная способность газа  $Q_r$  и коэффициент полезного действия газификации (КПД)  $\eta_r$  рассчитывают по известным формулам [14]:

$$Q_r = 0.01(n_{CO}Q_{CO} + n_{H_2}Q_{H_2} + n_{CH_4}Q_{CH_4} + n_{H_2S}Q_{H_2S}) \quad (13)$$

$$\eta_r = \frac{V_r Q_r}{V_y Q_y} \quad (14)$$

где  $n_{CO}, n_{CH_2}, n_{CH_4}, n_{H_2S}$  - концентрации компонентов  $CO, H_2, CH_4, H_2S$  (об.%) в газе;  $Q_{CO}, Q_{H_2}, Q_{CH_4}, Q_{H_2S}$  - соответственно теплотворные способности компонентов  $CO, H_2, CH_4, H_2S$  (кДж/м<sup>3</sup>);  $V_r$  - общее количество газа (м<sup>3</sup>);  $Q_r$  и  $Q_y$  - теплотворные способности газа (кДж/м<sup>3</sup>) и угля (кДж/кг);  $V_y$  - количество газифицируемого угля (кг).

Для реализации расчета по вышеуказанной методике с учетом уравнений (1)–(14) **использовали компьютерную программу MathCAD**. Для определения оптимальных параметров процесса газификации заданы массивы значений количества вдуваемых в газификатор водяного пара и воздуха. При

этом, количество пара при расчете подбиралось таким образом, чтобы объемные соотношения  $H_2/CO$  в газе составляли от 1 до 2. Такие соотношения обычно используют в органическом синтезе для получения различных углеводородов (альдегидов, метанола или алифатических углеводородов и др.).

Исходными данными программы являются:

- 1) масса загружаемого топлива (кг);
- 2) температура процесса газификации (К);
- 3) содержание в топливе углерода, кислорода, водорода, азота, серы, воды и золы (масс. %);
- 4) количество уноса углерода в процессе газифи-

кации (масс. %);

5) доля перехода кислорода топлива в водяной пар (масс. %);

6) доля перехода кислорода топлива в углекислый газ  $CO_2$  (масс. %);

7) доля перехода водорода топлива в метан  $CH_4$  (масс. %);

8) доля перехода водорода топлива в этилен и эквивалентное ему количество углеводорода  $C_2H_4$  и  $C_nH_m$  (масс. %);

9) доля перехода серы топлива в газ в виде  $H_2S$  (масс. %);

10) доля перехода углерода топлива в золу (масс. %);

11) степень разложения водяного пара для расчета константы равновесия  $K_p$  (%);

12) массив значений количества вдуваемого в газификатор водяного пара (масс. % от веса угля);

13) массив значений коэффициентов по воздушному дутью (отношение  $C/N_2$ ) или кислородному дутью ( $C/O_2$ ), характеризующих количество сгорающего углерода;

14) количество значений параметров из пунктов 12), 13).

Технологические параметры, указанные в пунктах 2), 10), 12), уточнялись, исходя из экспериментальных данных [16, 17]. Алгоритм программирования при задании массивов значений в пунктах 12), 13) следующий:

- при наличии  $n$  определяемых параметров по  $m$  значений с помощью задания операторов цикла осуществляется  $m^n$  различных комбинаций расчетов между всеми параметрами цикла от 1 до  $m$ ;
- среди множества полученных результатов расчета фиксируются и отбираются те рабочие параметры, при которых объемные соотношения  $H_2/CO$  в газе

составляют от 1 до 2.

Таким образом, результатами расчета процесса газификации угля являются:  $W_B$  - расход воздуха, вдуваемого в газификатор (на 1 кг угля),  $m^3/kg$ ;  $W_K$  - расход кислорода, вдуваемого в газификатор (на 1 кг угля),  $m^3/kg$ ;  $W_P$  - расход водяного пара, вдуваемого в газификатор (на 1 кг угля),  $kg/kg$ ;  $T$  - температура газификации,  $K$ ;  $V_{вл}$ ,  $V_{сух}$  - соответственно выход влажного и сухого газов, об. %;  $n$  - общая концентрация основных горючих компонентов сухого газа ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ), об. %;  $n_{вл}$ ,  $n_{сух}$  - концентрации компонентов влажного и сухого газов соответственно;  $Q_g$  - теплотворная способность газа,  $kJ/m^3$ ;  $\eta_r$  - коэффициент полезного действия газификации, %;

Технический и элементный анализы угля проводили на термогравиметрическом анализаторе Eltra Thermostep (согласно ASTM D7582-12 «Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis») и элементном анализаторе «EURO EA3000».

**Результаты и обсуждение.** Характеристика Сарыадырского угля (пласт «Пятиметровый») и результаты программного расчета приведены в таблицах 1–3 и рисунках 1–2. Выбор оптимальных расходов воздуха ( $1,912 m^3/kg$ ) и кислорода ( $0,574 m^3/kg$ ) обусловлен наибольшим выходом компонентов  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  ( $m^3/kg$ ).

Полученные данные показывают, что увеличение расхода водяного пара при ПВ-дутье и ПК-дутье в достаточно широком диапазоне (от 0,63 до 1,7 кг) приводит (для сухого газа) к существенному уменьшению концентрации  $CO$  (об. %), повышению объемного содержания  $H_2$  и  $CO_2$  в газе и объемного соотношения  $H_2/CO$  (от 1 до 2). Такое влияние  $H_2O$  происходит в случае протекания реакции водяного газа (9), что непосредственно отражается на некотором уменьшении общей концентрации горючих компонентов газа ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ), и соответственно на снижении калорийности газа и КПД газификации.

Таблица 1 - Характеристика газифицируемого угля

Уголь	Состав угля (на рабочую массу), %								$Q_y$ , кДж/кг	
	$W^r$	$A^r$	$V^{daf}$	$C^r$	$O^r$	$H^r$	$N^r$	$S^r$	$Q_{высш}$	$Q_{низш}$
Сарыадыр («Пятиметровый»)	2,56	19,71	50,54	64,73	7,55	4,29	0,77	0,39	25556	24413

Таблица 2 - Варианты ведения процесса газификации угля Сарыадырского месторождения (пласт «Пятиметровый») при паро-воздушном дутье

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wв, м³/кг	1,912	1,912	1,912	1,912	1,912	1,912	1,912	1,912	1,912	1,912	1,912	1,912
Wп, кг/кг	0,630	0,700	0,800	0,900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700
T, К	1173	1173	1173	1173	1173	1173	1173	1173	1173	1173	1173	1173
Vвл,м³/кг	3,732	3,819	3,944	4,068	4,192	4,317	4,441	4,566	4,690	4,815	4,939	5,064
Vсух,м³/кг	3,335	3,361	3,393	3,422	3,448	3,471	3,492	3,512	3,530	3,546	3,561	3,575
H2/CO	1,004	1,079	1,184	1,286	1,386	1,485	1,582	1,677	1,771	1,863	1,955	2,045
n, об. %	44,72	44,38	43,97	43,59	43,27	42,97	42,71	42,47	42,25	42,06	41,89	41,72
пвл/нсух												
CO2	8,38 9,38	8,85 10,06	9,40 10,92	9,82 11,67	10,14 12,33	10,39 12,92	10,58 13,45	10,72 13,93	10,81 14,37	10,87 14,76	10,91 15,13	10,92 15,46
CH4	2,25 2,52	2,20 2,50	2,13 2,48	2,07 2,46	2,01 2,44	1,95 2,42	1,89 2,41	1,84 2,39	1,79 2,38	1,75 2,37	1,70 2,36	1,66 2,35
CO	18,82 21,05	17,72 20,14	16,34 19,00	15,13 17,99	14,07 17,11	13,12 16,32	12,28 15,61	11,52 14,97	10,83 14,39	10,21 13,86	9,64 13,38	9,13 12,93
H2S	0,06 0,07	0,06 0,06	0,06 0,06	0,05 0,06	0,05 0,06	0,05 0,06	0,05 0,06	0,05 0,06	0,05 0,06	0,05 0,06	0,04 0,06	0,04 0,06
H2	18,90 21,15	19,13 21,74	19,35 22,49	19,46 23,14	19,50 23,72	19,48 24,23	19,41 24,69	19,31 25,11	19,18 25,48	19,02 25,83	18,85 26,15	18,67 26,44
N2	40,64 45,47	39,71 45,13	38,46 44,70	37,28 44,32	36,18 43,99	35,13 43,70	34,15 43,43	33,22 43,19	32,34 42,97	31,50 42,77	30,71 42,59	29,95 42,42
H2O	10,63 -	12,01 -	13,96 -	15,88 -	17,76 -	19,59 -	21,37 -	23,09 -	24,75 -	26,35 -	27,90 -	29,39 -
C2H4	0,32 0,36	0,31 0,36	0,30 0,35	0,30 0,35	0,29 0,35	0,28 0,35	0,27 0,34	0,26 0,34	0,26 0,34	0,25 0,34	0,24 0,34	0,24 0,34
Qг, кДж/м³	5858	5800	5727	5663	5607	5557	5512	5471	5434	5401	5370	5341
ηг, %	80,03	79,84	79,59	79,38	79,18	79,00	78,84	78,70	78,56	78,44	78,32	78,22

Таблица 3 - Варианты ведения процесса газификации угля Сарыадырского месторождения (пласт «Пятиметровый») при паро-кислородном дутье

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wв, м³/кг	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574
Wп, кг/кг	0,630	0,700	0,800	0,900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700
T, К	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
Vвл,м³/кг	2,221	2,309	2,433	2,557	2,682	2,806	2,931	3,055	3,180	3,304	3,429	3,553
Vсух,м³/кг	1,825	1,850	1,882	1,911	1,937	1,961	1,982	2,001	2,019	2,035	2,051	2,065
H2/CO	1,004	1,079	1,184	1,286	1,386	1,485	1,582	1,677	1,771	1,863	1,955	2,045
n, об. %	81,74	80,63	79,24	78,04	77,00	76,08	75,26	74,53	73,87	73,28	72,74	72,24
Nвл/нсух												
CO2	14,08 17,15	14,65 18,28	15,23 19,68	15,62 20,90	15,86 21,95	15,99 22,88	16,03 23,71	16,01 24,45	15,95 25,12	15,84 25,72	15,71 26,27	15,56 26,77
CH4	3,79 4,61	3,64 4,55	3,46 4,47	3,29 4,40	3,14 4,34	3,00 4,29	2,87 4,24	2,75 4,20	2,64 4,16	2,54 4,13	2,45 4,10	2,37 4,07
CO	31,61 38,48	29,32 36,59	26,49 34,24	24,07 32,21	21,99 30,45	20,18 28,89	18,60 27,51	17,21 26,27	15,98 25,16	14,88 24,15	13,89 23,23	13,01 22,39
H2S	0,10 0,12	0,09 0,12	0,09 0,12	0,09 0,11	0,08 0,11	0,08 0,11	0,07 0,11	0,07 0,11	0,07 0,11	0,07 0,11	0,06 0,11	0,06 0,11
H2	31,75 38,65	31,64 39,49	31,36 40,53	30,96 41,43	30,49 42,21	29,97 42,90	29,42 43,51	28,86 44,06	28,29 44,55	27,72 45,00	27,16 45,41	26,60 45,78
N2	0,28 0,34	0,27 0,33	0,25 0,33	0,24 0,32	0,23 0,32	0,22 0,31	0,21 0,31	0,20 0,31	0,19 0,30	0,19 0,30	0,18 0,30	0,17 0,30
H2O	17,86 -	19,86 -	22,63 -	25,27 -	27,77 -	30,14 -	32,38 -	34,50 -	36,50 -	38,40 -	40,19 -	41,89 -
C2H4	0,54 0,66	0,52 0,65	0,49 0,64	0,47 0,63	0,45 0,62	0,43 0,61	0,41 0,61	0,39 0,60	0,38 0,59	0,36 0,59	0,35 0,59	0,34 0,58
Qг, кДж/м³	10707	10536	10322	10139	9979	9838	9713	9601	9500	9408	9325	9248
ηг, %	80,03	79,84	79,59	79,38	79,18	79,00	78,84	78,70	78,56	78,44	78,32	78,22

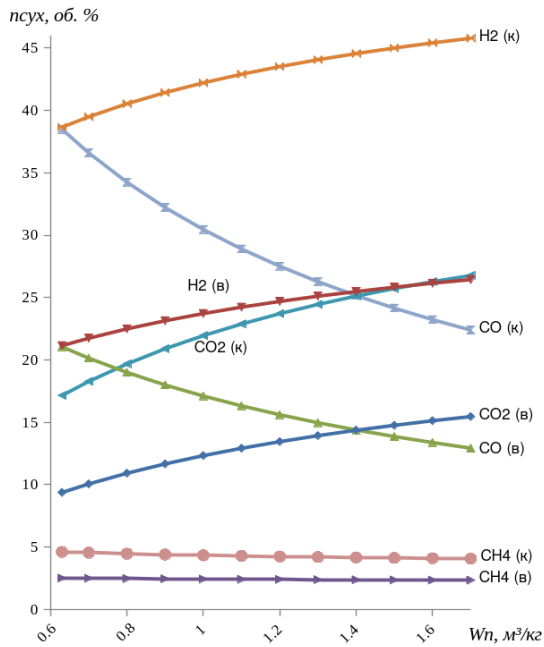


Рис. 1 - Зависимость концентрации компонентов сухого газа  $n_{\text{сух}}$  от расхода водяного пара

$W_n$  при паро-воздушном и парокислородном дутьях:  
 $CO$  (в),  $H_2$  (в),  $CH_4$  (в),  $CO_2$  (в) - компоненты газа при ПВ-дутье;

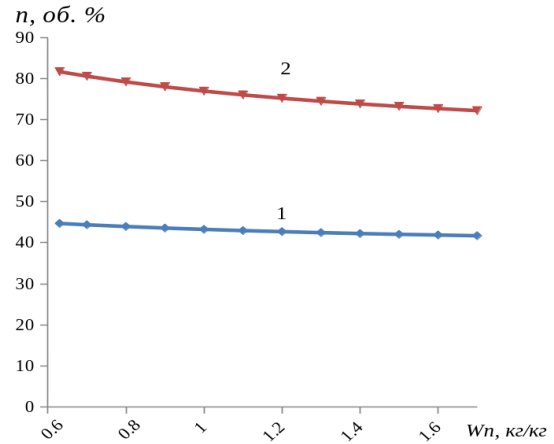


Рис. 2 - Зависимость общей концентрации горючих компонентов сухого газа  $n$  от расхода водяного пара  $W_n$  при паро-воздушном и парокислородном дутьях:

1 - ПВ-дутье; 2 - ПК-дутье.

Как показали расчеты, для получения уже генераторного газа, с наибольшей калорийностью (режим 1 в табл. 2 и 3), необходимо, чтобы расходы паро-воздушного (или паро-кислородного дутья) были наименьшими. Вместе с тем, на практике, нижний предел подачи дутьевой смеси лимитируется необходимостью поддержания определенного температурного режима в газификаторе и ее количество должно быть достаточным для качественного сжигания угля, с минимальными остатками шлака.

При паро-кислородном дутье полученный газ можно использовать как синтез-газ и как генераторный газ. Об этом свидетельствует то, что по сравнению с паро-паро-воздушным дутьем, концентрация горючих компонентов ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ) и соответственно калорийность газа при ПК-дутье существенно выше (от 1,83 до 1,73 раза на всем интервале изменения соотношения  $H_2/CO$ ), что обусловлено отсутствием балластного газа  $N_2$  и окисляющим действием кислорода, согласно уравнению (12). Отсутствие  $N_2$  облегчает условия дальнейшего использования полученного газа. Однако при ПК-дутье концентрация  $CO_2$  в сухом газе в 1,73-1,83 раза выше по сравнению с ПВ-дутьем, ввиду протекания реакции (6).

Выход сухого газа при ПВ-дутье (3,335-3,575  $m^3/kg$ ) значительно превышает по сравнению с аналогичным параметром при ПК-дутье (1,825-2,065  $m^3/kg$ ), из-за большого содержания  $N_2$ . Вместе с тем, КПД для обоих видов дутья составляют одинаковые значения, так как более низкий выход сухого газа при ПК-дутье одинаково компенсирует его более высокая калорийность, в соответствии с формулой (14).

Повышенные концентрации  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  в газе увеличивают нагрузку на газоочистку для дальнейшей переработки в целевые продукты. Указанные недостатки при получении газа в газификаторах частично устраняют повышением температуры водяного пара (свыше 300°C), что способствует более благоприятному протеканию деструктивных процессов разложения угля.

**Выводы.** В данной работе, особенностью проведенного компьютерного расчета процесса слоевой газификации угля является возможность определения основных химико-технологических характеристик газа с заданными объемными соотношениями  $H_2/CO$ . Полученные результаты представляют определенный практический интерес для проектирова-



---

ния слоевых газификаторов, прогнозирования оптимальных параметров процесса с целью получения синтетического газа для его дальнейшего использования при планировании синтеза углеводов или в качестве энергоносителя.

### Литература

1. Кузнецов В.А. Исследование воздушно-плазменной газификации биомассы по обращенной схеме. Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: ИЭЭ РАН.- 2011.
2. Гроо А.А. Интенсификация процессов теплообмена при слоевой газификации угля с использованием обратного дутья. Дис. ... канд. тех. наук. Новосибирск: РАН СОИТ.- 2007.
3. Тимербаев, Н.Ф. Сафин Р.Г., Хисамеева А.Р. Моделирование процесса сушки древесных частиц при кондуктивном подводе тепла // Вестник Казан. технол. ун-та. 2011.- Т. 14. № 4. -стр.84-88.
4. Lu X., Wang T. Water-gas shift modeling in coal gasification in an entrained-flow gasifier, Part 1: Development of methodology and model calibration, Fuel.- 2013. - Vol. 108. - pp.629-638. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.023>.
5. Fan J., Zhang Z., An Q., Lou T. Investigation on the aerodynamic field distribution in an entrained-flow gasifier by two-stage oxygen, Industrial and Engineering Chemistry Research.- 2012. - Vol. 51, No. 38. - pp.12488-12496. <http://doi.org/10.1021/ie202444h>.
6. Kangcheng Wang, Jie Zhang, Dexian Huang. Online temperature estimation of Shell coal gasification process based on extended Kalman filter, *Chinese Journal of Chemical Engineering*.- 2022. - Vol. 47. - pp.134-144. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.07.030>.
7. Кузоватов И.А., Гроо А.А., Степанов С.Г. Численное моделирование физико-химических процессов в слоевом газификаторе, Вычислительные технологии, 2005. - Том. 10. No. 5. - стр.39-48. <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=767>.
8. Lei Wang, Jianliang Xu, Juntao Wei, Qinghua Guo, Yan Gong, Guangsuo Yu. Numerical simulation of radiant syngas cooler with different connection to entrained-flow gasifier, *Applied Thermal Engineering*.-2022.- Vol.201,Part A, 117804. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.-2021.-117804>.
9. Саломатов Б.Б. Аналитическое исследование горения угольной частицы, Ползуновский вестник.- 2004. - №. 1. - стр. 36-45.
10. Lijun Wang, Xiaocheng Du, Junqi Chen, Zhonggang Wu. Numerical study on characteristics of biomass oxygen enriched gasification in the new gasifier on an experimental basis, *Renewable Energy*.- 2021. - Vol. 179. - pp.815-827. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.098>.
11. Efimov N.N., Belov A.A., Shaforost D.A., Fedorova N.V., Pryatkina V.S. The Mathematical Model of the Coal Gasification Process in a Flow, *Modern Applied Science*, 2015. - Vol. 9, No. 2. - P.223-227. <http://doi.org/10.5539/mas.v9n2p223>.
12. Kuo Lin, Zhongjie Shen, Qinfeng Liang, Jianliang Xu, Haifeng Liu. Modelling study of characteristics of heat transfer and structural optimization of refractory layer in an entrained-flow gasifier, *Applied Thermal Engineering*, 2020. - Vol. 168, 114830. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114830>.
13. Neng Fang, Lingyan Zeng, Bin Zhang, Zhengqi Li, Haopeng Wang, Xiaoying Liu (2019) Numerical simulation of flow and gasification characteristics with different swirl vane angles in a 2000 t/d GSP gasifier, *Applied Thermal Engineering*, 2019. - Vol. 153. - P.791-799. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.006>.
14. Бесков С.Д. Техно-химические расчеты. М.: Высшая школа, 1962. -462 с.
15. Зубилин И.Г., Рудыка В.И. Получение синтез-газов для производства экологически чистых моторных топлив: теория и технология. Харьков: Издат. центр Харьков. нац. Университета.-2002. - 313 с.
16. Ермагамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Набиев М.А., Касенова Ж.М., Реминный Р.А., Букетаев А.С. Исследование процесса паро-воздушной газификации углей различных месторождений Казахстана // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. -2014. Ч. 2. № 6.- стр. 355-359.

17. Набиев М.А., Ермагамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Касенова Ж.М, Реминный Р.А. Получение синтетического газа из угля // Промышленность Казахстана.- 2014. - № 6.- стр. 68-71.

### References

1. Kuznetsov V.A. Study of air-plasma gasification of biomass according to the inverted scheme. Dis. ... cand. tech. Sciences. St. Petersburg: IEE RAS.- 2011.
2. Groo, A.A. Intensification of heat and mass transfer processes in layered coal gasification using reverse blast. Dis. ... cand. those. Sciences. Novosibirsk: RAN SOIT. - 2007.
3. Timerbaev, N.F. Safin R.G., Khisameeva A.R. Simulation of the drying process of wood particles with conductive heat supply. Vestnik Kazan. technol. university 2011. Vol. 14. No. 4.-pp. 84-88.
4. Lu X., Wang T. Water-gas shift modeling in coal gasification in an entrained-flow gasifier, Part 1: Development of methodology and model calibration, Fuel, 2013. - Vol. 108. - P.629-638. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.023>.
5. Fan J., Zhang Z., An Q., Lou T. Investigation on the aerodynamic field distribution in an entrained-flow gasifier by two-stage oxygen, Industrial and Engineering Chemistry Research, 2012. - Vol. 51, No. 38. -pp.12488-12496. <http://doi.org/10.1021/ie202444h>.
6. Kangcheng Wang, Jie Zhang, Dexian Huang. Online temperature estimation of Shell coal gasification process based on extended Kalman filter, Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022. - Vol. 47. - pp.134-144. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.07.030>.
7. Kuzovatov I.A., Groo A.A., Stepanov S.G. Numerical modeling of physical and chemical processes in a layered gasifier, Computational technologies, 2005. - Vol. 10. No. 5. - P.39-48. <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=767>.
8. Lei Wang, Jianliang Xu, Juntao Wei, Qinghua Guo, Yan Gong, Guangsuo Yu. Numerical simulation of radiant syngas cooler with different connection to entrained-flow gasifier, Applied Thermal Engineering, 2022.- Vol. 201. Part A. 117804. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117804>.
9. Analytical study of the combustion of a coal particle, Polzunovskiy Vestnik, 2004. - No. 1. - pp.36-45.
10. Lijun Wang, Xiaocheng Du, Junqi Chen, Zhonggang Wu. Numerical study on characteristics of biomass oxygen enriched gasification in the new gasifier on an experimental basis, Renewable Energy, 2021. - Vol. 179. - pp.815-827. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.098>.
11. Efimov N.N., Belov A.A., Shaforost D.A., Fedorova N.V., Pryatkina V.S. The Mathematical Model of the Coal Gasification Process in a Flow. Modern Applied Science, 2015. - Vol. 9, No. 2. - pp.223-227. <http://doi.org/10.5539/mas.v9n2p223>.
12. Kuo Lin, Zhongjie Shen, Qinfeng Liang, Jianliang Xu, Haifeng Liu. Modelling study of characteristics of heat transfer and structural optimization of refractory layer in an entrained-flow gasifier, Applied Thermal Engineering, 2020. - Vol. 168, 114830. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114830>.
13. Neng Fang, Lingyan Zeng, Bin Zhang, Zhengqi Li, Haopeng Wang, Xiaoying Liu (2019) Numerical simulation of flow and gasification characteristics with different swirl vane angles in a 2000 t/d GSP gasifier, Applied Thermal Engineering, 2019. - Vol. 153. - pp.791-799. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.006>.
14. Beskov S.D. Techno-chemical calculations. Moscow: Higher school, 1962.
15. Zubilin I.G., Rudyka V.I. Obtaining synthesis gases for the production of environmentally friendly motor fuels: theory and technology. Kharkov: Publishing house. center Kharkov. nat. University. - 2002.
16. Ermagambet B.T., Nurgaliev N.U., Nabiev M.A., Kasenova Zh.M., Reminny R.A., Buketaev A.S. Study of the process of steam-air gasification of coals from various deposits of Kazakhstan // Bulletin of the ENU. L.N. Gumilyov. 2014. Part 2. No. 6. - pp. 355-359.
17. Nabiev M.A., Ermagambet B.T., Nurgaliev N.U., Kasenova Zh.M., Reminny R.A. Obtaining synthetic gas from coal // Industry of Kazakhstan. 2014. No. 6. - pp. 68-71.



---

***Сведения об авторах***

Нургалиев Н.У. – кандидат химических наук, асс.профессор, АО «КазУТБ», Астана, Казахстан, e-mail: nurgaliev\_nao@mail.ru;

Хамит А.Ж.- магистр, старший преподаватель, АО «КазУТБ», Астана, Казахстан, e-mail: aytolkyn.khamit-76@mail.ru;

Жунусова Э.Б.- кандидат технических наук, асс.профессор, АО «КазУТБ», Астана, Казахстан, e-mail: tahmina.66@mail.ru;

Омаров Х.Б. - доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН РК, АО «КазУТБ», Астана, Казахстан, e-mail: homarov1963@mail.ru;

Ахаева А.А. - магистр, старший преподаватель, АО «КазУТБ», Астана, Казахстан, e-mail: ainur\_akhaeva@mail.ru;

Жумабекова А.К.- кандидат химических наук, асс.профессор, АО «КазУТБ», Астана, Казахстан, e-mail: zhumabekova\_ak@mail.ru;

Иварай А.И. - магистр, старший преподаватель, АО «КазУТБ», Астана, Казахстан, e-mail: ivrai\_aika79@mail.ru.

***Information about the authors***

Nurgaliyev N.U. – Candidate of Chemical Science, Associate Professor, KazUTB JSC, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurgaliev\_nao@mail.ru;

Khamit A.Zh. -Master's degree, senior lecturer, KazUTB JSC, Astana, Kazakhstan, e-mail: aytolkyn.khamit-76@mail.ru;

Zhunussova E.B.-Candidate of technical sciences, Associate Professor, KazUTB JSC, Astana, Kazakhstan, e-mail: tahmina.66@mail.ru;

Omarov K.B. – Doctor of technical sciences, professor, Corresponding member of the National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, professor, KazUTB JSC, Astana, Kazakhstan, e-mail:

homarov1963@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2931-652X>;

Akhaeva A.A. Ainur -Master's degree, senior lecturer, KazUTB JSC, Astana, Kazakhstan,e-mail: ainur\_akhaeva@mail.ru;

Zhumabekova A.K.- Candidate of chemical sciences, Associate Professor, KazUTB JSC, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhumabekova\_ak@mail.ru;

Ivaray A.I. - Master's degree, senior lecturer, KazUTB JSC, Astana, Kazakhstan, e-mail: e-mail: ivrai\_aika79@mail.ru.