

ГАЗИФИКАЦИЯ ТЯЖЕЛОГО НЕФТЯНОГО ТОПЛИВА: ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗИФИЦИРУЮЩИХ АГЕНТОВ

© 2021 г. Hamidreza Farshi Fasih^{1,*}, Hojat Ghassemi², Hasan Karimi Mazrae Shahi¹

¹ Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran 16765-3381, Iran

² School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran 16765-163, Iran

*E-mail: hrfarshifasih@mail.kntu.ac.ir; h_ghassemi@iust.ac.ir

Поступила в редакцию 24 марта 2020 г.

После доработки 15 июня 2020 г.

Принята к публикации 5 ноября 2020 г.

На основе минимизации свободной энергии Гиббса исследовали эффективность газификации мазута иранских нефтеперерабатывающих заводов. Параметрическое исследование было выполнено для изучения влияния различных агентов (кислорода, воздуха и пара), соотношения компонентов и давления газификатора на состав синтез-газа, температуру газификации, высшую теплотворную способность, эффективность по холодному газу и эксергетический КПД. При кислородной газификации мазут демонстрирует постоянный и высокий эксергетический КПД и может быть использован в интегрированных газификационных энергосистемах. Установлено, что воздушно-паровая или кислородно-паровая газификация мазута более эффективна при производстве синтез-газа для химического производства. В настоящем исследовании оценены состав синтез-газа и основные параметры газификации для различных рабочих условий.

Ключевые слова: тяжелое дизельное топливо, мазут, моделирование газификации, эксергетический КПД, газифицирующий агент

DOI: 10.31857/S0028242121020064

Количество нефтяных остатков увеличивается за счет снижения качества сырой нефти и увеличения содержания серы, несмотря на усовершенствование процессов переработки. Обычно из-за высокой вязкости и содержания серы тяжелые нефтяные остатки превращают в тяжелое дизельное топливо (ТДТ) путем нагревания и смешивания с дистиллятным нефтепродуктом (висбрекинг) [1]. Из-за нежелательных побочных эффектов при сжигании ТДТ необходима разработка экологически безопасных технологий, таких как газификация. Газификация – термохимический процесс, при котором углеродсодержащие материалы превращаются в синтез-газ с использованием воздуха или кислорода. Очищенный синтез-газ состоит в основном из CO и H₂, а также из небольшого количества CO₂, H₂O, CH₄ и других легких углеводородов [2]. Эффективность газификации зависит от свойств сырья, геометрии газификатора, температуры и давления газификации, а также от рабочих условий,

таких как газифицирующий агент и соотношение компонентов. Во многих исследованиях изучалось влияние вышеупомянутых параметров на характеристики газификации различного сырья, особенно биомассы и угля, экспериментально [3] или путем моделирования [4]. Моделирование процесса газификации может быть альтернативным средством прогнозирования производительности газификатора, поскольку экспериментальные исследования технически трудны и дороги. Целью моделирования газификации является расчет состава и теплотворной способности синтез-газа, эффективности газификации и эксергии, а также определение оптимального режима работы газогенератора [5]. Различные исследования выполняются моделированием газификации небольшого количества ТДТ с использованием метода фазового равновесия [6]. Более 25% продукции иранских нефтеперерабатывающих заводов – это мазут, который используется для производства электроэнергии, топлива мор-

ского транспорта и других отраслей [7]. Благодаря высокой производительности мазут потенциально может быть использован в интегрированной газификации в комбинированном цикле для получения непосредственно синтез-газа или для производства химических реагентов. В настоящей работе была изучена газификация мазута при различных рабочих условиях на основе минимизации свободной энергии Гиббса и использования программы моделирования Aspen Plus. Определены рабочие характеристики газификации для таких агентов газификации, как кислород, воздух и пар.

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ

Свойства топлива. Для моделирования процесса газификации необходимы и важны химические и физические свойства мазута, которые определяют экспериментально в лабораторных условиях. В табл. 1 представлены свойства мазута Тегеранского НПЗ в соответствии со стандартом ASTM-D (ASTM).

Моделирование с использованием программы моделирования Aspen Plus. Моделирование процесса газификации проводили с использованием Aspen Plus. В модели сделаны следующие допущения: 1) синтез-газ состоит из H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄, C₂H₄, и N₂; 2) газификатор работает в стационарном режиме, при постоянном давлении, в адиабатическом режиме. Модель газификатора основана на минимизации свободной энергии Гиббса и состоит из четырех основных частей, блок-схема которых показана на рис. 1. В блоке первичного разложения мазут предполагается состоящим из элементарных соединений, например, H₂, N₂, S, H₂O и C (углерод) в соответствии с массовым балансом и результатами анализа, представленными в табл. 1. Путем термического разложения при постоянной температуре 500 К [8] эти соединения превращаются в летучие вещества (такие как H₂, H₂O, CH₄, N₂, NH₃, H₂S, CO и CO₂) и уголь в блоке пиролиза. На следующем этапе процессы частичного сгорания и газификации моделируются путем добавления агентов газификации (воздуха, кислорода и пара) в блок сгорания. Наконец, такие побочные продукты как синтез-газ и зола разделяются в блоке сепарации. Молекулярная формула мазута: C₃₃H₅₁O₀N_{0.007}S_{0.0198}.

Таблица 1. Физические и химические свойства мазута Тегеранского НПЗ

Физические свойства	
Температура вспышки	> 65°C
Температура застывания	< 3.5°C
Удельный вес	0.9714 г/см ³ /15.6°C
Вязкость	377.8 мм ² /с (сСт)/50°C
Плотность	0.9457 г/мл/50°C
Химические свойства	
Элементный анализ	
Углерод	87.3 мас.%
Водород	11.3 мас.%
Сера	1.36 мас.%
Азот	0.02 мас.%
Зола	0.02 мас.%
Кислород	0.00 мас.%
Технический анализ	
Углеродистый остаток	14.1 мас.%
Общее содержание серы	1.36 мас.%
Зола	0.02 мас.%
Содержание воды	< 0.05 мас.%
Низшая теплота сгорания (НТС)	40.62 МДж/кг
Высшая теплота сгорания (ВТС)	43.02 МДж/кг

Энергетическое моделирование газификации. Высшая теплота сгорания (ВТС) и эффективность по холодному газу (ЭХГ) являются важными параметрами для оценки энергии газификации. ВТС продуктов рассчитывается на основе состава отходящего синтез-газа в стандартном состоянии следующим образом [9]:

$$HHV_{\text{Syn gas}} = 12.75[H_2] + 12.63[CO] + 39.82[CH_4] + 63.43[C_2H_4] + \dots, \tag{1}$$

где концентрации компонентов выражены в мольных долях, а теплота сгорания – в МДж/Нм³. ЭХГ (%) определяется как отношение энергии получа-

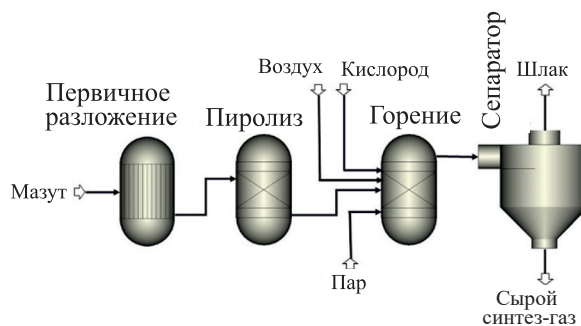


Рис. 1. Блок-схема модели газификатора в ASPEN Plus.

Таблица 2. Свойства водно-битумной эмульсии [11]

Полный анализ		Технический анализ	
Углерод	84.28 мас. %	Кокс	12.84 мас. %
Водород	10.33 мас. %	Общее количество серы	2.81 мас. %
Сера	3.95 мас. %	Зола	0.18 мас. %
Азот	0.64 мас. %	Содержание воды	28.8 мас. %
Кислород	0.55 мас. %	НТС	29.76 МДж/кг
Зола	0.25 мас. %		

Таблица 3. Сравнение результатов модели с экспериментальными данными М. Ashizawa [11]

Рабочие условия			
Соотношение компонентов (СК)	0.4		
Давление в газогенераторе	18.75 атм		
Состав синтез-газа, об. %	Экспериментальные	Модельные	
CO	38.7	42.56	
H ₂	39.4	38.38	
H ₂ O	11.85	12.52	
CO ₂	8.67	5.71	
CH ₄	0.08	0.05	
Другое	0.38	0.78	
ВТС	9.5–10.5 МДж/Нм ³	10.29 МДж/Нм ³	
Среднеквадратичная ошибка	–	2.05	

емого газа к энергии мазута согласно следующей формуле [9]:

$$CGE = \frac{HHV_{\text{Syngas}} (\text{МДж/Нм}^3) v_{\text{gas}} (\text{Нм}^3/\text{кг})}{HHV_{\text{Fuel}} (\text{МДж/кг})} \times 100, \quad (2)$$

где v_{gas} – удельный объем синтез-газа при нормальных условиях.

Эксергетическое моделирование газификации. Для оценки термодинамических характеристик газогенератора представлен анализ эксергии газификации мазута для различных агентов. Эксергетический КПД определяется следующим образом [10]:

$$\eta_{\text{exergy}} = \frac{\dot{m}_{\text{syngas}} E_{\text{syngas}}}{\dot{m}_{\text{Fuel}} E_{\text{Fuel}} + \dot{m}_{\text{agent}} E_{\text{agent}}}, \quad (3)$$

где E – эксергия каждого потока, которая может быть выражена суммой физических и химических эксергий. Расчет физической эксергии (E^{ph}) и химической эксергии (E^{ch}) для многокомпонентных газов производится следующим образом [10]:

$$E^{\text{ph}} = (h - h_0) - T_0(S - S_0), \quad (4)$$

$$E^{\text{ch}} = \sum x_k e_k^{\text{CH}} + \bar{R} T_0 \sum x_k \ln x_k, \quad (5)$$

где H , S , и e_k^{CH} – энтальпия, энтропия, мольная доля и стандартная химическая эксергия k -го компонента, соответственно. Значения стандартной химической эксергии для различных компонентов являются справочными данными [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проверка модели. Оценка точности результатов модели, состав синтез-газа и его значение ВТС проводились в сравнении с экспериментальными результатами М. Ashizawa [11]. Водно-битумная эмульсия представляет собой смесь 30% воды и 70% битума (Orinoco Tar), и ее свойства очень близки к свойствам ТДТ (табл. 2).

Результаты разработанной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными (табл. 3), поэтому модель подходит для расчета рабочих параметров газификации тяжелого мазута.

Параметрическое исследование. Цель данного исследования – изучение возможности газификации мазута (табл. 1) для производства электроэнергии и/или для химического производства. Типичные рабочие условия процесса газификации для расхода мазута 10 кг/ч представлены в табл. 4.

Таблица 4. Рабочие условия процесса газификации

Параметры	Топливо	Агент 1	Агент 2	Агент 3
	Мазут	Кислород	Воздух	Пар
Массовый расход, кг/ч	10	8–20	30–100	1–30
Стехиометрический массовый расход, кг/ч	–	3.25	14.12	–
Температура на входе, К	370	400	400	600
Давление газификации, бар			5	

Влияние газифицирующих агентов. На рис. 2 и 3 представлено влияние отношений воздуха к топливу (Воздух/Т), кислорода к топливу (O₂/Т) и соотношения компонентов (СК) на состав синтез-газа, температуру газификации, значения ВТС и ЭХГ. СК определяется следующим образом:

$$СК = \frac{[\dot{m}_{(O_2/воздух)}/\dot{m}_{Fuel}]_{\text{фактически}}}{[\dot{m}_{(O_2/Air)}/\dot{m}_{Fuel}]_{\text{стехиометрически}}} \quad (6)$$

На рис. 2 мольные доли компонентов синтез-газа представлены как функция от СК, O₂/Т и Воздух/Т. Установлено, что для кислородной газификации оптимальным СК является 0.36, после которого концентрация CO₂ и H₂O увеличивается и приближается к области горения, что отображено в литературе для другого сырья [12]. Для газификации воздухом оптимальное СК составляет 0.37, при котором мольная доля газа состава H₂+CO достигает 43%. При газификации воздухом азот является инертным разбавителем и снижает температуру газификации.

На рис. 3 показано, как температура газификации, ВТС и ЭХГ изменяются в зависимости от СК,

O₂/Т и Воздух/Т. Как и ожидалось, увеличение соотношения компонентов приводит к увеличению температуры газификации и отрицательно влияет на ВТС и ЭХГ из-за протекания реакций горения. Этот факт согласуется с литературными данными по газификации различного сырья [13].

На рис. 4 представлен состав синтез-газа в зависимости от массового соотношения пара к топливу при постоянной температуре газогенератора 1100°C. Газификация мазута паром исследуется при постоянной температуре, поскольку увеличение количества пара приводит к снижению температуры газификации. Кроме этого, на рис. 4 видно, что с увеличением соотношения пар/топливо уменьшается доля H₂+CO в основном за счет значительного снижения содержания CO. Данный факт описывается в литературе для другого аналогичного сырья [14].

На рис. 5 представлены зависимости состава синтез-газа и ВТС газификации мазута от природы газифицирующего агента (воздух, кислород и пар). Видно, что в случае кислородной газификации содержание синтез-газа и ВТС в 2 раза выше, чем при

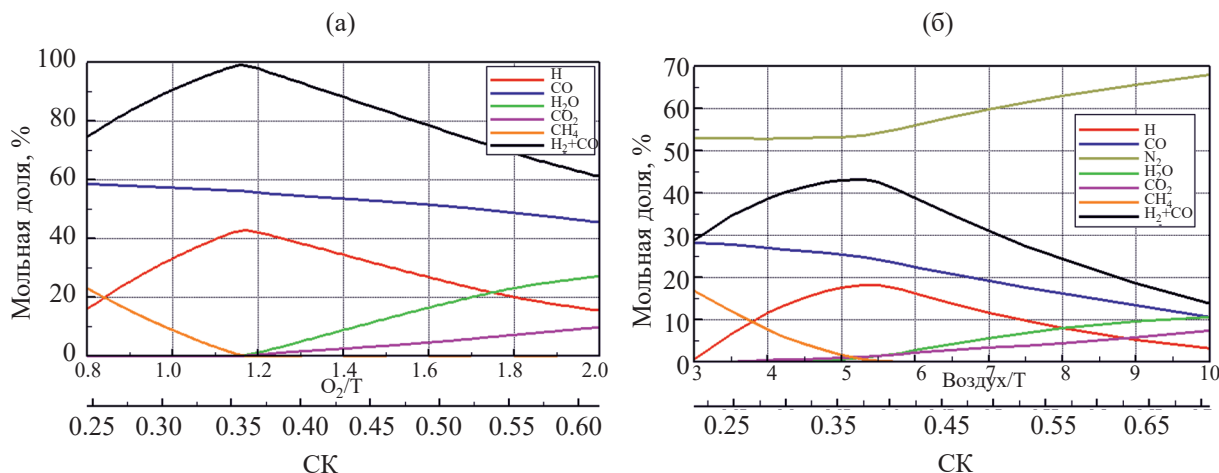


Рис. 2. Влияние соотношения компонентов и массового отношения агента к топливу на состав синтез-газа: кислород (а) и воздух (б).

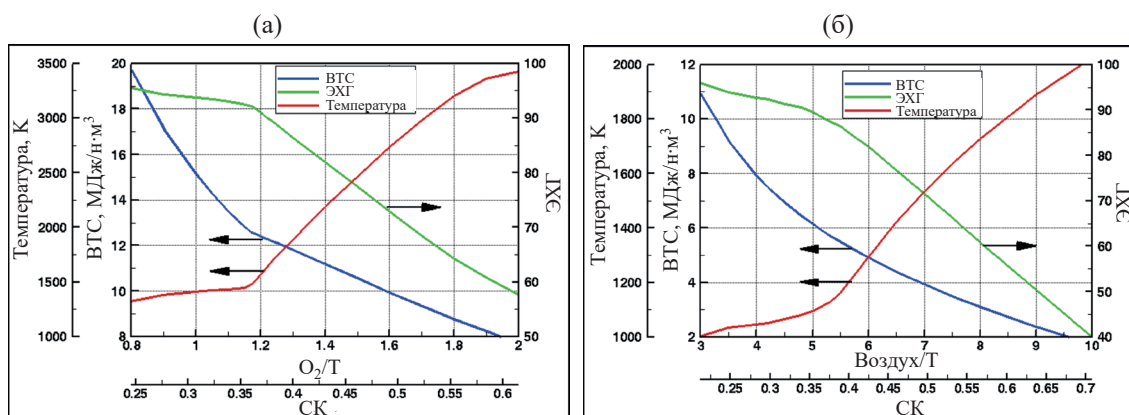


Рис. 3. Влияние соотношения компонентов и массового отношения агента к топливу на температуру газификации, ВТС и ЭГ: кислород (а) и воздух (б).

использовании воздушной газификации. Например, ВТС при оптимальных рабочих условиях составляет 13 МДж/Нм³, что свидетельствует о том, что мазут подходит для использования в качестве сырья на электростанции с комбинированным циклом интегрированной газификации (КЦИГ) мощностью 500 МВт [15]. В случае паровой газификации был получен синтез-газ хорошего состава, однако, необходимо использование других агентов. Данный тезис будет подробнее рассмотрен в разделе «Разбавление паром».

Влияние давления. На рис. 6 представлена зависимость состава синтез-газа, температуры и ВТС от давления газификации в диапазоне от 1 до 50 бар для оптимальных значений СК и O₂/T, которые составляли 0.36 и 1.36, соответственно. Состав синтез-газа нанесен на график в логарифмических

координатах из-за незначительных изменений значений. Видно, что с увеличением давления содержание CO₂, CH₄ и H₂O увеличивается, а содержание CO и H₂ немного уменьшается при приблизительно постоянном соотношении H₂/CO. Повышение давления приводит к увеличению температуры и ВТС из-за увеличения CH₄, несмотря на снижение скорости образования CO и H₂, что можно объяснить принципом Ле-Шателье [16]. Таким образом, давление не оказывает существенного влияния на показатели газификации, однако в литературе рекомендуют использовать газификатор под давлением (до 50 бар для КЦИГ и химического производства) из-за меньшего размера аппарата и экономических соображений [5].

Разбавление паром. Для химического производства важным параметром является соотношение

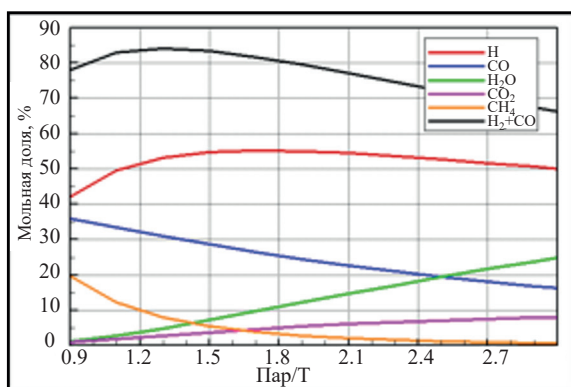


Рис. 4. Влияние массового соотношения пар/топливо на состав синтез-газа.

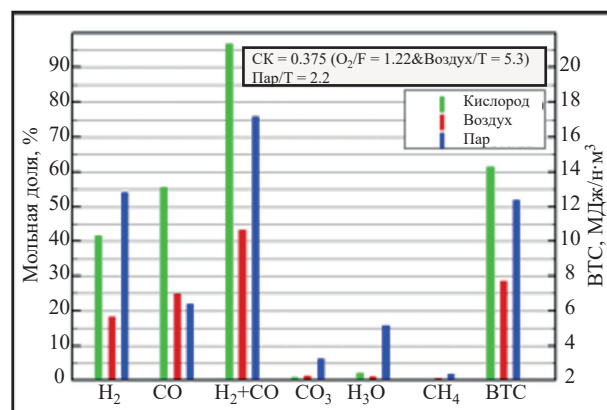


Рис. 5. Состав синтез-газа и ВТС газификации мазута в зависимости от природы агента (воздух, кислород и пар).

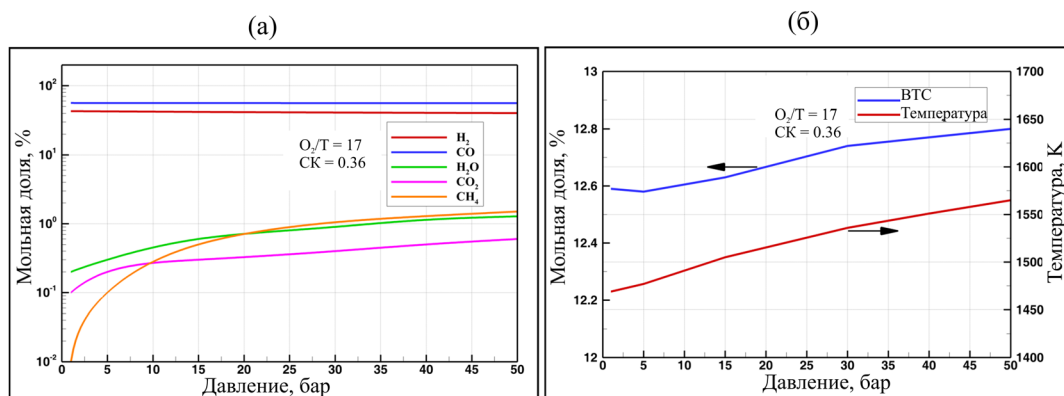


Рис. 6. Зависимость состава синтез-газа от давления (а) и температуры (б) газификации.

H₂/CO, минимальное значение которого должно быть больше единицы [17]. На рис. 7 представлена зависимость H₂/CO от соотношения компонентов для кислородной и воздушной газификации в соответствии с составом синтез-газа на рис. 2. При оптимальных рабочих условиях максимальное соотношение H₂/CO не превышает 0.75, из чего следует, что добавление водяного пара может способствовать большему производству водорода [2].

В данной работе исследовали влияние разбавления паром на содержание H₂ и CO, температуру газификации, ВТС и ЭХГ при кислородной и воздушной газификации. Все расчеты проводились при следующих параметрах: соотношения O₂/T и Воздух/T варьировались в пределах 0.8–1.6 и 3.0–9.0 соответственно, соотношение Пар/T составляло 1.0–3.0, рабочее давление газификации составляло 5 бар.

На рис. 8 показано распределение температуры газификации в зависимости от соотношения Пар/T для газификации кислородом и воздухом. Видно, что использование водяного пара в качестве газифицирующего агента приводит к снижению температуры газификации. При увеличении Пар/T температура практически не изменяется при более низких значениях O₂/T и Воздух/T, однако резко снижается при более высоких значениях этих отношений, что можно объяснить изменением химической активности гомогенных и гетерогенных реакций [18].

На рис. 9 представлена зависимость содержания H₂ и CO от количества использованного пара в качестве дополнительного газифицирующего агента

при кислородной и воздушной газификации в сухих условиях. При постоянных значениях O₂/T и Воздух/T увеличение содержания пара приводит к увеличению доли H₂ и максимум достигается при оптимальных условиях газификации. Сравнение данных рис. 2 и 9 демонстрирует, что разбавление водяным паром играет важную роль в образовании H₂. Например, при оптимальных условиях (соотношениях Пар/T = 3, O₂/T = 1.17 и Воздух/T = 5.5) доля H₂ увеличивается на 33% и 61% при кислородной и воздушной газификации, соответственно. Кроме того, при постоянном значении O₂/T или Воздух/T увеличение содержания пара приводит к уменьшению доли CO, что более значительно, чем при снижении значений O₂/T или Воздух/T.

На рис. 10 представлено влияние разбавления паром на H₂+CO и H₂/CO при кислородной и воздушной газификации. Показано, что для кислородной газификации увеличение содержания пара

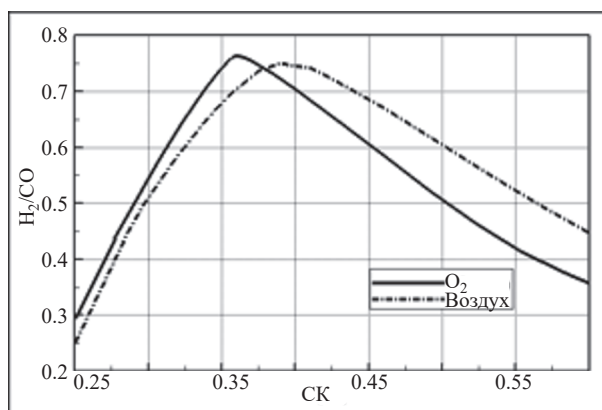


Рис. 7. Зависимость H₂/CO от соотношения компонентов для кислородной и воздушной газификации.

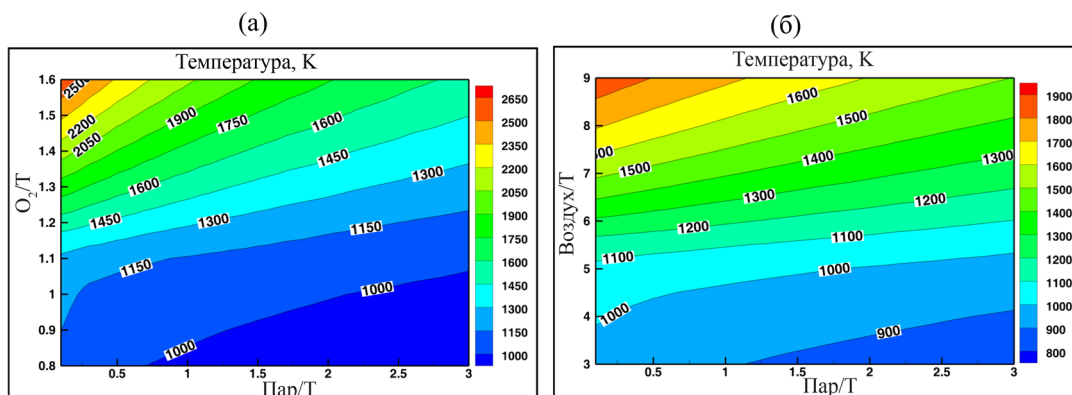


Рис. 8. Зависимость температуры кислородной и воздушной газификации от соотношения Пар/Т: (а) – в случае кислорода; (б) – в случае воздуха.

приводит к уменьшению доли H_2+CO , тогда как при воздушной газификации доля H_2+CO остается постоянной за исключением диапазона Пар/Т = 4.0–6.0, в котором доля H_2+CO немного снижается. Кроме того, при увеличении Пар/Т значение H_2/CO превышает единицу. При этом более высокие значения H_2/CO достигаются при меньших значениях $O_2/Т$ и Воздух/Т и больших Пар/Т.

На рис. 11 представлено влияние разбавления паром на ВТС и ЭХГ при кислородной и воздушной газификации. Показано, что при воздушной газификации разбавление паром не оказывает значительного влияния на ВТС и ЭХГ. Кроме того, максимальная ЭХГ достигается при наименьшем отношении $O_2/Т$ и Воздух/Т во всем диапазоне Пар/Т.

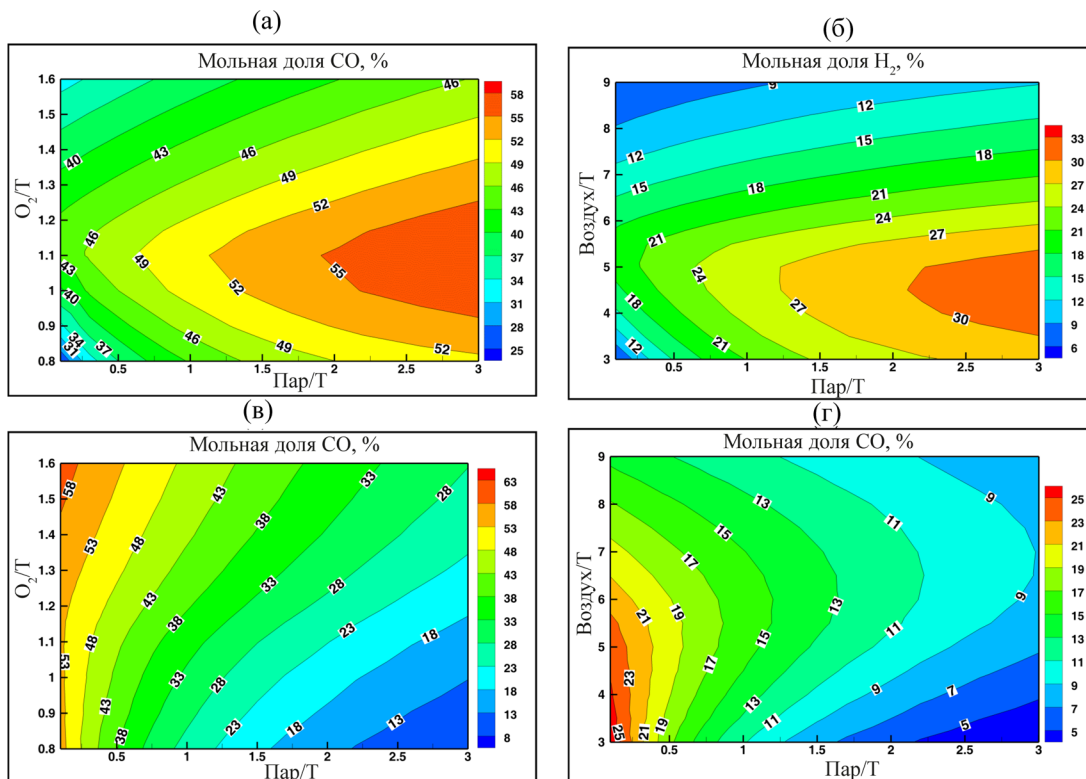


Рис. 9. Зависимость распределения H_2 и CO при кислородной и воздушной газификации от соотношения Пар/Т: (а) – газификация кислородом; (б) – газификация воздухом; (в) – смесь кислород– CO ; (г) – смесь воздух– CO .

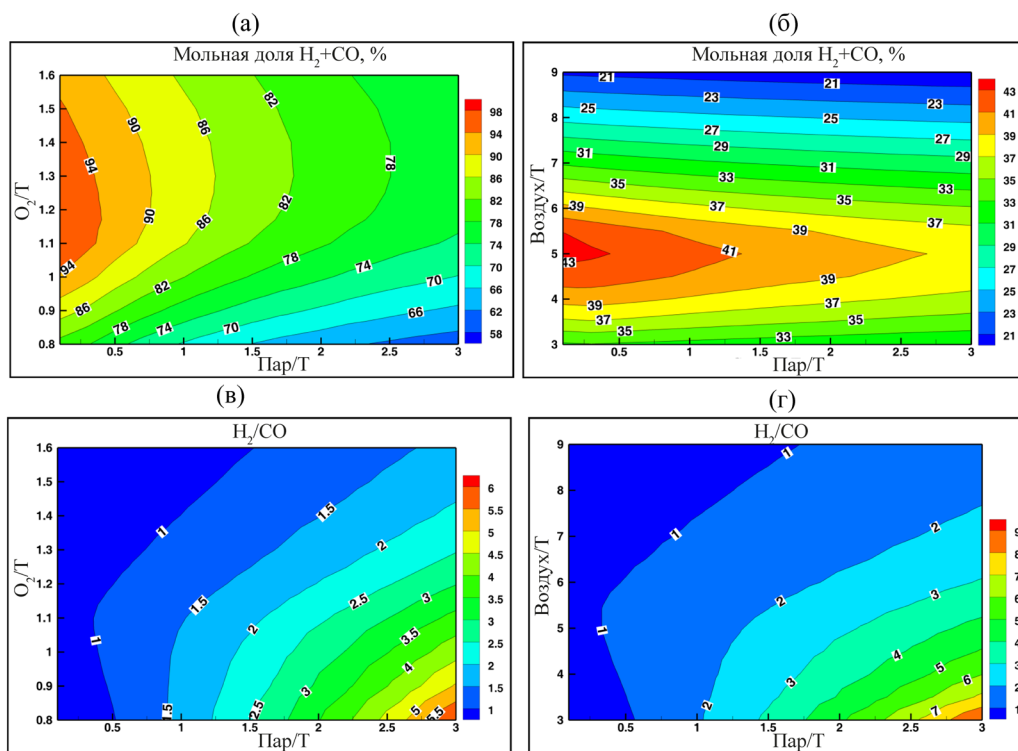


Рис. 10. Зависимость распределения H_2+CO и H_2/CO при кислородной и воздушной газификации от соотношения Пар/Т: (а) – в случае кислород– H_2+CO ; (б) – в случае воздух– H_2+CO ; (в) – в случае кислород– H_2/CO ; (г) – в случае воздух– H_2/CO .

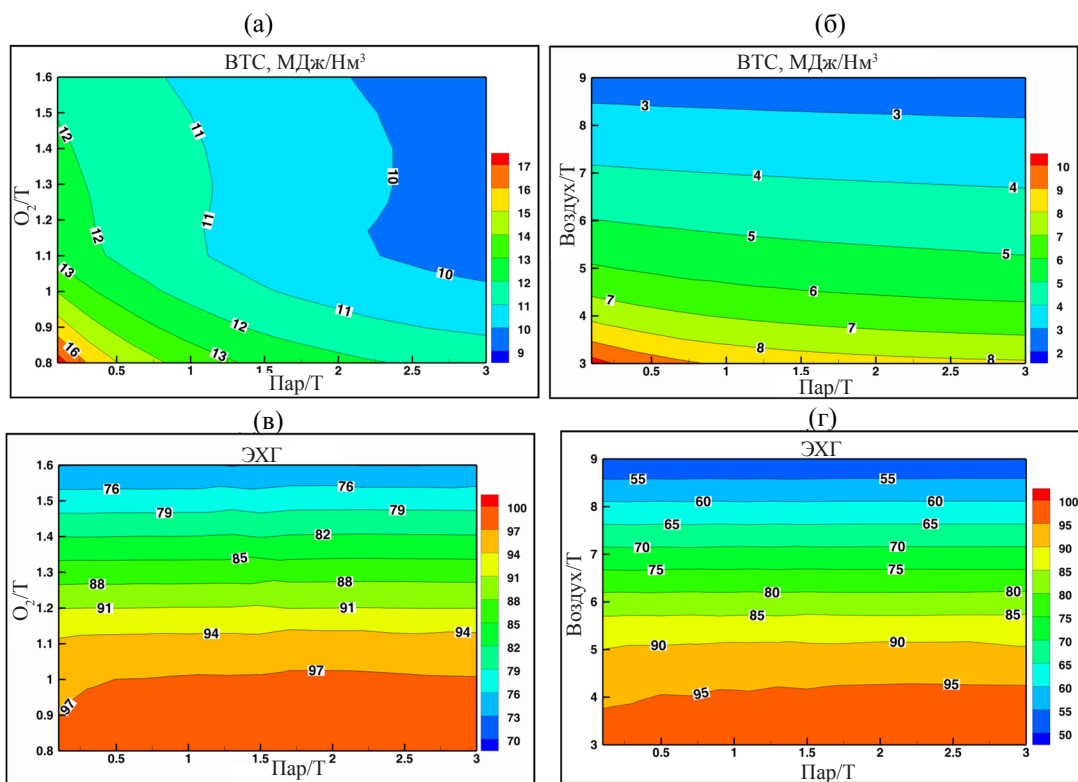


Рис. 11. Влияние соотношения Пар/Т на ВТС и ЭХГ при кислородной и воздушной газификации: (а) – кислород–ВТС; (б) – воздух–ВТС; (в) – кислород–ЭХГ; (г) – воздух–ЭХГ.

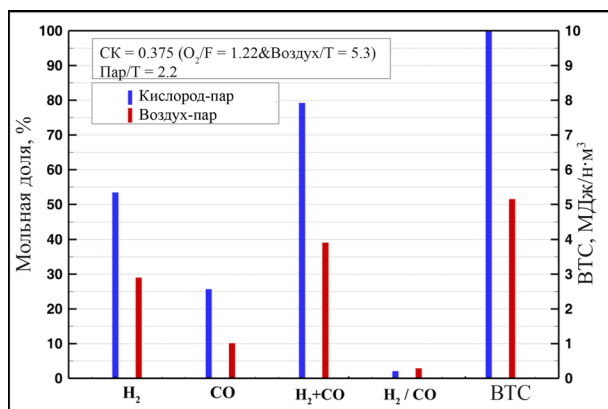


Рис. 12. Моделирование газификации мазута при использовании кислородно-паровой и воздушно-паровой смесей, Пар/Т = 2.2 и СК = 0.375.

Практические выводы. Несмотря на то, что использование водяного пара приводит к снижению температуры газификации, моделирование и экспериментальные исследования газификации мазута показывают, что для полной газификации требуется минимальная температура газификации – почти 1100 К [14, 19]. Кроме того, при определенном значении Пар/Т соотношение H_2/CO превышает единицу. По этим двум причинам, на основании данных рис. 8 и 10 определены пределы соотношений O_2/T , Воздух/Т и Пар/Т. Следовательно, массовые расходы газифицирующих агентов кислород-пар и воздух-пар могут определяться путем моделирования газификации мазута. Оптимальные диапазоны агентов кислород-пар и воздух-пар для газификации мазута (10 кг/ч) приведены в табл. 5.

На рис. 12 представлены результаты моделирования газификации мазута при следующих условиях: Пар/Т = 2.2 и СК = 0.375. При сравнении данных рис. 5 и 12 видно, что при использовании двухкомпонентных агентов увеличивается содержание водорода и соотношение H_2/CO при аналогичных значениях СК и Пар/Т. Однако использование пара в газификации не оказывает благоприятного вли-

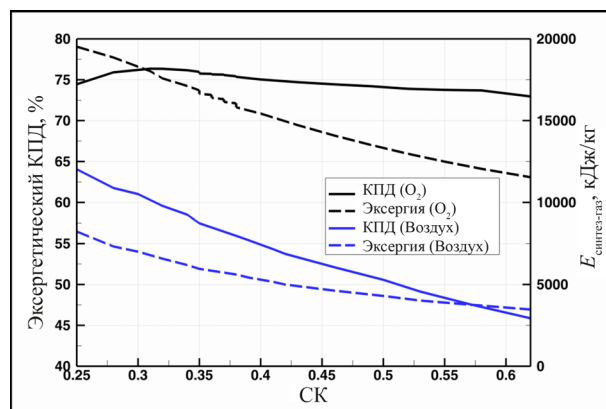


Рис. 13. Изменение эксергетического КПД и эксергии синтез-газа в зависимости от соотношения компонентов для кислородной и воздушной газификации.

яния на H_2+CO , ВТС и ЭХГ. Таким образом, воздушно-паровая и кислородно-паровая газификация более эффективны для получения синтез-газа для химического производства, например, чистого водорода, метанола, этанола и т.д.

Эксергетический анализ. На рис. 13 представлено изменение эксергетического КПД и эксергии синтез-газа в зависимости от СК для кислородной и воздушной газификации. Установлено, что увеличение соотношения компонентов приводит к снижению эксергии синтез-газа. Видно, что эксергетический КПД резко снижается при воздушной газификации и практически не изменяется в случае кислородной газификации. При оптимальных условиях эксергетический КПД достигает 75 и 55% для кислородной и воздушной газификации, соответственно.

На рис. 14 видно, что разбавление паром не оказывает значительного влияния на эксергетический КПД для кислородной и воздушной газификации.

Таким образом, для оценки эффективности процесса газификации мазутного сырья было проведено комплексное исследование. Расчет термо-

Таблица 5. Оптимальные условия газификации мазута для различных двухкомпонентных агентов

Оптимальные условия			
	Мазут, кг/ч	$O_2/Воздух$, кг/ч	Пар, кг/ч
Кислородно-паровая газификация ($1.1 < O_2/T < 1.5 - 1.2 < Пар/Т < 3.0$)	10	11–15	10–30
Воздушно-паровая газификация ($5.0 < Воздух/Т < 8.0 - 1.0 < Пар/Т < 3.0$)	10	50–80	10–30

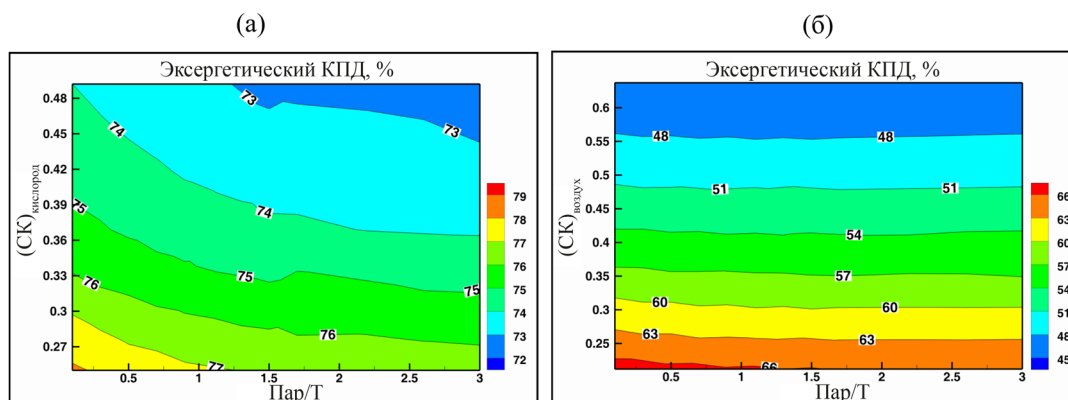


Рис. 14. Влияние соотношения Пар/Т на эксергетический КПД для кислородной и воздушной газификации: (а) – кислород, (б) – воздух.

динамически равновесных состояний проводили методом минимизации свободной энергии Гиббса. Исследовано влияние природы газифицирующего агента (кислород, воздух и пар) и давления газификатора на рабочие параметры для различных условий эксплуатации. Установлено, что давление не оказывает существенного влияния на основные показатели газификации. В определенном диапазоне воздушно-паровая и кислородно-паровая газификация эффективны для получения водорода. Более высокие значения H_2/CO были получены при более низких значениях O_2/T и Воздух/ T и более высоких Пар/ T . Кроме того, при постоянном соотношении Воздух/ T или O_2/T в оптимальных условиях использование пара в качестве второго агента газификации приводит к снижению температуры газификации и не оказывает значительного влияния на ВТС, ЭХГ и эксергетический КПД.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Hamidreza Farshi Fasih, ORCID – 0000-0001-6687-2512

Hojat Ghassemi, ORCID – 0000-0002-1985-6760

Hassan Karimi MazraeShahi, ORCID – 0000-0002-3164-4824

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldsworthy L. Computational fluid dynamics modeling of residual fuel oil combustion in the context of marine diesel engines // *Int. J. Engine Res.* 2006. V. 7. P. 181–199. <https://doi.org/10.1243/146808705X30620>
2. Ancheyta J. Modeling of processes and reactors for upgrading of heavy petroleum, chemical industries. Ed. J.G. Speight. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
3. Park S., Lee J., Seo H., Kim G., Kim K.T. Experimental Investigations of the effect of coal type and coal burner with different oxygen supply angles on gasification characteristics // *Fuel Process. Technol.* 2011. V. 92. P. 1374–1379. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.02.020>
4. Lee H., Choi S., Paek M. A simple process modelling for a dry-feeding entrained bed coal gasifier // *Proc. Inst. Mech. Eng., Part A: J. Power Energy.* 2011. V. 225. P. 74–84. <https://doi.org/10.1177/2041296710394249>
5. Higman C., Burgt M.M.V.D. Gasification. Elsevier, 2008.
6. Vaezi M., Passandideh-Fard M., Moghiman M., Charmchi M. Gasification of heavy fuel oils: A thermochemical equilibrium approach // *Fuel.* 2011. V. 90. P. 878–885. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.011>
7. National Iranian Oil Refining and Distribution Company. – Statics of petroleum products consumption. Tehran, Iran, 2015.
8. Maki T., Miura K. A Simulation model for the pyrolysis of orimulsion // *Energy Fuels.* 1997. V. 11. P. 819–824. <https://doi.org/10.1021/ef9601834>
9. Li X.T., Grace J.R., Lim C.J., Watkinson A.P., Chen H.P., Kim J.R. Biomass gasification in a circulating fluidized bed // *Biomass and Bioenergy.* 2004. V. 26. P. 171–193. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00084-9)
10. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. Thermal design and optimaization. John Wiley & Sons, Inc., 1996.

11. *Ashizawa M., Saburo H., Kazuhiro K., Jun I.* Gasification characteristics of extra-heavy oil in a research-scale gasifier // *Energy*. 2005. V. 30. P. 2194–2205. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.08.023>
12. *Xiangdong K., Weimin Z., Wenli D., Feng Q.* Three stage equilibrium model for coal gasification in entrained flow gasifiers based on aspen plus // *Chin. J. Chem. Eng.* 2013. V. 21. P. 79–84. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(13\)60444-9](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(13)60444-9)
13. *Arabkhalaj A., Ghassemi H., Shahsavan-Markadeh R.* Thermodynamic evaluation of integrated gasification combined cycle: Comparison between high-ash and low-ash coals // *Int. J. Energy Res.* 2016. V. 40. P. 1638–1651. <https://doi.org/10.1002/er.3541>
14. *Choi Y.C., Lee J.G., Yoon S.J., Park M.H.* Experimental and theoretical study on the characteristics of vacuum residue gasification in an entrained-flow gasifier // *Korean J. Chem. Eng.* 2007. V. 24. № 1. P. 60–66. <https://doi.org/10.1007/s11814-007-5010-7>
15. *Khaleghi M.S.B., Shahsavan-Markadeh R., Ghassem H.* Thermodynamic evaluation of mazut gasification for using in power generation // *Pet. Sci. Technol.* 2016. V. 34. № 6. P. 531–538. <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1149491>
16. *Atkins P., Paula J.* Atkins' Physical Chemistry. 8th Edition, W.H. Freeman and Company, 2006.
17. *Speight J.G.* Gasification of unconventional feedstocks. Elsevier Inc., Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2014.
18. *Detournay M., Hemati M., Andreux R.* Biomass steam gasification in fluidized bed of inert or catalytic particles: Comparison between experimental results and thermodynamic equilibrium predictions // *Powder Technol.* 2011. V. 208. P. 558–567. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.08.059>
19. *Salgansky E.A., Glazov S.V., Kislov V.M., Salganskaya M.V., Tsvetkova Yu.Yu.* Processing of heavy petroleum residues by filtration combustion // *Petrol. Chemistry*. 2019. V. 59. P. 471–476. <https://doi.org/10.1134/S0965544119040145>