

УДК 550.4.46(575.2)

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ПРОЦЕССЕ СЖИГАНИЯ МАЗУТА В КОТЛОАГРЕГАТАХ СРЕДНЕЙ И МАЛОЙ МОЩНОСТИ

© 2023 г. Т. З. Маймеков<sup>a, \*</sup>, Д. А. Самбаева<sup>b</sup>, М. Б. Молдобаев<sup>c</sup>,  
Т. С. Бажиров<sup>d</sup>, З. К. Маймеков<sup>c, \*</sup>

<sup>a</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

<sup>b</sup>Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, КР

<sup>c</sup>Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, г. Бишкек, КР

<sup>d</sup>Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, г. Шымкент, РК

\*e-mail: zarlyk.maymekov@manas.edu.kg

Поступила в редакцию 18.07.2023 г.

После доработки 19.07.2023 г.

Принята к публикации 23.07.2023 г.

С целью прогнозирования и оценки величины углеродного следа в газовой фазе изучен процесс окисления мазута в избытке воздуха (альфа-фактор 1.3) в широких пределах изменения температуры ( $T = 298–3000$  К,  $P = 0.1$  МПа). Рассчитаны равновесные термодинамические параметры (энтропия, энтальпия и внутренняя энергия) и определены концентрационные распределения С, S, N, O, H – содержащих компонентов и активных частиц в газовой фазе. На основе суммарного концентрационного распределения С, S, N, O, H – содержащих компонентов и активных частиц в газовой фазе рассчитано весовое содержание углерода. С учетом химической матрицы системы мазут-воздух и весового содержания углерода найдена техногенная нагрузка углерода в газовой фазе. Результаты работы позволили оценить величины углеродного следа в газовой фазе в процессе горения топлива, в частности мазута в воздухе. Снижение техногенной нагрузки оксидов углерода (CO, CO<sub>2</sub>) в газовой фазе достигнуто модифицированием и сжиганием мазута в виде обратных водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М.

**Ключевые слова:** мазут-воздух, концентрационное распределение, газовая фаза, техногенная нагрузка, углеродный след

**DOI:** 10.31857/S0040357123050147, **EDN:** MFXFSS

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оценка величины углеродоемкости осуществляется на основе анализа межстрановых таблиц “затраты-выпуск” с учетом продукции по видам экономической деятельности (экспорта и импорта выбросов) [1]. При этом расчеты производятся по трем категориям (Score 1, 2 и 3). Прямые выбросы (Score 1) от: собственной генерации энергии (пара, тепла); производственных процессов; обращения с отходами, а также фугитивные выбросы (организованные постоянные или залповые выбросы) в результате удаления технологических газов, например, метана. Энергетические выбросы (Score 2) – выбросы парниковых газов в атмосферу в результате производства потребленной компанией электроэнергии, пара, тепла и холода (энергии для охлаждения, и энергия, которая закупается, а не генери-

руется на собственных мощностях). Косвенные выбросы (Score 3) – прочие выбросы парниковых газов, образованных в результате эксплуатации транспортных средств; выбросы от складирования продукции в сторонних логистических центрах, энергия, потребляемая при использовании клиентами продукции компании, выбросы парниковых газов от утилизации отходов продукции [2, 3].

Совокупность указанных выше выбросов парниковых газов, прямо и косвенно произведенных организацией или продуктом составляет ее (его) углеродный след (англ.: carbon footprint) [4]. С целью реализации этой задачи страны составляют национальные кадастры по техногенным нагрузкам потоков [1]. Задача сложная, поскольку требуется строгий учет удельных прямых выбросов парниковых газов при производстве продукции, величины которых определяются: с учетом годо-

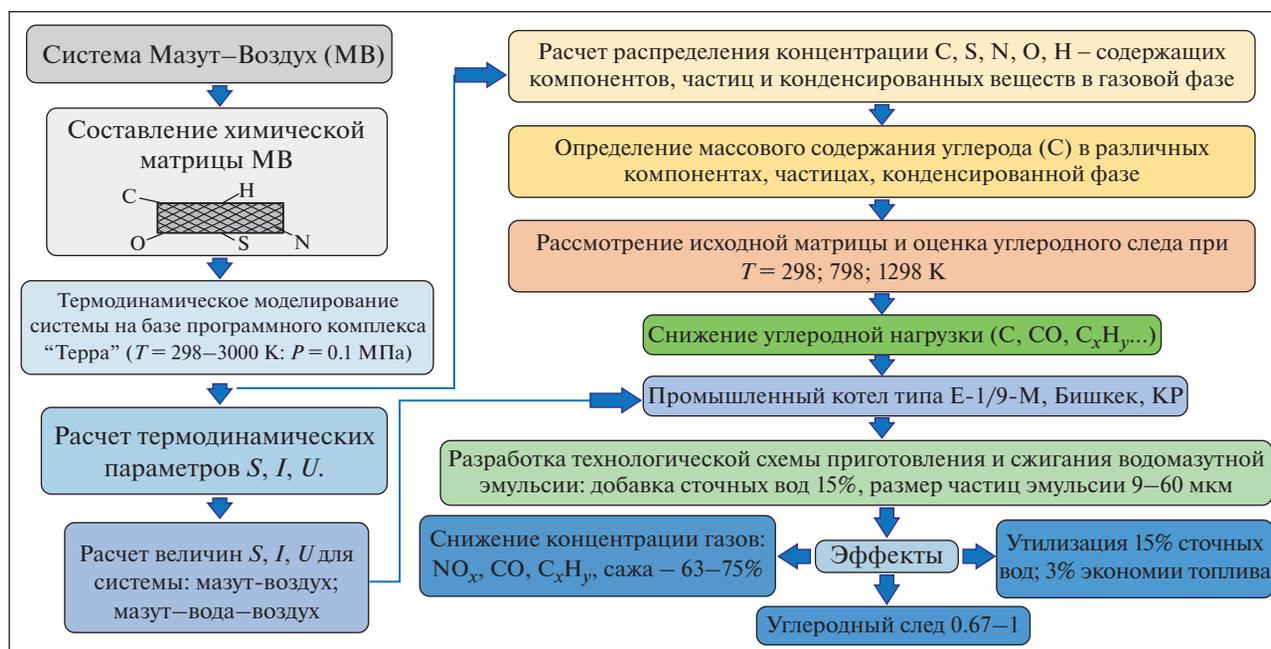


Рис. 1. Схема расчета углеродного следа для системы мазут–воздух.

вого объема прямых выбросов при производстве продукции (т $\text{CO}_2$ экв); годового объема производства продукции (тонн); число и вида использованного топлива; фактического годового потребления каждого вида топлива в условных единицах при производстве продукции (т. усл. т); коэффициентов выбросов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) при сжигании каждого вида топлива; множителей потенциалов глобального потепления парниковых газов. Здесь возможны два основных способа оценки углеродного следа: прямой расчет углеродного следа продукции; расчет по бенчмаркам (эталонным значениям) [5–13]. Соответственно, требуется строгие методы осуществления химической диагностики и анализа концепций наилучших доступных технологий и зеленой химии [14, 15].

Исходя из изложенных выше положений, в настоящей работе осуществлено термодинамическое моделирование системы [16–21]: жидкое топливо–воздух при избытке окислителя (альфа-фактор 1.3) в широких пределах изменения температуры ( $T = 298\text{--}3000\text{ K}$ ,  $P = 0.1\text{ МПа}$ ) с целью прямого расчета углеродного следа на основе концентрационного распределения: конденсированных веществ; C, S, N, O, H – содержащих компонентов и активных частиц в газовой фазе.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе рассмотрена система по схеме (рис. 1): жидкое топливо–воздух при среднем химическом

составе топочного мазута (%): C(83–87), H(10–12), S(1–3.5), N + O(0.2–0.9) с избыточным количеством воздуха (альфа-фактор 1.3); общая химическая матрица расчетной модели включила (%): (C – 84.8) + (H – 11.2) + (S – 2.0) + (N – 0.5) + (O – 1.5) + (O – 3.3) + (N – 12.43); ( моль/кг) C – 61.006, H – 96.018, S – 0.539, N – 7.977, O – 2.592.

В расчетных экспериментах использовано термодинамическое моделирование процесса окисления топочного мазута при максимуме энтропии системы на основе программного комплекса “Терра” в широких пределах изменения температуры ( $T = 298\text{--}3000\text{ K}$ ,  $P = 0.1\text{ МПа}$ ) [22, 23].

Модифицирование топочного мазута в виде водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах типа E-1/9M с целью снижения концентрации вредных веществ осуществлено составлением принципиальной технологической схемы (рис. 3) приготовления обратных эмульсий с оптимальным количеством воды в мазуте (15%), которое не приводит к его обводнению [16, 21]. Размеры частиц водомазутной эмульсии (9–60 мкм) найдены методом седиментационного анализа с использованием торзионного веса модификации ВТ-500. Отбор пробы из дымовой трубы осуществлен газоуловителем типа Vortex Ultra Flow, мультифункциональным газоанализатором Visit 01-L/LR, а также переносным газоанализатором типа УГ-2. Пробы анализированы по стандартной методике 5506 и 5515 “NIOSH Manual of Analytical Methods” с последующим использованием

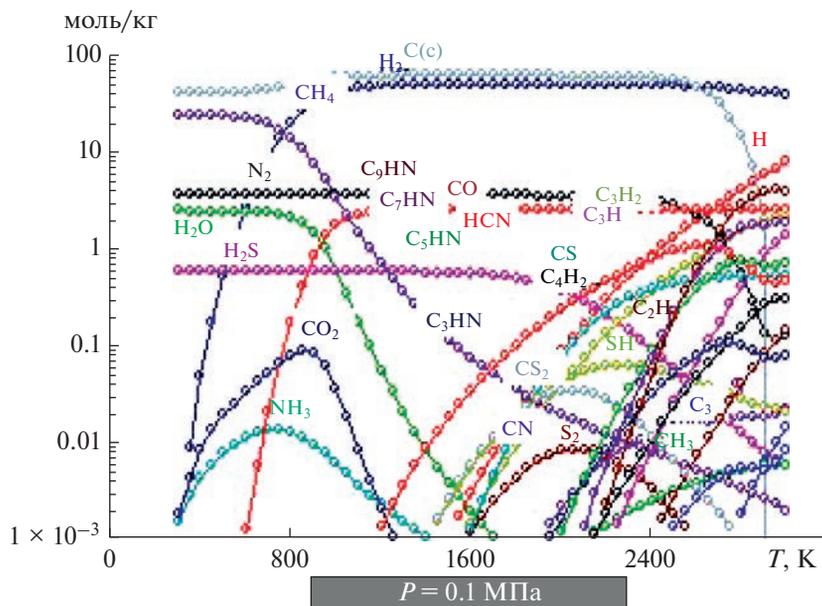


Рис. 2. Концентрационное распределение C, S, O, H, N – содержащих частиц, молекул и конденсированной фазы (моль/кг) в газовой фазе в зависимости от температуры окисления системы: мазут–воздух,  $T = 298\text{--}3000$  К,  $P = 0.1$  МПа.

гравиметрических методов для определения содержания сажи в дымовых газах котлоагрегатов типа Е-1/9М [16].

На основе определения суммарного концентрационного распределения C, S, N, O, H – содержащих компонентов и активных частиц в газовой фазе рассчитано весовое содержание углерода. С учетом химической матрицы системы мазут–воздух и весового содержания углерода осуществлена оценка величины углеродного следа в газовой фазе при температурах (К): 298, 798 и 1298.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

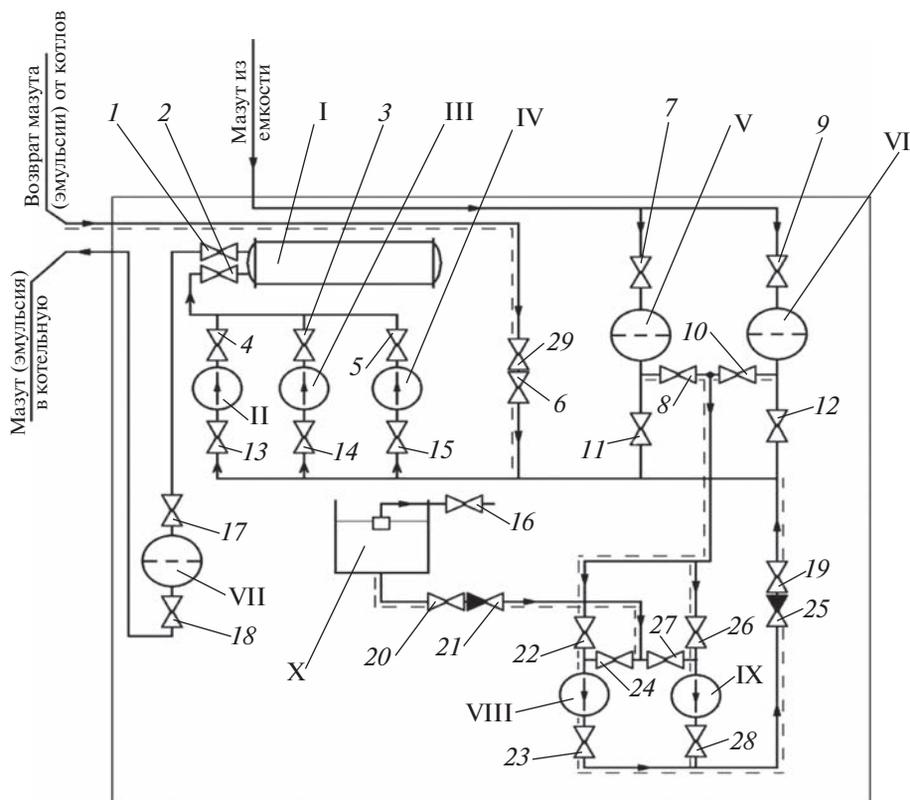
В процессе окисления мазута в воздухе ( $T = 298\text{--}3000$  К,  $P = 0.1$  МПа) образуются углеродсодержащие конденсированные фазы, простые и сложные компоненты и активные частицы (табл. 1). Кривые их распределения (рис. 2) позволили оценить равновесные данные молекул и частиц, на основе которых были рассчитаны общие весовые содержания углерода в газовой фазе по схеме: например, CS ( $M = 44$  г-моль) в кг газовой фазе: из табл. 1 видно, что  $CS = 1.93 \times 10^{-22}$  моль, или  $8.5 \times 10^{-21}$  г. При этом количество углерода в CS равно:  $8.5 \times 10^{-21} \times 12/44 = 2.3 \times 10^{-21}$  г. Аналогичным образом рассчитаны содержание углерода во всех компонентах и частицах, содержащихся в газовой фазе ( $P = 0.1$  МПа,  $T = 298, 798, 1298$  К, табл. 2): CS, CS<sub>2</sub>, COS, CO, CS<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>O, C<sub>3</sub>O<sub>2</sub>, C(c), C, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, CH, CH, CH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H,

C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H, C<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H, C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>5</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, CHO, CHO, C<sub>3</sub>HN, C<sub>5</sub>HN, C<sub>7</sub>HN, C<sub>9</sub>HN, N<sub>2</sub>C, C<sup>+</sup>, C<sub>2</sub><sup>+</sup>, C<sub>2</sub><sup>-</sup>, CO<sup>+</sup>, CH<sup>+</sup>, CHO<sup>+</sup>, CN<sup>-</sup>.

Из табл. 2 видно, что общее содержание углерода (C) в дымовом газе составляет:  $T = 298$  К, 489.62 г;  $T = 798$  К, 590.33 г;  $T = 1298$  К, 732.01 г. Исходный элементный химический состав мазута представлен в виде (%): C (83–87), H (10–12), S (1–3.5), N + O (0.2–0.9). Химическая матрица системы мазут–воздух (альфа-фактор = 1.3): (C – 84.8) + (H – 11.2) + (S – 2.0) + (N – 0.5) + (O – 1.5) + (O – 3.3) + (N – 12.43); в моль/кг: C – 61.006, H – 96.018, S – 0.539, N – 7.977, O – 2.592.

С учетом содержания углерода в исходном мазуте: C – 61.006 моль/кг, или 732 г C найдена расчетная величина углеродного следа (техногенная нагрузка) в газовой фазе при различных температурах:  $T = 298$  К,  $489.62/732 = 0.67$ ;  $T = 798$  К,  $590.33/732 = 0.8$ ;  $T = 1298$  К,  $732.01/732 = 1$ . Таким образом, величина углеродного следа изменяется от 0.67 до 1. Здесь следует заметить, что при высоких температурах, практически равной теоретической температуре горения топлива, углеродная техногенная нагрузка максимальная, т.е. равна единице.

С целью снижения техногенной нагрузки вредных веществ, в том числе сажи и оксидов углерода (CO, CO<sub>2</sub>) в газовой фазе изучены процессы приготовления и сжигания водомазутной



**Рис. 3.** Принципиальная технологическая схема приготовления и сжигания водомазутной эмульсии в котлоагрегатах типа Е-1/9-М: I – подогреватель мазута; II, III, IV – фильтры грубой очистки; V, VI, VII – фильтры тонкой очистки; VIII, IX – роторно-пульсационные аппараты; X – бак для воды; 1–20, 22–24, 26–29 – вентили; 21, 25 – обратные клапаны.

эмульсии, и полученные расчетные результаты апробированы согласно разработанной принципиальной технологической схеме в котлоагрегатах типа Е-1/9М Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек (рис. 3, табл. 3–5). По схеме (рис. 3) мазут после прохождения подогревателя мазута, фильтров грубой и тонкой очистки, насосами подаются роторно-пульсационные аппараты (РПА) [15, 20]. Вода из бака поступает в РПА и на основе смеси, состоящей из 85% мазута и 15% воды образуются полидисперсные водомазутные эмульсии и они направляются в зону горения. Управление расхода потоков на трубопроводах осуществляется вентилями и обратными клапанами. Технические характеристики установки: электродвигатель, кВт (об/мин) – 4.0 (1500); расход мазута, 0.1–0.15 м<sup>3</sup>/ч; расход воды, 0.01–0.015 м<sup>3</sup>/ч; температура воды и ВМЭ, 40–45°С (прерывистая линия (рис. 3) – путь водомазутной эмульсии) [16, 21].

Измерения и расчет концентраций загрязняющих веществ в дымовых газах проводили в процессах сжигания мазута (табл. 3) и водомазутных эмульсий (табл. 4) с учетом параметров дымовой

трубы:  $H = 18$  м,  $D = 0.5$  м, объема газовой смеси  $V_{g.m.} = 0.889$  м<sup>3</sup>/с, температуры дымовых газов  $t_{f.g.} = 220$ °С, скорости осаждения частиц  $F = 1$ , скорости ветра  $v = 5.0$  м/с [16].

Процессы приготовления и сжигания водомазутной эмульсии, апробированные на промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9-1М показали снижения концентраций оксидов азота, углерода, углеводородов нефти и сажи при сжигании водомазутной эмульсии в среднем на 63–75%, а диоксида серы незначительно (4.06%). Результаты проведенных исследований показывают, что в эмульсиях обратного типа (вода в мазуте), когда вода в виде мельчайших капелек диаметром 9–60 мкм равномерно распределена по всей массе мазута, способствует более эффективному процессу сгорания жидкого топлива, снижению сажеобразования и уменьшению содержания в выбросах С, S, O, H, N – содержащих вредных веществ (табл. 3–5) [16].

Сравнение термодинамических параметров системы: мазут–воздух и мазут–вода–воздух показали высоких значений энтропии в обратной эмульсии (табл. 6), обусловленные более хаотичным движением взаимодействующих частиц [16].

**Таблица 1.** Концентрационное распределение углеродсодержащих частиц, молекул и конденсированной фазы (моль/кг) в газовой фазе в зависимости от температуры окисления системы: мазут–воздух,  $T = 298\text{--}3000\text{ К}$ ,  $P = 0.1\text{ МПа}$

Молекулы и частицы	Температура, К						
	298	798	1298	1798	2298	2798	2998
CS	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.4 \times 10^{-13}$	$6.3 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-1}$	$4.8 \times 10^{-1}$	$4.9 \times 10^{-1}$
CS <sub>2</sub>	$3.7 \times 10^{-17}$	$7.3 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-2}$	$9.0 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-4}$
COS	$2.1 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$
CO	$7.5 \times 10^{-12}$	$1.8 \times 10^{-1}$	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
CO <sub>2</sub>	$2.1 \times 10^{-3}$	$9.2 \times 10^{-2}$	$6.4 \times 10^{-4}$	$9.3 \times 10^{-6}$	$9.1 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-7}$
C <sub>2</sub> O	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$9.7 \times 10^{-15}$	$3.3 \times 10^{-10}$	$1.2 \times 10^{-7}$	$5.6 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-5}$
C <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.2 \times 10^{-18}$	$4.5 \times 10^{-13}$	$1.2 \times 10^{-11}$	$8.0 \times 10^{-11}$	$2.6 \times 10^{-10}$	$3.1 \times 10^{-10}$
C <sub>(c)</sub>	38.56	47.68	58.10	58.23	56.52	7.51	$5.7 \times 10^{-29}$
C	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.1 \times 10^{-19}$	$1.3 \times 10^{-11}$	$4.4 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-3}$
C <sub>2</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.3 \times 10^{-22}$	$4.6 \times 10^{-13}$	$7.5 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$
C <sub>3</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$3.1 \times 10^{-21}$	$5.8 \times 10^{-12}$	$8.8 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-2}$
C <sub>4</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$7.6 \times 10^{-17}$	$2.2 \times 10^{-10}$	$3.1 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-5}$
C <sub>5</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.5 \times 10^{-16}$	$1.0 \times 10^{-9}$	$1.6 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-4}$
CH	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$3.3 \times 10^{-17}$	$1.5 \times 10^{-10}$	$8.4 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$8.9 \times 10^{-4}$
CH <sub>2</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$4.5 \times 10^{-22}$	$5.7 \times 10^{-12}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-5}$	$7.5 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-3}$
CH <sub>3</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$7.7 \times 10^{-10}$	$7.7 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$
CH <sub>4</sub>	22	13	$3.2 \times 10^{-1}$	$3.2 \times 10^{-2}$	$8.9 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$
C <sub>2</sub> H	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.4 \times 10^{-13}$	$1.2 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-1}$
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.5 \times 10^{-11}$	$2.8 \times 10^{-5}$	$8.7 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-1}$	1.4	1.7
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.1 \times 10^{-15}$	$6.9 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$9.4 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-3}$
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	$3.2 \times 10^{-20}$	$1.7 \times 10^{-6}$	$6.8 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-4}$
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$3.3 \times 10^{-12}$	$3.1 \times 10^{-9}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$9.1 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-7}$	$9.4 \times 10^{-8}$
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$4.1 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^{-8}$	$9.5 \times 10^{-9}$	$3.7 \times 10^{-9}$
C <sub>3</sub> H	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$6.4 \times 10^{-13}$	$9.2 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-1}$	1.0
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$3.4 \times 10^{-20}$	$7.1 \times 10^{-13}$	$6.3 \times 10^{-10}$	$2.7 \times 10^{-8}$	$2.3 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.3 \times 10^{-13}$	$1.2 \times 10^{-11}$	$3.0 \times 10^{-11}$	$4.8 \times 10^{-11}$	$4.3 \times 10^{-11}$	$2.1 \times 10^{-11}$
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	$4.2 \times 10^{-13}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$8.2 \times 10^{-11}$	$2.9 \times 10^{-12}$	$4.0 \times 10^{-13}$	$5.7 \times 10^{-14}$	$1.5 \times 10^{-14}$
C <sub>4</sub> H	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$4.3 \times 10^{-20}$	$8.4 \times 10^{-12}$	$3.7 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$
C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.3 \times 10^{-20}$	$4.6 \times 10^{-10}$	$1.3 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-1}$	$2.0 \times 10^{-1}$
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$4.3 \times 10^{-17}$	$6.1 \times 10^{-13}$	$1.2 \times 10^{-10}$	$2.9 \times 10^{-9}$	$3.4 \times 10^{-9}$
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$3.9 \times 10^{-19}$	$8.6 \times 10^{-15}$	$2.9 \times 10^{-13}$	$2.1 \times 10^{-12}$	$5.0 \times 10^{-12}$	$2.8 \times 10^{-12}$
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	$8.5 \times 10^{-19}$	$8.6 \times 10^{-13}$	$2.6 \times 10^{-15}$	$5.1 \times 10^{-17}$	$5.0 \times 10^{-18}$	$4.9 \times 10^{-19}$	$9.1 \times 10^{-20}$
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$4.7 \times 10^{-17}$	$2.5 \times 10^{-13}$	$4.6 \times 10^{-12}$	$2.3 \times 10^{-11}$	$4.3 \times 10^{-11}$	$1.9 \times 10^{-11}$
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.7 \times 10^{-14}$	$5.2 \times 10^{-12}$	$2.6 \times 10^{-11}$	$6.2 \times 10^{-11}$	$7.0 \times 10^{-11}$	$2.2 \times 10^{-11}$
CHO	$1.9 \times 10^{-22}$	$9.5 \times 10^{-14}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-7}$	$4.5 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$

Таблица 1. Окончание

Молекулы и частицы	Температура, К						
	298	798	1298	1798	2298	2798	2998
CHO <sub>2</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$2 \times 10^{-15}$	$8.1 \times 10^{-13}$	$1.1 \times 10^{-12}$	$1.4 \times 10^{-12}$	$1.6 \times 10^{-12}$	$2.0 \times 10^{-12}$
CH <sub>2</sub> O	$2.2 \times 10^{-22}$	$6.0 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$9.5 \times 10^{-7}$	$9.0 \times 10^{-7}$	$7.6 \times 10^{-7}$	$6. \times 10^{-7}$
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$1.8 \times 10^{-15}$	$2.7 \times 10^{-8}$	$6.3 \times 10^{-10}$	$1.2 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-12}$	$3.6 \times 10^{-13}$	$2.6 \times 10^{-13}$
CH <sub>3</sub> O	$1.9 \times 10^{-22}$	$6.4 \times 10^{-19}$	$1.4 \times 10^{-14}$	$2.7 \times 10^{-13}$	$1.5 \times 10^{-12}$	$3.6 \times 10^{-12}$	$4.4 \times 10^{-12}$
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	$6.7 \times 10^{-16}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.3 \times 10^{-13}$	$6. \times 10^{-16}$	$3.0 \times 10^{-17}$	$3.3 \times 10^{-18}$	$1. \times 10^{-18}$
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	$1.9 \times 10^{-22}$	$3.1 \times 10^{-12}$	$1.6 \times 10^{-13}$	$6.6 \times 10^{-15}$	$1.1 \times 10^{-15}$	$2.2 \times 10^{-16}$	$8.5 \times 10^{-17}$
CN	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$5.6 \times 10^{-12}$	$4.3 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-4}$	$5.8 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-2}$
CN <sub>2</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.5 \times 10^{-14}$	$8.2 \times 10^{-10}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-6}$	$3.7 \times 10^{-6}$
C <sub>2</sub> N	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$4.8 \times 10^{-17}$	$2.9 \times 10^{-10}$	$1.8 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-4}$	$6.7 \times 10^{-4}$
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	$1.9 \times 10^{-22}$	$3.6 \times 10^{-18}$	$2.7 \times 10^{-10}$	$8.6 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4}$
NCO	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.3 \times 10^{-15}$	$2.6 \times 10^{-12}$	$1.9 \times 10^{-10}$	$1.3 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$
HCN	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-1}$	$6.2 \times 10^{-1}$	$8.2 \times 10^{-1}$	$7.5 \times 10^{-1}$
HNC	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.0 \times 10^{-17}$	$1.1 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$
C <sub>2</sub> HN	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.0 \times 10^{-14}$	$3.0 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-6}$	$7.1 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-4}$
C <sub>3</sub> HN	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.3 \times 10^{-15}$	$9.6 \times 10^{-8}$	$2.2 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^{-1}$
C <sub>5</sub> HN	$1.9 \times 10^{-22}$	$5.2 \times 10^{-21}$	$9.0 \times 10^{-10}$	$6.8 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-2}$	$7.9 \times 10^{-1}$	$8.4 \times 10^{-1}$
C <sub>7</sub> HN	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.5 \times 10^{-12}$	$6.1 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-2}$	1.7	1.91
C <sub>9</sub> HN	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$6.0 \times 10^{-15}$	$4.6 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-2}$	3.1	3.50
N <sub>2</sub> C	$1.9 \times 10^{-22}$	$3.5 \times 10^{-18}$	$1.7 \times 10^{-10}$	$4.9 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-4}$
C <sup>+</sup>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$7.1 \times 10^{-18}$	$3.4 \times 10^{-12}$	$1.4 \times 10^{-10}$
C <sub>2</sub> <sup>+</sup>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.8 \times 10^{-20}$	$8.2 \times 10^{-14}$	$4.8 \times 10^{-12}$
C <sub>2</sub> <sup>-</sup>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$7.5 \times 10^{-20}$	$1.6 \times 10^{-14}$	$6.2 \times 10^{-11}$	$6.5 \times 10^{-10}$
CO <sup>+</sup>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.1 \times 10^{-16}$	$7.7 \times 10^{-13}$	$1.0 \times 10^{-11}$
CH <sup>+</sup>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.1 \times 10^{-16}$	$9.1 \times 10^{-12}$	$2.1 \times 10^{-10}$
CHO <sup>+</sup>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$2.3 \times 10^{-24}$	$6.4 \times 10^{-15}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$4.7 \times 10^{-8}$
CN <sup>-</sup>	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.9 \times 10^{-22}$	$1.7 \times 10^{-20}$	$4.4 \times 10^{-13}$	$2.2 \times 10^{-10}$	$7.6 \times 10^{-9}$	$2.2 \times 10^{-8}$

Величины энтальпии и внутренней энергии отрицательные в пределах температуры от 500 до 750 К для системы мазут–воздух, а для системы мазут–вода–воздух направление химических превращений соответствует к интервалу от 500 до 950 К. Число Прандтля для системы мазут–вода–воздух меняется от 0.69 до 0.47, и она более подвержена к разбавлению; доля конденсированной фазы ( $z$ ) в указанных выше системах составляет 0.79/0.41 при 500 К и 0.78/0.54 при 950 К, соответственно образование конденсированного углерода ( $C_c$ ) в два раза меньше в системе мазут–вода–воз-

дух. Таким образом, термодинамические параметры и величины число Прандтля тоже показали в эффективности использования системы мазут–вода–воздух в процессе снижения техногенных нагрузок газовых выбросов. Отмечено, что концентрация оксида углерода, углеводородов нефти и сажи при сжигании водомазутной эмульсии уменьшилась в среднем на 63–75%. Величины углеродного следа в газовой фазе составили от 0.6 до 1, что и полезна при оценке углеродной емкости на единицу продукции.

**Таблица 2.** Сжигание мазута в воздухе и содержание углерода (С, г) в различных компонентах и частицах при температурах: 298, 798 и 1298 К

Молекулы и частицы	Температура, К		
	298	798	1298
CS	$2.3 \times 10^{-21}$	$2.9 \times 10^{-12}$	$7.65 \times 10^{-5}$
CS <sub>2</sub>	$4.5 \times 10^{-16}$	$8.7 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^{-3}$
COS	$2.6 \times 10^{-8}$	$3.32 \times 10^{-3}$	$7.75 \times 10^{-3}$
CO	$9.04 \times 10^{-11}$	2.22	30.84
CO <sub>2</sub>	0.026	0.22	$7.75 \times 10^{-3}$
C <sub>2</sub> O	$4.63 \times 10^{-21}$	$4.6 \times 10^{-21}$	$1.17 \times 10^{-14}$
C <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	$6.95 \times 10^{-21}$	$8.2 \times 10^{-17}$	$5.51 \times 10^{-12}$
C <sub>(с)</sub>	462.72	572.16	697.2
C	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$1.43 \times 10^{-18}$
C <sub>2</sub>	$4.63 \times 10^{-21}$	$4.6 \times 10^{-21}$	$2.87 \times 10^{-21}$
C <sub>3</sub>	$6.95 \times 10^{-21}$	$6.9 \times 10^{-21}$	$1.12 \times 10^{-19}$
C <sub>4</sub>	$9.3 \times 10^{-21}$	$9.3 \times 10^{-21}$	$9.3 \times 10^{-21}$
C <sub>5</sub>	$1.16 \times 10^{-20}$	$1.1 \times 10^{-20}$	$1.16 \times 10^{-20}$
CH	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$4.04 \times 10^{-16}$
CH <sub>2</sub>	$2 \times 10^{-21}$	$5 \times 10^{-21}$	$9 \times 10^{-5}$
CH <sub>3</sub>	$2 \times 10^{-21}$	$9 \times 10^{-9}$	$6 \times 10^{-11}$
CH <sub>4</sub>	26.88	15.72	3.91
C <sub>2</sub> H	$4 \times 10^{-21}$	$4 \times 10^{-21}$	$3 \times 10^{-12}$
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$4 \times 10^{-21}$	$6 \times 10^{-10}$	$6 \times 10^{-4}$
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	$4 \times 10^{-21}$	$2 \times 10^{-14}$	$1 \times 10^{-7}$
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	$7 \times 10^{-19}$	$4 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3}$
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	$4 \times 10^{-21}$	$8 \times 10^{-11}$	$7 \times 10^{-8}$
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$1 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-5}$
C <sub>3</sub> H	$6 \times 10^{-21}$	$6 \times 10^{-21}$	$2 \times 10^{-11}$
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	$6 \times 10^{-21}$	$1 \times 10^{-18}$	$2 \times 10^{-11}$
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	$6 \times 10^{-21}$	$8 \times 10^{-12}$	$4 \times 10^{-10}$
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	$1 \times 10^{-11}$	$3 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-9}$
C <sub>4</sub> H	$9 \times 10^{-21}$	$9 \times 10^{-21}$	$2 \times 10^{-18}$
C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	$9 \times 10^{-21}$	$6 \times 10^{-19}$	$2 \times 10^{-8}$
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub>	$9 \times 10^{-21}$	$9 \times 10^{-21}$	$2 \times 10^{-15}$
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	$9 \times 10^{-21}$	$1 \times 10^{-17}$	$4 \times 10^{-13}$
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	$5 \times 10^{-17}$	$4 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-13}$
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	$1 \times 10^{-20}$	$2 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-11}$
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	$1 \times 10^{-20}$	$1 \times 10^{-12}$	$3 \times 10^{-10}$
CHO	$2.32 \times 10^{-21}$	$1.1 \times 10^{-12}$	$1.3 \times 10^{-6}$
CHO <sub>2</sub>	$2.32 \times 10^{-21}$	$3.4 \times 10^{-14}$	$9.83 \times 10^{-11}$
CH <sub>2</sub> O	$2.65 \times 10^{-21}$	$7.24 \times 10^{-7}$	$1.28 \times 10^{-4}$
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$2.22 \times 10^{-14}$	$3.36 \times 10^{-7}$	$7.6 \times 10^{-9}$

Таблица 2. Окончание

Молекулы и частицы	Температура, К		
	298	798	1298
CH <sub>3</sub> O	$2.32 \times 10^{-21}$	$7.7 \times 10^{-18}$	$1.73 \times 10^{-13}$
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	$1.62 \times 10^{-14}$	$2.52 \times 10^{-9}$	$3.2 \times 10^{-12}$
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	$6.95 \times 10^{-21}$	$1.1 \times 10^{-10}$	$5.6 \times 10^{-12}$
CN	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$6.83 \times 10^{-11}$
CN <sub>2</sub>	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$3.1 \times 10^{-13}$
C <sub>2</sub> N	$4.63 \times 10^{-21}$	$4.6 \times 10^{-21}$	$1.16 \times 10^{-15}$
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	$4.63 \times 10^{-21}$	$8.8 \times 10^{-17}$	$6.7 \times 10^{-9}$
NCO	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$1.7 \times 10^{-14}$
N <sub>2</sub> C	$2.32 \times 10^{-21}$	$4.3 \times 10^{-17}$	$2.15 \times 10^{-9}$
HCN	$2.32 \times 10^{-21}$	$1.46 \times 10^{-5}$	$4.43 \times 10^{-2}$
HNC	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.4 \times 10^{-16}$	$1.37 \times 10^{-8}$
C <sub>2</sub> HN	$4.63 \times 10^{-21}$	$4.6 \times 10^{-21}$	$7.84 \times 10^{-13}$
C <sub>3</sub> HN	$6.95 \times 10^{-21}$	$5 \times 10^{-14}$	$3.47 \times 10^{-13}$
C <sub>5</sub> HN	$1.16 \times 10^{-20}$	$3.1 \times 10^{-19}$	$5.4 \times 10^{-8}$
C <sub>7</sub> HN	$1.62 \times 10^{-20}$	$1.6 \times 10^{-20}$	$2.13 \times 10^{-10}$
C <sub>9</sub> HN	$1.85 \times 10^{-20}$	$1.8 \times 10^{-20}$	$5.85 \times 10^{-13}$
C <sup>+</sup>	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$2.32 \times 10^{-21}$
C <sub>2</sub> <sup>+</sup>	$4.63 \times 10^{-21}$	$4.6 \times 10^{-21}$	$4.63 \times 10^{-21}$
C <sub>2</sub> <sup>-</sup>	$4.63 \times 10^{-21}$	$4.6 \times 10^{-21}$	$4.63 \times 10^{-21}$
CO <sup>+</sup>	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$
CH <sup>+</sup>	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$2.32 \times 10^{-21}$
CHO <sup>+</sup>	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$2.8 \times 10^{-23}$
CN <sup>-</sup>	$2.32 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-21}$	$2.1 \times 10^{-19}$
Количество в граммах	489.62	590.33	732.01

Таблица 3. Сжигание мазута и расчет концентраций вредных веществ в газовой фазе

Компоненты газовых выбросов	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Количество веществ, выбрасываемых в атмосферу		Сумма максимальных приземных концентраций (доли ПДК), создаваемых выбросами источника
		макс., г/с	сум., т/год	
CO	3.0	0.071	2.242	0.00356
NO <sub>x</sub>	0.085	0.069	2.186	0.12205
SO <sub>2</sub>	0.5	0.444	14.016	0.13351
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	1.5	1.067	33.638	0.10695
Сажа	0.15	0.046	1.458	0.04611

**Таблица 4.** Сжигание водомазутных эмульсий и расчет концентраций вредных веществ в газовой фазе

Компоненты газовых выбросов	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Количество веществ, выбрасываемых в атмосферу		Сумма максимальных приземных концентраций (доли ПДК), создаваемых выбросами источника
		макс., г/с	сум., т/год	
CO	3.0	0.021	0.673	0.00145
NO <sub>x</sub>	0.085	0.023	0.729	0.04953
SO <sub>2</sub>	0.5	0.427	13.455	0.12299
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	1.5	0.391	12.334	0.04901
Сажа	0.15	0.012	0.364	0.02005

**Таблица 5.** Снижение концентраций вредных веществ в дымовых газах котлоагрегатов типа Е-1/9М на основе сжигания водомазутных эмульсий

Компоненты газовых выбросов	количество вредных веществ						снижение газовых выбросов, %
	мазут			водомазутная эмульсия			
	мг/м <sup>3</sup>	г/с	т/год	мг/м <sup>3</sup>	г/с	т/год	
SO <sub>2</sub>	500	0.444	14.016	480	0.427	13.455	4.06
NO <sub>x</sub>	78	0.069	2.186	26	0.023	0.729	66.67
CO	80	0.071	2.242	24	0.021	0.673	70.00
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	1200	1.067	33.638	440	0.391	12.334	63.33
Сажа	52	0.046	1.458	13	0.012	0.364	75.00

**Таблица 6.** Сравнительные характеристики термодинамических параметров системы: мазут–воздух и мазут–вода–воздух

Термодинамические и физические параметры	Системы	
	мазут–воздух	мазут–вода–воздух
	Т, К	
	500–750	500–950
Энтродия $S$ , кДж/(кг К)	2.49–3.28	7.44–11.49
Энтальпия $I$ , кДж/кг	(–498)–(–94.7)	(–3252)–(–162)
Внутренняя энергия $U$ , Дж/кг	(–510)–(–125)	(–3307)–(–452)
Число Прандтля ( $Pr = \gamma/D$ )	0.68–0.59	0.69–0.47
Доля конденсированной фазы ( $z$ )	0.79–0.78	0.41–0.54

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена система мазут–воздух при избытке окислителя (альфа-фактор 1.3) при широких пределах изменения температуры ( $T = 298–3000$  К,  $P = 0.1$  МПа). Рассчитаны равновесные параметры и определены концентрационные распределения С, S, N, O, H – содержащих компонентов и активных частиц в газовой фазе. На основе суммарного концентрационного распределения С, S,

N, O, H – содержащих компонентов и активных частиц рассчитаны весовое содержание углерода в газовой фазе. С учетом химической матрицы системы мазут–воздух и весового содержания углерода найдена техногенная нагрузка углерода в газовой фазе. Рассчитаны величины углеродного следа (0.6–1) в газовой фазе и отмечено снижение концентрации оксида углерода, углеводородов нефти и сажи при сжигании водомазутной эмульсии в среднем на 63–75%.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

<i>I</i>	энтальпия, Дж/кг
<i>P</i>	давление, Па
<i>S</i>	энтропия, Дж/К
<i>T</i>	температура, К
<i>U</i>	внутренняя энергия, Дж
<i>V</i>	объем, м <sup>3</sup>
$\rho$	плотность, кг/м <sup>3</sup>
<i>Pr</i>	число Прандтля

## ИНДЕКСЫ

<i>c</i>	конденсированный
<i>g.m.</i>	газовоздушная смесь
<i>f.g.</i>	дымовые газы

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baranov E., Kim I., Staritsyna E.* Estimation of Russian constant-price input-output accounts according to NACE/CRA // Higher School of Economics Research Paper. 2011. 7.
2. *Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Единак Е.А.* Возможности и риски политики климатического регулирования в России // Вопр. экон. 2022. № 1. С. 72
3. *Durojaye O., Laseinde T., Oluwafemi I.* A descriptive review of carbon footprint // Proceeding of 2nd International Conference on Human Systems Engineering and Design (IHSED2019). Munich.: Springer Int. Publishing, 2020. p. 960
4. ISO 14067: (2018) "Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification"
5. *Magacho G., Espagne E., Godin A.* Impacts of the CBAM on EU trade partners: consequences for developing countries // Climate Policy. 2023. P. 1
6. *Lazaryan S., Sudakov S.* Impact of EU's CBAM on EAEU Countries: The Case of Russia // Global Challenges of Climate Change. V. 2: Risk Assessment, Political and Social Dimension of the Green Energy Transition. – Cham: Springer International Publishing. 2022. P. 157.
7. *Eicke L., Weko S., Apergi M., Marian A.* Pulling up the carbon ladder? Decarbonization, dependence, and third-country risks from the European carbon border adjustment mechanism // Energy Research & Social Science. 2021. 80. 102240.
8. *Böhringer C., Fischer C., Rosendahl K.E., Rutherford T.F.* Potential impacts and challenges of border carbon adjustments // Nature Climate Change. 2022. 12(1). P. 22.
9. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. Kanagawa, Japan.
10. *Davis S., Peters G., Caldeira K.* The Supply Chain of CO<sub>2</sub> Emissions // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2011. V. 108. №. 45. P. 18554.
11. *Boitier B.* CO<sub>2</sub> emissions production-based accounting vs consumption // Insights from the WIOD databases. Proceeding of WIOD Conference. Brussels. 2012
12. *Пискулова Н.А., Костюнина Г.М., Абрамова А.В.* Климатическая политика основных торговых партнеров России и ее влияние на экспорт ряда российских регионов // Всемирный фонд дикой природы (WWF). М.: 2013
13. "Газы парниковые (2014). Определение количества выбросов парниковых газов в организациях и отчетность. Руководство по применению стандарта ИСО 14064-1".
14. *Meshalkin V.P.* Current Theoretical and Applied Research on Energy- and Resource-Saving Highly Reliable Chemical Process Systems Engineering // Theor. Found. Chem. Eng. 2021. V. 55. № 4. P. 563. [*Мешалкин В.П.* Актуальные теоретические и прикладные исследования по инжинирингу энергоресурсосберегающих высоконадежных химико-технологических систем // Теор. осн. хим. технол. 2021. Т. 55. № 4. С. 399]
15. *Maimekov Z.K., Sambaeva D.A., Izakov J.B., Shaikieva N.T., Dolaz M., Kobyta M.* Concentration distribution of molecules and other species in the model system Fe–NaCl–Na<sub>2</sub>S–H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O at various temperatures of the electrocoagulation process // Theor. Found. Chem. Eng. 2023. V. 57. № 2. P. 205. [*Маймеков З.К., Самбаева Д.А., Изаков Ж.Б., Шайкиева Н.Т., Долаз М., Кобыта М.* Концентрационное распределение молекул и частиц в модельной системе: Fe–NaCl–Na<sub>2</sub>S–H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O при различных температурах процесса электрокоагуляции // Теор. осн. хим. технол. 2023. Т. 57. № 2. С. 218]
16. *Sambaeva D.A., Moldobaev M.B., Kemelov K.A., Maimekov Z.K.* Water is an effective additive to fuel oil to reduce the concentration of soot in the gas phase // Manas J. Eng. 2022. V. 10. № 2. P. 145
17. *Кемелов К.А., Молдобаев М.Б., Самбаева Д.А., Маймеков З.К.* Влияние воды в водотопливных эмульсиях на процессы снижения концентрации сажи в газовой фазе // Проблемы региональной экологии. 2016. № 4. С. 30.
18. *Молдобаев М.Б., Самбаева Д.А., Маймеков З.К.* Снижение концентрации сажи в газовой фазе на основе использования водотопливных эмульсий в катлоагрегатах типа КЕВ-4-14 // Инженер. 2015. № 9. С. 354
19. *Маймеков З.К., Самбаева Д.А., Молдобаев М.Б., Кемелов К.А.* Влияние воды в топливных эмульсиях на процессы образования и уменьшения концентрации сажи в газовой фазе // Изв. вузов. 2014. № 5. С. 8
20. *Самбаева Д.А., Молдобаев М.Б.* Модифицирование топлива в виде водотопливных эмульсий с целью снижения концентрации сажи в газовой фазе // Изв. КГТУ им. И. Раззакова. 2014. № 33. С. 399
21. *Маймеков З.К.* Научные основы оптимизации процессов сжигания жидкого топлива и рекарбонизации водно-солевых систем. Бишкек, 2015.
22. *Синярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Мусеев Г.К.* Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. М.: Наука, 1982.
23. *Белов Г.В., Трусов Б.Г.* Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013.