

А. А. Сагдеев, Д. Н. Латыпов, Г. С. Сагдеева,
А. М. Абдуллин, А. Р. Зарифов

РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГАЗООБРАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ И ИХ СМЕСЕЙ

Ключевые слова: смеси газообразных углеводородов, коэффициент теплового излучения, спектральные полосы поглощения, серое приближение.

Приведена функциональная зависимость коэффициента теплового излучения этана, пропана, бутана, этилена, пропилена, бутиленов и изобутилена от температуры, давления и толщины слоя излучающего газа. Интегральные коэффициенты теплового излучения указанных газообразных углеводородов были исследованы ранее. Функциональная зависимость коэффициента теплового излучения углеводородов от температуры принята линейной, от давления и толщины слоя газа – показательной т.е. в виде: $\varepsilon(T, P, L) = (A + BT)P^K L^m$. Показатели K и m определены методом наименьших квадратов. Минимум суммарных квадратов отклонений S по всем экспериментальным точкам рассматривается при одном определенной температуре T . Однако следует отметить, что полученная функциональная зависимость основывается на экспериментальных значениях, а не на физических законах процессов излучения, поэтому проводить экстраполяцию ее за пределы эксперимента не желательно. Измерены интегральные коэффициенты теплового излучения бинарных и тройных смесей: этан + бутаны, пропан + бутилены, этан + пропилен, пропан + изобутилен, пропан + бутан, пропилен + бутилены, этилен + пропилен + бутилены, этан + пропилен + бутилены. при температуре 673 К в диапазоне парциальных давлений от 0,004 до 0,1 МПа абсолютным методом. Установлено, что коэффициент теплового излучения смеси углеводородов всегда ниже суммы отдельно взятых коэффициентов теплового излучения чистых газообразных углеводородов. Это связано с перекрытием спектральных полос поглощения углеводородов, так как все они имеют ряд полос, вызванных аналогичными видами колебаний. При расчете коэффициента теплового излучения смеси углеводородов рекомендовано использовать серое приближение с учетом поправочного коэффициента. Сравнение экспериментально полученных значений $\varepsilon_{см}^Э$ и рассчитанных $\varepsilon_{см}^Р$ согласно уравнению (12) показывает, что расхождение между ними $\Delta = \frac{\varepsilon_{см}^Э - \varepsilon_{см}^Р}{\varepsilon_{см}^Э} \cdot 100\%$ для одних смесей находится в пределах 10%, для других достигает 25%. Эти отклонения зависят от степени перекрытия спектральных полос. Для определения более точной поправки на перекрытие полос поглощения углеводородов необходимы спектральные исследования, которые позволили бы учесть влияние температуры, относительного содержания компонентов в смеси, а также оптической толщины слоя смеси газов.

А. А. Sagdeev, D. N. Latypov, G. S. Sagdeeva,
А. М. Abdullin, А. R. Zarifov

RADIATIVE PROPERTIES OF GASEOUS HYDROCARBONS AND THEIR MIXTURES

Keywords: gaseous hydrocarbon mixtures, thermal emissivity, spectral absorption bands, grayscale approximation.

The functional dependence of the thermal emissivity of ethane, propane, butane, ethylene, propylene, butylenes, and isobutylene on temperature, pressure, and the thickness of the radiating gas layer is presented. The integral thermal emissivity coefficients of these gaseous hydrocarbons were studied previously. The functional dependence of the thermal emissivity of hydrocarbons on temperature is assumed to be linear, and on pressure and the gas layer thickness, exponential, i.e., in the form: $\varepsilon(T, P, L) = (A + BT)P^K L^m$. The indices K and m are determined by the least squares method. The minimum total squared deviations S for all experimental points are considered at a single specific temperature T . However, it should be noted that the resulting functional dependence is based on experimental values, not on the physical laws of radiation processes, so extrapolating it beyond the experimental limits is not advisable. The integral thermal emissivity coefficients of binary and ternary mixtures were measured: ethane + butanes, propane + butylenes, ethane + propylene, propane + isobutylene, propane + butane, propylene + butylenes, ethylene + propylene + butylenes, and ethane + propylene + butylenes. The absolute method was used to measure the thermal emissivity coefficients of the mixtures at a temperature of 673 K in a partial pressure range from 0.004 to 0.1 MPa. It was found that the thermal emissivity coefficient of the hydrocarbon mixture is always lower than the sum of the individual thermal emissivity coefficients of the pure gaseous hydrocarbons. This is due to the overlap of the spectral absorption bands of hydrocarbons, as they all have a number of bands caused by similar vibration modes. When calculating the thermal emissivity of a hydrocarbon mixture, it is recommended to use a gray-scale approximation, taking into account a correction factor. A comparison of the experimentally obtained $\varepsilon_{см}^E$ values and the calculated $\varepsilon_{см}^P$ values according to equation (12) shows that the discrepancy between them, $\Delta = \frac{\varepsilon_{см}^E - \varepsilon_{см}^P}{\varepsilon_{см}^E} \cdot 100\%$, is within 10% for some mixtures and reaches 25% for others.

These deviations depend on the degree of overlap of the spectral bands. To determine a more accurate correction for the overlap of hydrocarbon absorption bands, spectral studies are necessary, which would take into account the influence of temperature, the relative content of components in the mixture, and the optical thickness of the gas mixture layer.

Введение

В условиях возрастающего использования углеводородов в различных технологических процессах все острее становится недостаточность, а в некото-

рых случаях и полное отсутствие экспериментальных данных по их радиационным свойствам. В реальных условиях как правило приходится иметь дело с излучением смеси газов. Так в агрегатах нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности,

в частности в печах пиролиза [1-4] обычно встречаются не чистые углеводороды, а их смеси. Поэтому при расчетах лучистого теплообмена в этих аппаратах необходимо располагать не только коэффициентами теплового излучения отдельных углеводородов, но и их смесей. В связи с этим была поставлена задача экспериментального измерения интегральных коэффициентов теплового излучения смесей углеводородов при температуре 673 К и различных парциальных давлениях. Кроме того, в данной работе выведена функциональная зависимость коэффициента теплового излучения этана, пропана, бутана, этилена, пропилена, бутиленов и изобутилена от температуры, давления и толщины слоя излучающего газа. Интегральные коэффициенты теплового излучения указанных газообразных углеводородов были исследованы ранее и представлены в работе [5].

Теоретическая часть

Функциональная зависимость коэффициента теплового излучения углеводородов от температуры принята линейной, от давления и толщины слоя газа – показательной, т.е. в виде:

$$\varepsilon(T, P, L) = (A + BT)P^K L^m \tag{1}$$

где T - температура, К; P - давление, Па; L - толщина слоя газа, м; A и B - эмпирические размерные коэффициенты. Определение неизвестных коэффициентов и показателей в выражении (1) проводится в два этапа.

Вначале рассчитываются показатели K и m. При постоянной температуре A + BT = const = C, тогда $\varepsilon = CP^K L^m$ или для i-го эксперимента $\varepsilon_i = CP_i^K L_i^m$. В результате математических выкладок получается:

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}} = \left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right)^K \cdot \left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right)^m \tag{2}$$

$$\ln\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}}\right) = K \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right) + m \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right) \tag{3}$$

Показатели K и m определяются, используя метод наименьших квадратов.[6] Минимум суммарных квадратов отклонений S по всем экспериментальным точкам рассматривается при одном определенной температуре T.

$$s = \sum_{i=1}^n \left(K \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right) + m \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right) - \ln\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}}\right) \right)^2 \tag{4}$$

Для нахождения S необходимо вычислить частные производные по K и по m, и приравнять их к нулю.

$$\begin{cases} \frac{\partial s}{\partial K} = \sum_{i=1}^n \left[2 \left(K \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right) + m \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right) - \ln\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}}\right) \right) \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right) \right] \\ \frac{\partial s}{\partial m} = \sum_{i=1}^n \left[2 \left(K \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right) + m \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right) - \ln\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}}\right) \right) \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right) \right] \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} K \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right)^2 + m \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right) \cdot \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right) - \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}}\right) \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right) = 0 \\ K \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right) \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right) + m \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right)^2 - \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}}\right) \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right) = 0 \end{cases} \tag{6}$$

Решение системы уравнения (3.6) позволяет найти K и m:

$$\begin{cases} m = \frac{C1-C2 \cdot \frac{A1}{A2}}{B1-B2 \cdot \frac{A1}{A2}}, \\ K = \frac{C2-mB2}{A2} \end{cases} \tag{7}$$

где

$$A1 = \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right) \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right); B1 = \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right)^2; C1 = \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}}\right) \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right)$$

$$A2 = \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right)^2; B2 = \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{L_i}{L_{i+1}}\right) \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right); C2 = \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}}\right) \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right)$$

Второй этап заключается в определении коэффициентов A и B. Здесь используется метод наименьших квадратов.

$$\begin{cases} \varepsilon = (A + BT)P^K L^m = AP^K L^m + BTP^K L^m \\ \varepsilon = AP_i^K L_i^m + BT_i P_i^K L_i^m \end{cases} \tag{8}$$

$$S = \sum_{i=1}^n (AP_i^K L_i^m + BT_i P_i^K L_i^m - \varepsilon_i)^2 \tag{9}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial A} = A \sum_{i=1}^n P_i^{2K} L_i^{2m} + B \sum_{i=1}^n T_i P_i^{2K} L_i^{2m} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i P_i^K L_i^m = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial B} = A \sum_{i=1}^n T_i P_i^{2K} L_i^{2m} + B \sum_{i=1}^n T_i^2 P_i^{2K} L_i^{2m} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i T_i P_i^K L_i^m = 0 \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} B = \frac{C3-C4 \cdot \frac{A3}{A4}}{B3-B2 \cdot \frac{A3}{A4}}, \\ A = \frac{C4-B \cdot B4}{A4} \end{cases} \tag{11}$$

где

$$A3 = \sum_{i=1}^n T_i P_i^{2K} L_i^{2m}; B3 = \sum_{i=1}^n T_i^2 P_i^{2K} L_i^{2m}; C3 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i T_i P_i^K L_i^m \\ A4 = \sum_{i=1}^n P_i^{2K} L_i^{2m}; B4 = \sum_{i=1}^n T_i P_i^{2K} L_i^{2m}; C4 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i P_i^K L_i^m$$

Таким образом, для исследованных газов рассчитаны значения постоянных A, B, K и m, которые сведены в таблицу 1. Однако следует отметить, что полученная функциональная зависимость основывается на экспериментальных значениях, а не на физических законах процессов излучения, поэтому проводить экстраполяцию ее за пределы эксперимента не желательно.

Таблица 1 - Значения постоянных A, B, K и m

Table 1 - Values of constants A, B, K and m

№ п/п	Наименование газа	A	B · 10 ³	K	m
1.	Этан	1,76	0,39	0,51	0,5
2.	Пропан	4,12	0	0,67	0,5
3.	Бутан	4,78	-1,65	0,70	0,5
4.	Изобутан	4,48	0	0,69	0,5
5.	Этилен	1,85	-0,72	0,38	0,3
6.	Пропилен	4,11	-2,33	0,45	0,3
7.	Бутилены	4,39	-2,13	0,48	0,3
8.	Изобутилен	3,30	-0,84	0,43	0,3

Сравнение расчетных значений коэффициента теплового излучения, полученных по уравнению (1), с экспериментальными данными показало, что средняя относительная ошибка аппроксимации составляет 7,4%, а максимальная ошибка не превышает 14 %.

Экспериментальная часть

Измерения интегральных коэффициентов теплового излучения смесей углеводородов при температуре 673 К и различных давлениях производились абсолютным методом на установке, схема и описание которой приведены в работах [7,8]. Основными узлами установки являются рабочая камера и приемник излучения. Слой газа в рабочей камере создавался методом встречных потоков исследуемого и диатермичного (азота) газов. В ходе экспериментов проведены соответствующие измерения коэффициентов теплового излучения следующих бинарных и тройных смесей: этан + бутаны, пропан + бутилены, этан

+ пропилен, пропан + изобутилен, пропан + бутан, пропилен + бутилены, этилен + пропилен + бутилены, этан + пропилен + бутилены. Исследования проводились при толщине слоя газа 0,15 м и температуре 673 К, в диапазоне парциальных давлений от 0,004 до 0,1 МПа.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений показали, что коэффициент теплового излучения смеси углеводородов всегда ниже суммы отдельно взятых коэффициентов теплового излучения чистых газообразных углеводородов. Это связано с перекрытием спектральных полос поглощения углеводородов, так как все они имеют ряд полос, вызванных аналогичными видами колебаний. [9-14].

Следовательно, в тех областях спектра, где расположены эти полосы, часть энергии, спускаемой одним газом, поглощается другим и, наоборот, часть излучения второго газа поглощается первым, т.е. можно записать: $\epsilon_{см} < \sum_{i=1}^n \epsilon_i$. Такое же положение

наблюдается для смеси углекислого газа и водяного пара. Наиболее сильно эффект перекрытия полос поглощения CO₂ и H₂O проявляется в полосе 2,7 мкм. В области спектра от 3800 см⁻¹ до 4400 см⁻¹ излучает только H₂O, а в области от 2500 см⁻¹ до 3800 см⁻¹ излучают совместно H₂O и CO₂ [15, 16].

При расчете коэффициента теплового излучения смеси углеводородов в работе [17] рекомендовано использовать серое приближение. В этом случае уравнение для определения излучательной способности смеси газов записывается в виде:

$$\epsilon_{см}^P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \epsilon_i), \quad (12)$$

где ϵ_i – коэффициент теплового излучения отдельных компонентов смеси при соответствующих парциальных давлениях.

В таблице 2 приведены экспериментальные и рассчитанные по серому приближению коэффициенты теплового излучения смесей газообразных углеводородов.

Таблица 2 - Экспериментальные и рассчитанные по серому приближению значения коэффициента теплового излучения смесей углеводородов.

Table 2 - Experimental and calculated values of the thermal emissivity coefficient of hydrocarbon mixtures using the gray approximation

Парциальное давление и коэффициент излучения								
P ₁ , кПа	ε ₁	P ₂ , кПа	ε ₂	P ₃ , кПа	ε ₃	ε _{см} ^э	ε _{см} ^р	Δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЭТАН + БУТИЛЕНЫ								
7,00	0,049	93,00	0,515	-	-	0,506	0,539	6,5
7,15	0,050	92,85	0,515	-	-	0,516	0,539	4,4
7,50	0,050	92,50	0,515	-	-	0,511	0,539	5,5
8,60	0,060	91,40	0,510	-	-	0,518	0,539	4,1
9,80	0,065	90,20	0,510	-	-	0,526	0,551	4,7
10,80	0,070	89,20	0,505	-	-	0,504	0,540	7,1
15,60	0,085	84,40	0,480	-	-	0,523	0,524	1,0
22,30	0,110	77,70	0,470	-	-	0,476	0,528	10
23,30	0,115	76,70	0,465	-	-	0,492	0,527	7,1
29,40	0,125	70,60	0,450	-	-	0,467	0,518	10
ПРОПАН + БУТИЛЕНЫ								
5,00	0,055	95,00	0,525	-	-	0,509	0,551	8,2
10,90	0,84	89,10	0,505	-	-	0,502	0,547	8,9
11,00	0,085	89,00	0,505	-	-	0,506	0,547	8,1
11,40	0,085	88,60	0,500	-	-	0,502	0,543	8,1
23,00	0,140	77,00	0,465	-	-	0,499	0,545	9,2
58,00	0,250	42,00	0,345	-	-	0,456	0,502	10
ЭТАН + ПРОПИЛЕН								
5,50	0,040	94,50	0,515	-	-	0,509	0,524	5
28,20	0,120	71,80	0,460	-	-	0,475	0,524	10
86,60	0,240	13,40	0,165	-	-	0,340	0,365	7,3
ПРОПАН + ИЗОБУТИЛЕН								
14,20	0,105	85,80	0,445	-	-	0,466	0,503	7
42,60	0,200	57,40	0,373	-	-	0,468	0,498	6,5
73,00	0,2855	27,00	0,242	-	-	0,409	0,450	10
91,10	0,325	8,90	0,100	-	-	0,364	0,392	7,6
95,80	0,330	4,20	0,058	-	-	0,351	0,369	5
ПРОПАН + БУТАН								
22,70	0,135	77,30	0,320	-	-	0,347	0,412	19
73,10	0,285	26,90	0,143	-	-	0,335	0,392	17
73,30	0,285	26,70	0,136	-	-	0,328	0,391	19
84,00	0,320	16,00	0,085	-	-	0,330	0,382	16
ПРОПИЛЕН + БУТИЛЕНЫ								
83,30	0,480	16,70	0,200	-	-	0,505	0,584	16
81,80	0,477	18,20	0,215	-	-	0,495	0,589	19
80,90	0,476	19,10	0,220	-	-	0,502	0,591	18
60,44	0,435	39,56	0,355	-	-	0,532	0,632	20
60,40	0,435	39,60	0,355	-	-	0,534	0,636	19
52,52	0,410	47,48	0,390	-	-	0,529	0,640	21
42,46	0,365	57,54	0,420	-	-	0,523	0,632	21
32,90	0,310	67,10	0,445	-	-	0,518	0,617	19
31,43	0,290	68,57	0,450	-	-	0,510	0,610	20
26,50	0,250	73,50	0,465	-	-	0,507	0,599	18

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЭТИЛЕН + ПРОПИЛЕН + БУТИЛЕНЫ								
5,00	0,050	30,20	0,310	64,80	0,450	0,540	0,639	18
17,30	0,135	53,81	0,410	28,89	0,275	0,534	0,629	18
17,53	0,135	63,62	0,435	19,85	0,210	0,531	0,614	16
28,30	0,185	18,50	0,220	53,20	0,435	0,517	0,624	21
32,10	0,205	22,80	0,255	45,10	0,375	0,512	0,629	23
36,90	0,225	16,30	0,200	46,80	0,380	0,510	0,615	21
38,00	0,230	22,20	0,250	39,80	0,350	0,500	0,625	25
73,90	0,320	21,00	0,235	5,10	0,070	0,416	0,516	24
ЭТАН + ПРОПИЛЕН + БУТИЛЕНЫ								
24,70	0,115	12,90	0,150	62,40	0,425	0,480	0,574	19
25,00	0,120	54,50	0,410	20,50	0,235	0,525	0,603	15
31,10	0,130	46,40	0,375	22,50	0,255	0,511	0,594	16
37,50	0,147	32,00	0,295	30,50	0,315	0,501	0,588	17
37,70	0,148	31,40	0,285	30,90	0,315	0,494	0,583	18
38,40	0,150	26,40	0,250	35,00	0,340	0,480	0,579	20
40,40	0,155	27,10	0,260	32,40	0,330	0,487	0,581	19
43,20	0,160	33,90	0,315	22,90	0,255	0,464	0,571	23
58,80	0,190	31,90	0,300	9,30	0,120	0,423	0,493	16
71,10	0,215	17,50	0,185	11,40	0,145	0,368	0,452	22

Сравнение экспериментально полученных значений $\varepsilon_{см}^{\Delta}$ и рассчитанных $\varepsilon_{см}^P$ согласно уравнению (12) показывает, что расхождение между ними

$\Delta = \frac{\varepsilon_{см}^{\Delta} - \varepsilon_{см}^P}{\varepsilon_{см}^{\Delta}} \cdot 100\%$ для одних смесей находится в пределах 10%, для других достигает 25%. Эти отклонения зависят от степени перекрытия полос. Допустим, если бинарная смесь состоит из газов различного ряда (предельного и непредельного), спектральные полосы поглощения которых не столь значительно перекрыты, расчет излучательной способности смеси по формуле (12) дает удовлетворительное приближение к экспериментальным данным. Подтверждением этого являются результаты экспериментальных измерений следующих смесей: этан + бутены, пропан + бутены, пропан + изобутилен, этан + пропилен (см. табл. 2).

В случае если полосы поглощения углеводородов перекрываются значительно, расчетная формула (12) дает завышенные значения излучательной способности по сравнению с экспериментальными данными в среднем на 20% для указанных условий. На основании это можно рекомендовать, расчетные значения $\varepsilon_{см}^P$, полученные согласно серому приближению, умножить на поправочный коэффициент, который в случае бинарных смесей, состоящих из углеводородов разного ряда, равен 0,9, для углеводородов одного ряда и тройных смесей – 0,83.

Для определения более точной поправки на перекрытие полос поглощения углеводородов необходимы спектральные исследования, которые позволили бы учесть влияние температуры, относительного содержания компонентов в смеси, а также оптической толщины слоя смеси газов. Эти данные в настоящее время в литературе отсутствуют.

Заключение

Выведена функциональная зависимость коэффициента теплового излучения этана, пропана, бутана, этилена, пропилена, бутиленов и изобутилена от температуры, давления и толщины слоя излучающего газа. Отмечено, что полученная функциональная зависимость основывается на экспериментальных зна-

чениях, а не на физических законах процессов излучения, поэтому проводить экстраполяцию ее за пределы эксперимента не желательно.

Исследованы излучательные свойства смесей газообразных углеводородов: этан + бутены, пропан + бутены, этан + пропилен, пропан + изобутилен, пропан + бутан, пропилен + бутены, этилен + пропилен + бутены, этан + пропилен + бутены. Исследования проведены в диапазоне парциальных давлений от 0,004 до 0,1 МПа при температуре 673 К. При расчете интегрального коэффициента теплового излучения смеси углеводородов рекомендовано использовать серое приближение с учетом поправочного коэффициента.

Литература

1. А.М. Абдуллин. Вестник технол. ун-та, 4, 40–42, (2016).
2. А.М. Абдуллин. Вестник технол. ун-та, 8, 112–114, (2015).
3. А.М. Абдуллин. Вестник технол. ун-та, 4, 103–105, (2014).
4. Невский А.С. Лучистый теплообмен в топках. Москва: Металлургия, 439, (1971).
5. Сагдеев А.А., Латыпов Д.Н., Сагдеева Г.С., Зарифов А.Р. Вестник технологического университета, 28(10), 41–45, (2025).
6. Б.Н. Четверушкин, Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. М.: Наука, 1985. 304с.
7. Сагдеев А.А., Зарифов А.Р., Сагдеева Г.С., Латыпов Д.Н. Международный научный журнал «Промышленность и сельское хозяйство», 7, 19–25, (2025).
8. А.Р. Зарифов, А.А. Сагдеев. Наука молодых: Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 71–78, (2025).
9. Детков С.П., Перунков В.В. ТВИ, 32(2), 262–267, (1985).
10. Тивари, Гупта. Теплопередача, 2, 74–82, (1978).
11. Абдуллин А.М. Вестник технол. ун-та, 19(4), 40–42, (2016).
12. Свердлов Л.М., Ковкер М.А., Крайнов Е.П. Колебательные спектры многоатомных молекул. Москва, 560, (1970).
13. Большаков Г.Ф. Инфракрасные спектры насыщенных углеводородов. Часть I. Алканы. Новосибирск: Наука, 175, (1986).
14. F.M. Gumerov, R.A. Kayumov, R.A. Usmanov, A.A. Sagdeev, I.Sh. Abdullin, R.F. Sharafiev, American Journal of Analytical Chemistry, 3, 12A, 950–957 (2012).

15. Блох Д.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. Ленинград: Энергоатомиздат, 240, (1984).
16. Тухватуллин С.Г., Ахунов Н.Х., Усманов А.Г. Химия и химическая технология, 25(1), 109–113, (1982).
17. Лукаш В.П. ТВТ, 9(4), 708–716, (1971).

References

1. A. M. Abdullin. Herald of Technological University, 4, 40–42, (2016).
2. A. M. Abdullin. Herald of Technological University, 8, 112–114, (2015).
3. A. M. Abdullin. Herald of Kazan Technological University, 4, 103–105, (2014).
4. Nevsky A. S. Radiant Heat Exchange in Furnaces. Moscow: Metallurgy, 439, (1971).
5. Sagdeev A. A., Latypov D. N., Sagdeeva G. S., Zarifov A. R. Herald of Technological University, 28(10), 41–45, (2025).
6. B. N. Chetverushkin, Mathematical Modeling of Radiating Gas Dynamics Problems. Moscow: Nauka, 1985, 304 p.

7. Sagdeev A. A., Zarifov A. R., Sagdeeva G. S., Latypov D. N. International Scientific Journal "Industry and Agriculture", 7, 19–25, (2025).
8. A. R. Zarifov, A. A. Sagdeev. Science of the Young: Petrozavodsk: MCNP "NEW SCIENCE", 71–78, (2025).
9. Detkov S. P., Perunkov V. V. TVI, 32(2), 262–267, (1985).
10. Tiwari, Gupta. Heat Transfer, 2, 74–82, (1978).
11. Abdullin A.M. Herald of Technological University, 19(4), 40–42, (2016).
12. Sverdlov L.M., Kovker M.A., Krainov E.P. Vibrational spectra of polyatomic molecules. Moscow, 560, (1970).
13. Bolshakov G.F. Infrared spectra of saturated hydrocarbons. Part I. Alkanes. Novosibirsk: Science, 175, (1986).
14. F.M. Gumerov, R.A. Kayumov, R.A. Usmanov, A.A. Sagdeev, I. Sh. Abdullin, R.F. Sharafiev, American Journal of Analytical Chemistry, 3, 12A, 950–957 (2012).
15. Blokh D.G. Heat Transfer in Steam Boiler Furnaces. Leningrad: Energoatomizdat, 240, (1984).
16. Tuxhvatullin S.G., Akhunov N.Kh., Usmanov A.G. Chemistry and Chemical Technology, 25(1), 109–113, (1982).
17. Lukash V.P. TVT, 9(4), 708–716, (1971).

© **А. А. Сагдеев** – канд. тех. наук, доцент кафедры Процессы и аппараты химической технологии (ПАХТ), Нижнекамский химико-технологический институт (НХТИ) филиал Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ), Нижнекамск, Россия, sagdeev_aa@mail.ru; **Д. Н. Латыпов** – канд. тех. наук, доцент кафедры ПАХТ, НХТИ (филиал) КНИТУ, dlatypov@yandex.ru; **Г. С. Сагдеева** – канд. пед. наук, доцент кафедры ПАХТ, НХТИ (филиал) КНИТУ, sagdeeva_g@mail.ru, **А. М. Абдуллин** – канд. тех. наук, доцент кафедры Электротехники и энергообеспечения предприятий, НХТИ (филиал) КНИТУ, amabdullin@mail.ru; **А. Р. Зарифов** – студент, НХТИ (филиал) КНИТУ, ayaz.zarifov@mail.ru;

© **А. А. Sagdeev** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technology (PACT), Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (NICT), a branch of Kazan National Research Technological University (KNRTU), Nizhnekamsk, Russia, sagdeev_aa@mail.ru; **D. N. Latypov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the PACT department, NICT (branch of) KNRTU, dlatypov@yandex.ru; **G. S. Sagdeeva** – PhD (Pedagogical Sci.), Associate Professor of the PACT department, NICT (branch of) KNRTU, sagdeeva_g@mail.ru; **A. M. Abdullin** – Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises, NCTI (branch of) KNRTU, amabdullin@mail.ru; **A. R. Zarifov** – Student, NCTI (branch of) KNRTU, ayaz.zarifov@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 14.01.26.

Дата принятия рукописи в печать – 26.02.26.