

УДК 533.1:536.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Н. М. Цирельман<sup>1</sup>, А. В. Комаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>at-t@ugatu.ac.ru, <sup>2</sup>AlexeyKomarov.AKV89@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 28.11.2016

**Аннотация.** Разработан метод расчета вязкости и теплопроводности многокомпонентной газовой смеси. При этом смесь представлена как множество бинарных компонентов, для которых вязкость и теплопроводность рассчитываются по известным формулам.

**Ключевые слова:** многокомпонентная газовая смесь; бинарная газовая смесь; вязкость; теплопроводность.

### ВВЕДЕНИЕ

Вязкость  $\mu_m$  и теплопроводность  $\lambda_m$  многокомпонентных газовых смесей входят в структуру уравнений гидродинамики и теплопереноса в качестве свойств движущейся среды. Зачастую невозможно или весьма затруднительно провести их экспериментальное определение в необходимом диапазоне изменения параметров для многих практически важных процессов. В качестве примера можно привести процесс гидрогашения заряда ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ), процесс работы газотурбинной установки (ГТУ) на парогазовой смеси и др [1]. В последнем случае при вводе пара в камеру сгорания ГТУ можно достичь увеличения ее мощности.

Поэтому представляется важной возможность определения зависимости свойств переноса количества движения и теплоты от таких параметров как температура, давление и концентрация компонентов.

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Метод основывается на известных свойствах одно- и двухкомпонентных газов, так как именно для них были предложены методы расчетов для определения  $\mu_m$  и  $\lambda_m$ . Так, известная формула Вилке [2] для определения вязкости бинарных смесей газов такова:

$$\mu_m = \frac{\mu_1}{1+(x_2/x_1)\Phi_{12}} + \frac{\mu_2}{1+(x_1/x_2)\Phi_{21}}, \quad (1)$$

где

$$\Phi_{ij} = \frac{\left[1 + (\mu_i/\mu_j)^2 (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{(4\sqrt{2})\left[1 + (M_i/M_j)\right]^{1/2}}. \quad (2)$$

Для расчета теплопроводности бинарной смеси газов используются зависимость Линдсея и Бромлея [3], основанная на вычислениях Васильевой, имеющие вид:

$$\lambda_m = \frac{\lambda_1}{1+(x_2/x_1)A_1} + \frac{\lambda_2}{1+(x_1/x_2)A_2}, \quad (3)$$

где

$$A_1 = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[ \frac{\mu_1}{\mu_2} \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{3/4} \frac{1+(s_1/T)}{1+(s_2/T)} \right]^{1/2} \right\}^2 \times \frac{1+(s_{12}/T)}{1+(s_1/T)}, \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[ \frac{\mu_2}{\mu_1} \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^{3/4} \frac{1+(s_2/T)}{1+(s_1/T)} \right]^{1/2} \right\}^2 \times \frac{1+(s_{12}/T)}{1+(s_2/T)}. \quad (5)$$

В формулах (1)–(5) обозначены:  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – абсолютные вязкости компонентов;  $x_1$  и  $x_2$ ,

$M_1$  и  $M_2$  – молярные доли и молекулярный вес 1-го и 2-го компонентов;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – теплопроводность компонентов;  $T$  – абсолютная температура;  $s_{12}$  – константа Сатэрленда газовой смеси, определяемая по формуле

$$s_{1,2} = \sqrt{s_1 \cdot s_2}. \quad (6)$$

Заметим, что при вычислении  $s_{1,2}$  по формуле (6) предполагается отсутствие в газовой смеси водяного пара или аммиака. Для газа, содержащего водяной пар, в работе [4] предложено рассчитывать  $s_{1,2}$  как

$$s_{1,2} = 0,733 \cdot \sqrt{s_1 \cdot s_2}, \quad (7)$$

где  $s_1$  и  $s_2$  – константа Сатэрленда для 1-го и 2-го компонентов соответственно.

*Для расчета вязкости и теплопроводности многокомпонентных газовых смесей с количеством компонентов больше двух нами предложен алгоритм, по которому сначала по приведенным выше формулам находятся свойства произвольно выбранных двух ее компонентов. Затем свойства такой бинарной*

*смеси рассматриваются как свойства одного нового компонента и, совместно рассмотрев его с третьим компонентом в газовой смеси, используются приведенные выше формулы для расчета значений  $\mu_m$  и  $\lambda_m$ . Если компонентов больше трех, то такая процедура расчета искомых параметров продолжается.*

#### ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА

Для определения точности предложенного метода сначала были рассчитаны вязкость и теплопроводность воздуха при давлении 1 бар. Он был рассмотрен как смесь трех компонентов: азота, кислорода и аргона. Вначале устанавливались свойства смеси азота и кислорода (смесь АК). Затем она рассматривалась как один компонент, который образует бинарную смесь с аргоном (смесь АК-Аргон). Полученные результаты вычисления  $\mu_m$  и  $\lambda_m$  приведены в табл. 1–4 и сравнены с экспериментальными данными в справочнике по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [5], в монографии [4] и в таблицах стандартных справочных данных для сухого воздуха [6].

Таблица 1

Сравнение результатов расчета вязкости смеси АК с экспериментальными данными

Температура	Воздух, [4]	Воздух, [5]	Воздух, [6]	Смесь АК [7]	Относительное расхождение метода		
					$\delta_{\mu}$ , %, [4]	$\delta_{\mu}$ , %, [5]	$\delta_{\mu}$ , %, [6]
К	$\mu_{\text{эксп}} \cdot 10^7$ , Па·с	$\mu_{\text{эксп}} \cdot 10^7$ , Па·с	$\mu_{\text{эксп}} \cdot 10^7$ , Па·с	$\mu_m \cdot 10^7$ , Па·с			
200	132,9	132,5	132,8	132,9	0,05	0,35	0,12
240	155,5	154,4	155,1	154,8	0,45	0,26	0,19
260	165,1	164,1	165,6	164,9	0,07	0,54	0,37
280	175,9	174,6	175,8	174,8	0,63	0,11	0,57
300	184,7	184,6	185,6	184,8	0,07	0,13	0,41
400	228,6	230,1	230,7	228,9	0,12	0,53	0,79
500	267,1	270,1	270,7	267,5	0,14	0,97	1,19
600	301,8	305,8	307,1	302,2	0,12	1,19	1,61
700	333,2	338,8	341,0	333,9	0,20	1,45	2,09
800	362,5	369,8	372,9	363,2	0,19	1,79	2,60
900	389,9	398,1	403,1	390,5	0,16	1,91	3,12
1000	415,2	424,4	432,1	416,1	0,22	1,95	3,70
1200	462,6	473,0	483,9	463,6	0,22	1,99	4,20
1400	505,6	516,0	527,2	506,8	0,25	1,77	3,87

Таблица 2

**Сравнение результатов расчета теплопроводности смеси АК  
с экспериментальными данными**

Температура К	Воздух, [4]	Воздух, [5]	Воздух, [6]	Смесь АК, [7]	Относительное расхождение метода		
	$\lambda_{\text{эксп}} \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\lambda_{\text{эксп}} \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\lambda_{\text{эксп}} \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\lambda_m \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\delta_\lambda, \%, [4]$	$\delta_\lambda, \%, [5]$	$\delta_\lambda, \%, [6]$
200	18,1	18	18,6	18,3	1,20	1,67	1,61
240	21,5	21,2	21,8	21,5	0,27	1,24	1,54
260	23,1	22,9	23,3	23,0	0,32	0,46	1,27
280	25,4	24,6	24,8	24,7	2,91	0,45	0,36
300	26,2	26,2	26,2	26,3	0,14	0,29	0,29
400	33,6	33,8	33	32,3	3,91	4,35	2,03
500	40,4	40,7	39,5	39,6	1,99	2,79	0,17
600	46,6	46,9	45,7	45,3	2,67	3,32	0,78
700	52,3	52,4	51,8	50,7	3,10	3,28	2,16
800	57,8	57,3	57,7	55,8	3,38	2,58	3,25
900	62,8	62	63,5	60,9	2,92	1,70	4,02
1000	67,5	66,7	69,2	66,2	1,99	0,80	4,48
1200	76,3	76,3	79,6	77,2	1,19	1,21	2,99
1400	84,4	84,4	89,8	88,2	4,41	4,57	1,72

Таблица 3

**Сравнение результатов расчета вязкости смеси АК-Аргон  
с экспериментальными данными**

Температура К	Воздух, [4]	Воздух, [5]	Воздух, [6]	Смесь АК-Аргон [7]	Относительное расхождение метода		
	$\mu_{\text{эксп}} \cdot 10^7, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\mu_{\text{эксп}} \cdot 10^7, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\mu_{\text{эксп}} \cdot 10^7, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\mu_m \cdot 10^7, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\delta_\mu, \%, [4]$	$\delta_\mu, \%, [5]$	$\delta_\mu, \%, [6]$
200	132,9	132,5	132,8	133,2	0,19	0,50	0,27
240	155,5	154,4	155,1	155,0	0,29	0,42	0,04
260	165,1	164,1	165,6	165,2	0,09	0,70	0,21
280	175,9	174,6	175,8	175,1	0,47	0,28	0,41
300	184,7	184,6	185,6	185,1	0,24	0,29	0,25
400	228,6	230,1	230,7	229,3	0,30	0,35	0,61
500	267,1	270,1	270,7	268,0	0,33	0,78	1,00
600	301,8	305,8	307,1	302,8	0,32	0,99	1,41
700	333,2	338,8	341,0	334,6	0,40	1,25	1,89
800	362,5	369,8	372,9	363,9	0,40	1,58	2,40
900	389,9	398,1	403,1	391,3	0,37	1,70	2,92
1000	415,2	424,4	432,1	417,0	0,44	1,74	3,49
1200	462,6	473,0	483,9	464,6	0,44	1,76	3,98
1400	505,6	516,0	527,2	508,1	0,49	1,53	3,63

Таблица 4

**Сравнение результатов расчета теплопроводности смеси АК-Аргон  
с экспериментальными данными**

Температура К	Воздух [4]	Воздух [5]	Воздух [6]	Смесь АК-Аргон [7]	Относительное расхождение метода		
	$\lambda_{\text{эксп}} \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$	$\lambda_{\text{эксп}} \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$	$\lambda_{\text{эксп}} \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$	$\lambda_m \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$	$\delta_\lambda, \%$ [4]	$\delta_\lambda, \%$ [5]	$\delta_\lambda, \%$ [6]
200	18,1	18	18,6	18,3	0,95	1,42	1,85
240	21,5	21,2	21,8	21,4	0,52	0,99	1,79
260	23,1	22,9	23,3	22,9	0,57	0,21	1,51
280	25,4	24,6	24,8	24,6	3,16	0,19	0,61
300	26,2	26,2	26,2	26,2	0,11	0,03	0,03
400	33,6	33,8	33	32,2	4,14	4,58	2,27
500	40,4	40,7	39,5	39,5	2,24	3,04	0,09
600	46,6	46,9	45,7	45,2	2,92	3,56	1,03
700	52,3	52,4	51,8	50,5	3,35	3,53	2,41
800	57,8	57,3	57,7	55,7	3,64	2,83	3,51
900	62,8	62	63,5	60,8	3,17	1,96	4,27
1000	67,5	66,7	69,2	66,0	2,26	1,07	4,64
1200	76,3	76,3	79,6	77,0	0,90	0,92	3,27
1400	84,4	84,4	89,8	88,0	4,19	4,25	2,02

При различном порядке сочетания компонентов воздуха были получены результаты максимального относительного расхождения предложенного метода, приведенные в табл. 5.

Таблица 5

**Максимальное относительное расхождение расчетных данных  $\mu_m$  и  $\lambda_m$  с экспериментальными**

Расхождение, %	Порядок сочетания компонентов		
	(N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> )+ +Ar	(N <sub>2</sub> +Ar)+ +O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> +Ar+ +N <sub>2</sub>
$\delta_\mu, \%$ [4]	0,49	4,72	4,26
$\delta_\mu, \%$ [5]	1,84	2,41	3,99
$\delta_\mu, \%$ [6]	3,98	2,09	3,43
$\delta_\lambda, \%$ [4]	4,19	5,01	6,24
$\delta_\lambda, \%$ [5]	4,58	4,89	6,47
$\delta_\lambda, \%$ [6]	4,64	6,1	5,47

Из рассмотрения результатов расчетов по предложенному нами методу видно, что максимальное расхождение с экспериментальными данными без учета наличия компонента аргон в составе воздуха для вязкости  $\mu_m$  составило 0,63 %, [4]; 1,96 %, [5]; 4,2 %, [6], а для теплопроводности  $\lambda_m$  – 4,41 %, [4]; 4,57 %, [5]; 4,48 %, [6]. При этом максимальное расхождение расчета с учетом наличия аргона в составе воздуха для вязкости  $\mu_m$  уменьшилось и составило 0,49%, [4]; 1,76 %, [5];

3,98 %, [6], а для теплопроводности  $\lambda_m$  – 4,19 %, [4]; 4,58 %, [5]; 4,64 %, [6].

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА  
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЯЗКОСТИ  
И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ПАРОВАЗОВОЙ СМЕСИ**

В качестве применения предложенного нами метода была рассмотрена паровозовая смесь, состоящая из продуктов сгорания природного газа, воздуха и паров воды.

При определении массовых и мольных долей сухого воздуха (сух. возд.) и паров воды (п. в.) влагосодержание в атмосферном воздухе было принято равным 10 (г п. в.)/(кг сух. возд.).

Таблица 6

**Состав атмосферного воздуха**

Компонент	Сухой воздух	Пары воды
Массовая доля, %	99,0	1,0
Мольная доля $x \cdot 100, \%$	98,39	1,61
Объемная доля $\varphi \cdot 100, \%$	98,39	1,61
Молярная масса $M_i, \text{г/моль}$	28,98	18

Молярная масса влажного воздуха (вл. возд.) определялась по формуле

$$M_{\text{см}} = \sum \varphi_i \cdot M_i, \quad (8)$$

с привлечением которой и с использованием данных табл. 6 получаем

$$M_{\text{вл. возд.}} = \varphi_{\text{сух. возд.}} \cdot M_{\text{сух. возд.}} + \varphi_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} = \\ = 0,9839 \cdot 28,98 + 0,0161 \cdot 18 = 28,8 \frac{\text{г. вл. возд.}}{\text{моль вл. возд.}}$$

Состав топлива – природного газа приведен в табл. 7.

Таблица 7

**Химический состав природного газа [8]**

Компонент	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Объемная доля φ·100, %	97,0	0,5	0,3	0,1
Компонент	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Объемная доля φ·100, %	0,2	0,1	0,8	1,0

Состав продуктов сгорания при его полном сжигании в воздухе с влагосодержанием 10 (г п. в./кг сух. возд.) и коэффициентом из-

бытка воздуха при горении α = 1,2 приведен в табл. 8.

Таблица 8

**Состав продуктов сгорания природного газа [8]**

Компонент	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Массовая доля, %	12,75	11,23	72,42	3,66
Мольная доля x·100, %	8,03	17,27	71,53	3,17
Объемная доля φ·100, %	8,03	17,27	71,53	3,17
Молярная масса M <sub>i</sub> , г/моль	44,01	18	28,02	32

Молярная масса продуктов сгорания (п. с.) согласно формуле (8) получается равной

$$M_{\text{п.с.}} = \varphi_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} + \varphi_{\text{N}_2} \cdot M_{\text{N}_2} + \\ + \varphi_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2}, \\ M_{\text{п.с.}} = 0,0803 \cdot 44,01 + 0,1727 \cdot 18 + \\ + 0,7153 \cdot 28,02 + 0,0317 \cdot 32 = 27,712 \frac{\text{г п. с.}}{\text{моль п. с.}}$$

Свойства компонентов указанных продуктов сгорания приведены в табл. 9, 10.

Таблица 9

**Вязкость μ<sub>i</sub> компонентов**

Температура в камере сгорания T, К	N <sub>2</sub> , [9]	CO <sub>2</sub> , [5]	Пары воды, [5]	O <sub>2</sub> , [9]	Сухой воздух, [9]
	μ·10 <sup>7</sup> , Па·с				
1453	495,8	532,3	525,7	596,5	558,8
1461	497,2	534,1	527,8	598,3	561,1
1468	498,5	535,7	529,6	599,9	563,1
1483	501,1	539,1	533,4	603,4	567,5

Таблица 10

**Теплопроводность λ<sub>i</sub> компонентов**

Температура в камере сгорания T, К	N <sub>2</sub> , [9]	CO <sub>2</sub> , [5]	Пары воды, [5]	O <sub>2</sub> , [9]	Сухой воздух, [9]
	λ·10 <sup>3</sup> , $\frac{\text{Вт}}{\text{м·град}}$				
1453	85,9	100,8	193,6	95,6	101,6
1461	86,5	101,6	194,7	96,0	102
1468	87,1	102,3	195,7	96,4	102,3
1483	88,3	103,9	197,9	97,3	103

Далее в табл. 11 были приведены результаты термогазодинамических расчетов ГТУ при различном относительном расходе подаваемого водяного пара:  $d_{\text{пар воды}} = 0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$  и  $15\%$  [10] и определены объемные доли основных компонентов в парогазовой смеси. Относительный расход пара определялся по формуле

$$d_{\text{пар воды}} = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{возд.}}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $G_{\text{п}}$  и  $G_{\text{возд.}}$  – расход пара и расход воздуха.

Результаты последовательного расчета  $\lambda_m$  и  $\mu_m$  продуктов сгорания с привлечением данных из табл. 12 приведены в табл. 13.

Затем по предложенному методу были определены теплофизические свойства влажного воздуха (смесь № 4), смеси продуктов сгорания и влажного воздуха (смесь № 5) и парогазовой смеси (смесь № 6).

Таблица 11

**Параметры парогазовой смеси при различном относительном расходе пара в камеру сгорания**

Относительный расход пара $d_{\text{пар воды}}$ , %	0	5	10	15
Расход топлива $G_T$ , кг/с	6,750	7,718	8,843	10,093
Расход топлива $V_T$ , нм <sup>3</sup> /с	10,006	11,441	13,109	14,962
Объём продуктов сгорания при сжигании 1 м <sup>3</sup> топлива $V_{\text{п.с.}}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	29,179	27,010	24,92	23,125
Объём воздуха при сжигании 1 м <sup>3</sup> топлива $V_B$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	31,883	29,420	27,05	25,016
Объём пара при сжигании 1 м <sup>3</sup> топлива $V_{\text{п}}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0	2,900	5,062	6,654
Коэффициент избытка воздуха, $\alpha$	2,808	2,591	2,382	2,203
Температура в газовой $T_T$ , К	1483	1468	1461	1453
Давление перед газовой турбиной $P_T$ , МПа	1,3566	1,3566	1,3566	1,3566
Объемная доля продуктов сгорания в парогазовой смеси, $\varphi_{\text{п.с.}}$	0,479	0,455	0,438	0,422
Объемная доля воздуха в парогазовой смеси, $\varphi_{\text{возд.}}$	0,521	0,496	0,473	0,457
Объемная доля пара в парогазовой смеси, $\varphi_{\text{п}}$	0	0,049	0,089	0,121

Таблица 12

**Результаты расчетов  $\lambda_m$  и  $\mu_m$  продуктов сгорания**

Температура в камере сгорания $T$ , К	N <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> (Смесь № 1)		Смесь № 1+ H <sub>2</sub> O (Смесь № 2)		Смесь № 2+ O <sub>2</sub> (Смесь № 3)	
	$\mu \cdot 10^7$ , Па·с	$\lambda \cdot 10^3$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\mu \cdot 10^7$ , Па·с	$\lambda \cdot 10^3$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\mu \cdot 10^7$ , Па·с	$\lambda \cdot 10^3$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
1453	499,7	87,4	504,6	103,7	507,5	103,4
1461	501,1	88,0	506,1	104,4	509,0	104,1
1468	502,5	88,7	507,5	105,0	510,5	104,8
1483	505,1	89,9	510,4	108,9	513,3	108,4

Результаты расчета  $\lambda_m$  и  $\mu_m$  парогазовой смеси

Температура в камере сгорания $T, K$	Сухой воздух + H <sub>2</sub> O (Смесь № 4)		Смесь № 3+ Смесь № 4 (Смесь № 5)		Смесь № 5+ H <sub>2</sub> O (Смесь № 6)	
	$\mu \cdot 10^7, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\lambda \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\mu \cdot 10^7, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\lambda \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\mu \cdot 10^7, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\lambda \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
1453	558,5	103,0	533,6	103,3	533,6	113,2
1461	560,8	103,4	535,5	103,8	535,5	111,1
1468	562,8	103,7	537,3	104,3	537,3	108,3
1483	567,2	104,7	540,9	105,6	540,9	105,6

Изменение вязкости и теплопроводности парогазовой смеси, приведенные в табл. 12 при различном относительном расходе пара, графически показаны на рис. 1, 2.

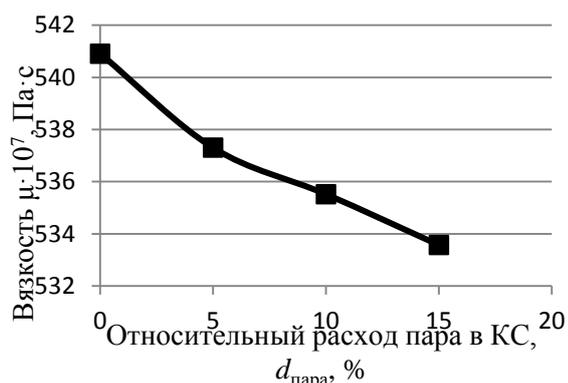


Рис. 1. Изменение вязкости парогазовой смеси: ■ – расчетные значения

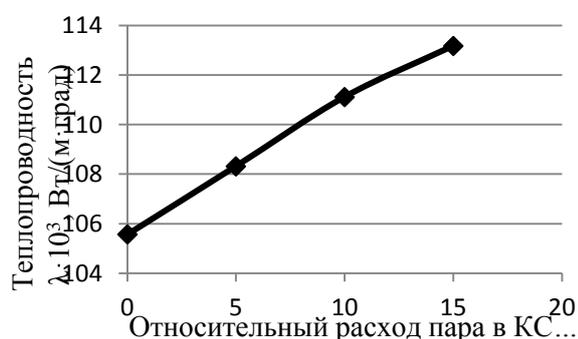


Рис. 2. Изменение теплопроводности парогазовой смеси: ■ – расчетные значения

Как видно из рассмотрения рис. 1, 2, с увеличением относительного расхода пара  $d_{\text{пара}}$  вязкость получившейся парогазовой смеси  $\mu_m$  уменьшается, а теплопроводность  $\lambda_m$  увеличивается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод расчета вязкости и теплопроводности многокомпонентной газовой смеси. Точность метода была определена путем сравнения экспериментальных значений  $\mu_m$  и  $\lambda_m$  воздуха с расчетными. Максимальное расхождение при разном порядке учета компонентов не превысило для вязкости 5 %, а для теплопроводности 6,5 % при температурах более 1000 К. При температурах менее 1000 К расхождение составляло менее 4 % и 5 % соответственно.

Проведен расчет  $\mu_m$  и  $\lambda_m$  парогазовой смеси при различном расходе пара в камеру сгорания ГТУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цирельман Н. М., Мустафин Р. Р. Моделирование процессов теплообмена при гидрогашении РДТТ // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 3. С. 34–40. [ N. M. Tsirelman and R. R. Mustafin "Modeling of heat and mass transfer processes when hydroclearing rocket engines of firm fuel," (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 17, no. 3, pp. 34–40, 2013. ]
2. Wilke C. R. A Viscosity Equation for Gas Mixtures// The journal of chemical physics. Berkeley: University of California, 1950, V.18, № 4. pp. 517–519. [C. R. Wilke "A Viscosity Equation for Gas Mixtures," in The journal of chemical physics. Berkeley: University of California, vol. 18, no. 4, pp. 517–519, 1950. ]
3. Lindsay A. L., Bromley L. A. Thermal conductivity of gas mixture// Ind. Eng. Chem. 1950. vol. 42, no.1. pp. 1508–1510. [A. L. Lindsay and L.A. Bromley "Thermal conductivity of gas mixture," in // Ind. Eng. Chem., vol. 42, no. 1, pp. 1508–1510, 1950. ]
4. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло- и массообмена, пер. с англ. под ред. А. В. Лыкова. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 680 с. [ E. R. Eckert and R. M. Drake Heat and mass transfer, (in Russian). Moscow- Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. ]
5. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М: Наука, 1972. 720 с.

[ N. B. Vargaftik, Handbook of thermophysical properties of gases and liquids, (in Russian). Moscow: Nauka, 1972. ]

6. **Козлов А. Д., Кузнецов В. М.** Таблицы стандартных справочных данных. Воздух сухой. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 150...1000К и давлениях соответствующих разреженному газу до 100 МПа.М.: Издательство стандартов, 1987. 14 с. [ A. D. Kozlov and V. M. Kuznetsov, Table of standarts reference data. Air dry. The coefficients of a dynamic viscosity and thermal conductivity at temperatures 150...1000K and at pressures corresponding to dilution gas , (in Russian). Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1987. ]

7. **Цирельман Н. М., Комаров А. В.** Расчет температурной зависимости теплофизических свойств многокомпонентных газовых смесей // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция (Уфа, окт. 28–30, 2015) Уфа: УГАТУ, 2015. Т. 1. С. 389–394. [ N. M. Tsirelman and A. V. Komarov, "The calculation of the temperature dependence of thermal properties of multicomponent gas mixtures," in Mavlyutovskiye chteniya : Vserossiyskaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya, Ufa, 2015, vol. 1, pp. 389–394. ]

8. **РосТепло. Энциклопедия теплоснабжения.** [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosteplo.ru/> (дата обращения 07.02.2016) [ (2016, Feb. 7). Rosteplo. Heat supply encyclopedia [Online]. Available: <http://www.rosteplo.ru/> ]

9. **Вассерман А. А., Казавчинский Я. З., Рабинович В. А.** Теплофизические свойства воздуха и его компонентов. М.: Наука, 1966. 376 с. [ A. A. Wasserman, J. Z. Kazavchinsky and V. A. Rabinovich, Thermal properties of air and its components, (in Russian). Moscow: Nauka, 1966. ]

10. **Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: МЭИ, 2002. 584 с. [ S. V. Tsanev, V. D. Burov and A. N. Remezov, Gas turbine and combined-cycle plants in thermal power plants, (in Russian). Moscow: MEI, 2002. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЦИРЕЛЬМАН Наум Моисеевич**, проф. каф. АТиТ. Дипл. инж.-мех. (ОТИПХП, Одесса, 1963). Д-р техн. наук (КГТУ им. Туполева, 1995). Числен.-аналит. эксперим. иссл. в обл. ТМО.

**КОМАРОВ Алексей Валерьевич**, аспирант каф. АТиТ. Дипл. магистра техн. и технол. по направл. теплоэнергетика (УГАТУ, 2012). Готовит дисс. о исследовании тепломассопереноса при гидрогашении заряда РДТТ с учетом переменных теплофизических свойств среды.

#### METADATA

**Title:** Determination thermophysical properties of multicomponent gas mixtures

**Authors:** N. M. Tsirelman<sup>1</sup>, A. V. Komarov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** at-t@ugatu.ac.ru,

AlexeyKomarov.AKV89@yandex.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 1 (75), pp. 128-135, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** A method of calculating the viscosity and the thermal conductivity of a multicomponent gas mixture is developed. This mixture is presented as a set of binary components, for which the viscosity and thermal conductivity are calculated from the known formulas.

**Key words:** multicomponent gas mixture; binary gas mixture; viscosity; thermal conductivity.

**About authors:**

**TSIRELMAN, Naum Moiseyevich**, Prof., Dept. of aviation and power plants thermal engineering. Mechanical engineer (ОТИПХП, Odessa, 1963). Dr. Tech. Sciences (KSTU. Tupolev, 1995). Numerical, analytical and experimental research in heat mass transfer area.

**KOMAROV, Alexey Valer'yevich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of aviation and power plants thermal engineering. Master of Technics & Technology (UGATU, 2012).