

Теплофизические свойства смесей благородных газов с низкими числами Прандтля

© К.С. Егоров, Л. В. Степанова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проанализированы результаты исследований, связанных с изучением термодинамических (плотности, теплоемкости, энтальпии, коэффициента сжимаемости) и теплофизических (теплопроводности и вязкости) свойств благородных газов и их смесей, которые представляют собой основное рабочее тело при использовании в перспективных замкнутых газотурбинных установках космического назначения. Эти энергоустановки можно применять в разных космических приложениях: беспилотных космических аппаратах, спутниках связи и пилотируемой экспедиции на Марс. Рассмотрены исследования по термодинамическим и теплофизическим свойствам благородных газов и их смесей. Выявлено, что в настоящее время уже накоплено достаточно экспериментальных данных о свойствах как отдельных инертных газов, так и их смесей. Использование этой информации позволило построить расчетные модели на основе кинетической теории газов и вириального уравнения состояния для реальных газов, которые дают возможность рассчитывать необходимые теплофизические параметры. Показано, что в расчетах и при проектировании замкнутых газотурбинных установок следует учитывать изменение показателя адиабаты и числа Прандтля для смесей благородных газов, а при приближении рабочих параметров к линии насыщения ксенона – увеличение погрешности расчетных зависимостей.

Ключевые слова: замкнутая газотурбинная установка, число Прандтля, смесь благородных газов, кинетическая теория газов, теплофизические свойства

Введение. В МГТУ им. Н.Э. Баумана много лет ведутся работы по замкнутым газотурбинным установкам (ЗГТУ) космического назначения: сначала под руководством В.Л. Самсонова [1–2], а с 2007 г. — под руководством А.Н. Арбекова [3–11]. Рассмотрим по работам [12–26] возможность применения и мощности ЗГТУ космического назначения. Газотурбинные установки мощностью 25...100 кВт [12–17] с перспективой увеличения до 500 кВт предполагается использовать в инопланетных базах (Луна, Марс), установки приблизительно такой же мощности (50...150 кВт) [12–15] — в беспилотных космических аппаратах для исследования глубокого космоса (Марс, Юпитер — проект «Прометей»). Более мощные ЗГТУ (10...15 МВт) необходимы для пилотируемого полета на Марс [12, 26]. Для малых исследовательских космических аппаратов возможен вариант применения микротурбин мощностью 100...300 Вт [18–20].

Рассмотрим также околоземные спутники. Согласно прогнозу [12], спутникам военного назначения требуется от 10 до 100 кВт по-

лезной мощности, геостационарным информационным спутникам – от 10 до 20 кВт мощности, в перспективе возможно увеличение до 50 кВт. В АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнёва» (ведущем производителе информационных спутниковых систем) выполнен прогноз развития геостационарных информационных спутников серии «Экспресс» [27]. Их основные характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики спутниковых платформ серии «Экспресс»

Характеристика	Экспресс-1000К	Экспресс-1000НМ	Экспресс-2000	Экспресс-4000
Срок активного существования, лет	15	15	15	От 17 до 18
Максимальная мощность, выделяемая на полезную нагрузку, кВт	3,2	6,1	12,1	До 20
Максимальное тепловыделение, кВт	1,8	3,5	7,5	8,0
Число антенн, шт.	От 2 до 3	От 2 до 6	От 5 до 9	До 20
Размер рефлекторов антенн, м	До 2	—	До 2,2 × 2,7	До 35
Стартовая масса космического аппарата, кг	До 1450	До 2100	Более 3500	5000
Масса полезной нагрузки, кг	До 187	До 660	До 950	До 2200

Для платформы тяжелого класса «Экспресс-2000» необходимая мощность составляет 12 кВт, а в перспективе у платформы «Экспресс-4000» она может достигать 20 кВт (что совпадает и с американским прогнозом [12]). Следовательно, применение ЗГТУ в этом случае становится приемлемым по диапазону мощностей и коэффициенту полезного действия. В настоящее время в АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнёва» используют солнечные батареи ПАО «Сатурн» [28] и НПП «Квант».

Одним из наиболее амбициозных проектов стал начатый в 2010 г. и рассчитанный до 2018 г. проект ядерной энергодвигательной установки для транспортно-энергетического модуля мощностью 1 МВт [29–34], в соответствии с которым принято решение об использовании замкнутой газотурбинной установки совместно с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (ВТГР).

В НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана также ведутся работы над вторым вариантом использования замкнутой газотурбинной установки (ее конверсионным вариантом) в качестве автономной долгоресурсной малообслуживаемой энергоустановки для радиорелейных станций связи, обеспечения катодной защиты и т. д. [3, 5].

Выбор рабочего тела для ЗГТУ — важная задача, так как оно должно обладать хорошими теплопередающими свойствами при небольших затратах работы на его прокачку через контур ЗГТУ. При работе с ядерным реактором должен быть гарантированный необходимый теплоотвод рабочим телом из активной зоны вследствие высокой плотности выделения энергии, а также это тело должно иметь хорошие ядерно-физические свойства: отсутствие наведенной радиоактивности; малое сечение захвата нейтронов; термическую, радиационную стойкость; хорошие технологические и химические свойства (совместимость с конструкционными материалами, взрыво- и пожаробезопасность, нетоксичность) [35, 36]. Применение газовых теплоносителей с ЗГТУ и высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами имеет одно важное достоинство — отсутствие фазового перехода в рабочем диапазоне температур (300...1400 К) и давлений (0,1...7 МПа), что обуславливает возможность создания одноконтурных установок.

В качестве рабочих тел для замкнутых газотурбинных установок космического назначения, работающих по циклу Брайтона, рассматриваются чистые инертные газы или их смеси. Для космических установок (или их конверсионного варианта) первоначально предполагалось использовать чистые благородные газы, например криптон (Kr) [4]. В дальнейшем в качестве рабочего тела для установок космического назначения мощностью от 15 кВт предполагается применять двухкомпонентную смесь гелия (He) и ксенона (Xe) [1–2, 4, 12–26, 37–41]. У этой смеси число Прандтля составляет приблизительно 0,2, у чистых газов число Прандтля составляет приблизительно 0,7. Применение этой смеси позволяет уменьшить массу теплообменных аппаратов ЗГТУ [4], прежде всего регенератора, так как без использования сложного цикла ЗГТУ имеет низкий КПД при температуре перед турбиной около 1000 К. Такой выбор температуры связан в первую очередь с необходимостью установки неохлаждаемой турбины в отличие от ГТУ открытого цикла, где есть возможность повысить температуру перед турбиной за счет ее охлаждения. Использование ксенона имеет существенный недостаток — он обладает большим радиусом захвата тепловых нейтронов, поэтому применение его в замкнутой газотурбинной установке совместно с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором представляется проблематичным. Предварительные результаты [38, 39] показывают, что уменьшение количества ксенона компенсирует снижение реактивности реактора, но при этом уменьшается время работы реактора. Более детальные исследования проводят в настоящее время по этому направлению в университете Нью-Мехико [38]. Применение смеси гелия с ксеноном возможно с радиоизотопным источником энергии или с солнечным нагревателем [2, 4]. При использовании ядерного

реактора на быстрых нейтронах эта проблема не возникает, так как вероятность захвата нейтронов с энергиями больше 1 эВ уменьшается на несколько порядков. Для более мощных установок (от 1 МВт и выше) инопланетного применения (например, для лунной базы) предполагается использовать чистый гелий [37–39, 42].

Таким образом, в настоящее время есть несомненный интерес к замкнутым газотурбинным установкам космического применения как в России, так и за рубежом.

Цель настоящей работы — проанализировать работы по теплофизическим свойствам благородных газов и их смесей в широком диапазоне давлений (0,1...20 МПа) и температур (400...1400 К) и в результате проведенного исследования выявить расчетные зависимости для теплофизических свойств, которые позволяют учесть влияние температуры и давления и в дальнейшем могут быть использованы при проектировании замкнутых газотурбинных установок.

Термодинамические свойства благородных газов. Основные термодинамические и критические свойства благородных (инертных) газов приведены в табл. 2 [43].

Для оценки экспериментальных данных термодинамических и теплофизических свойств чистых благородных газов и их смесей приведем краткую характеристику (табл. 3, 4) [44]. На сегодняшний день количество экспериментальных данных превышает 3000, диапазон по температурам и давлениям составляет 60...3000 К, а по давлениям 0,1...50 МПа.

Для расчета основных термодинамических свойств реальных газов (теплоемкость, внутренняя энергия, энтальпия) используют, как правило [44], уравнение в вириальной форме [111]

$$p = (\rho_m + B\rho_m^2 + C\rho_m^3)RT,$$

где p — давление; ρ_m — молярная плотность; B — 2-й вириальный коэффициент; R — газовая постоянная; T — термодинамическая температура; C — 3-й вириальный коэффициент.

Таблица 2

Основные термодинамические и критические свойства благородных (инертных) газов [43]

Газ	M , г/моль	$T_{кр}$, К	$p_{кр}$, бар	$\rho_{кр}$, кг/м ³	$T_{кип}$, К
Гелий (He)	4,003	5,20	2,29	69,3	13,78
Неон (Ne)	20,183	44,40	26,54	483	27,09
Аргон (Ar)	39,944	150,86	50,00	536	87,29
Криптон (Kr)	83,800	209,40	54,90	911	119,78
Ксенон (Xe)	131,300	289,70	58,30	1110	160,05

Примечание. M — молярная масса; $T_{кр}$ — критическая температура; $p_{кр}$ — критическое давление; $\rho_{кр}$ — критическая плотность; $T_{кип}$ — температура кипения при 760 мм рт. ст.

Таблица 3

Основные экспериментальные данные по 2-му и 3-му вириальным коэффициентам чистых благородных газов и их смесей

Коэффициент	Газ	Температура, К	Количество экспериментальных точек	Источник
<i>B</i>	Чистые газы	От 60 до 1 100	392	[45–62]
<i>B</i>	Смеси газов	От 148 до 773	158	[47, 54, 50, 53, 57, 63]
<i>C</i>	Чистые газы	От 61 до 3 000	168	[47, 49, 50, 55, 58–60]

Таблица 4

Основные экспериментальные данные по динамической вязкости и теплопроводности чистых благородных газов и их смесей

Газ	Температура, К	Давление, МПа	Количество экспериментальных точек	Источник
<i>Динамическая вязкость</i>				
Чистые газы	От 77 до 1 500	Нормальное, не более 0,1	577	[43, 64, 65–72]
Чистые газы	От 200 до 1 300	Высокое, не более 30	614	[43, 72–84]
Смеси газов	От 1670 до 1533	Нормальное, не более 0,1	847	[68, 70, 73–75, 79–94]
Смеси газов	От 293 до 303	Высокое, не более 12	522	[73–75, 82]
<i>Теплопроводность</i>				
Чистые газы	От 150 до 1550	Нормальное, не более 0,1	615	[43, 64, 65, 71, 72, 96]
Чистые газы	От 235 до 1500	Высокое, не более 50	1151	[43, 64, 72, 95, 98, 99, 100, 101]
Смеси газов	От 170 до 793	Нормальное, не более 0,1	675	[86, 92, 93, 101–102]
Смеси газов	От 300 до 603	Высокое, не более 20	371	[110]

Аппроксимационные соотношения для расчета вириальных коэффициентов можно найти в работах [44, 112]. Для расчета вириальных коэффициентов, используя теорию соответственных состояний, для чистых инертных газов и их смесей предлагают следующие зависимости [44]:

2-й вириальный коэффициент для всех инертных газов, кроме гелия,

$$B = \left[-102,6 + \left(102,732 - 0,001\theta - \frac{0,44}{\theta^{1,22}} \right) \operatorname{th} (4,5\sqrt{\theta}) \right] V^*, \quad (1)$$

где $\theta = T/T_{\text{кр}}$ — приведенная температура; $V^* = RT_{\text{кр}}/p_{\text{кр}}$ — критический удельный объем, м³/кг; T — температура, К.

2-й вириальный коэффициент для гелия

$$B = 8,4 - 0,00018T + \frac{115}{\sqrt{T}} - \frac{835}{T}; \quad (2)$$

3-й вириальный коэффициент для всех инертных газов, кроме гелия (для гелия при давлении меньше 30 МПа им можно пренебречь),

$$C = \left[0,0757 + \left(-0,0862 - 3,6 \cdot 10^{-5} \theta - \frac{0,0237}{\theta^{0,059}} \right) \text{th}(0,84\theta) \right] V^{*2}.$$

Коэффициенты в формулах (1), (2) получены эмпирическим путем на основании обработки экспериментальных данных.

Для смесей газов используют следующие зависимости [29]:

2-й вириальный коэффициент

$$B = x_i^2 B_{ii} + 2x_i x_j B_{ij} + x_j^2 B_{jj},$$

где x_i, x_j — молярные доли компонентов газов в смеси; B_{ii}, B_{ij} вычисляют по формулам для чистых газов (1), (2), только для коэффициента B_{ij} величины V^* и θ рассчитывают по следующим зависимостям:

$$V^* = \frac{V_{ii} + V_{jj}}{2}, \quad \theta = \frac{T}{T_{ij}}.$$

Здесь $T_{ij} = \frac{4\beta}{(1+\beta)^2} \sqrt{T_{кpi} T_{крj}}$; $\beta = \frac{V_{ii}^*}{V_{jj}^*}$ — отношение критических объемов компонентов смеси;

3-й вириальный коэффициент

$$C = x_i^3 C_{iii} + 3x_i^2 x_j C_{ijj} + 3x_j^2 x_i C_{jii} + x_j^3 C_{jjj},$$

где $C_{ijj} = (C_i^2 C_j)^{1/3}$; $C_{jii} = (C_j^2 C_i)^{1/3}$.

Молярную энтальпию рассчитывают по формуле

$$H_M = H_{0M}(T_0) + C_{PM}(T - T_0) + \rho_M RT \left[\left(B - T \frac{dB}{dT} \right) + \rho_M \left(C - \frac{T}{2} \frac{dC}{dT} \right) \right],$$

где $H_{0M}(T_0) = C_{PM} T_0$ — молярная энтальпия идеального газа при температуре T_0 ; $C_{PM} = \frac{5R}{2}$ — молярная теплоемкость идеального газа.

При постоянном давлении молярная теплоемкость

$$C_{PM} = \left[\frac{\partial H_M}{\partial T} \right]_P.$$

При постоянном объеме молярная теплоемкость

$$C_{\text{VM}} = \left[\frac{\partial U_{\text{M}}}{\partial T} \right]_{\rho_{\text{M}}} = \left[\frac{\partial H_{\text{M}}}{\partial T} \right]_{\rho_{\text{M}}} - \left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{p}{\rho_{\text{M}}} \right) \right]_{\rho_{\text{M}}}.$$

Предложенная в работе [44] модель позволяет достаточно точно вычислять теплоемкость, а также коэффициент сжимаемости для чистых газов и их смесей. Точность моделей для чистых газов коэффициента сжимаемости, теплоемкости и энтальпии составила менее 0,1 %, для смесей газов – около 1 % при условии нахождения далеко от критических параметров. Вблизи критической точки ($T_{\text{кр}} = 50 \text{ K}$) точность расчетных моделей для чистых инертных газов и их смесей около 1 %.

Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности.

Рассмотрим еще два важных теплофизических параметра — динамическую вязкость и теплопроводность. Так как они не подчиняются закону аддитивности (в отличие от термодинамических параметров), их расчет требует серьезного экспериментального и теоретического исследования. Это связано с тем, что данные параметры являются характеристиками переноса, поэтому даже небольшое добавление другого газа может существенно изменить свойства основного газа.

Все полученные к настоящему времени экспериментальные данные позволили надежно обосновать применимость кинетической теории Чепмена — Энскога [113] для смесей инертных газов при низких давлениях ($\approx 0,1 \text{ МПа}$); для учета влияния высокого давления можно воспользоваться, например, поправками, предложенными в работе [44].

В этом случае динамическая вязкость и теплопроводность рассчитываются следующим образом:

$$\mu(T, p) = \mu_0(T) + \left(1 - \frac{1}{2,3} \right) \mu^* \psi_{\mu}(a),$$

$$\lambda(T, p) = \lambda_0(T) + \left(1 - \frac{1}{2,3} \right) \lambda^* \psi_{\lambda}(a),$$

где $\mu_0(T)$, $\lambda_0(T)$ — динамическая вязкость и теплопроводность, рассчитанные по кинетической теории Чепмена — Энскога [113]; μ^* , λ^* — псевдокритическая вязкость и теплопроводность, рассчитываемые по формулам

$$\mu^* = 0,204 \cdot 10^{-7} \frac{\sqrt{M\bar{T}^*}}{(0,291\bar{V}^*)^{2/3}},$$

$$\lambda^* = 0,304 \cdot 10^{-4} \frac{(\bar{T}^*)^{0,277}}{M^{0,465} (0,291\bar{V}^*)^{0,415}},$$

$$a = \frac{0,291\bar{V}^*}{M} \rho, \quad \psi_{\mu}(a) = 0,221a + 1,062a^2 - 0,509a^3 + 0,225a^4,$$

$$\psi_\lambda(a) = 0,645a + 0,331a^2 + 0,0368a^3 - 0,0128a^4,$$

$$\bar{V}^* = x_i V_{ii} + x_j V_{jj}, \quad \bar{T}^* = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 x_i x_j V_{ij}^* T_{ij}^*.$$

Результаты расчетов [44] для теплопроводности, динамической вязкости и числа Прандтля смесей инертных газов приведены на рис. 1–3. Точность предложенных моделей не превышает 2,5...3 % [44], что достаточно для инженерных расчетов.

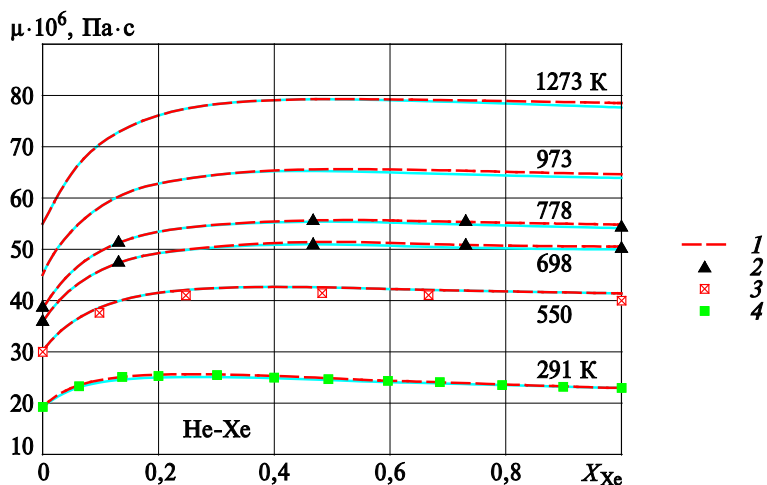


Рис. 1. Динамическая вязкость смеси гелия и ксенона в зависимости от молярной доли ксенона [44]:
1 — [88]; 2 — [86]; 3 — [102]; 4 — [103]

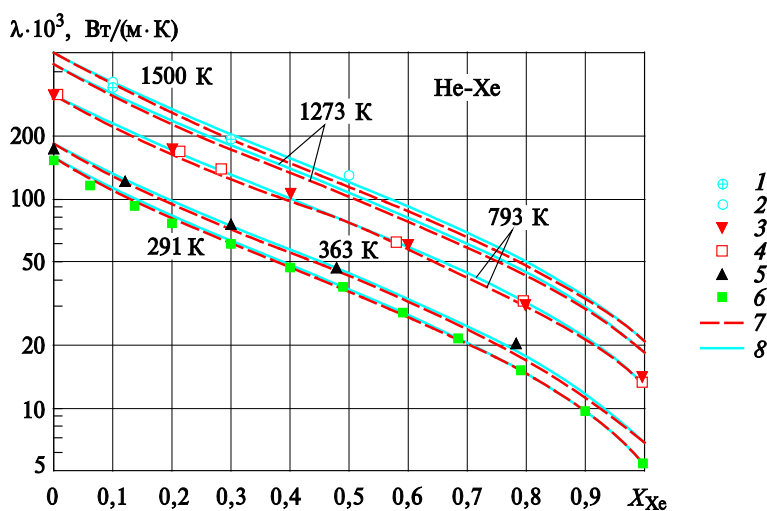


Рис. 2. Теплопроводность смеси гелия и ксенона в зависимости от молярной доли ксенона [44]:
1 — [107]; 2 — [106]; 3 — [103]; 4 — [102]; 5 — [103]; 6 — [93]; 7 — [110]; 8 — [44]

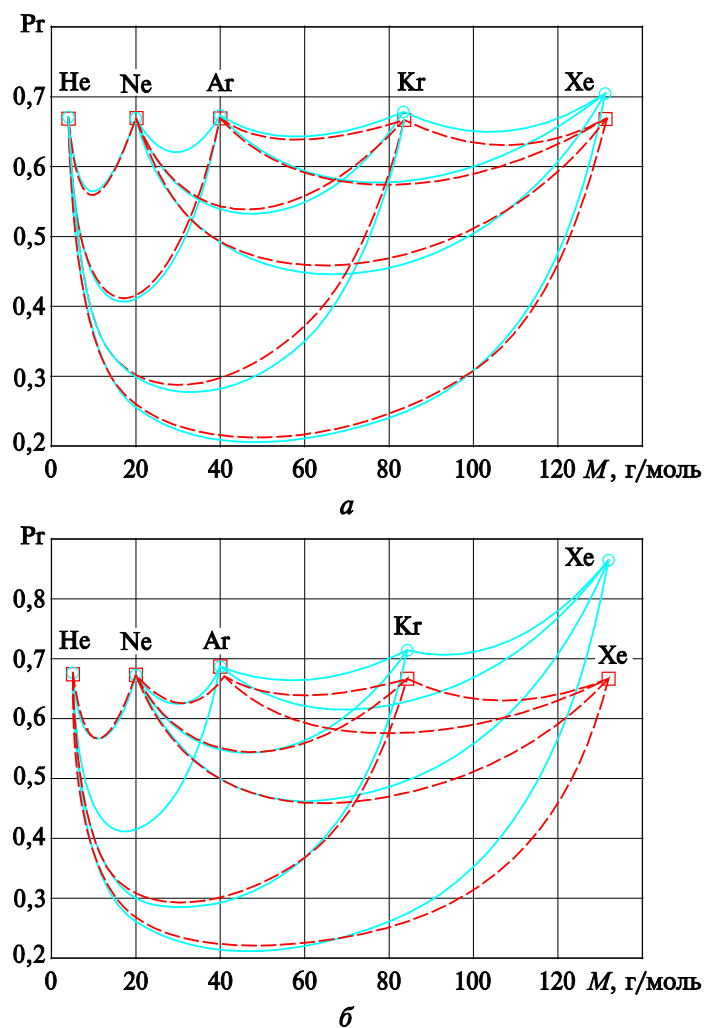


Рис. 3. Число Прандтля для смесей инертных газов при низких и высоких давлениях [44]:
 а — давление 2 МПа; б — давление 7 МПа; 1 — температура 400 К;
 2 — температура 1200 К

Отдельно следует выделить совместную работу Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова (Белоруссия) и Университета Иллинойса (США) [109], где исследовали теплопроводность смесей He–Xe, Ar–Xe, Kr–Xe при низких температурах (170–273 К) вблизи линии насыщения ксенона. Давление в экспериментах составляло 1,013 бар, что соответствует температуре насыщения ксенона 165 К. Результаты работы подтвердили, что кинетической теорией Чепмена — Энскога можно пользоваться вплоть до линии насыщения ксенона, хотя погрешность возрастает в этом случае до 8–10 %.

В работе [114] авторами было сделано расчет числа Прандтля для смеси радона (Rn) и гелия (He). Результаты показали, что даже использование более тяжелого, чем ксенон, радона мало влияет на минимальное число Прандтля – для смеси радона и гелия оно равно приблизительно 0,17, для смеси ксенона и гелия равно приблизительно 0,2.

Рассмотренные расчетные зависимости можно практически применить для проектирования ЗГТУ. Проанализируем некоторые аспекты при выборе параметров установок, которые следуют из полученных термодинамических и теплофизических свойств благородных газов и их смесей.

Термодинамические параметры ЗГТУ космического назначения. Теплоемкость и показатель адиабаты чистого гелия можно считать постоянными в пределах 400...1500 К, критическое давление составляет 2,29 бар, критическая температура 5,2 К (см. табл. 2). Следовательно, рабочий диапазон в ЗГТУ на гелии находится далеко от пограничной кривой. Гелий также обладает хорошими ядерно-физическими свойствами для использования в высокотемпературном ядерном реакторе [35, 36]. Со смесями He–Xe все не так однозначно, так как Xe имеет низкую критическую температуру – 289,7 К (см. табл. 2).

Рассмотрим прототипы ЗГТУ космического назначения, разрабатываемых NASA [41, 42] и МГТУ им. Н.Э. Баумана [11]. Исследовательский центр AIReserch фирмы Aligned Signal (Honeywell) использовал собственные аналитические зависимости [41], которые тем не менее хорошо согласуются с кинетической теорией Чепмена — Энскога. Предполагают, что специалисты из исследовательского центра AIReserch могли использовать кинетическую теорию Чепмена — Энскога и экспериментальные точки из уже известных к тому времени экспериментальных работ [93, 102–103, 105] для проектирования замкнутой газотурбинной установки. Схема ЗГТУ приведена на рис. 4. Газотурбинная установка — одновальная, с регенерацией теплоты уходящих газов от турбины. Основные данные по характеристикам циклов ЗГТУ приведены в табл. 5.

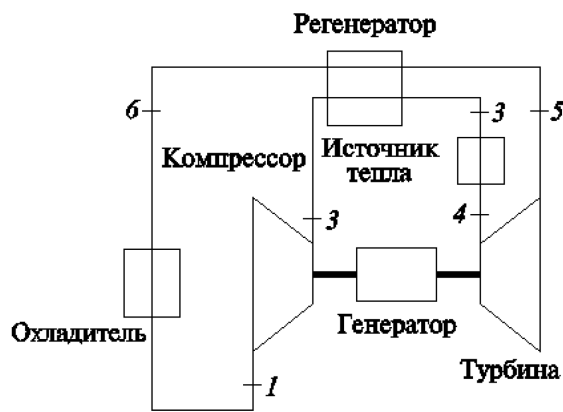


Рис. 4. Схема замкнутой газотурбинной установки с регенерацией [41]:

1 — параметры перед компрессором; 2 — параметры за компрессором; 3 — параметры после регенератора по холодной стороне; 4 — параметры перед турбиной; 5 — параметры после турбины; 6 — параметры после регенератора по горячей стороне

**Параметры ЗГТУ космического применения, разрабатываемых
в NASA [41, 42] и в МГТУ им. Н.Э. Баумана**

№ п/п	T_1^* , К	p_1^* , бар	T_2^* , К	p_2^* , бар	T_3^* , К	p_3^* , бар	T_4^* , К	p_4^* , бар	T_5^* , К	p_5^* , бар	T_6^* , К	p_6^* , бар	N_e , кВт	Рабо- чее тело	M , кг/ кмоль	G , кг/с	КПД, %
1	330	25	437	47,6	785	45,9	1000	45,9	815	25,8	467	25,8	250	He	4,003	0,62	22,7
2	389	—	526	15,7	907	—	1144	—	938	8,6	557	—	160	He-Xe	39,944	5,53	23,5
3	389	—	526	7,2	904	—	1144	—	924	3,9	546	—	160	He-Xe	39,944	4,59	27,9
4	389	—	526	47,1	907	—	1144	—	938	25,9	557	—	160	He-Xe	83,800	11,6	21,9
5	389	—	526	21,0	904	—	1144	—	924	11,3	546	—	160	He-Xe	83,800	9,64	26,0
6	313	1,31	419	2,3	—	—	1023	—	873	—	—	—	3	He-Xe	83,800	0,32	22,0

Примечание. N_e – электрическая мощность; G – расход рабочего тела.

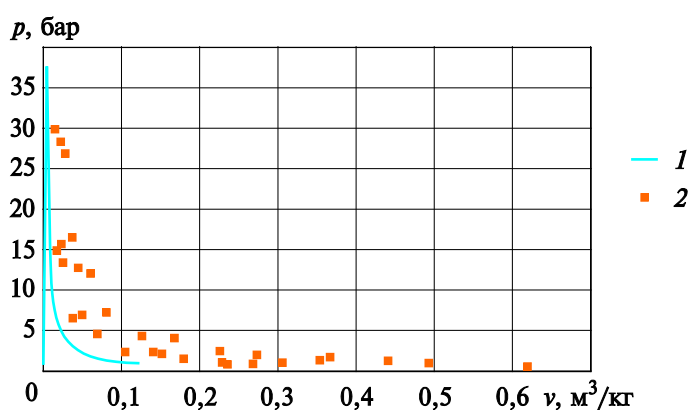


Рис. 5. Линия насыщения ксенона в v – p -координатах и параметры циклов ЗГТУ:

1 — линия насыщения ксенона; 2 — параметры циклов (см. рис. 4, табл. 5, пп. 1–6)

На рис. 5 приведены линия насыщения ксенона и пересчитанные для парциального давления точки циклов замкнутой газотурбинной установки (см. табл. 1) с учетом сжимаемости смеси по расчетным зависимостям [44]. Видно, что для смеси газов с молярной массой криптона 83,8 г/моль и при высоких давлениях в контуре рабочие точки лежат достаточно близко к кривой насыщения.

Это обстоятельство следует учитывать при расчетах термодинамических параметров ЗГТУ. Это особенно актуально для смеси газов гелия и ксенона с молекулярной массой 83,9 кг/кмоль. В этой смеси объемная доля ксенона составляет 62 %, что повышает вероятность его конденсации по сравнению со смесью гелия и ксенона молекулярной массой 39,94 кг/кмоль (здесь объемная доля ксенона составляет 28 %). При приближении к кривой насыщения и критической точке ксенона необходимо учитывать изменение теплофизических свойств смеси и увеличение погрешностей их расчета.

Как видно из табл. 5, существует тенденция повышения давления в контуре ЗГТУ. Причин для этого несколько: уменьшение габаритов и массы ЗГТУ, избежание перегрева высокотемпературного газоохлаждаемого реактора. При этом существенно изменяются теплоемкость и показатель адиабаты k с 1,67 до 2,2 (рис. 5, 6).

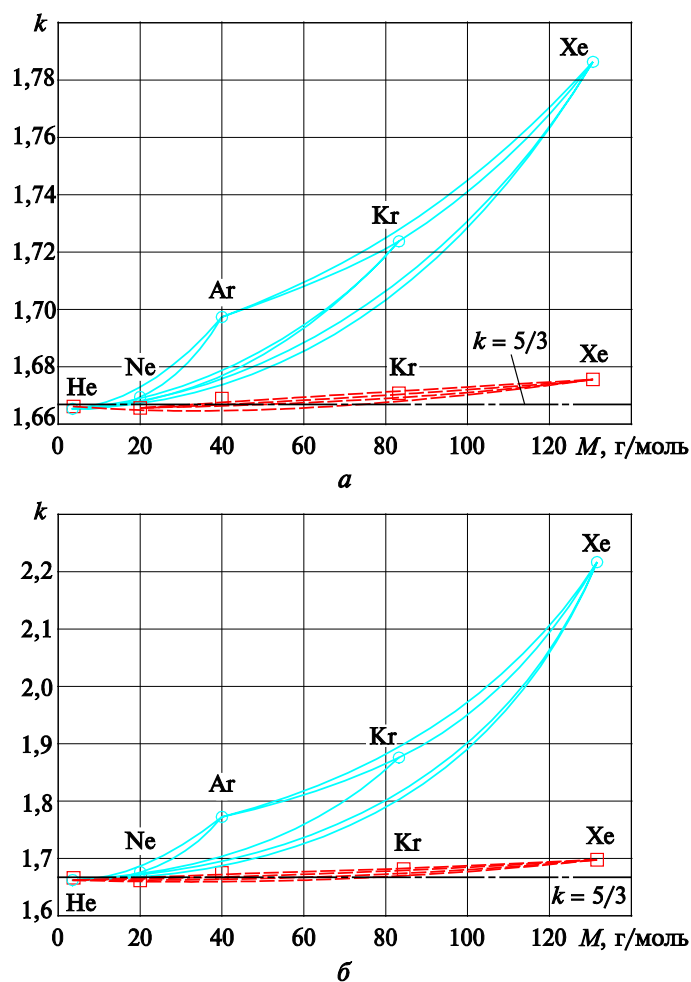


Рис. 6. Показатель адиабаты для смесей инертных газов при низких и высоких давлениях [44]:
 a — давление 2 МПа; b — давление 7 МПа; 1 — температура 400 К;
 2 — температура 1200 К

При начальном запуске замкнутой газотурбинной установки космического назначения со смесью He–Xe в качестве рабочего тела также необходимо учитывать, что ксенон может конденсироваться в контуре ЗГТУ. В этом случае необходимо прогревать всю установку (например, с помощью солнечного излучения уже на орбите Земли,

передача теплоты в этом случае может быть осуществлена тепловыми трубами), так как запуск на чистом гелии невозможен в силу его теплофизических параметров (прежде всего он трудно сжимаем) и, следовательно, требует большого количества энергии на запуск.

Заключение. В работе проанализированы экспериментальные и теоретические работы по теплофизическим свойствам благородных газов и их смесей. В результате проведенного анализа показано, что в настоящее время получен достаточный объем экспериментальных данных по теплофизическим свойствам благородных газов и их смесей. Это позволяет обосновать применимость расчетных моделей для всех необходимых теплофизических параметров как для чистых благородных газов, так и для их смесей (точность составляет не более 1 %, в худшем случае не более 10 %), что имеет важное практическое значение при расчетах замкнутых газотурбинных установок. Современные работы [115–127] подтвердили полученные ранее результаты, в том числе и для применимости кинетической теории газов.

Проведенное исследование также показало, что при расчетах ЗГТУ необходимо учитывать значительное влияние на теплофизические свойства приближающейся к критической точке температуры ксенона вследствие ее низкого значения (290 К). Также возрастает показатель адиабаты при увеличении молярной массы смеси и повышении давления в контуре.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (госзадание № 13.5521.2017/БЧ).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Leontiev A.I., Samsonov V.L., Surovtsev I.G., Katorgin B.I., Chvanov V.K., Kashkarov A.M. Closed brayton energy conversion system of the solar or nuclear power for manned martian mission electric thrusters power source. *Proceeding of 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit 2000*. Las Vegas, NV, July 24–28, 2000, pp. 1103–1110.
- [2] Арбеков А.Н., Леонтьев А.И., Самсонов В.Л., Суровцев И.Г., Каторгин Б.И., Чванов В.К., Кашкаров А.М., Елисеев Ю.С., Третьяк С.А., Бабаев И.Г. Безъядерная энергетика пилотируемой экспедиции на Марс. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2002, № 4, с. 3–12.
- [3] Arbekov A.N. Selection of the working medium for 6- to 12-kw closed organic-fuel-powered gas-turbine plants. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 121–125.
- [4] Арбеков А.Н., Леонтьев А.И. Развитие космических газотурбинных установок в работах В.Л. Самсонова. *Труды МАИ*, 2011, № 43, с. 1–13. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/c02/razvitie-kosmicheskikh-gazoturbinykh-ustanovok-v-rabotakh-v.l.-samsonova.pdf> (дата обращения 05.02.2018).
- [5] Арбеков А.Н. Автономная долгоресурсная малообслуживаемая замкнутая газотурбинная установка, работающая на органическом топливе. *Вестник*

- Самарского университета. *Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2012, № 3–2 (34), с. 307–312.
- [6] Arbekov A.N. Selecting a thermodynamic cycle for the closed gas-turbine power plant of spacecraft in order to minimize surface of the cooler-radiator. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 4. pp. 584–587.
- [7] Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Экспериментальное исследование малорасходного центробежного компрессора замкнутой газотурбинной установки. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2014, № 5–2 (47), с. 42–47.
- [8] Novitskiy V.B., Arbekov A.N. Calculation characteristics of centrifugal compressor operates on a mixture of gases. *Proceedings of the 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2016)*. Perm, June 27–July 03, 2016, P. 030089. DOI: 10.1063/1.4964031
- [9] Егоров К.С. Экспериментальное исследование характеристик пластинчато-ребристых высококомпактных поверхностей теплообмена. *Труды МАИ*, 2012, № 52, с. 1–8. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29545> (дата обращения 05.02.2016).
- [10] Егоров К.С., Щеголев Н.Л. Исследование характеристик высококомпактных пластинчато-ребристых поверхностей теплообмена со смещенным ребром. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 6, с. 351–362. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/431788.html> (дата обращения 05.02.2016).
- [11] Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Разработка макетного образца космической замкнутой газотурбинной установки. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2014, № 5–2 (47), с. 35–41.
- [12] Mason L.S., Shaltens R.K., Dolce J.L., Cataldo R.L. Status of Brayton cycle power conversion development at NASA GRC. *AIP Conference Proceedings 608*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2002*. Albuquerque, New Mexico, 3–6 February, 2002, pp. 865–871. DOI: 10.1063/1.1449813
- [13] Lipinski R.J., Wright S.A., Lenard R.X., Harms G.A. A gas-cooled reactor surface power system. *AIP Conference Proceedings 458*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–1999*. Albuquerque, New Mexico, 31 January – 4 February, 1999, pp. 1470–1475. DOI: 10.1063/1.57544
- [14] Lenard R.X., Binder A.B. Power system requirements and concepts for a commercially viable lunar base architecture. *AIP Conference Proceedings 458*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–1999*. Albuquerque, New Mexico, 31 January – 4 February, 1999, pp. 1647–1652. DOI: 10.1063/1.57567
- [15] Mason L. S. Surface nuclear power for human Mars missions. *AIP Conference Proceedings 458*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–1999*. Albuquerque, New Mexico, 31 January – 4 February, 1999, pp. 1464–1469. DOI: 10.1063/1.57736
- [16] Lipinski R.J., Wright S.A., Dorsey D.J., Peters C.D., Brown N., Williamson J., Jablonski J. A Gas-Cooled Reactor Closed-Brayton Cycle Demonstration with Nuclear Heating. *AIP Conference Proceedings 746*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2005*. Albuquerque, New Mexico, 13–17 February, 2005, pp. 437–448. DOI: 10.1063/1.1867160

- [17] Mason L.S. A Comparison of Fission Power System Options for Lunar and Mars Surface Applications. *AIP Conference Proceedings 813*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2006*. Albuquerque, New Mexico, 12–16 February, 2006, pp. 270–280. DOI: 10.1063/1.2169203
- [18] Zagarola M.V., Swift W.L., McCormick J.A., Izenon M.G. Miniature Turbo-Brayton Technologies for Space-Borne Thermal-to-Electric Power Converters. *AIP Conference Proceedings 608*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2002*. Albuquerque, New Mexico, 3–6 February, 2002, pp. 929–938. DOI: 10.1063/1.1449821
- [19] Zagarola M.V., Crowley C.J., Swift W.L. Developments in Turbo-Brayton Power Converters. *AIP Conference Proceedings 654*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2003*. Albuquerque, New Mexico, 2–5 February, 2003, pp. 580–588. DOI: 10.1063/1.1541342
- [20] Zagarola M.V., Crowley C.J., Swift W.L. Progress on Low-Power Turbo-Brayton Converters. *AIP Conference Proceedings 699*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2004*. Albuquerque, New Mexico, 8–12 February, 2004, pp. 453–462. DOI: 10.1063/1.1649606
- [21] EI-Genk M.S. Dual-mode, high energy utilization system concept for mars missions. *AIP Conference Proceedings 504*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2000*. Albuquerque, New Mexico, February, 2000, pp. 1290–1301. DOI: 10.1063/1.1290942
- [22] Borowski S.K., Stanley K., McGuire M.L., Mason M.L., Gilland J.H., Packard T.W. “Bimodal” Nuclear Thermal Rocket (BNTR) Propulsion for an Artificial Gravity HOPE Mission to Callisto. *AIP Conference Proceedings 654*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2003*. Albuquerque, New Mexico, 2–5 February, 2003, pp. 829–836. DOI: 10.1063/1.1541374
- [23] Joyner II C.R., Fowler B., Matthews J. A Closed Brayton Power Conversion Unit Concept for Nuclear Electric Propulsion for Deep Space Missions. *AIP Conference Proceedings 654*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2003*. Albuquerque, New Mexico, 2–5 February, 2003, pp. 677–684. DOI: 10.1063/1.1541355
- [24] Satter C.M. JIMO Follow-On Mission Studies. *AIP Conference Proceedings 746*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2005*. Albuquerque, New Mexico, 13–17 February, 2005, pp. 249–257. DOI: 10.1063/1.1867141
- [25] Frye P.E., Allen R., Delventhal R. Brayton Power Conversion System Study to Advance Technology Readiness for Nuclear Electric Propulsion – Phase I. *AIP Conference Proceedings 746*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2005*. Albuquerque, New Mexico, 13–17 February, 2005, pp. 727–737. DOI: 10.1063/1.1867192
- [26] McGuire M.L., Martini M.C., Packard T.W., Weglian J.E., Gilland J.H. Use of High-Power Brayton Nuclear Electric Propulsion (NEP) for a 2033 Mars Round-Trip Mission. *AIP Conference Proceedings 813*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2006*. Albuquerque, New Mexico, 12–16 February, 2006, pp. 222–229. DOI: 10.1063/1.2169198
- [27] Тестоедов Н.А. Перспективы и приоритеты развития информационных спутниковых систем. *Материалы IV науч.-практ. конф. «Вызовы и долгосрочные перспективы развития информационных космических систем»*, г. Кубинка, Московской обл., 10 сентября 2016 г. URL: <https://tp.iss-reshetnev.ru/documents/> (дата обращения 05.02.2018).

- [28] ПАО «Сатурн». Солнечные батареи. URL: <http://saturn-kuban.ru/produktsiya/solnechnye-batarei/> (дата обращения 05.02.2018).
- [29] Акимов В.Н., Коротеев А.А., Коротеев А.С. Ядерная космическая энергетика: вчера, сегодня, завтра. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2012, № 1, с. 3–11.
- [30] Андрианов Д.И., Захаренков Л.Э., Каревский А.В., Попов А.В., Попов С.А., Семёнкин А.В., Солодухин А.Е., Терехов Д.Н., Штонда С.Ю. Мощные энергодвигательные установки космического назначения с газотурбинным преобразованием энергии по замкнутому циклу Брайтона и особенности их экспериментальной отработки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 7 (55). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-7-1518
- [31] Dragunov Yu.G. Reactor unit for megawatt propulsion-power module. *Atomic Energy*, 2012, vol. 113, no. 1, pp. 1–3.
- [32] Драгунов Ю.Г., Габараев Б.А., Ужанова В.В., Беляков М.С., Селиверстов М.М. Космические ядерные энергетические установки суб- и мегаваттного класса. Ч. 1. Концепции реакторов (обзор). *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2014, № 2, с. 95–107.
- [33] Драгунов Ю.Г., Габараев Б.А., Ужанова В.В., Беляков М.С., Селиверстов М.М. Космические ядерные энергетические установки суб- и мегаваттного класса. Ч. 2. Системы преобразования тепловой энергии реактора в электрическую и отвода неиспользованного тепла (обзор). *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2014, № 3, с. 130–140.
- [34] Драгунов Ю.Г. Быстрый газоохлаждаемый реактор для космической ЯЭДУ мегаваттного класса. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2015, № 2, с. 117–120.
- [35] Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н. *Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики*. Москва, Энергоатомиздат, 2008, 136 с.
- [36] Манушин Э.А., Бекнев В.С., Осипов М.И., Суровцев И.Г. *Ядерные газотурбинные и комбинированные установки*. Манушин Э.А., ред. Москва, Энергоатомиздат, 1993, 272 с.
- [37] Mohamed S.E., Tournier J.P. Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, vol. 238, pp. 1353–1372.
- [38] Mohamed S.E., Tournier J.P. On the use of noble gases and binary mixtures as reactor coolants and CBC working fluids. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 1882–1891.
- [39] El-Genk M.S., Tournier J.P. Selection of noble gas binary mixtures for Brayton space nuclear power systems. *Proceedings of 4th international energy conversion engineering conference (IECEC)*, San Diego, CA, June 26–29, 2006. New York, AIAA, 2006, paper No. AIAA–2006–59986.
- [40] Johnson P.K. A Method for Calculating Viscosity and Thermal Conductivity of a Helium–Xenon Gas Mixture. *Report No. NASA CR-2006-214394*, 2006. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20060056311.pdf> (дата обращения 05.02.2018).
- [41] Coombs M.G., Morse C.J., Richard C.E. Topical report (Phase I) “Conceptual design study of nuclear Brayton cycle heat exchanger and duct assembly (HXDA)”. *Report No. NASA CR–72783 (AIRResearch 70–6691)*, 1970. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19710006163.pdf> (дата обращения 05.02.2018).
- [42] Brian A., Sam A., Shawn B., et al. Megawatt solar power systems for lunar surface operations (Final report). *Report: Space Systems Design, AA420/421*

- (NASA/USRA University Advanced Design Program), 1990. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19910008844> (дата обращения 05.02.2018).
- [43] Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. Москва, Наука, 1972, 720 с.
- [44] Tournier J.P., Mohamed S.E. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton Cycle application. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 469–492.
- [45] Schneider W., Duffie J. Compressibility of gases at high temperature – II: the second virial coefficient of helium in the temperature range 0 °C to 600 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1949, vol. 17, no. 9, pp. 751–754.
- [46] Yntema J., Schneider W. Compressibility of gases at high temperature – III: The second virial coefficient of helium in the temperature range 600 °C to 1200 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1950, vol. 18, no. 5, pp. 641–646.
- [47] Brewer J., Vaughn G. Measurement and correlation of some interaction second virial coefficients from –125 °C to 50 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1969, vol. 50, no. 7, pp. 2960–2968.
- [48] Blancett A., Hall K., Canfield F. Isotherms for the He–Ar System at 50 °C, 0 °C and –50 °C up to 700 Atmospheres. *Physica*, 1970, no. 47, pp. 75–91.
- [49] Levelt Sengers J.M.H., Klein M., Gallagher J. *Pressure — volume temperature relationships of gases — virial coefficients*. 3rd ed. American institute of physics handbook. New York, American Institute of Physics, 1972, 2364 p.
- [50] Dillard D., Waxman M., Robinson R. Volumetric data and virial coefficients for helium, krypton, and helium–krypton mixtures. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1978, vol. 23, no. 4, pp. 269–274.
- [51] Elias E., Hoang N., Sommer J., Schramm B. Die zweiten Virialkoeffizienten von Helium–Gasmischungen im Bereich unterhalb Zimmertemperatur. *Ber Bunsenges Phys Chem.*, 1986, Bd. 90, no. 4, S. 342–351.
- [52] Nicholson G., Schneider W. Compressibility of gases at high temperature–IX: second virial coefficients and the intermolecular potential of neon. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1955, no. 33, pp. 589–596.
- [53] Schmiedel H., Gehrmann R., Schramm B. Die zweiten Virialkoeffizienten verschiedener Gasmischungen im Temperaturbereich von 213 bis 475 K. *Ber Bunsenges Phys. Chem.*, 1980, no. 84, S. 721–724.
- [54] Dymond J.H., Smith E.B. *The virial coefficients of pure gases and mixtures — a critical compilation*. Oxford, England, Clarendon Press, 1980, 518 p.
- [55] Sevast'yanov R.M., Cheryavskaya R.A. Virial coefficients of neon, argon, and krypton at temperatures up to 3000 K. *Journal of Engineering Physic*, 1987, no. 52, pp. 703–705.
- [56] Whalley E., Lupien Y., Schneider W. The compressibility of gases — VII: argon in the temperature range 0–600 °C and the Pressure Range 10–80 Atmospheres. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1953, no. 31, pp. 727–733.
- [57] Rentschler H., Schramm B. Eine Apparatur zur Messung von zweiten Virialkoeffizienten bei hohen Temperaturen. *Ber Bunsenges Phys Chem*, 1977, Bd. 81, no. 3, S. 319–321.
- [58] Stewart R., Jacobsen R. Thermodynamic properties of argon from the triple point to 1200 K with pressure to 1000 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1989, vol. 18, no. 2, pp. 639–752.
- [59] Gilgen R., Kleinrahm R., Wagner W. Measurement and correlation of the (pressure, density, temperature) relation of argon — I: the homogeneous gas and liquid regions in the temperature range from 90 K to 340 K at pressures up to 12 MPa. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 1994, no. 26, pp. 383–398.

- [60] Tegeler C., Span R., Wagner W. A new equation of state for argon covering the fluid region for temperatures from the melting point line to 700 K at pressure up to 1000 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1999, vol. 28, no. 3, pp. 779–850.
- [61] Beattie J., Barriault R., Brierley J. Compressibility of gaseous xenon—II: the virial coefficient and potential parameter of xenon. *Journal of Chemical Physics*, 1951, vol. 19, no. 10, pp. 1222–1226.
- [62] Whalley E., Lupien Y., Schneider W. The compressibility of gases at high temperature — X: xenon in the temperature range 0–700 °C and the pressure range 8–50 atmospheres. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1955, no. 33, pp. 633–636.
- [63] Kalfoglou N., Miller J. *Compressibility of gases*. *Journal of Chemical Physics*, 1967, vol. 71, no. 5, pp. 1256–1264.
- [64] Kestin J., Knierim K., Mason E., Njafi S., Ro S., Waldman M. Equilibrium and transport properties of the noble gases and their mixtures at low density. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1984, vol. 13, no. 1, pp. 229–303.
- [65] *NIST Chemistry WebBook*. National Institute of Standards and Technology. URL: <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (дата обращения 05.02.2018).
- [66] Dawe R., Smith E. Viscosity of inert gases at high temperatures. *Journal of Chemical Physics*, 1970, vol. 52, no. 2, pp. 693–703.
- [67] Maitland G., Smith E.B. Critical reassessment of viscosities of 11 common gases. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1972, vol. 17, no. 2, pp. 150–156.
- [68] Kestin J., Ro S., Wakeham W. Viscosity of noble gases in the temperature range 25–700 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1972, vol. 56, no. 8, pp. 4119–4124.
- [69] Touloukian Y., Saxena S., Hestermans P. *Thermophysical properties of matter. Vol. 11: Viscosity*. New York, Washington: IFI/Plenum, 1975. 802 p.
- [70] Kestin J., Khalifa H., Wakeham W. The viscosity and diffusion coefficients of the binary mixtures of xenon with the other noble gases. *Physica*, 1978, no. 90A, pp. 215–228.
- [71] Bich E., Millat J., Vogel E. The viscosity and thermal conductivity of pure monoatomic gases from their normal boiling point up to 500 K in the limit of zero density and at 0.101325 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1990, vol. 19, no. 6, pp. 1289–1305.
- [72] Younglove B., Hanley H. The viscosity and thermal conductivity coefficients of gaseous and liquid argon. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1986, vol. 15, no. 4, pp. 1323–1337.
- [73] Kestin J., Nagashima A. Viscosity of neon–helium and neon–argon mixtures at 20 °C and 30 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1964, vol. 40, no. 12, pp. 3648–3654.
- [74] Iwasaki H., Kestin J. The viscosity of argon–helium mixtures. *Physical*, 1963, no. 29, pp. 1345–1372.
- [75] Kestin J., Kobayashi Y., Wood T. The viscosity of four binary gaseous mixtures at 20 °C and 30 °C. *Physical*, 1966, no. 32, pp. 1065–1089.
- [76] Kestin J., Leidenfrost W. An absolute determination of the viscosity of eleven gases over a range of pressures. *Physical*, 1959, no. 25, pp. 1033–1062.
- [77] Kestin J., Whitelaw J. A relative determination of the viscosity of several gases by the oscillating disk method. *Physical*, 1963, no. 29, pp. 335–356.
- [78] Flynn G.P., Hanks R.V., Lemaire N.A., Ross J. Viscosity of nitrogen, helium, neon and argon from 78.5 °C to 100 °C below 200 atmospheres. *Journal of Chemical Physics*, 1963, vol. 38, no. 1, pp. 154–162.

- [79] Reynes E., Thodos G. Viscosity of helium, neon, and nitrogen in the dense gaseous region. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1966, vol. 11, no. 2, pp. 137–140.
- [80] Kao J., Kobayashi R. Viscosity of helium and nitrogen and their mixtures at low temperature and elevated pressures. *Journal of Chemical Physics*, 1967, vol. 47, no. 8, pp. 2836–2849.
- [81] Trappeniens N., Botzen H., Van Der Berg H., Van Oosten J. The viscosity of neon between 25 °C and 75 °C at pressures up to 1800 atmospheres – corresponding states for the viscosity of the noble gases up to high density. *Physica*, 1964, no. 30, pp. 985–996.
- [82] Kestin J., Korfali O., Sengers J., Kamgar-Parsi B. Density dependence and composition dependence of the viscosity of neon–helium and neon–argon mixtures. *Physica*, 1981, no. 106A, pp. 416–422.
- [83] Рабинович В.А., Вассерман А.А., Недоступ В.И., Векслер Л.С. *Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона*. Рабинович В.А., ред., Москва, Издательство стандартов, 1976, 636 с.
- [84] Michels A., Botzen H., Schuurman W. The viscosity of argon at pressures up to 2000 atmospheres. *Physical*, 1954, no. 20, pp. 1141–1148.
- [85] Reynes E., Thodos G. The viscosity of argon, krypton, and xenon in the dense gaseous region. *Physical*, 1964, no. 30, pp. 1529–1542.
- [86] Thornton E. Viscosity of binary mixtures of rare gases. *Progress in international research on thermodynamic and transport properties*. Masi J., Tsai D., editors. Princeton University, Princeton NJ, January 24–26, 1962. New York, The American Society of Mechanical Engineers, Academic Press, 1962. 772 p.
- [87] Brokaw R. Viscosity of gas mixtures. *NASA Technical Note D-4496*. Washington DC, NASA, 1968, 28 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19680012255.pdf> (дата обращения 05.02.2018).
- [88] Rietveld A.O., van Itterbeek A., van den Berg G.J. Measurements on the viscosity of mixtures of helium and argon. *Physical*, 1953, no. 19, pp. 517–524.
- [89] Kelekar A., Kestin J. Viscosity of He–Ar and He–Kr binary gaseous mixtures in the temperature range 25–720 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1970, vol. 52, no. 8, pp. 4248–4261.
- [90] Maitland G., Smith E.B. Viscosities of binary gas mixtures at high temperatures. *Journal of Chemical Society, Faraday Transaction. Part I*, 1974, no. 70, pp. 1191–1211.
- [91] Gough D.W., Matthews G.P., Smith E.B. Viscosity of nitrogen and certain gaseous mixtures at low temperatures. *Journal of Chemical Society, Faraday Transaction. Part I*, 1976, no. 72, pp. 645–653.
- [92] Thornton E. Viscosity and thermal conductivity of binary gas mixtures: krypton–argon, krypton–neon and krypton–helium. *Proceedings of Physical of the Society of London*, 1961, no. 77, pp. 1166–1169.
- [93] Thornton E. Viscosity and thermal conductivity of binary gas mixtures: xenon–krypton, xenon–argon, xenon–neon and xenon–helium. *Proceedings of Physical of the Society of London*, 1960, no. 76, pp. 104–112.
- [94] Kestin J., Wakeham W., Watanabe K. Viscosity, thermal conductivity, and diffusion coefficient of Ar–Ne and Ar–Kr gaseous mixtures in the temperature range 25–700 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1970, vol. 53, no. 10, pp. 3773–3780.
- [95] Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тонкий Е.Е. *Справочник по теплопроводности жидкостей и газов*. Москва, Энергоатомиздат, 1990, 352 с.

- [96] Touloukian Y., Liley P., Saxena S. *Thermophysical properties of matter. Vol. 3: Thermal Conductivity — Nonmetallic Liquids and Gases*. New York/Washington, IFI/Plenum, 1970, 708 p.
- [97] Kestin J., Paul R., Clifford A., Wakeham W. Absolute determination of the thermal conductivity of noble gases at room temperature up to 35 MPa. *Physica*, 1980, no. 100A, pp. 349–369.
- [98] Sengers J., Bolk W., Stigter C. The thermal conductivity of neon between 25 °C and 75 °C at pressure up to 2600 atmospheres. *Physica*, 1964, no. 30, pp. 1018–1026.
- [99] Michels A., Sengers J., Van De Klundert J. The thermal conductivity of argon at elevated densities. *Physica*, 1963, no. 29, pp. 149–160.
- [100] Rosenbaum B., Oshen O., Thodos G. Thermal conductivity of argon in the dense gaseous and liquid regions. *Journal of Chemical Physics*, 1966, vol. 44, no. 8, pp. 2831–2838.
- [101] Bailey B., Kellner K. The thermal conductivity of gaseous and liquid argon. *Physica*, 1968, no. 39, pp. 444–462.
- [102] Mason E., Von Ubisch H. Thermal conductivities of rare gas mixtures. *The Physics of Fluids*, 1960, vol. 3, no. 1, pp. 355–361.
- [103] Gandhi J., Saxena S. Correlated thermal conductivity data of rare gases and their mixtures at ordinary pressure. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1968, vol. 13, no. 3, pp. 357–361.
- [104] Van Dael W., Cauwenbergh H. Measurements of the thermal conductivity of gases. *Physica*, 1968, no. 40, pp. 173–181.
- [105] Gambhir R., Saxena S. Thermal conductivity of binary and ternary mixtures of krypton, argon and helium. *Molecular Physics*, 1966, vol. 11, no. 3, pp. 233–241.
- [106] Mastovsky J. High temperature conduction of helium–xenon mixtures. *Journal of Engineering Physics*, 1978, vol. 33, no. 4, pp. 1170–1175.
- [107] Hashimoto K., Matsunaga N., Nagashima A., Mito K. Determination of the thermal conductivity of xenon–helium mixtures at high temperature by the shock-tube method. *International Journal of Thermophysics*, 1992, vol. 13, no. 2, pp. 211–221.
- [108] Mathur S., Tondon P. K., Saxena S. C. Thermal conductivity of binary, ternary and quaternary mixtures of rare gases. *Molecular Physics*, 1967, no. 12, pp. 569–579.
- [109] Shashkov A.G., Yaroshenko T.I., Nesterov N.A., Afshar R., Saxena S.C. Thermal Conductivity of Helium–Xenon, Argon–Xenon and Krypton–Xenon at Low Temperatures (170–273 K). *Thermal Conductivity*, 1983, no. 16, pp. 549–563.
- [110] Clifford A., Fleeter R., Kestin J., Wakeham W. Thermal conductivity of some mixtures of monoatomic gases at room temperature and at pressures up to 15 MPa. *Physica*, 1979, no. 98A, pp. 467–490.
- [111] Крутов В.И., Исаев С.И., Кожин И.А. и др. *Техническая термодинамика*. Крутов В.И., ред., Москва, Высшая школа, 1991, 384 с.
- [112] *Служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов в области использования атомной энергии Госкорпорации по атомной энергии. Теплофизические свойства газов и их смесей, используемых в ЯЭУ*. URL: <http://gsssd-rosatom.mephi.ru/DB-tp-02/index-tp-02.php> (дата обращения 05.02.2018).
- [113] Hirschfelder J.O., Curtiss C.F., Bird R.B. *Molecular theory of gases and liquids*. New York, John Wiley & Sons Inc., London, Chapman and Hall, 1954, 1219 p.
- [114] Бахмутов Д.М., Камолов Б.Х. Методика расчета критерия Прандтля для бинарных смесей инертных газов. *Молодежный науч.-техн. вестник МГТУ*

- им. Н.Э. Баумана, 2016, № 3. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/837344.html> (дата обращения 05.02.2018).
- [115] Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния доли гелия на значение критерия Прандтля газовых смесей. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 5, с. 314–329. URL: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/612> (дата обращения 05.02.2018).
- [116] Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния состава бинарных смесей инертных газов на их теплофизические свойства. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 11, с. 217–237. URL: <http://engineering-science.ru/doc/822897.html> (дата обращения 05.02.2018).
- [117] Dragunov Y.G., Smetannikov V.P., Gabaraev B.A., Orlov A.N., Belyakov M.S., Derbenev D.S. On calculation of the transport coefficients and thermodynamic properties of a helium–xenon gas mixture. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 21–29.
- [118] Dragunov Yu.G., Smetannikov V.P., Gabaraev B.A., Belyakov M.S., Kobzev P.V. On the choice of correlations for calculating the heat transfer coefficient in binary gas mixtures. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 30–42.
- [119] Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Effect of Net Structures on Wall-Free Non-Stationary Air Heat Vortices. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 64, pp. 817–828.
- [120] Dermer P.B., Varaksin A.Y., Leontiev A.I. The wall-free non-stationary fire whirls generation by axisymmetric burning of solid fuel pellets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 110, pp. 890–897.
- [121] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Approximate method for calculating convective heat flux on the surface of bodies of simple geometric shapes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 815, pp. 1–8.
- [122] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. Numerical simulation of the coaxial magneto-plasma accelerator and non-axisymmetric radio frequency discharge. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 830, pp. 1–6.
- [123] Компанец В.Я. Экспериментальное определение вязкости газов и газовых смесей при высоких температурах. *Сб. науч. тр. Ленинградского института механизации сельского хозяйства. Т. 9*. Москва – Ленинград, Издательство с/х литературы, 1953, с. 113–126.
- [124] Aziz R., McCourt F., Wong C. A New Determination of the Ground State Interatomic Potential for He–I. *Molecular Physics*, 1987, vol. 61, pp. 1487–1511.
- [125] Michels A., et al. Compressibility Isotherms of Hydrogen and Deuterium at Temperatures between –175 and +150 °C. *Physica*, 1959, vol. 25, pp. 1097–1124.
- [126] Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 1 (1). DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-31
- [127] Трусов Б.Г. Компьютерное моделирование фазовых и химических равновесий. *Инженерный вестник*, 2012, № 8, с. 1–7. URL: <http://engsi.ru/doc/483186.html> (дата обращения 05.02.2018).

Статья поступила в редакцию 18.01.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Егоров К.С., Степанов Л.В. Теплофизические свойства смесей благородных газов с низкими числами Прандтля. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-3-1858>

Егоров Кирилл Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 16 работ в области теплообмена и теплообменных аппаратов замкнутых газотурбинных установок. e-mail: blackbird05@mail.ru

Степанова Лариса Валерьевна — канд. биол. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 14 работ в области экологии, энергетики и биологии. e-mail: oystercatcher@mail.ru

Thermophysical properties of noble gas mixtures with low Prandtl number

© K.S. Egorov, L.V. Stepanova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article investigates thermal (thermal conductivity and viscosity) and thermodynamic (density, heat capacity, enthalpy, compression coefficient) properties of inert gases and their mixtures, which are used as the main working medium in promising closed gas turbine for the space needs. Closed gas turbines can be used in various space applications – unmanned spacecrafts, communication satellites and manned martian mission. Experimental research into thermodynamic and thermophysical properties of noble gases and their mixtures is considered. It was revealed that by this time enough amounts of experimental data concerning the properties of both single inert gases and their mixtures had been obtained. These data are used in different models based on kinetic theory of gases and virial real gas condition equation which makes possible to predict necessary thermophysical parameters. While calculating and designing closed gas-turbine installations it is necessary to take into account adiabatic change and Prandtl number of inert gas mixtures. While approaching working parameters to xenon saturation line one should consider the increase of calculated dependency errors.

Keywords: closed gas turbine, Prandtl number, noble gas mixture, kinetic gas theory, thermophysical properties

REFERENCES

- [1] Leontiev A.I., Samsonov V.L., Surovtsev I.G., Katorgin B.I., Chvanov V.K., Kashkarov A.M. Closed brayton energy conversion system of the solar or nuclear power for manned martian mission electric thrusters power source. *Proceeding of 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit 2000*. Las Vegas, NV, July 24–28, 2000, pp. 1103–1110.
- [2] Arbekov A.N., Leontiev A.I., Samsonov V.L., Surovtsev I.G., Katorgin B.I., Chvanov V.K., Kashkarov A.M. Eliseev Yu.S., Trdat'yan S.A., Babaev I.G. *Izvestiya Rossiiskoi akademii Nauk. Energetika — Thermal Engineering*, 2002, no. 4, pp. 3–12.
- [3] Arbekov A.N. Selection of the working medium for 6- to 12-kw closed organic-fuel-powered gas-turbine plants. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 121–125.
- [4] Arbekov A.N., Leontiev A.I. *Trudi MAI — Proceedings of MAI*, 2011, no. 43, pp. 1–13 Available at: <https://mai.ru/upload/iblock/c02/razvitie-kosmicheskikh-gazoturbinnnykh-ustanovok-v-rabotakh-v.l.-samsonova.pdf> (accessed February 5, 2018).
- [5] Arbekov A.N. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tehnika, Tehnologii i Mashinostroenie — Herald of Samara University. Aerospace technics, technology and engineering*, 2012, no. 3–2 (34), pp. 307–312.
- [6] Arbekov A.N. Selecting a thermodynamic cycle for the closed gas-turbine power plant of spacecraft in order to minimize surface of the cooler-radiator. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 4, pp. 584–587.
- [7] Arbekov A.N., Novitskii B.B. *Vestnik Samarskogo Universiteta. Aerokosmicheskaya Tehnika, Tehnologii i Mashinostroenie — Herald of*

- Samara University. *Aerospace technics, technology and engineering*, 2014, no. 5–2 (47), pp. 42–47.
- [8] Novitskiy B.B., Arbekov A.N. Calculation characteristics of centrifugal compressor operates on a mixture of gases. *Proceedings of the 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2016)*. Perm, June 27–July 3, 2016, P. 030089. DOI: 10.1063/1.4964031
- [9] Egorov K.S. *Trudi MAI — Proceedings of MAI*, 2012, no. 52, pp. 1–8. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29545> (accessed 05.02.2016).
- [10] Egorov K.S., Schegolev N.L. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. Ye. Baumana — Science and Education, Bauman MSTU*, 2012, no. 6, pp. 351–362. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/431788.html> (accessed 05.02.2016).
- [11] Arbekov A.N., Novitskii B.B. *Vestnik Samarskogo Universiteta. Aerokosmicheskaya Tehnika, Tehnologii i Mashinostroenie — Herald of Samara University. Aerospace technics, technology and engineering*, 2014, no. 5–2 (47), pp. 35–41.
- [12] Mason L.S., Shaltens R.K., Dolce J.L., Cataldo R.L. Status of Brayton cycle power conversion development at NASA GRC. *AIP Conference Proceedings 608*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2002*. Albuquerque, New Mexico, 3–6 February, 2002, pp. 865–871. DOI: 10.1063/1.1449813
- [13] Lipinski R.J., Wright S.A., Lenard R.X., Harms G.A. A gas-cooled reactor surface power system. *AIP Conference Proceedings 458*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–1999*. Albuquerque, New Mexico, 31 January – 4 February, 1999, pp. 1470–1475. DOI: 10.1063/1.57544
- [14] Lenard R.X., Binder A.B. Power system requirements and concepts for a commercially viable lunar base architecture. *AIP Conference Proceedings 458*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–1999*. Albuquerque, New Mexico, 31 January – 4 February, 1999, pp. 1647–1652. DOI: 10.1063/1.57567
- [15] Mason L.S. Surface nuclear power for human Mars missions. *AIP Conference Proceedings 458*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–1999*. Albuquerque, New Mexico, 31 January — 4 February, 1999, pp. 1464–1469. DOI: 10.1063/1.57736
- [16] Lipinski R.J., Wright S.A., Dorsey D.J., Peters C.D., Brown N., Williamson J., Jablonski J. A Gas-Cooled Reactor Closed-Brayton Cycle Demonstration with Nuclear Heating. *AIP Conference Proceedings 746*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2005*. Albuquerque, New Mexico, 13–17 February, 2005, pp. 437–448. DOI: 10.1063/1.1867160
- [17] Mason L.S. A Comparison of Fission Power System Options for Lunar and Mars Surface Applications. *AIP Conference Proceedings 813*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2006*. Albuquerque, New Mexico, 12–16 February, 2006, pp. 270–280. DOI: 10.1063/1.2169203
- [18] Zagarola M.V., Swift W.L., McCormick J.A., Izenon M.G. Miniature Turbo-Brayton Technologies for Space-Borne Thermal-to-Electric Power Converters. *AIP Conference Proceedings 608*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2002*. Albuquerque, New Mexico, 3–6 February, 2002, pp. 929–938. DOI: 10.1063/1.1449821

- [19] Zagarola M.V., Crowley C.J., Swift W.L. Developments in Turbo-Brayton Power Converters. *AIP Conference Proceedings 654*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2003*. Albuquerque, New Mexico, 2–5 February, 2003, pp. 580–588. DOI: 10.1063/1.1541342
- [20] Zagarola M.V., Crowley C.J., Swift W.L. Progress on Low-Power Turbo-Brayton Converters. *AIP Conference Proceedings 699*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2004*. Albuquerque, New Mexico, 8–12 February, 2004, pp. 453–462. DOI: 10.1063/1.1649606
- [21] EI-Genk M.S. Dual-mode, high energy utilization system concept for mars missions. *AIP Conference Proceedings 504*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2000*. Albuquerque, New Mexico, February, 2000, pp. 1290–1301. DOI: 10.1063/1.1290942
- [22] Borowski S.K., McGuire M.L., Mason M.L., Gilland J.H., Packard T.W. “Bimodal” Nuclear Thermal Rocket (BNTR) Propulsion for an Artificial Gravity HOPE Mission to Callisto. *AIP Conference Proceedings 654*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2003*. Albuquerque, New Mexico, 2–5 February, 2003, pp. 829–836. DOI: 10.1063/1.1541374
- [23] Joyner II C.R., Fowler B., Matthews J. A Closed Brayton Power Conversion Unit Concept for Nuclear Electric Propulsion for Deep Space Missions. *AIP Conference Proceedings 654*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2003*. Albuquerque, New Mexico, 2–5 February, 2003, pp. 677–684. DOI: 10.1063/1.1541355.
- [24] Satter C.M. JIMO Follow-On Mission Studies. *AIP Conference Proceedings 746*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2005*. Albuquerque, New Mexico, 13–17 February, 2005, pp. 249–257. DOI: 10.1063/1.1867141
- [25] Frye P.E., Allen R., Delventhal R. Brayton Power Conversion System Study to Advance Technology Readiness for Nuclear Electric Propulsion – Phase I. *AIP Conference Proceedings 746*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2005*. Albuquerque, New Mexico, 13–17 February, 2005, pp. 727–737. DOI: 10.1063/1.1867192
- [26] McGuire M.L., Martini M.C., Packard T.W., Weglian J.E., Gilland J.H. Use of High-Power Brayton Nuclear Electric Propulsion (NEP) for a 2033 Mars Round-Trip Mission. *AIP Conference Proceedings 813*. EI-Genk M.S., ed. *Space Technology and Applications International Forum–2006*. Albuquerque, New Mexico, 12–16 February, 2006, pp. 222–229. DOI: 10.1063/1.2169198
- [27] Testoedov N.A. Perspektivi i prioriteti razvitiya informatsionnih sputnikovih sistem [Perspectives and priorities of information satellite system development]. *Materiali IV Nauchno-prakticheskoi konferentsii “Vizovi i dolgosrochnie perspektivi razvitiya informatsionnih kosmicheskikh sistem”*. Russian Federation, Kubinka, Moscow reg., 10 September 2016 [Materials of IV scientific and practical conference “Challenges and longterm perspectives of information space system development”, Russian Federation, Kubinka, Moscow reg., September 10, 2016. Available at: <https://tp.iss-reshetnev.ru/documents/> (accessed February 5, 2018).
- [28] PAO «Saturn». *Solnechnie batarei* [Solar panels]. Available at: <http://saturn-kuban.ru/produktsiya/solnechnye-batarei/> (accessed February 5, 2018).
- [29] Akimov V.N., Koroteev A.A., Koroteev A.S. *Izvestiya Rossii'skoi akademii Nauk. Energetika — Thermal Engineering*, 2012, no. 1, pp. 3–11.
- [30] Andrianov D.I., Zaharenkov L.E., Karevri' A.V., Popov A.V., Popov S.A., Semyenkin A.V., Soloduhin A.E., Terehov D.N. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i*

- innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovations*, 2016, iss. 7 (55). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-7-1518
- [31] Dragunov Yu.G. Reactor unit for megawatt propulsion-power module. *Atomic Energy*, 2012, vol. 113, no. 1, pp. 1–3.
- [32] Dragunov Yu.G., Gabaraev B.A., Uzhanova V.V., Belyakov M.S., Seliverstov M.M. *Problemi mashinostroeniya i avtomatizatscii — Engineering & Automation Problems*, 2014, no. 2, pp. 95–107.
- [33] Dragunov Yu.G., Gabaraev B.A., Uzhanova V.V., Belyakov M.S., Seliverstov M.M. *Problemi mashinostroeniya i avtomatizatscii — Engineering & Automation Problems*, 2014, no. 3, pp. 130–140.
- [34] Dragunov Yu.G. *Problemi mashinostroeniya i avtomatizatscii — Engineering & Automation Problems*, 2015, no. 2, pp. 117–120.
- [35] Grebennik V.N., Kuharkin N.E., Ponomaryev-Stepnoi N.N. *Visokotemperaturnie gazoohlazhdaemie reaktori — innovatsionnoe napravlenie razvitiya atomnoi energetiki* [High-temperature gas-cooled reactors – innovative direction of atomic energy development]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2008, 136 p.
- [36] Manushin Ye.A., Beknev V.S., Osipov M.I., Surovtsev I.G. *Yadernie gazoturbinnie i kombinirovannye ustanovki*. [Nuclear gas turbine and combined plants]. Manushin Ye.A., ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1993, 272 p.
- [37] Mohamed S.E., Tournier J.P. Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, vol. 238, pp. 1353–1372.
- [38] Mohamed S.E., Tournier J.P. On the use of noble gases and binary mixtures as reactor coolants and CBC working fluids. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 1882–1891.
- [39] El-Genk M.S., Tournier J.P. Selection of noble gas binary mixtures for brayton space nuclear power systems. *Proceedings of 4th international energy conversion engineering conference (IECEC)*. San Diego, CA, June 26–29, 2006. New York, AIAA, 2006, paper No. AIAA–2006–59986.
- [40] Johnson P. K. A Method for Calculating Viscosity and Thermal Conductivity of a Helium–Xenon Gas Mixture. *Report No. NASA CR-2006-214394*, 2006. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20060056311.pdf> (accessed February 5, 2018).
- [41] Coombs M.G., Morse C.J., Richard C.E. Topical report (Phase I) “Conceptual design study of nuclear Brayton cycle heat exchanger and duct assembly (HXDA)”. *Report No. NASA CR-72783 (AIRResearch 70-6691)*, 1970. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19710006163.pdf> (accessed February 5, 2018).
- [42] Brian A., Sam A., Shawn B., et al. “Megawatt solar power systems for lunar surface operations” (Final report). *Report: Space Systems Design, AA420/421 (NASA/USRA University Advanced Design Program)*, 1990. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19910008844> (accessed February 5, 2018).
- [43] Vagraftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkostei* [Reference Book of thermophysical properties of gases and fluids]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 720 p.
- [44] Tournier J.P., Mohamed S.E. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton Cycle application. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 469–492.
- [45] Schneider W., Duffie J. Compressibility of gases at high temperature – II: the second virial coefficient of helium in the temperature range 0 °C to 600 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1949, vol. 17, no. 9, pp. 751–754.

- [46] Yntema J., Schneider W. Compressibility of gases at high temperature – III: The second virial coefficient of helium in the temperature range 600 °C to 1200 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1950, vol. 18, no. 5, pp. 641–646.
- [47] Brewer J., Vaughn G. Measurement and correlation of some interaction second virial coefficients from –125 °C to 50 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1969, vol. 50, no. 7, pp. 2960–2968.
- [48] Blancett A., Hall K., Canfield F. Isotherms for the He–Ar System at 50 °C, 0 °C and –50 °C up to 700 Atmospheres. *Physica*, 1970, no. 47, pp. 75–91.
- [49] Levelt Sengers J.M.H., Klein M., Gallagher J. *Pressure – volume temperature relationships of gases — virial coefficients*. 3rd ed., American institute of physics handbook. New York, American Institute of Physics, 1972, 2364 p.
- [50] Dillard D., Waxman M., Robinson R. Volumetric data and virial coefficients for helium, krypton, and helium–krypton mixtures. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1978, vol. 23, no. 4, pp. 269–274.
- [51] Elias E., Hoang N., Sommer J., Schramm B. Die zweiten Virialkoeffizienten von Helium–Gasmischungen im Bereich unterhalb Zimmertemperatur. *Ber Bunsenges Phys Chem.*, 1986, Bd. 90, no. 4, S. 342–351.
- [52] Nicholson G., Schneider W. Compressibility of gases at high temperature–IX: second virial coefficients and the intermolecular potential of neon. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1955, no. 33, pp. 589–596.
- [53] Schmiedel H., Gehrman R., Schramm B. Die zweiten Virialkoeffizienten verschiedener Gasmischungen im Temperaturbereich von 213 bis 475 K. *Ber Bunsenges Phys Chem.*, 1980, no. 84, S. 721–724.
- [54] Dymond J.H., Smith E.B. *The virial coefficients of pure gases and mixtures — a critical compilation*. Oxford, England, Clarendon Press, 1980, 518 p.
- [55] Sevast'yanov R. M., Cheryavskaya R.A. Virial coefficients of neon, argon, and krypton at temperatures up to 3000 K. *Journal of Engineering Physic*, 1987, no. 52, pp. 703–705.
- [56] Whalley E., Lupien Y., Schneider W. The compressibility of gases – VII: argon in the temperature range 0–600 °C and the Pressure Range 10–80 Atmospheres. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1953, no. 31, pp. 727–733.
- [57] Rentschler H., Schramm B. Eine Apparatur zur Messung von zweiten Virialkoeffizienten bei hohen Temperaturen. *Ber Bunsenges Phys. Chem.*, 1977, Bd. 81, no. 3, S. 319–321.
- [58] Stewart R., Jacobsen R. Thermodynamic properties of argon from the triple point to 1200 K with pressure to 1000 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1989, vol. 18, no. 2, pp. 639–752.
- [59] Gilgen R., Kleinrahm R., Wagner W. Measurement and correlation of the (pressure, density, temperature) relation of argon – I: the homogeneous gas and liquid regions in the temperature range from 90 K to 340 K at pressures up to 12 MPa. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 1994, no. 26, pp. 383–398.
- [60] Tegeler C., Span R., Wagner W. New equation of state for argon covering the fluid region for temperatures from the melting point line to 700 K at pressure up to 1000 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1999, vol. 28, no. 3, pp. 779–850.
- [61] Beattie J., Barriault R., Brierley J. Compressibility of gaseous xenon–II: the virial coefficient and potential parameter of xenon. *Journal of Chemical Physics*, 1951, vol. 19, no. 10, pp. 1222–1226.
- [62] Whalley E., Lupien Y., Schneider W. The compressibility of gases at high temperature – X: xenon in the temperature range 0–700 °C and the pressure

- range 8–50 atmospheres. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1955, no. 33, pp. 633–636.
- [63] Kalfoglou N., Miller J. Compressibility of gases. *Journal of Chemical Physics*, 1967, vol. 71, no. 5, pp. 1256–1264.
- [64] Kestin J., Knierim K., Mason E., Njafi S., Ro S., Waldman M. Equilibrium and transport properties of the noble gases and their mixtures at low density. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1984, vol. 13, no. 1, pp. 229–303.
- [65] *NIST Chemistry WebBook. National Institute of Standards and Technology.* Available at: <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (accessed February 5, 2018).
- [66] Dawe R., Smith E. Viscosity of inert gases at high temperatures. *Journal of Chemical Physics*, 1970, vol. 52, no. 2, pp. 693–703.
- [67] Maitland G., Smith E.B. Critical reassessment of viscosities of 11 common gases. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1972, vol. 17, no. 2, pp. 150–156.
- [68] Kestin J., Ro S., Wakeham W. Viscosity of noble gases in the temperature range 25–700 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1972, vol. 56, no. 8, pp. 4119–4124.
- [69] Touloukian Y., Saxena S., Hestermans P. *Thermophysical properties of matter. Vol. 11: Viscosity.* New York, Washington: IFI/Plenum, 1975, 802 p.
- [70] Kestin J., Khalifa H., Wakeham W. The viscosity and diffusion coefficients of the binary mixtures of xenon with the other noble gases. *Physica*, 1978, no. 90A, pp. 215–228.
- [71] Bich E., Millat J., Vogel E. The viscosity and thermal conductivity of pure monoatomic gases from their normal boiling point up to 500 K in the limit of zero density and at 0.101325 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1990, vol. 19, no. 6, pp. 1289–1305.
- [72] Younglove B., Hanley H. The viscosity and thermal conductivity coefficients of gaseous and liquid argon. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1986, vol. 15, no. 4, pp. 1323–1337.
- [73] Kestin J., Nagashima A. Viscosity of neon–helium and neon–argon mixtures at 20 °C and 30 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1964, vol. 40, no. 12, pp. 3648–3654.
- [74] Iwasaki H., Kestin J. The viscosity of argon–helium mixtures. *Physica*, 1963, no. 29, pp. 1345–1372.
- [75] Kestin J., Kobayashi Y., Wood T. The viscosity of four binary gaseous mixtures at 20 °C and 30 °C. *Physica*, 1966, no. 32, pp. 1065–1089.
- [76] Kestin J., Leidenfrost W. An absolute determination of the viscosity of eleven gases over a range of pressures. *Physica*, 1959, no. 25, pp. 1033–1062.
- [77] Kestin J., Whitelaw J. A relative determination of the viscosity of several gases by the oscillating disk method. *Physica*, 1963, no. 29, pp. 335–356.
- [78] Flynn G.P., Hanks R.V., Lemaire N.A., Ross J. Viscosity of nitrogen, helium, neon and argon from 78.5 °C to 100 °C below 200 atmospheres. *Journal of Chemical Physics*, 1963, vol. 38, no. 1, pp. 154–162.
- [79] Reynes E., Thodos G. Viscosity of helium, neon, and nitrogen in the dense gaseous region. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1966, vol. 11, no. 2, pp. 137–140.
- [80] Kao J., Kobayashi R. Viscosity of helium and nitrogen and their mixtures at low temperature and elevated pressures. *Journal of Chemical Physics*, 1967, vol. 47, no. 8, pp. 2836–2849.
- [81] Trappeniers N., Botzen H., Van Der Berg H., Van Oosten J. The viscosity of neon between 25 °C and 75 °C at pressures up to 1800 atmospheres —

- corresponding states for the viscosity of the noble gases up to high density. *Physica*, 1964, no. 30, pp. 985–996.
- [82] Kestin J., Korfali O., Sengers J., Kamgar-Parsi B. Density dependence and composition dependence of the viscosity of neon–helium and neon–argon mixtures. *Physica*, 1981, no. 106A, pp. 416–422.
- [83] Rabinovich V.A., Vasserman A.A., Nedostup V.I., Veksler L.S. *Teplofizicheskie svoistva neona, argona, kriptona i ksenona* [Thermophysical properties of Neon, Argon, Krypton and Xenon]. Rabinovich V.A., ed. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1976, 636 p.
- [84] Michels A., Botzen H., Schuurman W. The viscosity of argon at pressures up to 2000 atmospheres. *Physica*, 1954, no. 20, pp. 1141–1148.
- [85] Reynes E., Thodos G. The viscosity of argon, krypton, and xenon in the dense gaseous region. *Physica*, 1964, no. 30, pp. 1529–1542.
- [86] Thornton E. Viscosity of binary mixtures of rare gases. *Progress in international research on thermodynamic and transport properties*. Masi J., Tsai D., eds. Princeton University, Princeton NJ, January 24–26, 1962. New York, The American Society of Mechanical Engineers, Academic Press, 1962. 772 p.
- [87] Brokaw R. Viscosity of gas mixtures. *NASA Technical Note D-4496*. Washington DC: NASA, 1968, 28 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19680012255.pdf> (accessed February 5, 2018).
- [88] Rietveld A.O., van Itterbeek A., van den Berg G.J. Measurements of the viscosity of mixtures of helium and argon. *Physica*, 1953, no. 19, pp. 517.
- [89] Kelelkar A., Kestin J. Viscosity of He–Ar and He–Kr binary gaseous mixtures in the temperature range 25–720 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1970, vol. 52, no. 8, pp. 4248–4261.
- [90] Maitland G., Smith E.B. Viscosities of binary gas mixtures at high temperatures. *Journal of Chemical Society, Faraday Transaction. Part I*, 1974, no. 70, pp. 1191–1211.
- [91] Gough D.W., Matthews G.P., Smith E.B. Viscosity of nitrogen and certain gaseous mixtures at low temperatures. *Journal of Chemical Society, Faraday Transaction. Part I*, 1976, no. 72, pp. 645–653.
- [92] Thornton E. Viscosity and thermal conductivity of binary gas mixtures: krypton–argon, krypton–neon and krypton–helium. *Proceedings of Physical of the Society of London*, 1961, no. 77, pp. 1166–1169.
- [93] Thornton E. Viscosity and thermal conductivity of binary gas mixtures: xenon–krypton, xenon–argon, xenon–neon and xenon–helium. *Proceedings of Physical of the Society of London*, 1960, no. 76, pp. 104–112.
- [94] Kestin J., Wakeham W., Watanabe K. Viscosity, thermal conductivity, and diffusion coefficient of Ar–Ne and Ar–Kr gaseous mixtures in the temperature range 25–700 °C. *Journal of Chemical Physics*, 1970, vol. 53, no. 10, pp. 3773–3780.
- [95] Vagraftik N.B. Filipov L.P., Terzimanov A.L., Tonkii E.E. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti*. [Reference Book of thermophysical properties gases and fluids]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 352 p.
- [96] Touloukian Y., Liley P., Saxena S. *Thermophysical properties of matter. Vol. 3: Thermal Conductivity — Nonmetallic Liquids and Gases*. New York/Washington, IFI/Plenum, 1970, 708 p.
- [97] Kestin J., Clifford A., Wakeham W. Absolute determination of the thermal conductivity of noble gases at room temperature up to 35 MPa. *Physica*, 1980, no. 100A, pp. 349–369.

- [98] Sengers J., Bolk W., Stigter C. The thermal conductivity of neon between 25 °C and 75 °C at pressure up to 2600 atmospheres. *Physica*, 1964, no. 30, pp. 1018–1026.
- [99] Michels A., Sengers J., Van De Klundert J. The thermal conductivity of argon at elevated densities. *Physica*, 1963, no. 29, pp. 149–160.
- [100] Rosenbaum B., Oshen O., Thodos G. Thermal conductivity of argon in the dense gaseous and liquid regions. *Journal of Chemical Physics*, 1966, vol. 44, no. 8, pp. 2831–2838.
- [101] Bailey B., Kellner K. The thermal conductivity of gaseous and liquid argon. *Physica*, 1968, no. 39, pp. 444–462.
- [102] Mason E., Von Ubisch H. Thermal conductivities of rare gas mixtures. *The Physics of Fluids*, 1960, vol. 3, no. 1, pp. 355–361.
- [103] Gandhi J., Saxena S. Correlated thermal conductivity data of rare gases and their mixtures at ordinary pressure. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1968, vol. 13, no. 3, pp. 357–361.
- [104] Van Dael W., Cauwenbergh H. Measurements of the thermal conductivity of gases. *Physica*, 1968, no. 40, pp. 173–181.
- [105] Gambhir R., Saxena S. Thermal conductivity of binary and ternary mixtures of krypton, argon and helium. *Molecular Physics*, 1966, vol. 11, no. 3, pp. 233–241.
- [106] Mastovsky J. High temperature conduction of helium–xenon mixtures. *Journal of Engineering Physics*, 1978, vol. 33, no. 4, pp. 1170–1175.
- [107] Hashimoto K., Matsunaga N., Nagashima A., Mito K. Determination of the thermal conductivity of xenon–helium mixtures at high temperature by the shock-tube method. *International Journal of Thermophysics*, 1992, vol. 13, no. 2, pp. 211–221.
- [108] Mathur S., Tondon P. K., Saxena S. C. Thermal conductivity of binary, ternary and quaternary mixtures of rare gases. *Molecular Physics*, 1967, no. 12, pp. 569–579.
- [109] Shashkov A.G., Yaroshenko T.I., Nesterov N.A., Afshar R. Thermal Conductivity of Helium–Xenon, Argon–Xenon and Krypton–Xenon at Low Temperatures (170–273 K). *Thermal Conductivity 16*, 1983, pp. 549–563.
- [110] Clifford A., Fleeter R., Kestin J., Wakeham W. Thermal conductivity of some mixtures of monoatomic gases at room temperature and at pressures up to 15 MPa. *Physica*, 1979, no. 98A, pp. 467–490.
- [111] Krutov V.I., Isaev S.I., Kozhinov I.A. et al. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Engineering Thermodynamics]. Krutov V.I., ed. Moscow, Vishaya shkola Publ., 1991, 384 p.
- [112] *Sluzhba standartnih spravocnih dannih o fizicheskikh konstntah i svoistvah veschestv I materialov v oblasti ispolzovaniya atomnoi energii Goskorporatsii po atomnoi energii. Teplofizicheskie svoistva gazov i ih smesei, ispolzuemih v YAEU* [Service of standard reference data of physical constants and properties of matters and materials in the field of using nuclear energy of Federal Nuclear Energy Corporation. Thermophysical properties of gases and mixtures in NEP]. Available at: <http://gsssd-rosatom.mephi.ru/DB-tp-02/index-tp-02.php> (accessed February 5, 2018).
- [113] Hirschfelder J.O., Curtiss C.F., Bird R.B. *Molecular theory of gases and liquids*. New York, John Wiley & Sons Inc., London, Chapman and Hall, 1954, 1219 p.
- [114] Bahmutov D.M., Komolov B.H. *Molodyezhni' nauchno-technicheskii vestnik: nauchnoe izdanie BMSTU — Youth Scientific and Technical Herald of Bauman MSTU*, 2016, no. 3. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/837344.html> (accessed February 5, 2018).

- [115] Burtsev S.A., Kochurov D.S., Schegolev S.A. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education, Bauman MSTU*, 2014, no. 5. Available at: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/612> (accessed February 5, 2018).
- [116] Burtsev S.A., Kochurov D.S., Schegolev S.A. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education, Bauman MSTU*, 2015, no. 11, pp. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/822897.html> (accessed February 5, 2018).
- [117] Dragunov Y.G., Smetannikov V.P., Gabaraev B.A., Orlov A.N., Belyakov M.S., Derbenev D.S. On calculation of the transport coefficients and thermodynamic properties of a helium–xenon gas mixture. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 21–29.
- [118] Dragunov Yu.G., Smetannikov V.P., Gabaraev B.A., Belyakov M.S., Kobzev P.V. On the choice of correlations for calculating the heat transfer coefficient in binary gas mixtures. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 30–42.
- [119] Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Effect of Net Structures on Wall-Free Non-Stationary Air Heat Vortices. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 64, pp. 817–828.
- [120] Dermer P.B., Varaksin A.Y., Leontiev A.I. The wall-free non-stationary fire whirls generation by axisymmetric burning of solid fuel pellets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 110, pp. 890–897.
- [121] Kuzenov V.V. and Ryzhkov, S.V. Approximate method for calculating convective heat flux on the surface of bodies of simple geometric shapes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 815, pp. 1–8.
- [122] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. Numerical simulation of the coaxial magneto-plasma accelerator and non-axisymmetric radio frequency discharge. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 830, pp. 1–6.
- [123] Kompaneetsc V.Ya. *Experimentalnoe opredelenie vyazkosti gazov i gazovih smesei pri vysokih temperaturah. Sbornik nauchnih trudov Leningradskogo institute mehanizatscii selskogo hozyaistva* [Experimental viscosity determination of gases and gases mixtures on high temperatures. Proceedings of science articles of Leningrad agricultural mechanization Institute]. Vol. 9. Moscow—Leningrad, Izdatelstvo selskokhozyaistvennoy literatury Publ., 1953, pp. 113–126.
- [124] Aziz R., McCourt F., Wong C. A New Determination of the Ground State Interatomic Potential for He–I. *Molecular Physics*, 1987, vol. 61, pp. 1487–1511.
- [125] Michels A. et al. Compressibility Isotherms of Hydrogen and Deuterium at Temperatures between –175 and +150 °C. *Physica*, 1959, vol. 25, pp. 1097–1124.
- [126] Trusov B.G. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovations*, 2012, iss. 1 (1). DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-31
- [127] Trusov B.G. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Herald*, 2012, no. 8. Available at: <http://engsi.ru/doc/483186.html> (accessed February 5, 2018).

Egorov K.S., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Heat Physics Department, Bauman Moscow State Technical University. The Author of 16 publications in the field of heat transfer and close gas turbines heat exchangers. e-mail: blackbird05@mail.ru

Stepanova L.V., Cand. Sc. (Biology), Associate Professor of Bauman Moscow State Technical University. The Author of 14 publications in the field of ecology, energetics and biology. e-mail: oystercatcher@mail.ru