

УДК 533.2

Исследование влияния состава бинарных смесей инертных газов на их теплофизические свойства

Бурцев С. А.^{1,2,*}, Кочуров Д. С.^{1,2},
Щеголев Н. Л.¹

*burtsev@bmstu.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Рассмотрены особенности применения бинарных смесей инертных газов в устройстве газодинамической температурной стратификации, называемом трубой Леонтьева, а также в замкнутых газотурбинных установках космического и наземного базирования. Приведены результаты расчетов значений коэффициента динамической вязкости и коэффициента теплопроводности для бинарных смесей He-Ar, He-Kr, He-Xe в зависимости от молекулярной массы смеси для давлений 2 МПа и 7 МПа и температур 400 К и 1200 К. Выполнена верификация результатов расчета по справочным данным и расчетным данным сторонних авторов. Показано, что при расчете значений коэффициента теплопроводности при всех рассматриваемых температурах и давлениях используемая методика дает хорошие результаты для смесей He-Ar и He-Kr на всем интервале молекулярных масс смесей, практически не отличающиеся от верифицированных западных методик. При расчете коэффициента вязкости аналогичные результаты наблюдаются для He-Ar смеси, а также для смесей He-Kr и He-Xe с молекулярными массами до 40 г/моль.

Ключевые слова: инертные газы, газодинамическое энергоразделение, число Прандтля, труба Леонтьева, замкнутые газотурбинные установки, коэффициент восстановления температуры, газовые смеси, бинарные смеси, теплофизические свойства

Введение

Смеси газов с малым значением числа Прандтля рассматриваются в качестве перспективных рабочих тел для замкнутых газотурбинных установок [1, 2], термоакустических устройств [3, 4] и устройства газодинамической температурной стратификации в сверхзвуковом потоке газа, получившего наименование трубы Леонтьева [5, 6].

Замкнутые газотурбинные установки (ЗГТУ) являются эффективными, компактными и универсальными энергетическими машинами, рекомендуемыми к применению в космических летательных аппаратах, а также на электростанциях наземного базирования [7].

При этом для ЗГТУ выбор схемного решения [8, 9] и рабочего тела [10, 11] является одной из наиболее сложных задач при их проектировании. Использование бинарных смесей инертных газов с низким значением числа Прандтля [12] позволяет получить достаточно эффективные турбомшины [13, 14] и в 1,5-2 раза более компактные теплообменные поверхности [15]. При этом они могут быть рассчитаны на выработку как десятков киловатт [10, 16], так и в случае многовальных машин (чаще поверхностного базирования) – более 100 - 150 МВт [17].

Исследования, проведенные для трубы Леонтьева [18, 19], показали, что ее эффективность определяется коэффициентом восстановления температуры [20], который сильно зависит от режима течения [21, 22], значения числа Прандтля [23, 24], рельефа поверхности [25, 26] и т.д.

Данная работа посвящена исследованию влияния состава бинарных смесей инертных газов на теплофизические и транспортные свойства этих смесей по методике, аналогичной представленной в работе [27], и верификации их по известным данным экспериментальных и численных исследований.

1. Анализ областей целесообразного использования бинарных смесей инертных газов

На данный момент основным способом повышения эффективности устройства газодинамической стратификации является применение рабочих тел с низкими значениями числа Прандтля [12]. В работах [12, 28] приведен краткий обзор известных на сегодняшний день газовых смесей инертных и неинертных газов, которые при определенном соотношении их компонентов обладают минимальным значением числа Прандтля, лежащем в пределах от 0,1 до 0,6. Согласно данным разных работ [14, 26, 27, 29, 30] минимальным значением числа Прандтля, равным 0,21-0,22, из бинарных смесей инертных газов обладает смесь гелия с ксеноном He-Xe с молекулярной массой в интервале 40-50 г/моль. В то же время, характерным минимумом значения числа Прандтля в зависимости от соотношения компонентов обладают все бинарные смеси инертных газов [27, 29].

Инертные (благородные) газы, являясь химически инертными, представляются перспективными рабочими телами для замкнутых энергоустановок. Их применение позволяет избежать проблем с загрязнением проточных частей установки и коррозией ее элементов [30]. Так, гелий (He) обладает очень хорошими термодинамическими и транспортными характеристиками, но, имея маленькую молекулярную массу, он значительно повышает аэродинамическую нагрузку на лопатки турбомашин, что заставляет увеличивать их габариты и массу для обеспечения прочности, либо увеличивать число ступеней при использовании машины с осевым током рабочего тела. Гелий (He), будучи кроме всего прочего одним из самых дешевых инертных рабочих тел, широко применяется в установках поверхностного базирования, где ограничение по массе и компоновке отсутствует, но имеется строгое ограничение по стоимости эксплуатации (требование к высокому КПД) и требование к большим вырабатываемым мощностям [29].

Инертные газы с более высокой молекулярной массой, такие как неон (Ne), аргон (Ar), криптон (Kr) и ксенон (Xe), обладают заметно худшими теплофизическими и транспортными характеристиками, но при их использовании в качестве рабочих тел аэродинамическая нагрузка значительно снижается, что позволяет снизить массу и размеры установки, а также число ступеней при применении осевой машины [30].

При использовании смеси Ne с более тяжелым инертным газом, таким как Kr или Xe, свойства полученной бинарной смеси, как правило, сильно превосходят свойства отдельно взятых компонентов с той же молекулярной массой [11]. Установлено, что бинарные смеси Ne с Kr или Xe с молекулярной массой порядка 22 и 40 соответственно имеют несколько большие коэффициенты теплоотдачи и значительно снижают массу и габариты турбомшины, а также площади поверхностей теплообмена [11, 14]. На основании изучения термодинамического цикла показано [31, 32], что можно достичь значительных снижений затрат при использовании замкнутого газотурбинного цикла за счет применения в качестве рабочего тела смеси более тяжелого инертного газа с гелием.

2. Корректировка методики исследования

В работе [27] представлена подробная методика расчета теплофизических и транспортных свойств смесей газов полуэмпирическим методом в программе Tetra. Там же проведена верификация результатов расчета по этой методике для значений числа Прандтля смесей инертных (Ne-Xe, Ne-Kr, Ne-Ar, Ne-Ne, Ne-Ar, Ne-Kr, Ne-Xe, Ar-Kr, Ar-Xe, Kr-Xe) и неинертных (Ne-CH₄, Ne-N₂, Ne-Воздух, Ne-O₂, Ne-CO₂) газов в широком диапазоне давлений и температур по имеющимся экспериментальным, расчетным и справочным данным.

Выполненное сравнение результатов расчетов показало, что при давлении 0,1 МПа и любых температурах используемая в программе методика дает результаты для всех рассмотренных смесей инертных и неинертных газов любых молекулярных масс, практически полностью совпадающие с лучшими экспериментально верифицированными западными методиками. Аналогичные по качеству результаты были получены при расчетах числа Прандтля для рассмотренных бинарных смесей инертных газов и при давлениях, превышающих 0,1 МПа (до 7 МПа) и высоких температурах (1200 К) при любых молекулярных массах смесей и подтверждены, например данными работы [33]. Значительное расхождение данных верификации и расчетных данных Tetra для бинарных смесей инертных газов начиналось только при давлениях свыше 2 МПа, низких температурах (400 К) и молекулярных массах смесей, превышающих 40 г/моль (молекулярная масса Xe). При этом при молекулярных массах, меньших 40 г/моль, при любых температурах и давлениях совпадение результатов с данными верификации хорошее.

Для выявления причин описанного расхождения следует провести аналогичные исследования для составляющих числа Прандтля: удельной изобарной теплоемкости C_p , коэффициента теплопроводности λ и коэффициента динамической вязкости μ .

Наибольший интерес представляют транспортные параметры λ и μ , так как помимо того, что их значения необходимы для расчета числа Прандтля, они в значительной степени определяют потери давления и коэффициенты теплоотдачи в любом устройстве, работа которого связана с процессами теплообмена [14, 34].

Расчет значений λ и μ наиболее трудоемок, так как даже при расчете первого приближения их значений методом Гиршфельдера, основанном на подходе Чепмена-Энскога для разреженных одноатомных газов, требуется знание обеих силовых постоянных межмолекулярного потенциала Леннарда-Джонса для каждого компонента смеси с дальнейшим вычислением этих постоянных для самой смеси по эмпирическим выражениям, подсчетом приведенных температур и нахождением интеграла столкновений, предварительным расчетом транспортных параметров чистых компонентов и “чистой” смеси и, наконец, подстановкой всего найденного в выражение интересующего параметра смеси [34, 35, 36].

При этом, если при расчете значений коэффициента динамической вязкости смеси методом Гиршфельдера достаточно для получения точных результатов включить в решение уравнения Больцмана с использованием полиномиального разложения Сонина только члены первого порядка (благодаря быстрой сходимости полинома Сонина), то при расчете значений коэффициента теплопроводности смесей этим же методом требуется введение эмпирического поправочного коэффициента третьего порядка Сингха, так как значения коэффициента теплопроводности более чувствительны к разности размеров молекул компонентов смеси, разнице в их молекулярных массах, а также к зависимости особенностей взаимодействия молекул от температуры и концентрации компонентов [34, 35].

Расчет значений удельной теплоемкости C_p (например, массовой) для смеси часто ведется по простому соотношению аддитивности [33]

$$C_{p_{см}} = \sum_i g_i \cdot C_{p_i},$$

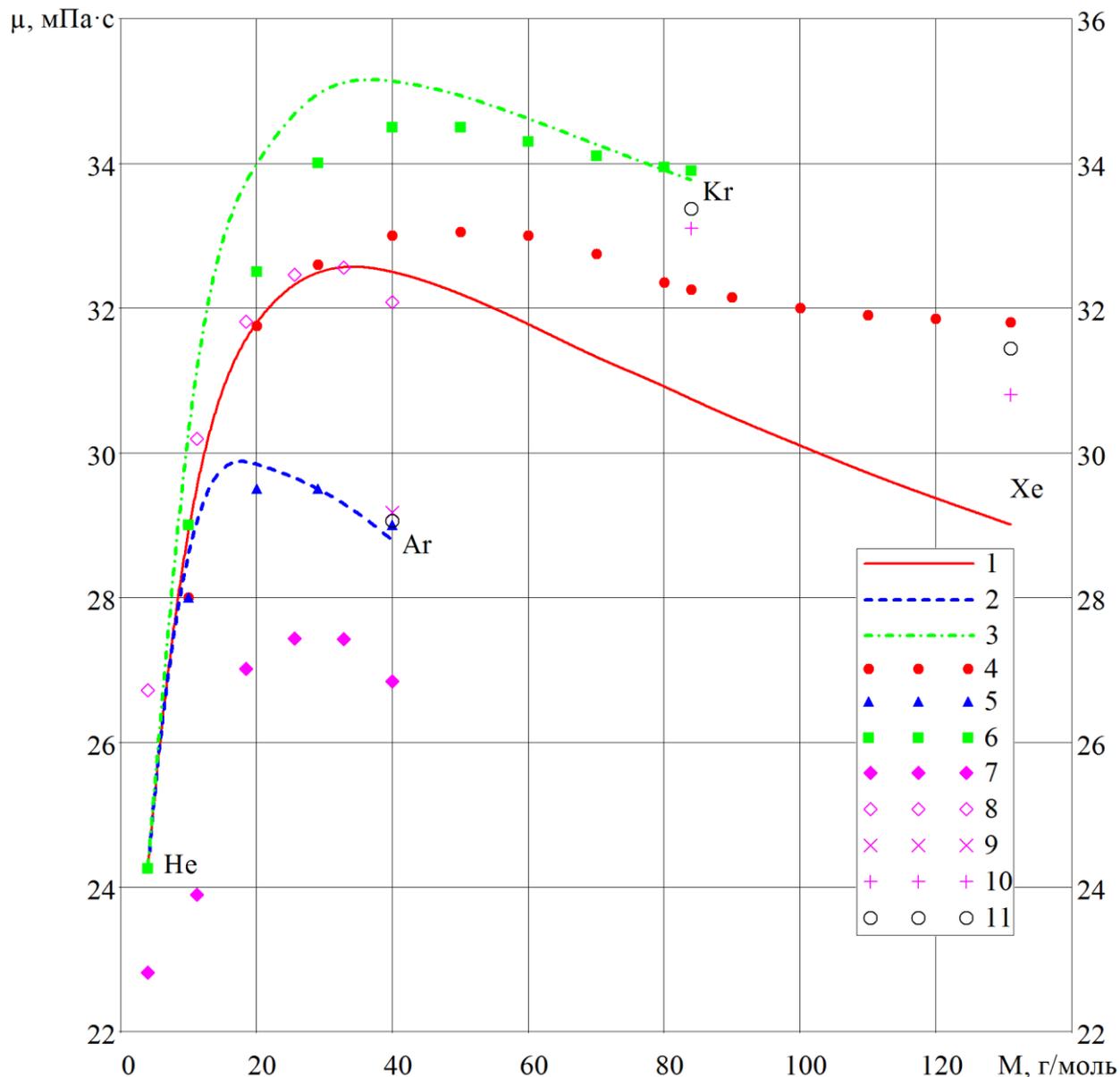
где g_i – массовая доля i -ого компонента смеси, C_{p_i} – массовая удельная теплоемкость i -ого компонента смеси. Причем удельная теплоемкость для компонента смеси может быть получена с использованием фундаментальных термодинамических соотношений [29], трудности использования которых могут состоять только в нахождении второго и третьего вириальных коэффициентов для каждого компонента смеси.

3. Верификация и анализ результатов численных исследований

На рис. 1 – 6 приведены результаты расчета значений коэффициента динамической вязкости μ [мПа·с] и коэффициента теплопроводности λ [$\text{МВт}/\text{м} \cdot \text{К}$] для перспективных бинарных смесей инертных газов (He-Ar, He-Kr и He-Xe) в зависимости от молекулярной массы смеси M [г/моль] для различных температур и давлений. Верификация проведена по справочным данным и результатам расчетов сторонних авторов, использовавших при расчете полуэмпирический метод, основанный на расширенной кинетической теории газов, разработанной специально для плотных газов и смесей, и хорошо

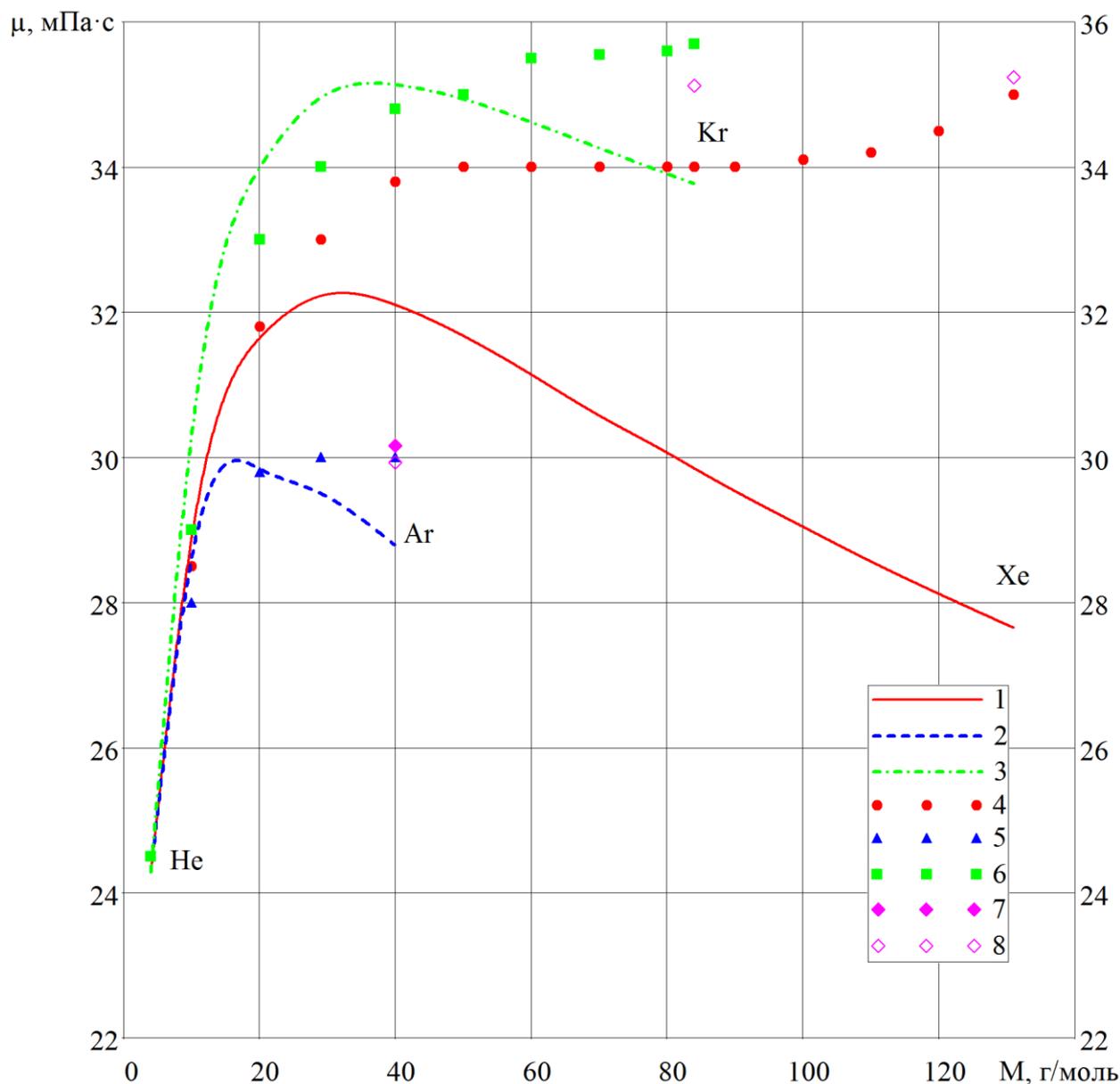
зарекомендовавший себя по точности получаемых результатов в сравнении с данными экспериментов [14, 30].

Расширенная кинетическая теория газов базируется на подходе Чепмена-Энскога для разреженных одноатомных газов и одновременно использует двухпараметрический закон соответственных состояний для учета больших давлений и плотностей газа [11, 29].



1 - 3 – расчет для смесей по методике [27]; 4 - 6 – расчетные данные [30] для смесей при $p = 2$ МПа и $T = 400$ К; 7 – справочные данные [38] для смеси He-Ar при $p = 0,1$ МПа и $t = 100$ °С; 8 – справочные данные [38] для смеси He-Ar при $p = 0,1$ МПа и $t = 200$ °С; 9 – справочные данные [38] для Ar при $p = 2$ МПа и $T = 400$ К; 10 – справочные данные [38] для Kr и Xe при $p = 0,1$ МПа и $T = 400$ К; 11 – справочные данные [39] для Ar, Kr и Xe при $p = 2$ МПа и $T = 400$ К.

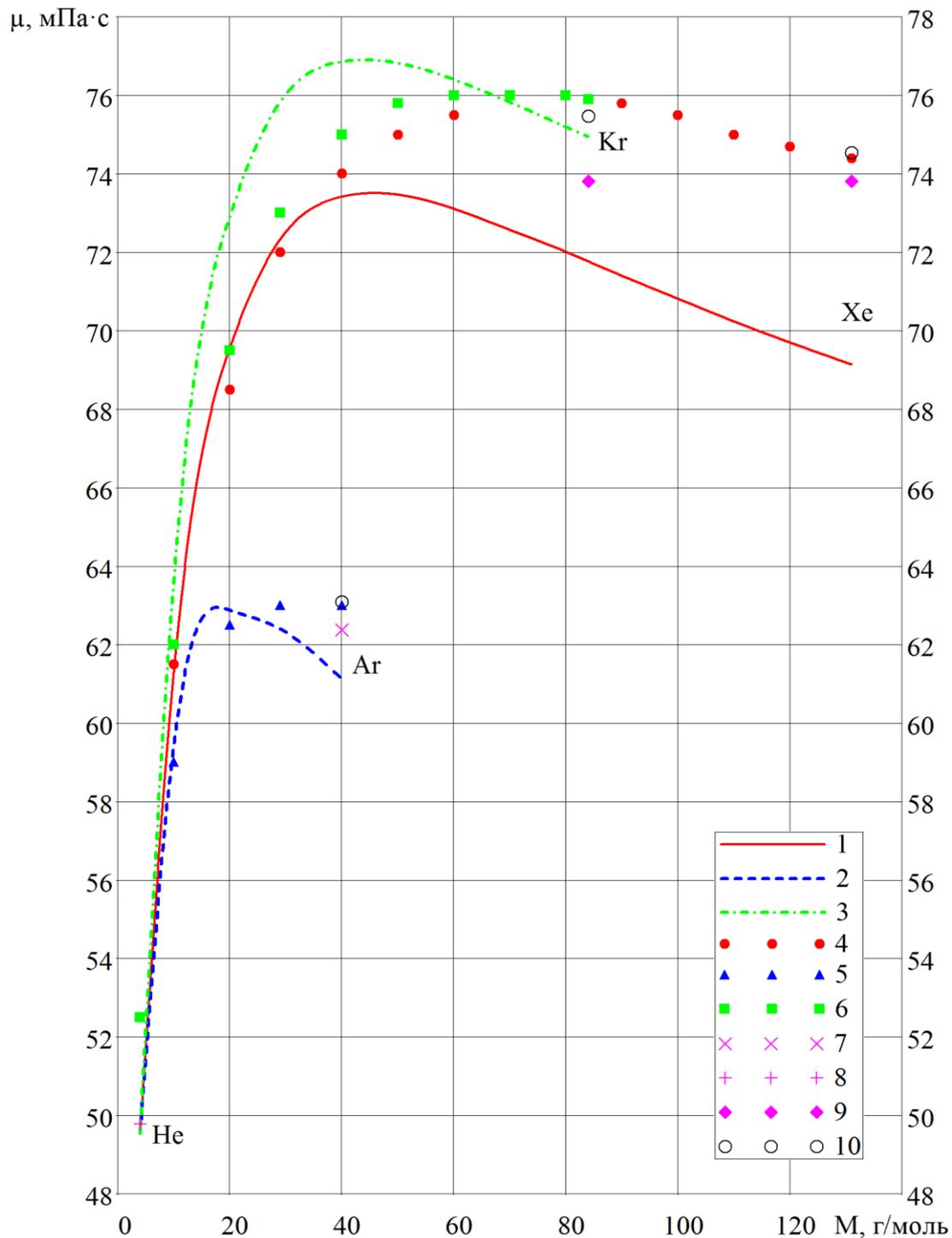
Рис. 1. Зависимость динамической вязкости μ от молекулярной массы смеси M для бинарных смесей инертных газов при давлении $p = 2$ МПа и температуре $T = 400$ К



1 - 3 – расчет для смесей по методике [27]; 4 - 6 – расчетные данные [29] для смесей при $p = 7$ МПа и $T = 400$ К; 7 – справочные данные [38] для Ar при $p = 7$ МПа и $T = 400$ К; 8 – справочные данные [39] для Ar, Kr и Xe при $p = 7$ МПа и $T = 400$ К.

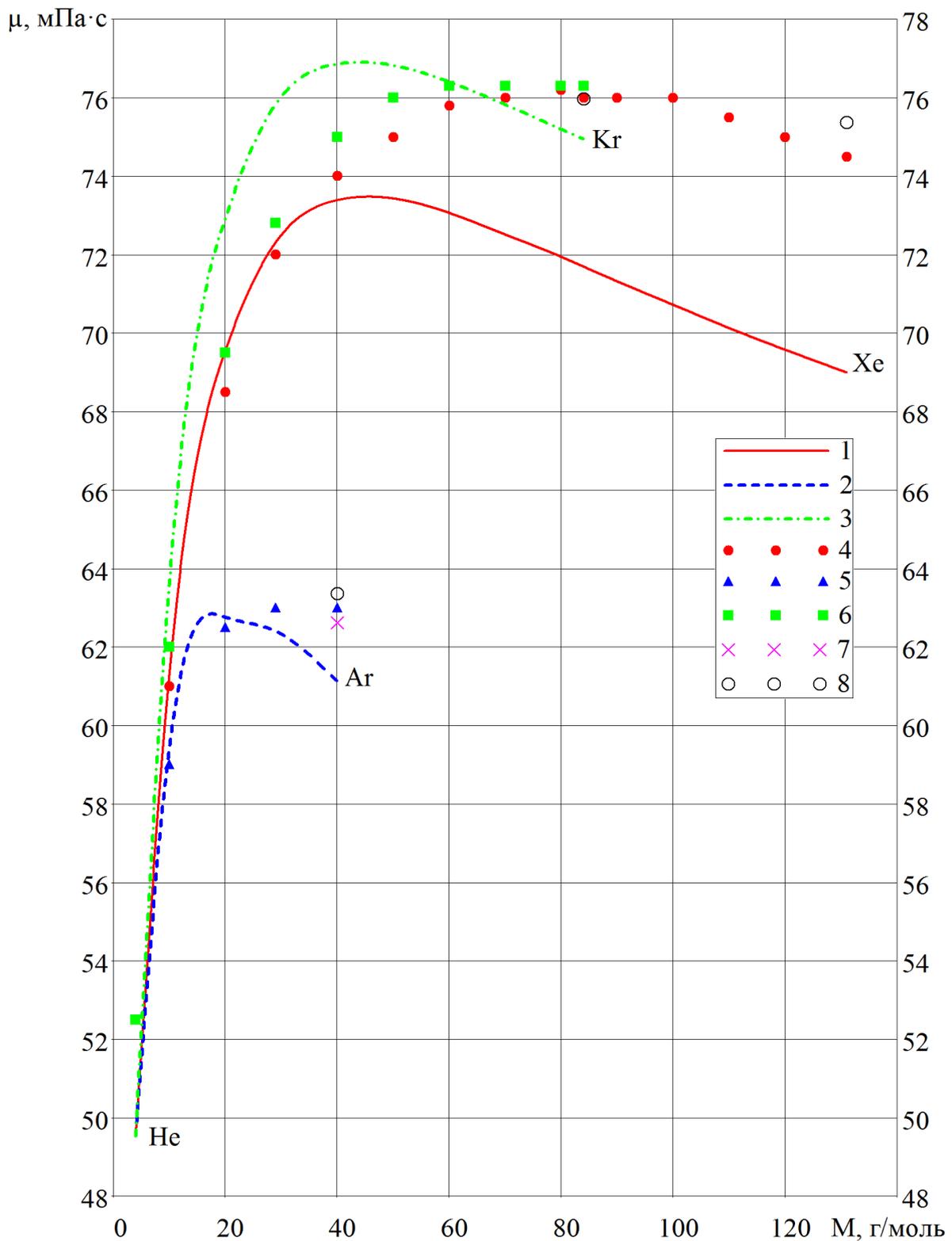
Рис. 2. Зависимость динамической вязкости μ от молекулярной массы смеси M для бинарных смесей инертных газов при давлении $p = 7$ МПа и температуре $T = 400$ К

Из рисунков 1, 2, 3 и 4 видно, что резкий рост коэффициента динамической вязкости μ при увеличении молекулярной массы смесей от значения 4 г/моль до значения 40 г/моль хорошо описывается рассматриваемой методикой для всех давлений и температур и всех рассматриваемых смесей. При этом максимальные расхождения не превышают 6 % (He-Xe смесь с молекулярной массой 40 г/моль) при температуре 400 К и 5 % при температуре 1200 К (He-Kr смесь с молекулярной массой 20 г/моль).



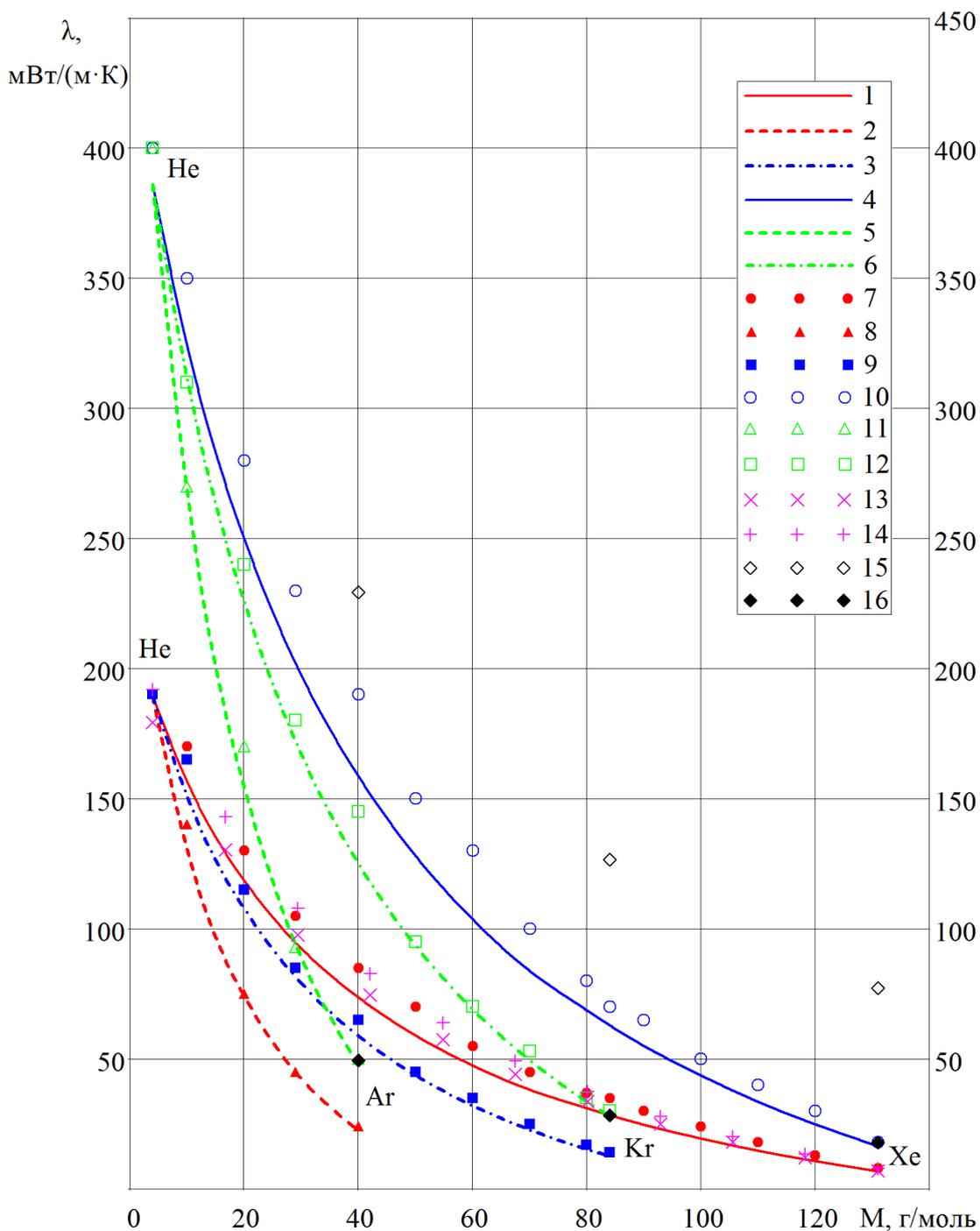
1 - 3 – расчет для смесей по методике [27]; 4 - 6 – расчетные данные [30] для смесей при $p = 2$ МПа и $T = 1200$ К; 7 – справочные данные [38] для Ar при $p = 2$ МПа и $T = 1200$ К; 8 – справочные данные [38] для He при $p = 0,1$ МПа и $T = 1173$ К; 9 – справочные данные [38] для Kr и Xe при $p = 0,1$ МПа и $T = 1200$ К; 10 – справочные данные [39] для Ar, Kr и Xe при $p = 0,1$ МПа и $T = 1200$ К.

Рис. 3. Зависимость динамической вязкости μ от молекулярной массы смеси M для бинарных смесей инертных газов при давлении $p = 2$ МПа и температуре $T = 1200$ К



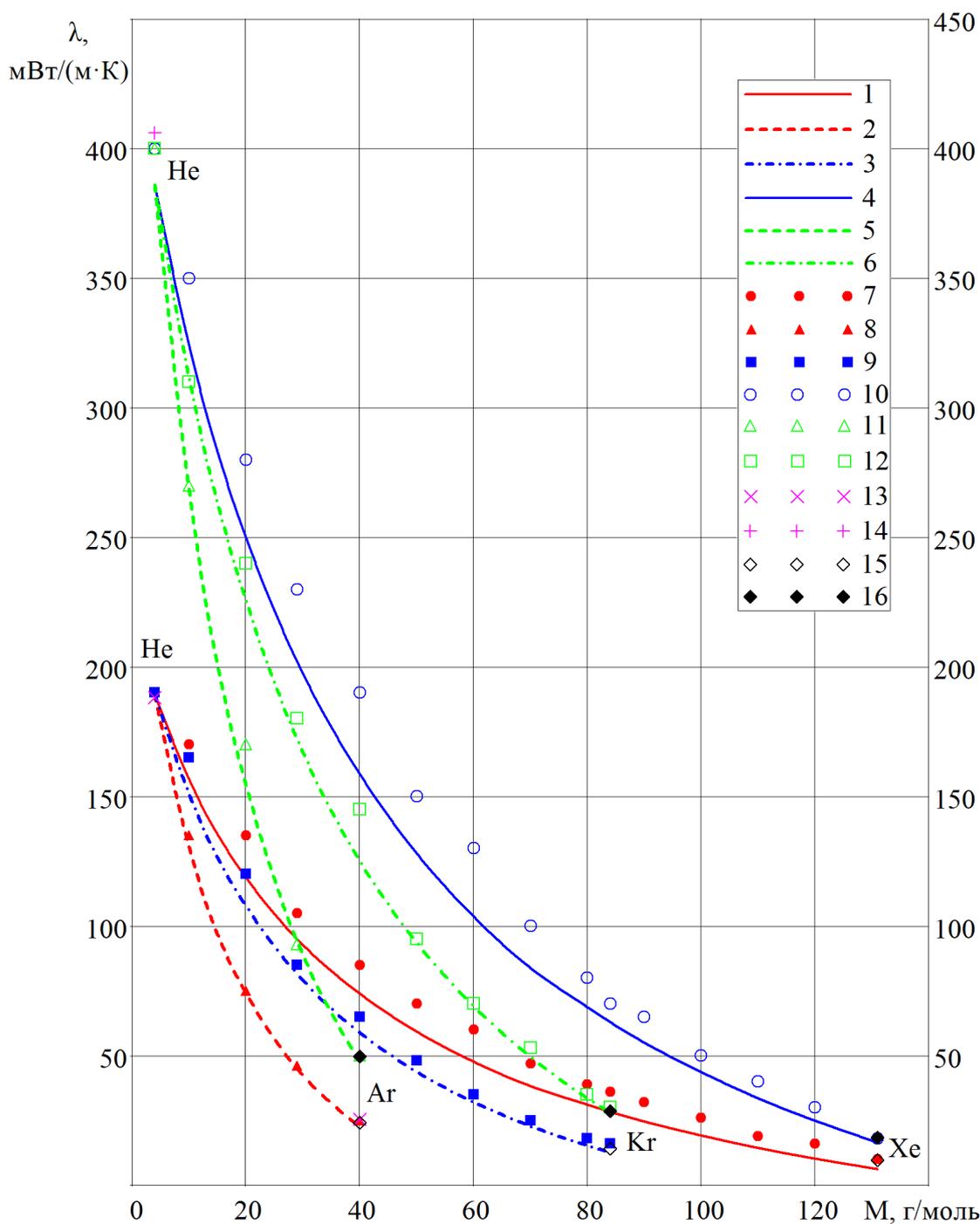
1 - 3 – расчет для смесей по методике [27]; 4 - 6 – расчетные данные [29] для смесей при $p = 7$ МПа и $T = 1200$ К; 7 – справочные данные [38] для Ar при $p = 7$ МПа и $T = 1200$ К; 8 – справочные данные [39] для Ar, Kr и Xe при $p = 7$ МПа и $T = 1200$ К.

Рис. 4. Зависимость динамической вязкости μ от молекулярной массы смеси M для бинарных смесей инертных газов при давлении $p = 7$ МПа и температуре $T = 1200$ К



1 - 3 – расчет для смесей по методике [27] при $T = 400$ К; 4 - 6 – расчет для смесей по методике [27] при $T = 1200$ К; 7 - 9 – расчетные данные [30] для смесей при $p = 2$ МПа и $T = 400$ К; 10 - 12 – расчетные данные [30] для смесей при $p = 2$ МПа и $T = 1200$ К; 13 – справочные данные [38] для смеси He-Xe при $p = 0,1$ МПа и $T = 373$ К; 14 – справочные данные [38] для смеси He-Xe при $p = 0,1$ МПа и $T = 423$ К; 15 – справочные данные [39] для Ar, Kr и Xe при $p = 2$ МПа и $T = 400$ К; 16 – справочные данные [39] для Ar, Kr и Xe при $p = 2$ МПа и $T = 1200$ К.

Рис. 5. Зависимость динамической вязкости μ от молекулярной массы смеси M для бинарных смесей инертных газов при давлении $p = 2$ МПа и температурах $T = 400$ К и $T = 1200$ К



1 - 3 – расчет для смесей по методике [27] при $T = 400 \text{ К}$; 4 - 6 – расчет для по методике [27] при $T = 1200 \text{ К}$; 7 - 9 – расчетные данные [29] для смесей при $p = 7 \text{ МПа}$ и $T = 400 \text{ К}$; 10 - 12 – расчетные данные [29] для смесей при $p = 7 \text{ МПа}$ и $T = 1200 \text{ К}$; 13 – справочные данные [38] для He и Ar при $p = 10 \text{ МПа}$ и $T = 400 \text{ К}$; 14 – справочные данные [38] для He при $p = 10 \text{ МПа}$ и $T = 1200 \text{ К}$; 15 – справочные данные [39] для Ar, Kr и Xe при $p = 7 \text{ МПа}$ и $T = 400 \text{ К}$; 16 – справочные данные [39] для Ar, Kr и Xe при $p = 7 \text{ МПа}$ и $T = 1200 \text{ К}$.

Рис. 6. Зависимость динамической вязкости μ от молекулярной массы смеси M для бинарных смесей инертных газов при давлении $p = 7 \text{ МПа}$ и температурах $T = 400 \text{ К}$ и $T = 1200 \text{ К}$

Значения коэффициента динамической вязкости He-Ar смеси практически не отличаются от данных верификации во всем рассмотренном диапазоне давлений и температур, и лишь при высоком давлении и низкой температуре рассматриваемая методика несколько занижает их (расхождение составляет примерно 3,5 %).

Для остальных смесей инертных газов с увеличением молекулярной массы смеси свыше 40 г/моль начинается заметное занижение результатов расчета по сравнению с данными верификации (особенно для смеси He-Xe). Для He-Kr смеси это занижение ярко не выражено и при давлении 7 МПа и температуре 400 К не превышает 6 %. Однако для He-Xe смеси при этом же давлении и температуре расхождение растет вплоть до значения 25 % для чистого Xe, а при остальных рассмотренных давлениях и температурах не превышает 10 %.

Обобщая выше сказанное, можно сделать следующий вывод. Погрешность в расчетах коэффициента динамической вязкости по методике [27] по сравнению с результатами расчета по расширенной кинетической теории газов [11] растет с увеличением давления, уменьшением температуры, увеличением молекулярной массы смеси и увеличением разности в молекулярных массах компонентов смеси. Этот вывод так не противоречит данным работ [11, 12, 29].

Результаты расчета значений коэффициента теплопроводности по методике [27], приведенные на рисунках 5 и 6, для He-Ar и He-Kr смеси полностью совпадают с данными верификации при всех давлениях и температурах. Исключение составляет локальное расхождение для He-Kr смеси с молекулярной массой 40 г/моль, равное около 15 %, причина которого не известна.

Для He-Xe смеси при всех температурах и давлениях методика [27] несколько занижает результаты расчета коэффициента теплопроводности по сравнению с данными верификации, при этом расхождение минимально у чистых компонентов He и Xe и увеличивается при приближении к середине интервала молекулярных масс смесей. Для чистого Xe результаты расчета полностью совпадают с данными верификации. Для He занижение имеет место только при температуре 1200 К и не превышает 5 %. По мере приближения молекулярной массы к середине интервала расхождение растет до 30 % для 60 г/моль при температуре 1200 К при всех давлениях, а для температуры 400 К – до 20 % для той же молекулярной массы при всех давлениях.

При расчете значения числа Прандтля суммарная погрешность оказывается ниже, т.к. занижение методикой [27] значений коэффициента теплопроводности для He-Xe смеси с увеличением температуры для всех молекулярных масс может скомпенсировать занижение значений коэффициента динамической вязкости, описанное выше. В результате суммарная погрешность расчета значения числа Прандтля в рабочем диапазоне параметров оказывается в пределах 15%.

Заключение

Известно, что рассмотренные бинарные смеси инертных газов (He-Ar, He-Kr и He-Xe) с молекулярными массами, соответствующими малому значению числа Прандтля, являются перспективными рабочими телами для замкнутых газотурбинных установок и устройства температурной стратификации газа (трубы Леонтьева). Использование таких смесей позволяет значительно уменьшить площади теплообменных поверхностей, снизить массу энергетических установок, а также избежать проблем с загрязнением проточных частей аппаратов и установок и коррозией их элементов.

Показано, что рассматриваемая методика практически точно определяет значение теплоемкости для всех вариантов и параметров смеси и значение коэффициента теплопроводности для He-Ar смеси и для He-Kr и He-Xe смесей при молекулярной массе менее 40 г/моль. При увеличении молекулярной массы свыше 40 г/моль для He-Kr и He-Xe смесей происходит занижение значений коэффициента теплопроводности по сравнению с данными верификации. Расхождение возрастает с увеличением давления, уменьшением температуры, увеличением молекулярной массы смеси и увеличением разности в молекулярных массах компонентов смеси и в пределе достигает 25%.

Результаты расчета значений коэффициента теплопроводности для He-Ar и He-Kr смеси практически полностью совпали с данными верификации при всех давлениях и температурах. При росте разницы в молекулярных массах компонентов смеси до смеси He с Xe погрешность расчетов резко возрастает до 30 % при приближении к середине интервала молекулярных масс и повышении температуры до 1200 К. У чистых компонентов He и Xe расхождение минимально.

Занижение расчетных значений коэффициента динамической вязкости объясняет причину занижения значений числа Прандтля при высоких давлениях, низких температурах и больших значениях молекулярной массы смеси (свыше 40 г/моль). Занижение значений коэффициента теплопроводности для He-Xe смеси с увеличением температуры для всех молекулярных масс может частично скомпенсировать занижение значений коэффициента динамической вязкости и суммарная погрешность расчета значения числа Прандтля в рабочем диапазоне параметров оказывается в пределах 15%.

Работа выполнена при поддержке Российского национального фонда. Грант № 14-19-00699.

Список литературы

1. Mason L.S., Shaltens R.K., Dolce J.L., Cataldo R.L. Status of Brayton cycle power conversion development at NASA GRC // Space Technology and Applications International Forum (2002): AIP Conference Proceedings. 2002. Vol. 608. P. 965-971. DOI: [10.1063/1.1449813](https://doi.org/10.1063/1.1449813)
2. Арбеков А.Н., Леонтьев А.И. Развитие космических газотурбинных установок в работах В.Л. Самсонова // Труды МАИ. Электрон. журн. 2011. № 43. Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24713> (дата обращения 07.07.2015).

3. Tijani M.E.H., Zeegers J.C.H., de Waele A.T.A.M. Prandtl number and thermoacoustic refrigerators // The Journal of the Acoustical Society of America. 2002. Vol. 112, no. 1. P. 134-143. DOI: [10.1121/1.1489451](https://doi.org/10.1121/1.1489451)
4. Gaicobbe F.W. Estimation of Prandtl numbers in binary mixtures of helium and other noble gases // The Journal of the Acoustical Society of America. 1994. Vol. 96, no. 6. P. 3568-3580. [10.1121/1.410615](https://doi.org/10.1121/1.410615)
5. Леонтьев А.И. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (труба Леонтьева): пат. 2106581 Российская Федерация. 1998. Бюл. №7. 5 с.
6. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 1. С. 157-159.
7. Bammert K., Rurik J., Griepentrog H. Highlights and future developments of closed-cycle gas turbines // Journal of Engineering for Power. 1974. Vol. 96, no. 4. P. 342-348. DOI: [10.1115/1.3445856](https://doi.org/10.1115/1.3445856)
8. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/359008.html> (дата обращения 07.07.2015).
9. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки параллельной схемы // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4, № 7. С. 326-331.
10. Арбеков А.Н. Выбор рабочего тела для замкнутых газотурбинных установок мощностью от 6 до 12 кВт, работающих на органическом топливе // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 1. С. 131-135. DOI: [10.7868/S0040364414010013](https://doi.org/10.7868/S0040364414010013)
11. Tournier J.-M., El-Genk M.S., Gallo B.M. Best estimates of Binary Gas Mixtures Properties for Closed Brayton Cycle Space Application // 4th International Energy Conversion Engineering Conference (San Diego, California, 26-29 June 2006): AIAA Paper, 2006. P. 4154-4167.
12. Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния доли гелия на значение критерия Прандтля газовых смесей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С. 314-329. DOI: [10.7463/0514.0710811](https://doi.org/10.7463/0514.0710811)
13. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Экспериментальное исследование характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 8. С. 491-504. DOI: [10.7463/0812.0432308](https://doi.org/10.7463/0812.0432308)
14. El-Genk M.S., Tournier J.-M. Selection of noble gas binary mixtures for Brayton space nuclear power systems // 4th international Energy Conversion Engineering Conference (San Diego, California, 26-29 June 2006): AIAA Paper, 2006. P. 4168-4176. DOI: [10.2514/6.2006-4168](https://doi.org/10.2514/6.2006-4168)

15. Арбеков А.Н., Суровцев И.Г., Дермер П.Б. Эффективность теплопередачи в рекуперативных теплообменниках с высокоскоростными газовыми потоками при низких числах Прандтля // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 3. С. 463-468. DOI: [10.7868/S004036441403003X](https://doi.org/10.7868/S004036441403003X)
16. Harty R., Mason L.S. 100-kWe lunar/Mars Surface Power Utilizing the SP-100 Reactor with Dynamic Conversion // Proceedings of the 10th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion: AIP Conference proceedings. 1993. Vol. 271. P. 1065-1071. DOI: [10.1063/1.43087](https://doi.org/10.1063/1.43087)
17. Kilstra J.F., Verkooijen A.H.M. Conceptual Design for the Energy Conversion System of a Nuclear Gas Turbine Cogeneration Plant // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy. 2000. Vol. 214, no. 5. P. 401-411. DOI: [10.1243/0957650001537967](https://doi.org/10.1243/0957650001537967)
18. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа // Известия АН. Энергетика. 2000. № 5. С. 101-113.
19. Бурцев С.А. Исследование путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 1. С. 14-21. DOI: [10.7868/S0040364414010062](https://doi.org/10.7868/S0040364414010062)
20. Бурцев С.А. Методика расчета устройств газодинамической температурной стратификации при течении реального газа // Тепловые процессы в технике. 2013. № 9. С. 386-390.
21. Бурцев С.А. Анализ влияния различных факторов на значение коэффициента восстановления температуры на поверхности тел при обтекании потоком воздуха. Обзор // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2004. № 11. DOI: [10.7463/1104.0551021](https://doi.org/10.7463/1104.0551021)
22. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование температурной стратификации воздушного потока, протекающего через сверхзвуковой канал, с центральным телом в виде пористой проницаемой трубки // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2013. № 5. С. 134-145.
23. Бурцев С.А. Исследование температурного разделения в потоках сжимаемого газа: дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 124 с.
24. Волчков Э.П., Макаров М.С. Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковом потоке // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 2. С. 19-31.
25. Здитовец А.Г., Титов А.А. Влияние формы поверхности теплоизолированного стержня, омываемого сверхзвуковым потоком, на коэффициент восстановления температуры // Известия РАН. Энергетика. 2007. № 2. С. 111-117.
26. Бурцев С.А., Васильев В.К., Виноградов Ю.А., Киселёв Н.А., Титов А.А. Экспериментальное исследование характеристик поверхностей, покрытых регулярным рельефом // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 1. С. 263-290. DOI: [10.7463/0113.0532996](https://doi.org/10.7463/0113.0532996)

27. Кочуров Д.С. Исследование транспортных и теплофизических свойств бинарных смесей инертных газов с использованием автоматизированной системы расчета Tetra // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 2. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/708327.html> (дата обращения: 07.07.2015).
28. Diaz G., Campo A. Artificial neural networks to correlate in-tube turbulent forced convection of binary gas mixtures // International Journal of Thermal Sciences. 2009. Vol. 48, iss. 7. P. 1392-1397.
29. Jean-Michel P. Tournier, Mohamed S. El-Genk. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton Cycle applications // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. P. 469-492.
30. Mohamed S. El-Genk, Jean-Michel Tournier Noble-Gas Binary Mixtures for Closed-Brayton-Cycle Space Reactor Power Systems // Journal of Propulsion and Power. 2007. Vol. 23, no. 4. P. 863-873. DOI: [10.2514/1.27664](https://doi.org/10.2514/1.27664)
31. Picket P.E., Taylor M.F., McEligot D.M. Heated turbulent flow of helium-argon mixtures in tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1979. Vol. 22. P. 705-719.
32. Bammert K., Klein R. The influence of He-Ne, He-N₂ and He-CO₂ gas mixtures on closed cycle gas turbines // ASME reference paper 74-GT-124. 1974. P. 1-8.
33. Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М., Титов А.А., Медвецкая Н.В. Экспериментальное исследование особенностей теплообмена при вдуве гелия через проницаемую поверхность в сверхзвуковой поток аргона // Тепловые процессы в технике. 2012. № 6. С. 253-261.
34. Melissa A. Haire, David D. Vargo. Review of helium and xenon pure component and mixture transport properties and recommendation of estimating approach for Project Prometheus (viscosity and thermal conductivity) // Space Technology and Applications International Forum (2007): AIP Conference proceedings, 2007. Vol. 880. P. 559-570. DOI: [10.1063/1.2437494](https://doi.org/10.1063/1.2437494)
35. Paul K. Johnson. A method for calculating viscosity and thermal conductivity of a helium-xenon gas mixture. Final contractor report. NASA Center for AeroSpace Information. 2006. 19 p.
36. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей: пер. с англ. / под ред. Е.В. Ступоченко. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 931 с. [Hirshfelder J.O., Curtiss Ch.F., Bird R.B. Molecular theory of gases and liquids. New York: John Wiley and Sons, 1954. London: Chapman and Hall, 1954.].
37. Исаев С.И., Миронов Б.М., Никитин В.М., Хвостов В.И. Основы термодинамики, газовой динамики и теплопередачи / под ред. В.И. Хвостова. М.: Машиностроение. 1968. 275 с.
38. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1972. 720 с.

39. Рабинович В.А., Вассерман А.А., Недоступ В.Н., Векслер Л.С. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона / под ред. В.А. Рабиновича. М.: Изд-во стандартов, 1976. 636 с.

Investigating the Effect of the Binary Mixtures Composition of Noble Gases on Their Thermodynamic and Transport Properties

S.A. Burtsev^{1,2,*}, D.S. Kochurov^{1,2},
N.L. Schegolev¹

*burtsev@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

Keywords: noble gases, gas dynamic energy separation, Prandtl number, Leontiev tube, closed Brayton cycle engine, temperature recovery factor, gas mixtures, binary mixtures, thermodynamic and transport properties

The paper presents possible application fields of the binary noble gas mixtures with low Prandtl numbers. It shows that it is expedient to select these mixtures as the working fluids for closed Brayton cycle gas-turbine installations, thermo-acoustic engines and for the gas dynamic energy separation device (Leontiev tube). As follows from the analysis, He-Ar, He-Kr, and He-Xe mixtures have proven to be the most attractive choice. The paper has analyzed the calculation results for coefficient of dynamic viscosity, coefficient of thermal conductivity, and for heat capacity at constant pressure for the given mixtures in terms of mixture molecular weights at pressures of 2MPa and 7MPa and temperatures of 400 and 1200°K. According to data of experiments and calculations available in public sources published by another authors, the results are verified. It was found that at constant pressure within the examined range of parameters (i.e. pressure, temperature, mixture molecular weight) the obtained heat capacity values are in good agreement with the values of the verification data. In calculating dynamic viscosity coefficient for any pressure and temperature the utilized technique provides results for He-Ar and He-Kr mixtures within the entire range of the molecular weights, which are, essentially, as good as shown by international verification techniques. However, at high pressures and low temperatures for He-Xe mixture with molecular weights close to the pure Xe the divergence was found to be as high as 25 % while for other parameter intervals under consideration and with the same mixture the difference does not exceed 10 %. A good agreement with the verification data is observed for the values of a thermal conductivity coefficient of He-Ar and He-Kr mixtures for any value of parameters, while for He-Xe mixture with molecular weights close to 60 g/mole independently of pressure the divergence can reach 30 % for 1200°K and 20 % for 400°K. It is shown that for a He-Xe mixture, with increasing temperature for all molecular masses, the un-

derestimation of the thermal conductivity coefficient values may partially compensate for underestimation of the dynamic viscosity coefficient values, thereby leading to the net inaccuracy in Prandtl number calculations at most 15 % for any value of parameters under consideration.

References

1. Mason L.S., Shaltens R.K., Dolce J.L., Cataldo R.L. Status of Brayton cycle power conversion development at NASA GRC. *Space Technology and Applications International Forum (2002): AIP Conference Proceedings*, 2002, vol. 608, pp. 965-971. DOI: [10.1063/1.1449813](https://doi.org/10.1063/1.1449813)
2. Arbekov A.N., Leontiev A.I. Development of space gas turbine plants in the works of V.L. Samsonov. *Trudy MAI*, 2011, no. 43. Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24713> , accessed 07.07.2015. (in Russian).
3. Tijani M.E.H., Zeegers J.C.H., de Waele A.T.A.M. Prandtl number and thermoacoustic refrigerators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, vol. 112, no. 1, pp. 134-143. DOI: [10.1121/1.1489451](https://doi.org/10.1121/1.1489451)
4. Gaicobbe F.W. Estimation of Prandtl numbers in binary mixtures of helium and other noble gases. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, vol. 96, no. 6, pp. 3568-3580. [10.1121/1.410615](https://doi.org/10.1121/1.410615)
5. Leont'ev A.I. *Sposob temperaturnoi stratifikatsii gaza i ustroystvo dlia ego osushchestvleniia (Truba Leont'eva)* [The method of temperature stratification of gas and device for its implementation (Pipe Leontiev)]. Patent RF, no. 2106581. 1998. (in Russian).
6. Leont'ev A.I. Gas-dynamic method of energy separation of gas flows. *Teplofizika vysokikh temperature*, 1997, vol. 35, no. 1, pp. 157-159. (English version of journal: *High Temperature*, 1997, vol. 35, no. 1, pp. 155-157.).
7. Bammert K., Rurik J., Griepentrog H. Highlights and future developments of closed-cycle gas turbines. *Journal of Engineering for Power*, 1974, vol. 96, no. 4, pp. 342-348. DOI: [10.1115/1.3445856](https://doi.org/10.1115/1.3445856)
8. Arbekov A.N., Burtsev S.A. Research of the working cycle of a closed gas turbine in a tri-generation unit operating on a sequential scheme. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 3. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/359008.html> , accessed 07.07.2015. (in Russian).
9. Arbekov A.N., Burtsev S.A. Research of Closed Gas Turbine Cycle of a Trigenation Unit Operating on Parallel Schema. *Teplovyie protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2012, vol. 4, no. 7, pp. 326-331. (in Russian)
10. Arbekov A.N. Selection of the working medium for 6- to 12-kW closed organic-fuel-powered gas-turbine plants. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 131-135. DOI: [10.7868/S0040364414010013](https://doi.org/10.7868/S0040364414010013) (English version of journal: *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 121-125. DOI: [10.1134/S0018151X14010015](https://doi.org/10.1134/S0018151X14010015)).

11. Tournier J.-M., El-Genk M.S., Gallo B.M. Best estimates of Binary Gas Mixtures Properties for Closed Brayton Cycle Space Application. *4th International Energy Conversion Engineering Conference (San Diego, California, 26-29 June 2006): AIAA Paper*, 2006, pp. 4154-4167.
12. Burtsev S.A., Kochurov D.S., Schegolev N.L. Investigation of the helium proportion influence on the Prandtl number value of gas mixtures. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 5, pp. 314-329. DOI: [10.7463/0514.0710811](https://doi.org/10.7463/0514.0710811) (in Russian).
13. Arbekov A.N., Novickii B.B. Experimental study of the characteristics of the small-scale centrifugal-flow compressor. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 8, pp. 491-504. DOI: [10.7463/0812.0432308](https://doi.org/10.7463/0812.0432308) (in Russian).
14. El-Genk M.S., Tournier J.-M. Selection of noble gas binary mixtures for Brayton space nuclear power systems. *4th international Energy Conversion Engineering Conference (San Diego, California, 26-29 June 2006): AIAA Paper*, 2006, pp. 4168-4176. DOI: [10.2514/6.2006-4168](https://doi.org/10.2514/6.2006-4168)
15. Arbekov A.N., Surovtsev I.G., Dermer P.B. Efficiency of heat transfer in recuperative heat exchangers with high-speed gas flows at low prandtl numbers. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2014, vol. 52, no. 3, pp. 463-468. DOI: [10.7868/S004036441403003X](https://doi.org/10.7868/S004036441403003X) (English version of journal: *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 3, pp. 447-452. DOI: [10.1134/S0018151X14030031](https://doi.org/10.1134/S0018151X14030031)).
16. Harty R., Mason L.S. 100-kWe lunar/Mars Surface Power Utilizing the SP-100 Reactor with Dynamic Conversion. *Proceedings of the 10th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion: AIP Conference Proceedings*, 1993, vol. 271, pp. 1065-1071. DOI: [10.1063/1.43087](https://doi.org/10.1063/1.43087)
17. Kilstra J.F., Verkooijen A.H.M. Conceptual Design for the Energy Conversion System of a Nuclear Gas Turbine Cogeneration Plant. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy*, 2000, vol. 214, no. 5, pp. 401-411. DOI: [10.1243/0957650001537967](https://doi.org/10.1243/0957650001537967)
18. Burtsev S.A., Leont'ev A.I. Thermal stratification in supersonic gas flow. *Izvestiia RAN. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2000, no. 5, pp. 101-113. (in Russian).
19. Burtsev S.A. Exploring ways to improve efficiency of gasdynamic energy separation. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 14-21. DOI: [10.7868/S0040364414010062](https://doi.org/10.7868/S0040364414010062) (English version of journal: *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 12-18. DOI: [10.1134/S0018151X14010064](https://doi.org/10.1134/S0018151X14010064)).
20. Burtsev S.A. Analysis Technique for Devices for Gas-Dynamic Temperature Stratification in Real Gas Flow. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2013, no. 9, pp. 386-390. (in Russian).

21. Burtsev S.A. Analysis of influence of different factors on the value of the temperature recovery factor at object surfaces in case of an airflow. Review. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2004, no. 11. DOI: [10.7463/1104.0551021](https://doi.org/10.7463/1104.0551021) (in Russian).
22. Vinogradov Y.A., Zditovets A.G., Strongin M.M. Experimental investigation of the temperature stratification of an air flow through a supersonic channel with a central body in the form of a porous permeable tube. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2013, no. 5, pp. 134-145. (English version of journal: *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 5, pp. 687-696. DOI: [10.1134/S0015462813050128](https://doi.org/10.1134/S0015462813050128)).
23. Burtsev S.A. *Issledovanie temperaturnogo razdeleniia v potokakh szhimaemogo gaza. Kand. diss.* [Investigation of temperature separation in the flows of compressible gas. Cand. diss.]. Moscow, 2001. 124 p. (in Russian, unpublished).
24. Volchkov E.P., Makarov M.S. Gas-dynamic temperature stratification in a supersonic flow. *Izvestiia RAN. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2006, no. 2, pp. 19-31. (in Russian).
25. Zditovets A.G., Titov A.A. The influence of heat insulated rod surface shape in the supersonic flow on the temperature recovery factor. *Izvestiia RAN. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2007, no. 2, pp. 111-117. (in Russian).
26. Burtsev S.A., Vasil'ev V.K., Vinogradov Yu.A., Kiselev N.A., Titov A.A. Experimental study of parameters of surfaces coated with regular relief. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 1, pp. 263-290. DOI: [10.7463/0113.0532996](https://doi.org/10.7463/0113.0532996) (in Russian).
27. Kochurov D.S. [Investigation of transport and thermophysical properties of binary mixtures of inert gases with the use of Tetra automated system of calculation]. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskii vestnik. MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2014, no. 2. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/708327.html> , accessed 07.07.2015. (in Russian).
28. Diaz G., Campo A. Artificial neural networks to correlate in-tube turbulent forced convection of binary gas mixtures. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, vol. 48, iss. 7, pp. 1392-1397.
29. Jean-Michel P. Tournier, Mohamed S. El-Genk. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton Cycle applications. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 469-492.
30. Mohamed S. El-Genk, Jean-Michel Tournier Noble-Gas Binary Mixtures for Closed-Brayton-Cycle Space Reactor Power Systems. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, vol. 23, no. 4, pp. 863-873. DOI: [10.2514/1.27664](https://doi.org/10.2514/1.27664)
31. Picket P.E., Taylor M.F., McEligot D.M. Heated turbulent flow of helium-argon mixtures in tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1979, vol. 22, pp. 705-719.

32. Bammert K., Klein R. *The influence of He-Ne, He-N₂ and He-CO₂ gas mixtures on closed cycle gas turbines. ASME reference paper 74-GT-124.* 1974, pp. 1-8.
33. Zditovetz A.G., Vinogradov Yu. A., Strongin M.M., Titov A.A., Medvetskaya N.V. Experimental Study of Heat Transfer Features at Helium Injection through a Permeable Surface in Supersonic Argon Flow. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2012, no. 6, pp. 253-261. (in Russian).
34. Melissa A. Haire, David D. Vargo. Review of helium and xenon pure component and mixture transport properties and recommendation of estimating approach for Project Prometheus (viscosity and thermal conductivity). *Space Technology and Applications International Forum (2007): AIP Conference Proceedings*, 2007, vol. 880, pp. 559-570. DOI: [10.1063/1.2437494](https://doi.org/10.1063/1.2437494)
35. Johnson P.K. *A method for calculating viscosity and thermal conductivity of a helium-xenon gas mixture. Final contractor report.* NASA Center for AeroSpace Information. 2006. 19 p.
36. Hirshfelder J.O., Curtiss Ch.F., Bird R.B. *Molecular theory of gases and liquids.* New York, John Wiley and Sons, 1954; London, Chapman and Hall, 1954. (Russ. ed.: Hirshfelder J.O., Curtiss Ch.F., Bird R.B. *Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkosti.* Moscow, Izd-vo inostrannoi literatury Publ., 1961. 931 p.).
37. Isaev S.I., Mironov B.M., Nikitin V.M., Khvostov V.I. *Osnovy termodinamiki, gazovoi dinamiki i teploperedachi* [Fundamentals of thermodynamics, gas dynamics and heat transfer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 275 p. (in Russian).
38. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 720 p. (in Russian).
39. Rabinovich V.A., Vasserman A.A., Nedostup V.N., Veksler L.S. *Teplofizicheskie svoistva neona, argona, kriptona i ksenona* [Thermophysical properties of neon, argon, krypton and xenon]. Moscow, Standards Publishing House, 1976. 636 p. (in Russian).