электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 533.27

Исследование транспортных и теплофизических свойств бинарных смесей инертных газов с использованием автоматизированной системы расчета Tetra

***Кочуров Д.С.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»

Научный руководитель: Бурцев С.А., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана
kochurov_ds@yahoo.com
turbosh@power.bmstu.ru

Введение

Одним из перспективных направлений использования бинарных смесей инертных газов является их применение в качестве рабочего тела в устройствах газодинамической температурной стратификации. Такое устройство было предложено Александром Ивановичем Леонтьевым [1, 2] и названо впоследствии трубой Леонтьева (далее ТЛ). ТЛ реализует способ температурной стратификации в сверхзвуковом потоке газа (также предложенный А.И. Леонтьевым).

Известно, что интенсивность теплообмена между газом и омываемой поверхностью прямопропорциональна величине температурного напора между этой поверхностью и потоком газа. При течении сжимаемого газа эта величина равна разности между температурой восстановления на стенке и температурой стенки [3].

Как показано в [4], разность между температурой восстановления на стенке T_W^* и температурой стенки пропорциональна коэффициенту восстановления температуры

$$r = \frac{T_W^* - T}{T^* - T},$$

где T – статическая температура, T^* – температура торможения потока.

Коэффициент восстановления температуры r показывает долю кинетической энергии, которая переходит в теплоту на стенке при торможении в пограничном слое [4]. Искривление эпюры температуры торможения (восстановления) потока газа в пограничном слое зависит от теплофизических свойств газа и может характеризоваться числом Прандтля

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости,C_p – удельная изобарная теплоемкость газа,λ– коэффициент теплопроводности.

Таким образом, если интенсивность выделения теплоты за счет работы сил трения на стенке преобладает над интенсивностью отвода теплоты в потоке газа при данной температуре, то значения числа Прандтля Pr > 1 и коэффициента восстановления температуры $r > 1$. Если преобладает отвод теплоты, то Pr < 1 и $r < 1$ [5].На использовании этого эффекта основан способ температурной стратификации в сверхзвуковом потоке газа, о котором говорилось выше.

При этом, наибольшее влияние на величину стратификации оказывает коэффициент восстановления температуры r[6 - 11].

В работах [12] и [13] показано, что для значений числа Прандтля 0.6–2.0 для ламинарного пограничного слоя коэффициент восстановления температуры хорошо описывается выражением

$$r = \sqrt{Pr},$$

а для турбулентного пограничного слоя при значении числа Прандтля от 0.5 до 2 и постоянных свойствах потока коэффициент восстановления температуры может быть определен выражением

$$r = \sqrt[3]{Pr}\,.$$

Проведенные исследования показали, что наиболее перспективным путем повышения эффективности устройств газодинамической стратификации является использование рабочих тел с низкими значениями числа Прандтля.

Еще более перспективно использование бинарных смесей инертных газов в качестве рабочих тел в энергетических турбоустановках, работающих на замкнутом цикле Брайтона (ЗЦБ), источником тепла в которых является газоохлаждаемый ядерный реактор (ГЯР).

Такие системы являются эффективными, компактными и универсальными энергетическими установками,нашедшимиширокое применение в космических летательных аппаратах, а также на электростанциях наземного базирования [14, 15].Так, космическая одновальная турбомашина с центробежным компрессором, центростремительной турбиной и источником тепла в виде ГЯР, обладая малой массой иосевой протяженностью порядка 330 мм, способна выработать10.5 киловатт электроэнергии [16]. Столь малый размер и масса являются типичными для турбомашин

такого класса, при этом они могут быть рассчитаны на выработку сотен киловатт[17-19], а многовальные машины поверхностного базирования – более 100 -150 МВт [20, 21].

При использовании турбоустановок ЗЦБ на летательных аппаратах упор в первую очередь делается на их компактность и малую удельную массу (кг/кВт), поэтому они вырабатывают пиковуюэлектрическую мощность для выбранного цикла и в основном представляют собой центробежные машины. Для установок поверхностного базирования основными требованиями являются большие вырабатываемые мощности и низкая стоимость эксплуатации. В таких установках, как правило, применяется многовальная конструкция с осевым током рабочего тела. Они работают на номинальных режимах, близких к максимальному КПД.

Так как благородные газы химически инертны, они являются перспективными рабочими телами для установок ЗЦБ с источником тепла в виде ГЯР. Они позволяют избежать проблем с загрязнением установки и коррозией ее элементов [16]. Так, гелий (He)обладает наилучшими термодинамическими и транспортными характеристиками. Однако, имея наименьшую молекулярную массу, он значительно повышает аэродинамическую нагрузку на лопатки крыльчатки, что заставляет увеличивать ее габариты и массу для обеспечения прочности, либо увеличивать число ступеней при использовании машины с осевым током рабочего тела.He, будучи кроме всего прочего самым дешевым,широко применяется в установках поверхностного базирования, где ограничение по массе отсутствует, но имеется строгое ограничение по стоимости эксплуатации [22].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 [16].

При использовании смеси Нес 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[23]. Эл-Генк и Турниер установили, что бинарные смеси He с Kr или Xe с молекулярной массой < 22 и < 40 соответственно имеют несколько большие коэффициенты теплоотдачи и значительно снижают массу и габариты турбомашины [24]. Основываясь на изучении термодинамического цикла, Баммерт и Клеин [25] установили, что можно достичь значительных снижений затрат на использование газотурбинного цикла за счет применения в качестве рабочего тела смеси более тяжелого инертного газа с гелием.

Именно такие смеси находят широкое применение в компактных установках ЗЦБ летательных аппаратов.

Бинарные смеси инертных газов такжеприменяются в области вопросов термоакустики. В частности, в [26] предлагается использование смеси легкого инертного газа с более тяжелым в качестве рабочего тела в термоакустическом холодильнике. Как уже отмечалось, такая смесь обладает большим показателем адиабаты и малым числом Прандтля, что делает ее превосходной рабочей смесью при термоакустическом охлаждении. Ряд работ, посвященных вопросам термоакустики, был направлен на рассмотрение методов расчета свойств таких смесей, например, числа Прандтля [27, 28].

Ограниченность объема данной статьи не позволяет более подробно рассмотреть области возможного применения бинарных смесей инертных газов и требования, предъявляемые к ним. Однако из вышеперечисленного ясно следует, что вне зависимости от области применения для оптимизации работы той или иной технической установки в первую очередь появляется необходимость достаточно точно знать теплофизические и транспортные свойства этих смесей. Причем эти свойства должны быть известны в определенном интервале давлений и температур, а при проектировании установки до окончательного выбора смеси – и для смесей разных газов с разной молекулярной массой.

Экспериментальные данные в этой области на сегодняшний день весьма ограничены, а те, что имеются, чаще всего не находятся в открытом доступе. Яркий тому пример – банки данных, ссылки на которые в довольно большом количестве могут быть найденывработе [29]. Кроме того, экспериментальные исследования, как правило, проводятся для определенных смесей некоторого состава в узком диапазоне давлений и температур, интересующем данную область техники, как это было сделано, например, в [22]. Проведение самостоятельных экспериментов для широкого круга смесей в широком диапазоне температур и давлений для определения перспективной области дальнейших работ не представляется возможным.

На таком фоне очень остро встает вопрос о возможности теоретического и полуэмпирического расчета свойств смесей. В ряде работ предлагаются самые разнообразные методики расчета, основанные на приближенных теоретических моделях, обобщении экспериментальных данных в виде формул, например, [27, 28]. Однако у всех работ имеется один существенный недостаток. Они предлагают методики расчета, а не конечный продукт, готовый к использованию.

Данная статья демонстрирует возможности программного продукта Tetra(ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ), написанного Борисом Георгиевичем Трусовым в 1995-96 гг., при расчете

зависимостей теплофизических и транспортных свойств бинарных смесей инертных газов в зависимости от температуры, давления и состава смеси. Программа способна считать с высокой точностью и свойства многих других смесей, учитывать химические реакции между веществами, а ее банки данных включают в себя информацию о свойствах более чем 1700 индивидуальных веществ.

Исследование

Была проведена обширная работа по расчету свойств бинарных смесей всех инертных газов от Недо Xe (т.е. He-Ne, He-Ar, …, He-Xe, Ne-Ar, …, Ne-Xe, …, Kr-Xe) всех молекулярных масс в зависимости от температурыTи давленияp. Были получены зависимости для следующих теплофизических и транспортных свойств: удельной изобарной теплоемкостиC_p, коэффициента адиабаты k, скорости звука a, коэффициента динамической вязкости μ, коэффициента теплопроводности λ, числа Прандтля Pr. Расчеты были проведены в интервале температур от 300 до 1500 К и в интервале давлений от 0.1 до 10 МПа.

Было выполнено широкомасштабное сравнение рассчитанных значений всехсвойств с экспериментальными, справочными, а также расчетными данными других авторов практически во всех рассмотренных интервалах давлений и температур для бинарных смесей разных компонентов и их процентных составов. По результатам сопоставления была оценена пригодность программы Tetraдля проведенных вычислений; выявленызначения и интервалы давлений, температур и составов, в которых появляютсяпогрешности, связанные с использованной в программе методикой счета; составлены рекомендации по введению поправок для учета этих погрешностей при определенных интервалах составов смесей, температур и давлений.

Все результаты работы представлены в виде графиков, построенных на основании рассчитанных таблиц значений свойств с помощью системы MathCAD. Часть графиков представляет собой трехмерные поверхности, отражающие расчетные зависимости определенного параметра от давления и температуры для смеси некоторого состава. В таких графиках принят интервал давлений и температур, соответственно, от 0.1 до 10 МПа и от 300 до 1500 К. На эти графики нанесены экспериментальные точки, покрывающие большую часть расчетных поверхностей, в том числе и в области больших давлений.Другая часть графиков представлена в виде плоских двумерных кривых, показывающих зависимость какого-либо параметра от компонентного состава бинарной смеси (т.е. He-Xe, Ne-Kr, Ar-Kr и т.д.) и от ее молекулярной массы (т.е. от процентного содержания ее компонентов).Все расчетные данные также подкреплены

экспериментальными точками, а также точками, полученными другими авторами в их расчетах.

Некоторые двумерные графики с зависимостями числа Прандтля *Pr*для всех смесей при нескольких давлениях и температурах с проставленными на них экспериментальными точками представлены ниже в этой статье для демонстрации возможностей программного продукта Tetra.

В рамках данной работы помимо вышеупомянутых смесей в самом начале были рассмотрены все простые инертные газы от He до Xe и воздух. Расчет их свойств и дальнейшее сопоставление со справочными данными позволили оценить правильность информации, внесенной в базу данных программы Tetra, а также проверить правильность проводимых расчетов на примере смеси элементарного состава из одного единственного компонента на предмет учета изменения давления. Этот момент, в частности, хорошо тестируется при расчете тяжелого газапри низкой температуре (до 400 К) и большом давлении (свыше2 МПа). Известно, что легкие газы, такие как He, ведут себя как идеальные газы при любых условиях, т.е. их свойства от давления не зависят [23]. Однако для более тяжелых газов, таких как Kr и Xe, такое утверждение несправедливо. При проведении исследования было, например, обнаружено, что число Прандтля по экспериментальным данным начинает заметно возрастать при давлениях выше 2 МПа и температурах ниже 400 К.

Расчеты по большей части показали свое полное совпадение с экспериментальными и справочными данными. Исключение составили Kr и Xe, для которых было отмечено заметное занижение программой значений чисел Прандтля, динамической вязкости, коэффициента теплопроводности и удельной изобарной теплоемкости при температурах ниже 400 К и давлениях выше 2 МПа. Для Xe при температуре 300 К и давлении 10 МПа было отмечено максимальное расхождение, составившее 39 %.

После проведения расчетов на простых инертных газах были выполнены аналогичные расчеты для воздуха. Экспериментальные точки и справочные данные для воздуха легко найти, поэтому он послужил отличным объектом для проверки корректности работы программы Tetra с многокомпонентными смесями. При расчете рассматривался воздух следующего состава по массовым долям:

75.5 % двухатомарного азота N_2,

23.2 % двухатомарного кислорода O_2,

1.3 % аргона Ar.

Результат расчета показал практически полную сходимость с экспериментальными данными. Опять же в области температур до 400 К и давлений свыше 2 МПа было отмечено занижение программой значений параметров по сравнению с экспериментом, но на этот раз максимальное отклонение было обнаружено у показателя адиабаты при 300 К и 10 МПа. Оно не превысило 15 %.

Предварительные оценки, проведенные на воздухе и простых инертных газах, позволили выявить те области температур, давлений и молекулярных масс исследуемых веществ (будь то простые инертные газы, или их смеси с некоторой молекулярной массой), в которых при расчетах параметров бинарных смесей следует ожидать появление погрешностей, а также определить их максимальную величину и область, в которой она имеет место. Было отмечено, что при температурах ниже 400 К и давлениях более 2 МПа при расчете свойств газов с большой молекулярной массой (Kr и Xe) программа занижает значения параметров. При этом с ростом давления, снижением температуры и ростом молекулярной массы исследуемого газа эта погрешность увеличивается.

Таким образом, при расчете свойств бинарной смеси любого рассматриваемого инертного газа с Kr или Xe при малых температурах и больших давлениях при приближении ее молекулярной массы к молекулярной массе Kr и дальнейшем росте до молекулярной массы Xe следует ожидать появления погрешности. Эта погрешность будет возрастать с понижением расчетной температуры до 300 К, повышением давления до 10 МПа и стремлением молекулярной массы смеси к 131 г/моль (если, разумеется, рассчитывается смесь какого-либо газа с Xe), а для числа Прандтля стремиться к 39 %. Здесь следует отметить, что при любых других проводимых расчетах для всех рассматриваемых смесей и параметров не ожидается превышения этого порогового значения.

Для выявления и анализа областей, в которых экспериментальные значения свойств газов начинают резко возрастать, а программа не учитывает это возрастание в достаточной степени, занижая расчетные значения по сравнению с экспериментом, были детально просчитаны следующие бинарные смеси:

He-Ar смесь с молекулярными массами

μ=20 неона Ne,

μ=29 воздуха;

He-Xe смесь с молекулярными массами

μ=20 неона Ne,

μ=29 воздуха,

μ=40 аргона Ar,

μ=84 криптона Kr.

Для них были получены трехмерные графики поверхностей. На этих графиках были проставлены экспериментальные точки, накрывшие большую часть исследуемых интервалов.

Как и ожидалось, на большей части поверхности для всех смесей и их параметров было выявлено превосходное совпадение расчета с экспериментом. Однако при смешивании любого из газов с Kr или Xe в пропорциях, соответствующих молекулярной массе смеси, превышающей таковую у Kr, было отмечено значительное расхождение результатов расчета и экспериментальных данных при давлениях выше 2 МПа и температурах ниже 400 К.

Для оценки правильности счета разных бинарных смесей инертных газов в зависимости от их состава и молекулярной массы, а также для выявления составов и молекулярных масс, при которых появляется вышеописанная погрешность, были построены двумерные графики свойств смесей. Графики построены по принципу диаграмм состояния. Вместо процентного содержания какого-либо компонента по оси *x*отложена молекулярная масса смеси, изменяющаяся в пределах от 4 у He до 131 у Xe. Эти графики представляют собой зависимость одного из шести свойств от состава смеси и ее молекулярной массы при определенной температуре и давлении. На таких графиках присутствуют кривые для всех бинарных смесей инертных газов от He до Xe. Примеры таких графиков для числа Прандтля приведены ниже в статье.

Методика работы с программой Tetraи получение результата

Для задания исходного состава смеси в программе Tetraтребуется записать химические формулы *i*-ых компонентов (например, He, Ar) и их массовые доли m_i в этой смеси. Для простых веществ массовая доля будет равна 1. Для воздуха массовые доли можно найти практически в любом справочнике. Они уже были приведены выше.

Для бинарных смесей необходимо выполнить пересчет из заданных компонентов смеси, их молекулярных масс μ_i и заданной молекулярной массы смеси μ в массовые доли m_iсоставляющих компонентов.

Пересчет ведется следующим образом. По определению, массовая доля *i*-ого компонента смесиm_i есть отношение массы этого компонента M_i к массе всей смеси M:

$$m_i = {M_i}/{M}, \tag{1}$$

а молярная доля *i*-ого компонента n_i равна отношению числа моль этого компонента ν_i к числу моль смеси ν:

$$n_i = {}^{\nu_i}/_{\nu}. \tag{2}$$

Перепишемвыражение (1) в иной форме с учетом (2):

$$m_i = {}^{\mu_i * \nu_i}/_{\sum_i(\mu_i * \nu_i)} = {}^{\mu_i * \nu_i}/_{\mu * \nu} = {}^{\mu_i}/_{\mu} * n_i. \tag{3}$$

Очевидно, что

$$\sum_i n_i = 1. \tag{4}$$

Суммируя (3) по всем *i*с учетом (5), будем иметь

$$\sum_i \left({}^{\mu_i}/_{\mu} * n_i \right) = 1. \tag{5}$$

Так как в рамках данной работы рассматриваются только бинарные смеси газов, то число компонентов *i*всегда равно двум. (4) и (6) преобразуются к следующей системе уравнений:

$$\begin{gathered} n_1 + n_2 = 1, \\ {}^{\mu_1}/_{\mu} * n_1 + {}^{\mu_2}/_{\mu} * n_2 = 1. \end{gathered} \tag{6}$$

Из этой системы можно определить n_1 и n_2. Подставив их в (3), получим, соответственно, m_1 и m_2.

Если для воздуха в каком-либо источнике заданы объемные доли составляющих компонентов, то необходимо выполнить их пересчет в массовые доли по выражению (3) для каждого компонента.

Программа Tetra выводит значения параметров веществ как функции от температуры T и давления p. При этом только одну термодинамическую координату можно задать интервалом. Вторая должна быть константой. То есть, фактически, программа умеет строить только двумерные графики кривых.

Для построения трехмерных графиков поверхностей был применен следующий способ. Для каждого теплофизического параметра каждой исследуемой смеси было взято восемь точек из требуемого интервала давлений от 0.1 до 10 МПа. Для каждой точки был проведен отдельно расчет в температурном интервале от 300 до 1500 К с шагом 10 К. Для каждого давления данные записывались в виде матрицы в файл. Затем матрицы преобразовывались и соединялись для обеспечения их считывания в программном пакете MathCAD. При помощи операции линейного интерполирования в MathCAD строились

трехмерные графики поверхностей. Процесс расчета, преобразования и обработки файлов был автоматизирован.

Двумерные графики строились в системе MathCAD вручную, то есть в нем непосредственно создавались матрицы, числа в которые напрямую переносились из результатов расчетов в Tetra.

Среди расчетных параметров программы Tetra нет числа Прандтля. Однако в ней есть возможность посчитать любую зависимость, выраженную формулой, состоящей из известных программе параметров.Зависимости для чисел Прандтля рассчитывались в Tetra по следующей формуле:

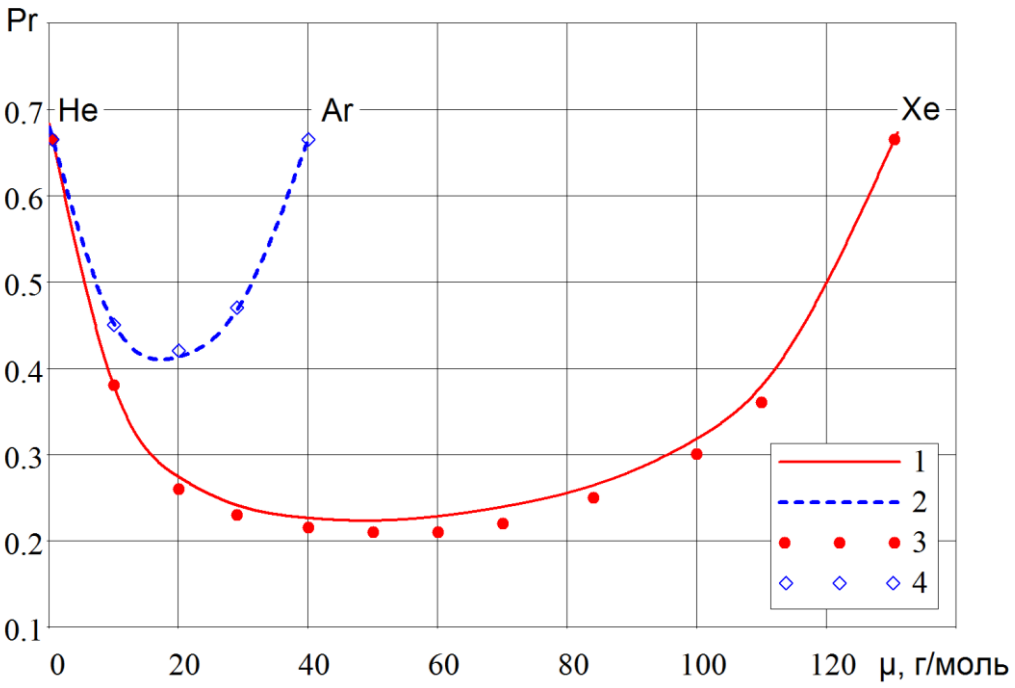
$$Pr = {}^{1000 * \mu * C_p}/_{\lambda},$$

где коэффициент 1000 служит для приведения размерности удельной теплоемкости C_p к системе СИ.

Результат

Для демонстрации возможностей программного продукта Tetra в данном разделе приведены двумерные графики расчетных зависимостей числа Прандтля от молекулярной массы смеси и ее составляющих компонентов для нескольких значений давлений и температур, полученные с помощью прикладной программы Tetra. Графики построены по принципу диаграмм состояния и охватывают все рассматриваемые в данном исследовании смеси всех составов. Расчетные зависимости подкреплены большим количеством экспериментальных данных других авторов.

На рис. 1 показаназависимость значений числа Прандтля, полученная для давления 0.1 МПа (1 атм.) и температуры 300 К. Здесь приведены только две смеси всех возможных молекулярных масс: He-Ar и He-Xe. Видно, что для смеси He-Ar совпадение расчета с экспериментом практически идеально. В то же время, в случае He-Xe смеси наблюдается некоторое завышение программой значений числа Прандтля по сравнению с экспериментальными данными в области близких мольных долей. Это завышение небольшое и по результатам оценок не превосходит 9 %.

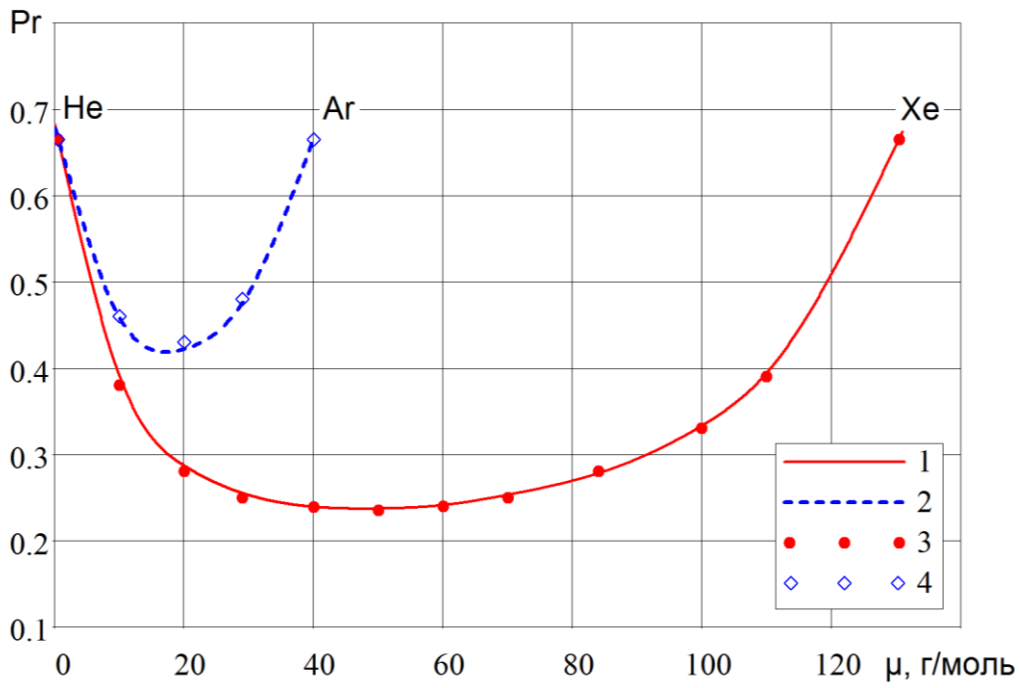


1 – расчет для He-Xe;2 – расчет для He-Ar;3 – данные [31]для p = 0.1 МПа и T = 291 К; 4 - данные [30]для p = 0.1 МПа и T = 298 К;

Рис. 1. Зависимость числа Прандтля для бинарных смесей инертных газов от молекулярной массы при p = 0.1 МПа и T = 300 К

На рис. 2 представлена зависимость числа Прандтля для тех же двух смесей и при том же давлении в 0.1 МПа, но большей температуре, равной 800 К. Видно, что отмеченная выше погрешность для смеси He с Xe отсутствует. Полное совпадение расчетных значений и экспериментальных данных наблюдается для обеих смесей при всех молекулярных массах.

По данным работы [22] типичное рабочее давление космических энергоустановок ЗЦБ с источником тепла в виде ГЯР составляет 2 МПа, при этом температуры на выходе из реактора и компрессора приблизительно равны 1400 и 400 К соответственно. Энергоустановки поверхностного базирования в основном работают при давлениях около 7 МПа.



1 – расчет для He-Xe; 2 – расчет для He-Ar; 3 – данные [31] для p = 0.1 МПа и T = 793 К; 4 - данные [30] для p = 0.1 МПа и T = 873 К;

Рис. 2. Зависимость числа Прандтля для бинарных смесей инертных газов от молекулярной массы при p = 0.1 МПа и T = 800 К

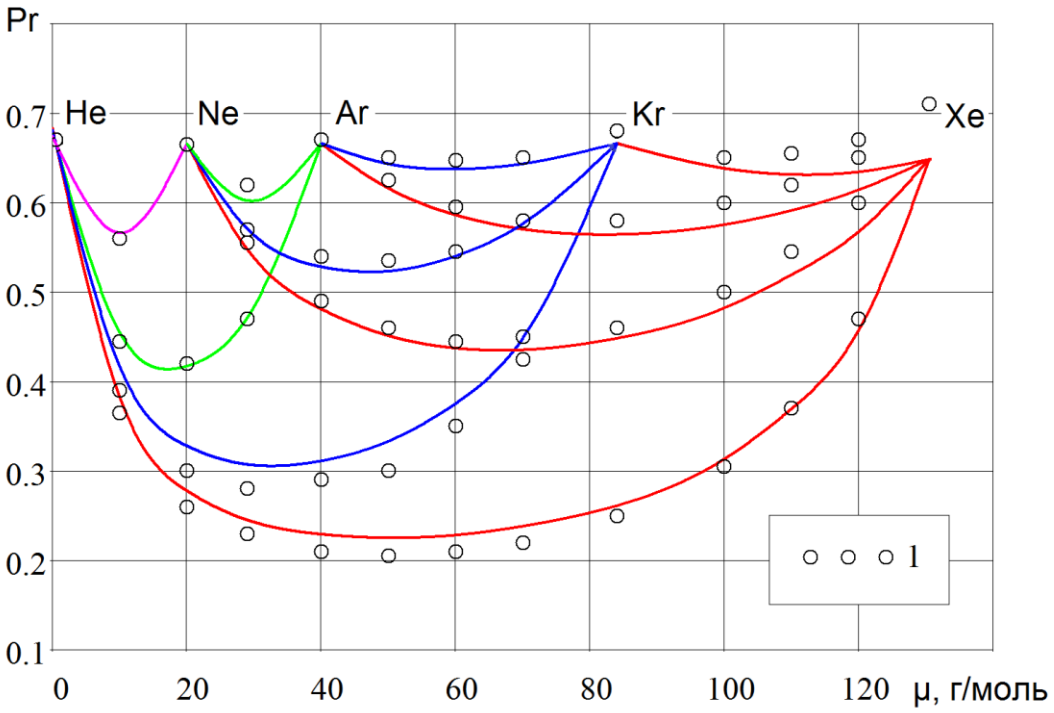
На рис. 3 представлен подробный график, содержащий зависимости для всех рассматриваемых бинарных смесей инертных газов для давления 2 МПа и температуры 400 К, а также большое число экспериментальных точек, взятых из[16] и [22].

Для смесей He с Neи He с Ar совпадение результатов расчета с экспериментом практически полное (расхождение не более 2 %).

При расчете смеси легкого газа с тяжелым (He с Kr и He с Xe), как уже было отмечено выше при температуре 300 К на рис. 1, наблюдается завышение программой расчетных значений над экспериментом в области близких мольных долей компонентов. Проведенный анализ показал, что максимум относительной погрешности наблюдается у He-Xe смеси(он не превышает 10 %).

При сравнении рис. 1 и 3, на которых приведены зависимости чисел Прандтля при похожих температурах, но разных давлениях (отличие на 2 МПа), хорошо прослеживается начало увеличения экспериментальных значений параметров в области больших молекулярных масс смесей с увеличением давления. Как и ожидалось, программа этот рост не учитывает и занижает значения по сравнению с экспериментальными. На рис. 3 максимальная относительная погрешность наблюдается у смесей с молекулярной массой, близкой к таковой у Xe, и составляет примерно 9 %. Как и предсказывалось, с ростом

давления до 10 МПа при температурах до 400 К эта погрешность растет, в то время как при повышении температуры до значений, превышающих 400 – 500 К, при любых давлениях она практически отсутствует.

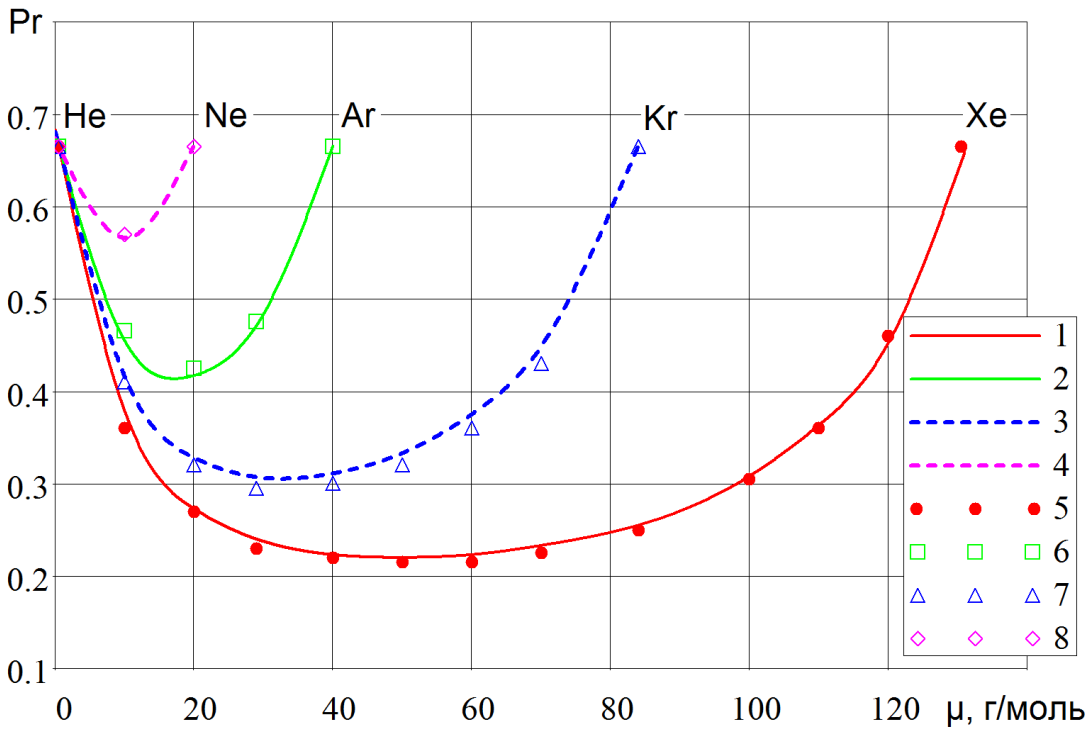


Сплошные линии – расчет для соответствующих смесей;
1 – данные [16]для p = 2МПа и T = 400 К;
Рис. 3. Зависимость числа Прандтля для бинарных смесей инертных газов от молекулярной массы при p = 2 МПа и T = 400 К

Стоит отметить еще один эффект, связанный с описанной погрешностью. При расчете смесей при давлениях выше 2 МПа и температурах ниже 400 К, состоящих из тяжелых газов (Ne-Ar, Ne-Kr, Ne-Xe, Ar-Kr, Ar-Xe, Kr-Xe), также получаются заниженные значения параметров по сравнению с экспериментом при любой молекулярной массе, причем с ее ростом эта погрешность растет и стремится к максимуму при данном давлении и температуре у смесей, близких по молекулярной массе к Xe.

На рис. 4 приведена зависимость числа Прандтля от молекулярной массы при давлении 1 МПа и температуре 300 К для четырех смесей: He-Ne, He-Ar, He-Kr и He-Xe. В отличие от всех остальных графиков, представленных в этой работе, на нем показано сравнение результатов расчета в программе Tetrac результатами счета другого автора, использовавшего иную методику [27]. Здесь для He-Ne и He-Ar смесей отмечается полное совпадение результатов. Имеется различие для смесей He с Kr и He с Xe в области близких мольных долей составляющих компонентов, однако это различие на этот раз не превышает 5 %. Стоит отметить, что при давлении 1 МПа и самой низкой из

рассматриваемых температур в 300 К рост параметров при больших молекулярных массах еще не начался и погрешность программы Tetra, с ним связанная, отсутствует.



1- 4 – расчет для смесей He-Xe, He-Ar, He-Kr, He-Ne соответственно;
5 - 8–данные[28] для p = 1МПа и T = 300 К;

Рис. 4. Зависимость числа Прандтля для бинарных смесей инертных газов от молекулярной массы при p = 1 МПа и T = 300 К

Выводы

При расчете свойств бинарных смесей инертных газов на большей части интервала температур от 300 до 1500 К и давлений от 0.1 до 10 МПа программа Tetra выдает результаты, практически полностью совпадающие с данными экспериментов. Это утверждение справедливо для всех исследованных смесей: He-Ne, He-Ar, …,He-Xe, Ne-Ar,…, Ne-Xe, …, Kr-Xe.

Исключение составляют области с давлениями выше 2 МПа и температурами ниже 400 К. В этих областях при расчете всех смесей, кроме He-Ne и He-Ar, программа дает заниженные результаты, практически не учитывая рост значений параметров с ростом давления и понижением температуры, характерный для всех тяжелых инертных газов и их смесей. Эта погрешность растет с увеличением молекулярной массы смеси и достигает максимума при температуре 300 К и давлении 0.1 МПа в районе смесей с молекулярной массой Xe.

При расчете смесей легкого газа с тяжелым в зоне близких мольных долей компонентов при низких температурах программа завышает результаты по сравнению с экспериментом. При исследовании выяснилось, что эта погрешность не превышает 10 %. Как было показано на рис. 2, эта погрешность полностью исчезает с ростом температуры до 800 К.

Список литературы

1. Леонтьев А.И. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева). Пат. 2106581 Российская Федерация. 1998.Бюл. № 7. 5 с.
2. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // ТВТ. 1997. Т. 35. № 1. С. 157-159.
3. Eckert E., Drewitz O. Die Berechnung des Temperaturfeldes in der laminaren Grenzschicht schnell angeströmter, unbeheizter Körper (in German)// Luftfahrt-Forschung. 1942. Bd. 19. S. 189-196.
4. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
5. Петухов Б.С. Теплообмен в движущейся однофазной среде. Ламинарный пограничный слой: монография / Под ред. А.Ф. Полякова. М.: Изд-во МЭИ, 1993. 350 с.
6. Научные основы технологий XXI века / под редакцией А.И. Леонтьева, Н.Н. Пилюгина, Ю.В. Полежаева, В.М. Поляева. УНПЦ М.: "Энергомаш". 2000. 135 с.
7. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа // Известия РАН. Энергетика. 2000. № 5, С. 101-113.
8. Бурцев С.А. Исследование температурного разделения в потоках сжимаемого газа: дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 124 с.
9. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Якубенко А.Е. Коэффициент восстановления в сверхзвуковом потоке газа с малым числом Прандтля // ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 238-245.
10. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С. Температурная стратификация при отсосе пограничного слоя из сверхзвукового потока // ТВТ. 2012. Т. 50. № 6. С. 793-798.
11. Волчков Э.П., Макаров М.С. Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковом потоке // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 2. С. 19-31.
12. EckertE.,WeiseW. Thetemperatureofunheatedbodiesinahigh-speedgasstream // NACATM 1000. 1941. 21 p.
13. Ackerman G. Plate thermometer in hight velocity flow with turbulent boundary layer

//Forschung aufdem Gebietedes Ingenieurwesens. 1942. Vol. 13. pp. 226-235.

14. K. Bammert, J. Rurik, H. Griepentrog. Highlights and future developments of closed-cycle gas turbines // J. Eng. Gas Turbines Power. 1974. Vol. 96. № 4. pp 342-348. DOI: 10.1115/1.3445856.
15. E.A. Mock. Closed Brayton cycle system optimization for undersea, terrestrial and space applications.NASA / CASI. N7922. 1970. 97 p.
16. 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, N. 4, pp. 863-873. DOI: 10.2514/1.27664.
17. 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. 1993. AIP-CP-271. Vol. 2. pp. 1065-1071.
18. El-Genk M.S. High-Energy Utilization, Dual-Mode System Concept for Mars Missions //Journal of Propulsion and Power. 2001. Vol. 17. No. 2. pp. 340-346.
19. 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 (STAIF-2002).AIP-CP-608. 2002. pp. 965-971.
20. Kilstra, J.F., Verkooijen, A.H.M. Conceptual Design for the Energy Conversion System of a Nuclear Gas Turbine Cogeneration Plant // Journal of Power and Energy. 2000. Vol. 214. No. 5. pp. 401-411.
21. Wang C., Ballinger R.G., Stahle P.W., Demetri E., Koronowski M. Design of a Power Conversion System for an Indirect Cycle, Helium Cooled Pebble Bed Reactor System //1st International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology. 2002. pp. 22-24.
22. 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.
23. Tournier J.-M., El-Genk M.S., Gallo B.M.Best estimates of Binary Gas Mixtures Properties for Closed Brayton Cycle Space Application // Proceedings of 4th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC):AIAA Paper 2006-4154. 14 p. DOI: 10.2514/6.2006-4154.
24. El-Genk M.S., Tournier J-M. Selection of noble gas binary mixtures for Brayton space nuclear power systems // Proceedings of 4th international energy conversion engineering conference (IECEC): AIAA Paper AIAA-2006-4168. 9 p. DOI: 10.2514/6.2006-4168.
25. K. Bammert, R. Klein. The influence of He-Ne, He-N_2 and He-CO_2 gas mixtures on closed cycle gas turbines // ASME Reference Paper. 74-GT-124. 1974. pp. 1-8.
26. J.R. Belcher, W.V. Slaton, R. Raspect, H.E. Bass, and J. Lightfoot. Working gases in

thermoacoustic engines //J. Acoust. Soc. Am. 1999. Vol. 105.№5.pp. 2677-2684.

27. F.W. Gaicobbe. Estimation of Prandtl numbers in binary mixtures of helium and other noble gases //J. Acoust. Soc. Am. 1994. Vol. 96. № 6. pp. 3568-3580.
28. Moulay El Hassan Tijani. Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration: PhD thesis. Technische Universiteit Eindhoven. 2001. 170 p.
29. А.А. Вассерман, В.П. Мальчевский. Банки данных и автоматизированные информационные системы по теплофизическим свойствам газов и жидкостей// Технические газы.2009.№5.С. 59-66.
30. Pickett P.E., M.F. Taylor, D.M. McEligot. Heated turbulent flow of helium-argon mixtures in tubes // Int. J. Heat Mass Transfer. 1979. Vol. 22.№5. pp. 705-719. DOI: 10.1016/0017-9310(79)90118-2.
31. Taylor M.F., Bauer K.E., McEligot D.M. Internal forced convection to low-Prandtl-number gas mixtures // Int. J. Heat Mass Transfer. 1988. Vol. 31.№ 1. pp. 13-25. DOI: 10.1016/0017-9310(88)90218-9.