

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-2>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN216.pdf>

DOI: 10.15862/130TVN216 (<http://dx.doi.org/10.15862/130TVN216>)

Статья опубликована 16.05.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кочетков А.В., Федотов П.В. Интерпретация опытных данных по сжимаемости газов при различных условиях. Атомно-фотонный газ // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/130TVN216

УДК 533

Кочетков Андрей Викторович

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь¹
Доктор технических наук, профессор
E-mail: soni.81@mail.ru

Федотов Петр Викторович

ООО «Научно-исследовательский центр технического регулирования», Россия, Саратов
Инженер
E-mail: klk50@mail.ru

Интерпретация опытных данных по сжимаемости газов при различных условиях. Атомно-фотонный газ

Аннотация. Показано, что быстрое увеличение теплопроводности газа при больших плотностях обусловлено передачей импульсов молекул газа не посредством взаимного столкновения, как это утверждается в современных теориях, а передачей механических импульсов от фотонов к молекулам. Т.к. скорость фотонов намного выше чем скорость молекул, то и передача тепла (механического импульса молекул) происходит быстрее. Причем, чем выше температура, тем большее влияние приобретает фотонно-молекулярное взаимодействие, вместо молекулярно-молекулярного.

Также показано, что фотоны не только передают механический импульс между молекулами, но и оказывают непосредственное влияние на внутреннее давление газа. При больших плотностях, концентрация тепловых фотонов настолько высокая, что необходимо говорить о молекулярно-фотонном газе, т.к. фотоны не дают сблизиться молекулам газа, для непосредственного контакта. Этим и объясняется повышение коэффициента сжатия газа при не очень высоких температурах.

Некоторое снижение сжимаемости при дальнейшем повышении температуры объясняется излучением газом фотонов за пределы газа.

Ключевые слова: теория реальных газов; лучистый теплообмен; теория Ван дер Ваальса; теплопроводность; плотность; температура; теплоемкость; сжимаемость газов

¹ 410022, г. Саратов, ул. Азина, д. 38 «В», кв. 4

Введение

Библиография данной научной проблемы вполне характеризуется перечнем [1-12]. Отметим, что механизм теплопроводности, описанный в статье [4], применим только к области малых плотностей.

Именно при малых плотностях теплопроводность газа повышается линейно. Но в области высоких плотностей теплопередача повышается по кубической параболе (рис. 1), т.е. согласно уравнению:

$$\lambda(\rho, T) = a_0(T) \rho^3 + a_1(T) \rho^2 + a_2(T) \rho + a_3(T).$$

Т.е., как уже сказано в [4] реализуется какой-то другой механизм, отличный от механизма, описанного выше.

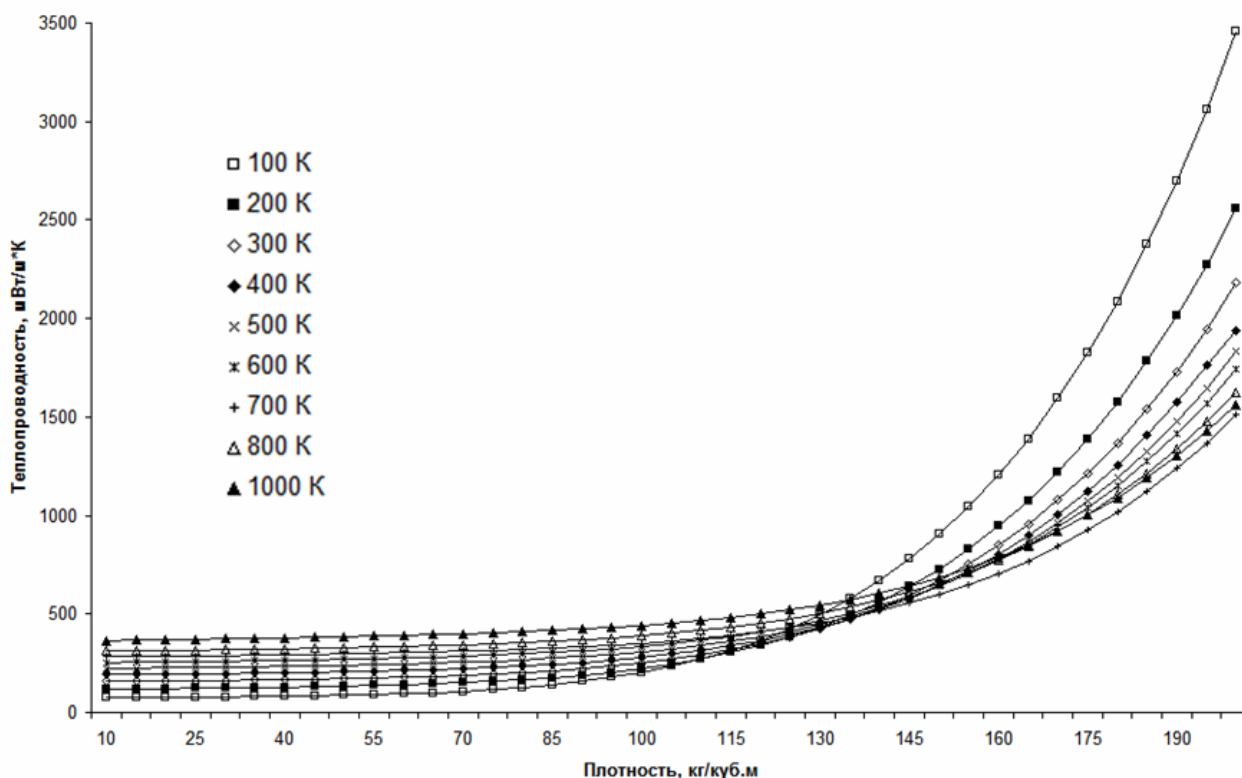


Рисунок 1. Теплопроводность гелия при больших плотностях по данным [10]

Постановка проблемы

Отличия теплопроводности газов при большой плотности в том, что при малых плотностях молекулы газа сталкиваются относительно редко. Так как средняя длина пробега молекул относительно большая, то при больших плотностях средняя длина пробега существенно сокращается, т.о. фотоны излучаются чаще, в силу вынужденного излучения [6].

Другими словами, если при малых плотностях энергия фотонов в основном находится в молекулах в поглощенном виде, то при больших плотностях атомы ударяются настолько часто, что в основном фотоны находятся в свободном (излученном) состоянии.

Но есть еще одно явление, при малых плотностях газа излученные фотоны могут проходить между молекул, т.к. расстояние между молекулами достаточно большое. А при больших плотностях, когда расстояние между молекулами малое и фотоны уже не могут свободно проходить между молекулами, они оказываются запертыми в клетке из молекул.

В свою очередь, согласно [5] фотоны не только поглощаются и излучаются, но и передают механический импульс молекулам, значит, толкают молекулы, причем фотоны давят на молекулы со всех сторон.

В результате давление фотонов не допускает сближения молекул. Таким образом, фотоны играют намного более существенную роль, чем при малых плотностях газа. Т.к., фотонов становится много, а молекулы расположены плотно, то фактически получается состояние молекулярно-фотонного газа. Основной поток передачи тепла идет уже не путем передачи от молекулы к молекуле, согласно модели идеального газа (МКТ), а путем столкновений фотонов с молекулами, при которых, происходит передача импульса и поглощение фотона. Такая передача тепла проходит намного быстрее, т.к. скорости фотонов намного превышают скорости молекул.

Если при малых плотностях газа передача тепла фотон-молекула играет подчиненную роль, а передача тепла от молекулы к молекуле основную, то при больших плотностях, наоборот передача тепловой (кинетической) энергии от молекулы к молекуле становится второстепенной, а на первый план выходит передача тепла от фотонов к молекулам.

Такое поведение газов может показаться странным, по крайней мере, высказанная гипотеза сильно противоречит всем постулатам современной молекулярной теории газов.

Но при внимательном рассмотрении экспериментальных данных все становится на свои места.

Пример

Рассмотрим параметр сжимаемости для гелия. Коэффициент сжимаемости газа есть отношение относительного изменения объема к изменению давления:

$$z = \frac{\Delta V}{V * \Delta p},$$

здесь: V – объем, ΔV – изменение объема, Δp – изменение давления [12, с. 67].

В термодинамике применяется несколько иное значение термина «сжимаемость». «Сжимаемость (коэффициент сжимаемости или фактор сжимаемости) – это безразмерный коэффициент, определяемый эмпирически, учитывающий отклонение от уравнения состояния идеального газа:

$$pV_M = zRT,$$

здесь: p – давление, V_M – молярный объем, z – коэффициент сжимаемости, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура» [11, с. 66].

Иногда пользуются следующим определением «Коэффициент сжимаемости газа - отношение объемов реального и идеального газов при одинаковых условиях, т. е. при одних и тех же давлении и температуре» [2]. Фактор сжимаемости идеального газа всегда равен единице. Именно отклонение фактора сжимаемости реальных газов от единицы и говорит о степени отклонения данного газа от идеального.

Можно предложить следующую формулировку в термодинамике, что коэффициент сжимаемости – это сопротивление сжатию реального газа, по отношению к сопротивлению сжатия идеального газа.

Опытные данные показывают, что фактор сжимаемости газа зависит от двух параметров: от температуры и плотности газа.

Зависимость сжимаемости для гелия от плотности (давления) может быть качественно интерпретирована в рамках современной теории реальных газов, т.к. современная теория газов основана на теории Ван дер Вальса, в рамках которой вводятся только поправки на конечные размеры молекул газа и потенциальные взаимодействия между молекулами. При повышении плотности уменьшается средние расстояния между молекулами, то не нулевые размеры молекул.

Вполне возможно, это играет важную роль в увеличении сопротивления газов сжатию.

Но при попытках получить количественные результаты выясняется проблемы современной теории реальных газов. При практических расчетах приходится вводить эмпирические коэффициенты. На самом деле современная теория реальных газов, основанная на теории Ван дер Вальса, не может объяснить поведение фактора сжимаемости, потому что при расстояниях между молекулами в газе при обсуждаемых параметрах таково, что увеличение отталкивания никак не может проявиться.

На рис. 2 приведен типичный график межмолекулярного взаимодействия.

По графику видно, что отталкивание появляется только при расстояниях между молекулами менее r_0 , где r_0 – это размер молекулы.

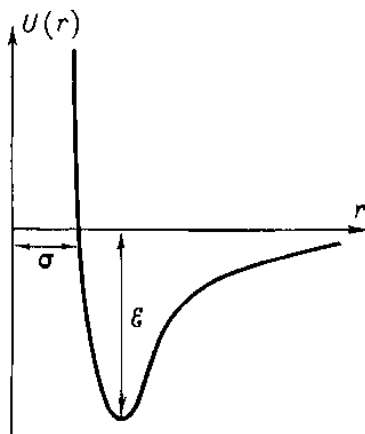


Рисунок 2. Зависимость потенциала $U(r)$ межмолекулярного взаимодействия Леннарда-Джонса от расстояния r между молекулами. Расстояние $r = \sigma$ — наименьшее возможное расстояние между неподвижными молекулами, ϵ — глубина «потенциальной ямы» (энергия связи молекул) [8]

Пока средние расстояния между молекулами превышают размеры молекул, согласно современным теориям должно наблюдаться притяжение между молекулами. Только когда молекулы сближаются на расстояния меньше средних размеров молекул, опять же согласно современным теориям, будет наблюдаться отталкивание.

В тоже время опыты показывают несоответствие с подобными гипотезами и теориями. Рассмотрим график зависимости коэффициента сжимаемости при температуре 300 К (рис. 3).

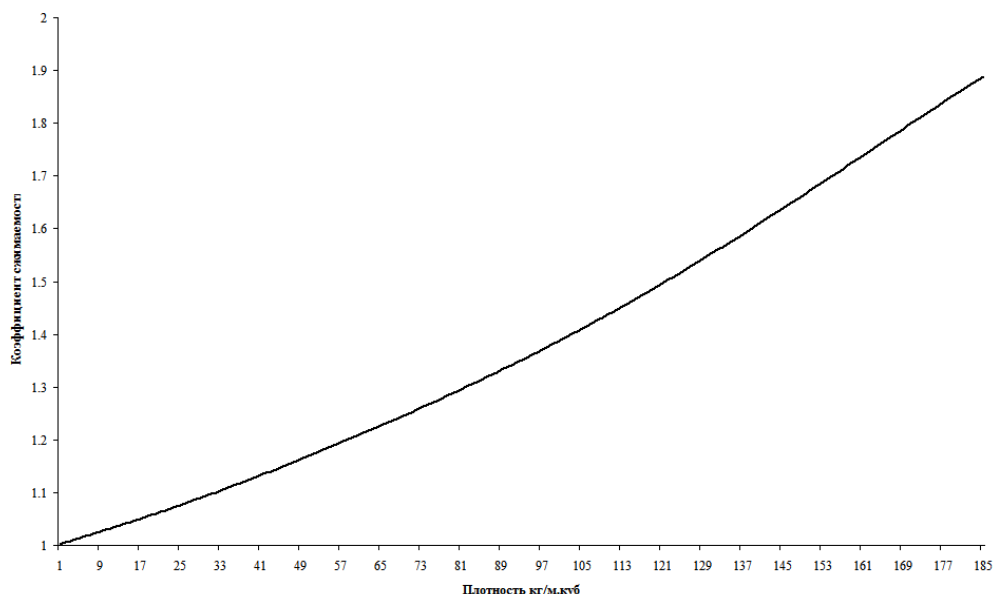


Рисунок 3. Коэффициент сжимаемости гелия при температуре 300 К

График зависимости коэффициента сжимаемости гелия, изображенный на графике (рис. 3) почти прямая. Функция сжимаемости с погрешностью менее $R^2 < 0,01\%$ аппроксимируется уравнением:

$$z = 0,00001 \rho^2 + 0,0027 \rho + 1,0013,$$

где: ρ – плотность, z – коэффициент (фактор) сжимаемости.

На графике (рис. 3) видно, что коэффициент сжимаемости (фактор сопротивления сжатию) всюду повышается. Хотя согласно принятой теории межмолекулярного взаимодействия по мере увеличения плотности сжимаемость должна уменьшаться в силу увеличения притяжения молекул газа по мере сближения молекул (рис. 2).

Такое поведение должно быть (согласно современной теории газов) до полного сближения молекул газа. Тем не менее опытные данные показывают наоборот, что сопротивление сжатию растет при увеличении плотности до самых высоких плотностей.

Причем расстояния между атомами гелия даже при самых высоких плотностях (200 кг/м^3) легко подсчитать, зная радиус атома гелия, равный $1,05 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, и массу, равную $6,64 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Из расчетов получается, что минимальное расстояние между атомами гелия при плотности 200 кг/м^3 равно $3,11 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Т.е. более чем в десять раз превышает радиус атома. Естественно, ни о каком отталкивании (по современным теориям) речи быть не может.

Что же касается зависимости фактора сжимаемости от температуры, то интерпретация такой зависимости также выходит за рамки возможностей современной теории газов.

Типичное поведение фактора сжимаемости гелия показано на рис. 4².

² У других газов графики коэффициента сжимаемости могут иметь другой вид (прим. авт.).

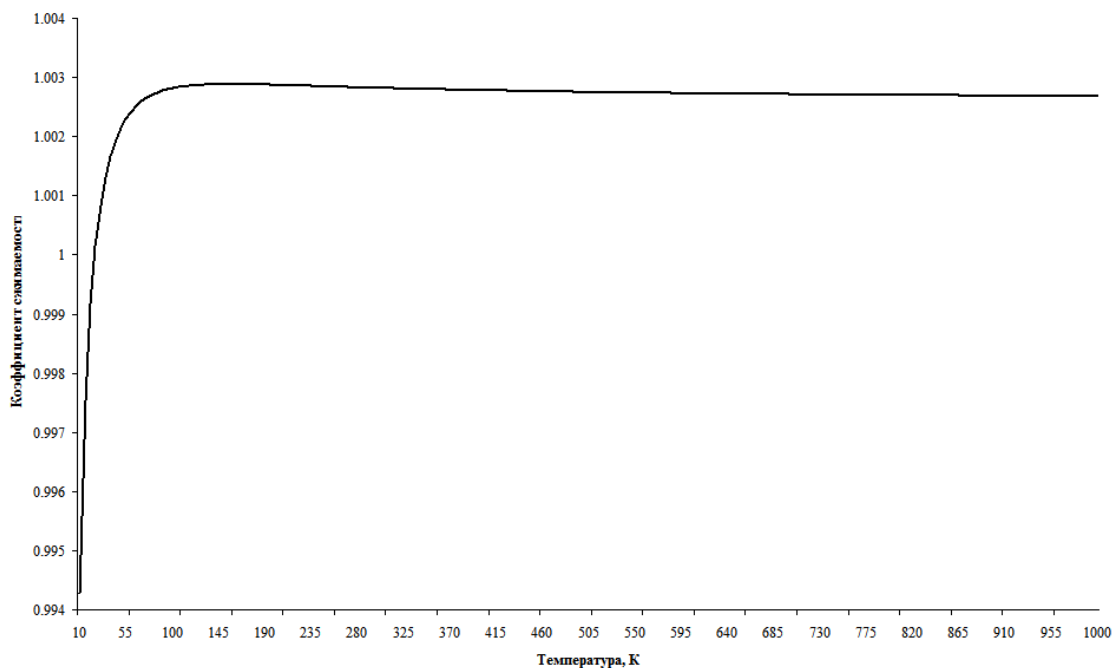


Рисунок 4. Сжимаемость гелия при плотности 1 кг/куб. м в диапазоне температур от 10 К до 1000 К по данным [10]

На графике (рис. 4) явно видны две области, в которых коэффициент сжимаемости меняет свое поведение. В области от 10 К до 150 К коэффициент сжимаемости гиперболически увеличивается. Причем в области температур до 25 К коэффициент сжимаемости меньше единицы. Т.е., сжимаемость гелия при температурах менее 25 К меньше, чем у идеального газа. В этом диапазоне температур решающее значение имеет притяжение молекул гелия друг к другу, причем этот фактор пересиливает все остальные факторы, препятствующие сближению молекул газа. При температуре примерно 150 К наблюдается максимум, выше 150 К фактор сжимаемости гелия медленно спадает (рис. 5).

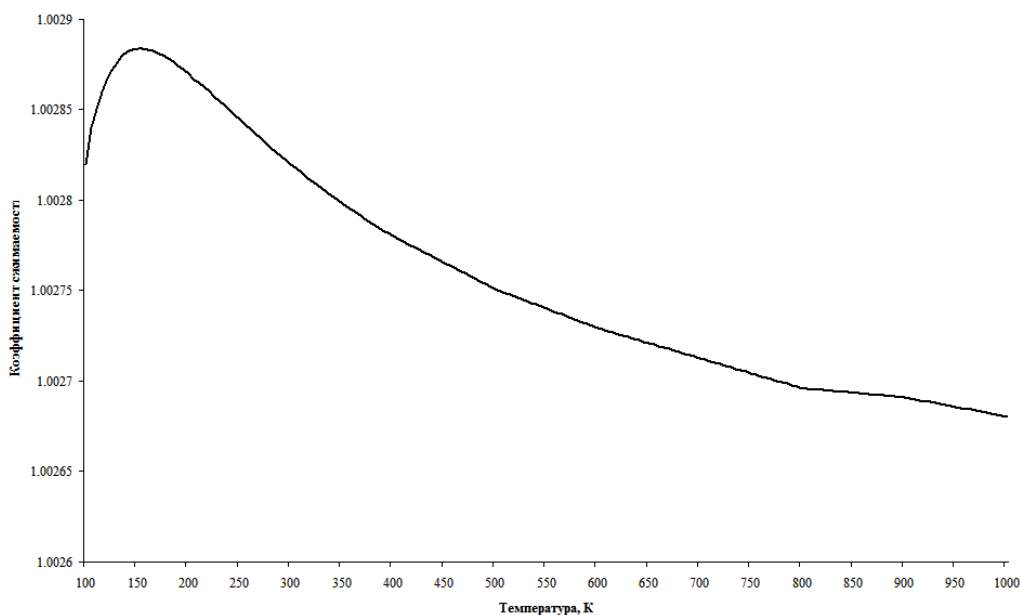


Рисунок 5. Сжимаемость гелия при плотности 1 кг/м³, в диапазоне температур от 100 К до 1000 К по данным [10]

Современные теории реальных газов объяснить поведение фактора сжимаемости не могут. Причем в области малых температур и, тем более, в области средних и больших температур. В самом деле, при одинаковой плотности газа (а именно такие графики и приведены на рис. 4 и 5) взаимодействие молекул не может зависеть от температуры по любой из современных теорий межмолекулярного взаимодействия в газах.

В то же самое время гипотеза, высказанная авторами в [4], объясняет такое поведение газа.

Решение проблемы

Сначала остановимся на объяснении зависимости сжимаемости от плотности. В [4] выдвигается гипотеза, что основное значение в процессе отталкивания между молекулами газов играют тепловые фотоны, которые поглощаются и излучаются молекулами газа. Как при поглощении, так и при излучении фотоны передают молекуле механический импульс, именно этот импульс и играет основную роль в броуновском движении [5], он же играет основную роль в противодействии сжиманию газов. Причем, как сказано в [4], при повышении плотности газа возрастает и количество фотонов, принимающих участие в отталкивании молекул. Отсюда и следует повышение коэффициента сжимаемости при повышении плотности гелия.

Зависимость коэффициента сжимаемости от температуры сложнее, тем не менее, имеет логическое обоснование в рамках выдвинутой гипотезы.

При малых температурах решающее значение имеет притяжение молекул газа между собой, как это предполагается в современных теориях межмолекулярного взаимодействия. По мере повышения температуры растет энергия тепловых фотонов, которыми обмениваются молекулы газа. Согласно гипотезе авторов, фотоны не только излучаются и поглощаются молекулами газа, но и передают механический импульс при поглощении и излучении фотонов. Именно этот импульс фотонов и создает дополнительное давление между молекулами газа. Причем более энергичные фотоны (излучаемые при повышенной температуре) передают больший импульс, и соответственно, фактор сжимаемости (сопротивление газа сжатию) для гелия растет с ростом температуры, в диапазоне до 150 К.

Для того, чтобы понять причину снижения фактора сжимаемости гелия при температурах выше 150 К необходимо рассмотреть излучательную способность газов.

«Газы, так же как и твердые тела, обладают способностью излучать, поглощать и пропускать лучистую энергию» [9].

«В основу практических расчетов лучеиспускания газов положен закон четвертой степени абсолютной температуры, хотя газы не подчиняются точно этому закону³. Такое допущение условно, но оно упрощает расчеты. Для уточнения затем вводится поправка на относительную излучательную способность газа, определяемую экспериментально» [1].

«Точное изучение закона излучения газов показывает, что интенсивность излучения водяных паров пропорциональна T^3 , углекислого газа – $T^{3.5}$. Тем не менее в технических расчетах (для удобства) принимают для газов закон излучения твердого тела – закон четвертой степени T^4 . Однако в этом случае для компенсации слишком сильной зависимости излучения от температуры (T^4) приходится в отличие от твердых тел вводить зависимость

³ Закон Стефана – Больцмана (прим. авт.).

коэффициента излучения газов от температуры, соответственно уменьшая его с ростом температуры» [9, с. 44].

«Таким образом, тепловой поток который излучает газ в пространство, с достаточной для технических целей точностью, может быть выражен формулой аналогичной формуле для твердого тела:

$$q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \gg [9, \text{с. 45}].$$

Здесь: $q_{\text{л}}$ – излучение газа, ε – относительная излучательная способность газа, C_0 – постоянная Стефана–Больцмана, T – абсолютная температура.

«Твердые тела для тепловых лучей практически непрозрачны, поэтому поглощение и излучение происходит в поверхностном слое. Газы для лучей являются в той или иной степени прозрачными, поэтому излучение и поглощение у них происходят в некотором объеме и определяются количеством молекул встречающихся на пути луча. Количество молекул на пути луча пропорционально геометрической длине луча и плотности газа» [9, с. 45].

Обсуждение результатов

Анализируя законы излучения газов можно утверждать, что излучение газов растет с ростом температуры, хотя и не так быстро как для твердых тел. Тепловые фотоны, излученные молекулами газов, находящимися в глубине толщины газа, проходят некоторое расстояние в глубине объема газа и частично поглощаются другими молекулами того же газа. Именно поэтому излучательная способность газа ниже, чем у твердых тел. Тем не менее, при температурах выше 150 К главенствующую роль начинает играть излучение за пределы газа.

Тепловые фотоны, которые уходят за пределы газа, перестают оказывать расширяющее воздействие на молекулы газа. По мере роста излучательной способности газа, точнее, по мере того, как некоторая часть фотонов уходит из межмолекулярного взаимодействия газа, падает внутреннее давление газа (обусловленное расталкивающим действием фотонов на молекулы газа), и, соответственно, уменьшается сопротивление газа сжатию.

Основное значение при рассмотрении поведения реального газа принадлежит не молекулярно кинетическим взаимодействиям, а механическому взаимодействию молекул газа и тепловых фотонов.

Выводы

1. Как сказано в [4], при небольших плотностях газов наблюдается линейное повышение теплопроводности газа по мере увеличения плотности. Это объясняется линейным повышением количества столкновений молекул газа в единицу времени по мере повышения плотности.
2. При больших плотностях газов в действие вступает другой механизм теплопроводности, в этом случае основную роль начинают играть тепловые фотоны, переизлучаемые атомами, причем поток фотонов настолько плотный, что они расталкивают атомы и не дают им сблизиться для передачи импульса непосредственно от атома к атому. Механические импульсы передаются от фотона к атому. Т.к., в действительности механический импульс передается от молекулы к молекуле, следует говорить о передаче механического импульса от молекулы к молекуле не напрямую, как это принято считать в молекулярно-

кинетических теориях газов, включая и теорию Ван дер Ваальса, а через посредство фотонов.

3. Т.к. при большой концентрации атомов концентрация переизлученных фотонов также возрастает, то наступает такой момент, когда атомы в доминирующей степени воспринимают непосредственное давление фотонов. Получается нечто, похожее на модель **атомно-фотонного газа**. Это состояние сродни плазме, но наблюдаться должно при не высоких температурах, при которых наблюдается обычная «горячая» плазма. Вторым отличием атомно-фотонного газа от плазмы является то, что в горячей плазме присутствуют не атомы, а ионы и электроны. В атомно-фотонном газе («холодной плазме») присутствуют обычные атомы и молекулы газа, разделяемые тепловыми фотонами.
4. Другим доказательством влияния на поведение газов влияния тепловых фотонов при различных условиях могут служить опытные данные по сжимаемости газов при различных условиях.
5. Объяснить поведение функции сжимаемости современные теории реальных газов не в состоянии. Ни при изменении плотности и тем более при различных температурах. Т.к. согласно современным теориям отталкивание молекул должно наблюдаться только при сближении молекул меньше размеров молекул. А от температуры сжимаемость газов не должна зависеть вовсе.
6. Гипотеза о существенном влиянии тепловых фотонов на механические свойства газов может объяснить поведение коэффициента сжимаемости газов.
7. При увеличении плотности газа коэффициент сжимаемости растет потому, что вместе с увеличением плотности газов растет и количество фотонов, оказывающих механическое влияние на молекулы газа.
8. При повышении температуры растет энергия тепловых фотонов, поэтому растет и фактор сжимаемости (сопротивление газа сжатию). Т.к. более энергичные фотоны оказывают более сильное механическое влияние (сильнее расталкивают) на молекулы газа. Именно поэтому коэффициент сжимаемости растет в диапазоне температур от 10 К до 150 К.
9. При температурах более 150 К количество тепловых фотонов, оказывающих механическое влияние на молекулы газа, падает, т.к. увеличивается излучение фотонов за пределы газа. Все большее количество фотонов уходит из объема газа и чем больше фотонов уходит за пределы газа, тем меньше влияния на внутреннее давление газа оказывают фотоны.
10. Уменьшение количества фотонов в объеме газа снижает внутреннее давление газа и, соответственно, коэффициент сжимаемости снижается.
11. Основной вывод состоит в том, что только учет механического влияния тепловых фотонов позволит полностью объяснить все свойства газов и правильно, не только качественно, но и количественно, интерпретировать опытные данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балайка Б., Сикора К. Процессы теплообмена в аппаратах химической промышленности. - М.: Машгиз. 1962. 351 с.
2. Геологический словарь. В 2 томах. Том 1 / Ред.: К.Н. Паффенгольц, Л.И. Боровиков, А.И. Жамойда и др. - М.: Недра. 1973. 942 с.
3. Кочетков А.В., Федотов П.В. Уточнение перечня базовых параметров термодинамического состояния газа // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Том 8. №2. [Электронный ресурс]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/103TVN216.pdf>.
4. Кочетков А.В., Федотов П.В. Необходимые дополнения к теории реальных газов // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Том 8. №2. [Электронный ресурс]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/104TVN216.pdf>.
5. Кочетков А.В., Федотов П.В. Об излучении атомов и молекул // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2016. №4 (18). [Электронный ресурс]. URL: [http://trts.esrae.ru/pdf/2016/4\(18\)/7.doc](http://trts.esrae.ru/pdf/2016/4(18)/7.doc).
6. Крушев А.А. и др. Анализ квантовых механизмов в термодинамике, при формировании интенсивностей спектров, эволюции нуклидов в Метагалактике / А.А. Крушев, Д.А. Крушев, Дм.А. Крушев, Н.И. Славщик, П.А. Крушев. - Минск: «Четыре четверти». 2010. 60 с.
7. Кунин Т. Температура. - М.: Мир. 1985. 448 с.
8. Межмолекулярное взаимодействие // Большая советская энциклопедия. - М.: Советская энциклопедия. 1969-1978.
9. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн. 2. / А.П. Васильев, В.А. Кузнецов и др. - М.: Высшая школа. 1993. 368 с.
10. Свойства и процессы рабочих тел и материалов атомной энергетики. Интерактивный справочник Александрова А.А., Орлова К.А., Очкова В.Ф. [Электронный ресурс]. URL: <http://twt.mpei.ac.ru/tthb/npp/>.
11. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. - Л.: Химия. 1971. 704 с.
12. Таблицы физических величин / Под. Ред. И.К. Кикоина. - М.: Атомиздат. 1976. 1008 с.

Kochetkov Andrey Viktorovich

Perm national research polytechnical university, Russia, Perm
E-mail: soni.81@mail.ru

Fedotov Petr Viktorovich

JSC Research Center of Technical Regulation, Russia, Saratov
E-mail: klk50@mail.ru

Interpretation of skilled data on compressibility of gases under various conditions. Nuclear and photon gas

Abstract. It is shown that the rapid increase in gas thermal conductivity at high densities due to the gas molecules pulse transmission is not through mutual collision, as alleged in the modern theories and peredachechey mechanical pulses of photons to the molecules. Because speed of photons is much higher than the velocity of the molecules, then the heat transfer (mechanical momentum of the molecules) is faster. Moreover, the higher the temperature, the greater the effect becomes photonic molecular interaction, to conduct molecular molecular. It is also shown that photons do not only transmit a mechanical pulse between molecules, but also have a direct effect on the internal gas pressure. At high densities, the concentration of thermal photons is so high that it is necessary to talk about molecular photon gas, as photons are not allowed to approach the gas molecules, for direct contact. This explains the increase in gas compression ratio at not very high temperatures.

Some decrease in the compressibility at higher temperatures is due to photon emission gas outside the gas.

Keywords: theory of real gases; radiative heat transfer; theory of Van der Waals; thermal conductivity; density; temperature; heat capacity; compressibility of gases

REFERENCES

1. Balayka B., Sikora K. Protsessy teploobmena v apparatakh khimicheskoy promyshlennosti. - M.: Mashgiz. 1962. 351 s.
2. Geologicheskiy slovar'. V 2 tomakh. Tom 1 / Red.: K.N. Paffengol'ts, L.I. Borovikov, A.I. Zhamoyda i dr. - M.: Nedra. 1973. 942 s.
3. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. Utochnenie perechnya bazovykh parametrov termodinamicheskogo sostoyaniya gaza // Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2016. Tom 8. №2. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/103TVN216.pdf>.
4. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. Neobkhodimye dopolneniya k teorii real'nykh gazov // Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2016. Tom 8. №2. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/104TVN216.pdf>.
5. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. Ob izluchenii atomov i molekul // Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve. 2016. №4 (18). [Elektronnyy resurs]. URL: [http://trts.esrae.ru/pdf/2016/4\(18\)/7.doc](http://trts.esrae.ru/pdf/2016/4(18)/7.doc).
6. Krushev A.A. i dr. Analiz kvantovykh mekhanizmov v termodinamike, pri formirovanii intensivnostey spektrov, evolyutsii nuklidov v Metagalaktike / A.A. Krushev, D.A. Krushev, Dm.A. Krushev, N.I. Slavshchik, P.A. Krushev. - Minsk: «Chetyre chetverti». 2010. 60 s.
7. Kunin T. Temperatura. - M.: Mir. 1985. 448 s.
8. Mezhmolekulyarnoe vzaimodeystvie // Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya. - M.: Sovetskaya entsiklopediya. 1969-1978.
9. Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigateley. V 2 kn. Kn. 2. / A.P. Vasil'ev, V.A. Kuznetsov i dr. - M.: Vysshaya shkola. 1993. 368 s.
10. Svoystva i protsessy rabochikh tel i materialov atomnoy energetiki. Interaktivnyy spravochnik Aleksandrova A.A., Orlova K.A., Ochkova V.F. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://twt.mpei.ac.ru/tthb/npp/>.
11. Rid R., Shervud T. Svoystva gazov i zhidkostey. - L.: Khimiya. 1971. 704 s.
12. Tablitsy fizicheskikh velichin / Pod. Red. I.K. Kikoina. - M.: Atomizdat. 1976. 1008 s.