

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2018, №1, Том 10 / 2018, No 1, Vol 10 <https://esj.today/issue-1-2018.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/16SAVN118.pdf>

Статья поступила в редакцию 29.01.2018; опубликована 28.02.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кочетков А.В., Федотов П.В. Условные и истинные адиабаты // Вестник Евразийской науки, 2018 №1, <https://esj.today/PDF/16SAVN118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Kochetkov A.V., Fedotov P.V. (2018). Conditional and true adiabats. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 1(10). Available at: <https://esj.today/PDF/16SAVN118.pdf> (in Russian)

УДК 533

Кочетков Андрей Викторович

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

Федотов Петр Викторович

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

Условные и истинные адиабаты

Аннотация. В статье производится подробный разбор опытов Клемана-Дезорма и Гей-Люссака. На основе методического анализа упомянутых опытов и сравнения результатов с другими опытами адиабатических процессов сделан вывод, что все адиабатические процессы делятся на два класса: условно или квази адиабатические и истинно адиабатические процессы.

Принципиальные различия условно адиабатических и истинных адиабатических процессов состоят в изменении температуры в адиабатическом процессе. В условно адиабатических процессах температура остается постоянной, в истинно адиабатических процессах температура изменяется.

Процессы в опытах Клемана-Дезорма и Гей-Люссака, так как температура в начале и в конце опытов остается постоянной, должны быть отнесены к условно адиабатическим процессам. В опытах Э. Дарвина и Дальтона температура изменялась, поэтому эти опыты должны быть отнесены к истинным адиабатическим процессам.

Уравнение адиабаты Пуассона описывает условно адиабатические процессы, т. к. в неявном виде, но строго требует выполнения условия постоянства температуры.

Ключевые слова: адиабатические процессы; опыты по исследованию адиабатических процессов: Клемана-Дезорма; Гей-Люссака; Э. Дарвина и Дальтона; методы определения адиабатической постоянной; адиабата Пуассона

Введение

Начнем рассмотрение адиабатических процессов с общих определений.

«Процесс, происходящий без подвода и отвода тепла, называется адиабатическим» [5, с. 75].

Известно уравнение:

$$PV^\gamma = \text{const}$$

«Это уравнение называется *уравнением Пуассона*. Оно является уравнением *адиабаты*, т. е. кривой, графически изображающей квазистатический адиабатический процесс. Величина γ называется *адиабатической постоянной*» [5, 75].

Адиабатическая постоянная γ численно равна отношению теплоемкостей газа при постоянном давлении C_p и при постоянном объеме C_v . Т. е. $\gamma = C_p / C_v$.

Клеман и Дезорм в 1819 г. предложили и осуществили метод измерения отношения теплоемкостей $\gamma = C_p / C_v$ для газов.

Рассмотрим внимательно опыт Клемана и Дезорма. Рассмотрение этого опыта важно, т. к. метод, разработанный Клеманом и Дезормом, является одним из классических методов определения показателя адиабаты в уравнении Пуассона, описывающего адиабатические процессы по терминологии современной науки.

«Опишем теперь, вслед за Дезормом и Клеманом, опыт, который они сами считали лучшим. Температура воздуха была 12,5 °С, барометрическое давление 766,5 мм рт. ст.¹ Эвакуировали воздух из баллона А через кран В, пока давление не сделалось равным 752,69 мм рт. ст. Вакуум в баллоне измеряли водяным барометром. Далее открывали кран М, воздух входил в баллон, по водяному барометру наблюдали отсутствие вакуума² и закрывали кран М. Операции открытия и закрытия крана М продолжались около 2/3 секунды. После закрытия крана М вода в водяном барометре начинала подниматься со все уменьшающейся быстротой. После прекращения поднятия воды в водяном барометре он показывал вакуум 3,61 мм рт. ст., т. е. давление воздуха в баллоне равно $(766,5 - 3,61) = 762,89$ мм рт. ст.

Лаплас сделал следующее заключение из опыта Дезорма и Клемана. Впуск воздуха в баллон через кран М происходит так быстро, что повышение давления воздуха в баллоне до барометрического давления (766,5 мм рт. ст.) является адиабатическим процессом. Температура при адиабатическом сжатии воздуха повышается с 12,5 °С до t °С. После закрытия крана М воздух в баллоне постепенно охлаждается³ (при постоянном объеме) до температуры 12,5 °С и давление воздуха становится равным 762,89 мм рт. ст.» [2, с. 71].

Из цитаты явно следует, что уже Лаплас понимал, что в опыте Дезорма и Клемана процесс двух стадийный, адиабатическим является только первая стадия, на второй стадии процесс изохорический. Тем не менее методика Дезорма-Клемана используется для определения показателя адиабаты в уравнении Пуассона.

В современной литературе адиабатические процессы разделяются на квазистатические и неквазистатические. «Уравнение адиабаты (Пуассона) относятся только к квазистатическому адиабатическому процессу. Для неквазистатических адиабатических процессов эти уравнения не применимы.

Разумеется, если отступления от неравновесности невелики, то можно пользоваться уравнением адиабаты и для не вполне равновесных процессов. Такие условия выполняются, например, в опытах Клемана и Дезорма по определению адиабатической постоянной газа γ » [5, с. 76].

¹ Имеется в виду атмосферное давление и температура воздуха в лаборатории (прим. авт).

² Имеется в виду, что давление в баллоне уравнивалось с атмосферным (прим. авт.).

³ С передачей тепла в атмосферу, потому что баллон не теплоизолирован (прим. авт.).

Но как мы видим из описания опыта Клемана и Дезорма, процесс не является истинно адиабатическим. Сначала производится адиабатическое выравнивание давления в баллоне с атмосферой с повышением температуры воздуха в баллоне, а затем изохорическое выравнивание температуры воздуха в баллоне с атмосферой. Тем не менее, этот процесс называется квазистатическим адиабатическим процессом, для которого применяется уравнение Пуассона.

Примечательна другая цитата из учебника: «Адиабатический процесс подчиняется условию $\delta Q \equiv 0$. Следует подчеркнуть, что отсутствие теплообмена нельзя формулировать в виде условия $Q = 0$. В самом деле, из равенства $Q = 0$ вовсе не следует, что на отдельных участках рассматриваемого процесса нет теплообмена между системой и окружающей средой. Оно означает лишь, что в целом за весь процесс алгебраическая сумма количеств теплоты, подведенной к системе и отведенной от нее, равна нулю» [1, с. 200].

Причем любопытно не то, что в разряд адиабатических процессов включены не только процессы без теплообмена, но и процессы с теплообменом при выполнении условия баланса принятой и отданной теплотой системы, а то, что даже с учетом такой поправки процесс в опыте Клемана и Дезорма не соответствует определению адиабатических процессов. Т. к. на первом этапе процесс идет без теплообмена (адиабатически), а на втором этапе идет отдача тепла из системы в атмосферу (охлаждение) и эта передача тепла никак не скомпенсирована передачей тепла в обратную сторону.

Постановка задачи

Разрешить этот парадокс и определить, для каких процессов можно применять уравнение Пуассона, а для каких – не стоит, может помочь ход рассуждений Пуассона при выводе своего уравнения.

«Пуассон при выводе уравнения предполагал, что теплота – свойство системы, и на этом основании написал уравнение бесконечно малого адиабатического процесса. Разбор облегчится, если воспользоваться геометрическим представлением процесса.

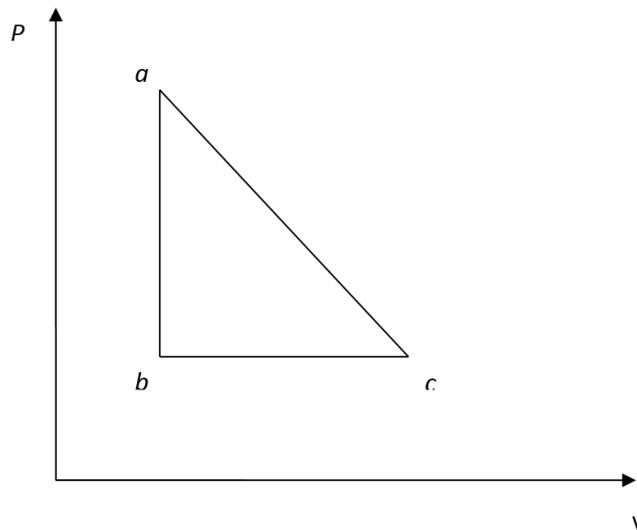


Рисунок 1. Круговой процесс Пуассона на диаграмме $P - V$ [2, с. 130]

Начальное состояние системы изображается точкой a на диаграмме $P - V$, а бесконечно малый адиабатический процесс – линией ac . Бесконечно малое количество теплоты dq на пути ac равно нулю по самому определению адиабатического процесса.

Пуассон предполагает, что бесконечно малое суммарное количество теплоты на пути abc тоже равно нулю, и пишет уравнение адиабаты» [2, с. 130].

Отметим важный момент, который в научной литературе обходится молчанием.

Диаграмма $P - V$ это диаграмма изотермических процессов. Т. е., Пуассон предполагая для адиабатических процессов, что количество тепла полученного или отданного системой равно нулю, молчаливо делает и другое предположение, а именно, что температура в адиабатическом процессе остается постоянной. Только в этом случае возможно применение диаграммы $P - V$.

Гипотеза, что при адиабатическом процессе температура остается неизменной, появилась не случайно. Начало положено знаменитым опытом Гей-Люссака.

«В 1807 г. Гей-Люссак поставил свой знаменитый опыт, оказавший большое влияние на развитие термодинамики.

Опыт Гей-Люссака.

«Я взял два баллона с двумя тубусами, каждый баллон емкостью в двенадцать литров. Эвакуировав оба баллона⁴, я наполнил один из баллонов газом, с которым я хотел произвести опыт. Спустя двенадцать часов я соединил баллоны свинцовой трубкой и открыл краны. Газ устремился тогда в эвакуированный баллон, пока не установились равные давления в обоих баллонах. Во время перехода газа менялись показания термометров⁵, тщательно мною отмечаемые.

Следующая таблица содержит средние результаты шести опытов, которые я провел с воздухом.

Давление воздуха, метры рт. ст.	0,76	0,38	0,19
Холод, произведенный в баллоне № 1, °C	0,61	0,34	0,20
Теплота, произведенная в баллоне № 2, °C	0,58	0,34	0,20

Мне кажется, что я имею достаточное право заключить, что при переходе воздуха из одного баллона в другой, равной емкости и эвакуированный, изменения температуры в каждом баллоне равны».

Аналогичные опыты, которые Гей-Люссак провел с водородом и двуокисью углерода, дали тот же результат: температура газа в баллоне, из которого выходил газ, понижалась, температура газа в баллоне, куда входил газ, повышалась. Понижение температуры в одном баллоне равнялась ее повышению в другом» [2, с. 64].

И далее И.Р. Кричевский пишет: «Но ни Гей-Люссак, ни два других выдающихся исследователя, присутствующих при проведении опыта, Лаплас и Бертолле не поняли смысла опыта» [2, с. 66].

Несмотря, на то, что никто из присутствующих при опыте не поняли смысла проведенных опытов, Гей-Люссак сделал никем не опровергаемый вывод, что при адиабатическом процессе температура системы остается неизменной. И уже на основании этого заключения Пуассон и вывел свое знаменитое уравнение.

Но чуть ранее были проведены другие опыты с прямо противоположным результатом. «Э. Дарвин – дед Чарльза Дарвина – обнаружил (1788 г.) охлаждение воздуха, выходящего из

⁴ Имеется в виду вакуумирование (прим. авт.).

⁵ Установленных в каждом баллоне (прим. авт.).

духового ружья после выстрела. Дальтон наблюдал (1802 г.) понижение температуры воздуха, находившегося под колпаком воздушного насоса, при эвакуировании воздуха и повышение температуры при впуске воздуха под колпак.

В 1803 г. один рабочий французского оружейного завода самостоятельно изобрел воздушное огниво. Воздушное огниво – это трубка, закрытая с одного конца и снабженная поршнем. При быстром вдавливании поршня воздух в трубке настолько нагревается, что воспламеняется трут, прикрепленный к поршню» [2, с. 63]. Принцип зажигания топливной смеси при быстром сжатии газовой смеси применяется в цикле Дизеля и т. д. В связи с этим И.Р. Кричевский пишет: «Исследования адиабатических процессов в газах привели к установлению важных фактов, которые, однако, не получили объяснения. Не было понятно, почему в опыте Дарвина изменение объема газа сопровождается изменением температуры, а в опыте Гей-Люссака изменение объема газа происходит без изменения температуры» [2, с. 72].

Принято объяснять, что для правильного истолкования результатов опыта Гей-Люссака требуется привлечение первого начала термодинамики или закона сохранения энергии. «Прошло еще 35 лет, прежде чем Р. Майер дал правильное истолкование опыту Гей-Люссака и обосновал тем самым метод вычисления эквивалента теплоты» [2, с. 65].

С одной стороны это так, но с другой стороны, первое начало термодинамики не исправляет методическую ошибку опыта Гей-Люссака, другими словами, не объясняет различий в выводах разных опытов адиабатических процессов.

Ошибка Гей-Люссака состояла в том, что в своем знаменитом опыте он проводил не один адиабатический процесс, а два. Опыт Гей-Люссака с воздухом можно проводить таким образом, чтобы объединение двух адиабатических процессов было явно видно.

Предложения по решению задачи

Для этого нужно не объединять два баллона, а проводить опыты отдельно.

Усовершенствованный опыт Гей-Люссака будет выглядеть следующим образом.

Возьмем два баллона одинакового объема. Из одного баллона откачаем воздух, а в другой накачаем воздух под давлением. После этого, не соединяя баллоны между собой, откроем краны на баллонах. В баллон № 1 (вакуумированный) воздух будет входить из атмосферы, и температура в баллоне будет повышаться, как это наблюдал Дж. Дальтон. В баллоне № 2 (с повышенным давлением внутри) температура будет понижаться, т. к. воздух будет выходить из него, как это наблюдали и Дж. Дальтон и Э. Дарвин.

Разделение опыта Гей-Люссака на два процесса даст полное согласие с результатами других опытов адиабатических процессов. Т. к. при всех адиабатических процессах при изменении объема газа, изменяется не только давление, но и температура. Причем при адиабатическом сжатии, повышается и давление и температура, а при адиабатическом расширении и давление и температура понижается. Признание этого факта освободит от ошибки, которая повторяется до сих пор в научной и учебной литературе. А именно, уравнение Пуассона описывает условно или квази адиабатические процессы, т. к. в неявном виде уравнение Пуассона требует сохранения в неизменности температуры газа в адиабатическом процессе. В случае опытов Клемана и Дезорма протекают последовательно два процесса: истинный адиабатический и изохорный. В случае опытов Гей-Люссака два адиабатических процесса условно объединяются в единый процесс.

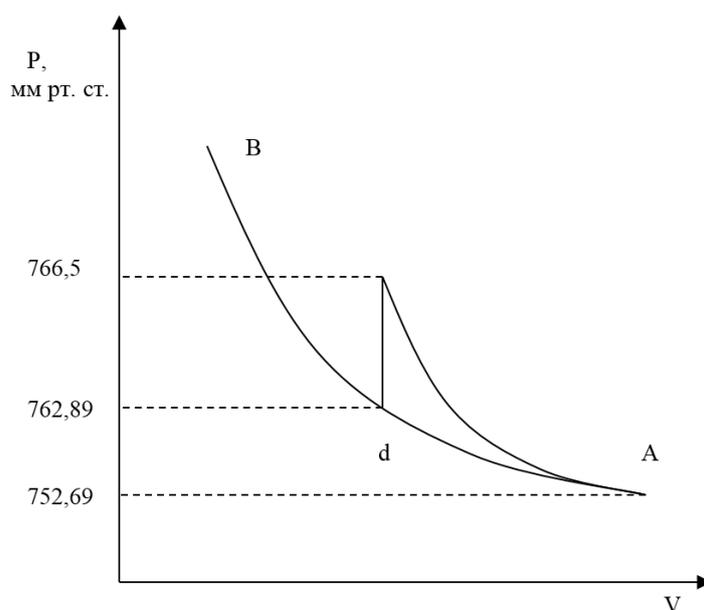
В случае истинных адиабатических процессов происходит изменение температуры, хотя передача тепла отсутствует. Это очень важное отличие реальных адиабатических процессов и

тех условно адиабатических процессов, для которых Пуассон выводит свое уравнение. И которые до сих пор в литературе считаются истинно адиабатическими.

Обсуждение результатов

Если при адиабатическом процессе при изменении объема изменяются не только давление, но и температура, то это означает, что адиабатический процесс двухпараметрический. А для графического описания процесса недостаточно применения диаграммы $P - V$, в виде линии на плоскости. Реальный адиабатический процесс описывается трехмерной поверхностью на полной диаграмме состояния $P - V - T$.

Истинная адиабата отклоняется от условной адиабаты Пуассона, причем эти отклонения можно явно увидеть на графике (рис. 2), построенном исходя из представленных Клеманом и Дезорма данных.



AB – условная адиабата Пуассона, Ac – истинная адиабата, cd – изохорическое охлаждение

Рисунок 2. Сравнение истинной и условной адиабат в опытах Клемана и Дезорма (рис. авт.)

Из рис. 2 видно, что при истинном адиабатическом процессе сжатия⁶ давление растет быстрее, чем это должно быть, исходя из изотермической условной адиабаты Пуассона. Это совершенно логично, т. к. при адиабатическом сжатии давление повышается не только от уменьшения объема занимаемого газом, но и от повышения температуры. Снижение давления вдоль линии cd на рис. 2 как раз и характеризует ту часть повышения давления, которая происходит вследствие повышения температуры при истинном адиабатическом процессе.

При адиабатическом расширении будет наблюдаться та же картина, только в обратном порядке. Давление при истинном адиабатическом расширении будет падать быстрее, чем это следует из графика условно адиабатической адиабаты Пуассона, т. к. при истинном

⁶ В оригинальном опыте Клемана и Дезорма на стадии адиабатического процесса происходит адиабатическое сжатие, т. к. в начале опыта газ содержался в баллоне при пониженном давлении, при открытии крана воздух поступал в баллон до уравнивания давления с атмосферным. При этом в баллон поступило некоторое количество газа m_2 . При этом масса газа m_1 в баллоне, первоначально занимающая весь объем баллона, стала занимать только его часть. Т. е. произошло адиабатическое сжатие (прим. авт.).

адиабатическом расширении будет понижаться температура, а, значит, давление будет падать не только от увеличения объема, занимаемого газом, но и от понижения температуры.

Различия между условно адиабатическими и истинными адиабатическими процессами можно увидеть, сравнивая экспериментальные данные.

Так из опытов Клемана и Дезорма следовало, что отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме c_p/c_v , причем показатель адиабаты Пуассона равна именно этому отношению: $\gamma = c_p/c_v$ [4, с. 349], [3, с. 145].

Из опытов Клемана и Дезорма получено значение $\gamma = 1,37$, а из опытов для скорости звука, согласно уравнению Лапласа получалось $\gamma = 1,42$ [2, с. 72].

Значение, получаемое из опытов со скоростью звука, следует считать более точными, т. к. в опытах Клемана и Дезорма процесс условно адиабатический, а в опытах по определению скорости звука – истинно адиабатический. Эффект распространения звука в воздухе правильно описал Лаплас. «Работа Лапласа (1816 г.) внесла ясность. По мнению Лапласа, сжатие воздуха при прохождении звуковой волны сопровождается выделением теплоты. Но выделившаяся теплота не имеет времени рассеяться и остается полностью в слое воздуха» [2, с. 67].

«Метод вычисления c_p/c_v по экспериментальным данным для скорости звука в газах нашел впоследствии большое применение» [2, с. 72].

Методическая основа настоящей статьи представлена в работах авторов [6-15].

Выводы

1. Адиабатические процессы, которые в настоящее время считаются однообразными, на самом деле делятся на два вида: истинные и условно адиабатические.

2. Истинные адиабатические процессы происходят с изменением температуры. Условно или квази адиабатические процессы происходят при неизменной температуре.

3. Изотермичность условных адиабатических процессов достигается различными искусственными приемами. Например, в опытах Клемана и Дезорма неизменность температуры достигается в процессе изохорного теплообмена с атмосферой. В случае опытов Гей-Люссака изотермичность достигается объединением двух противоположных адиабатических процессов (адиабатического расширения и адиабатического сжатия) в единый условно адиабатический процесс.

4. Уравнение Пуассона описывает условно адиабатические процессы, происходящие при условии $T = const$.

5. При истинных адиабатических процессах изменение давления за счет изменения температуры происходит быстрее, чем это следует из графика адиабаты Пуассона.

6. При истинном адиабатическом сжатии давление растет быстрее условной адиабаты Пуассона, потому что при этом повышается температура и давление растет не только за счет уменьшения объема, но и за счет увеличения температуры. При истинном адиабатическом расширении картина обратная, давление понижается не только за счет увеличения давления, но и за счет понижения температуры. Адиабата Пуассона учитывает увеличение давления только за счет уменьшения объема, игнорируя изменение давления за счет изменения температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики. Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. – М.: Высшая школа. 1973. 384 с.
2. Кричевский И.Р. Понятия и основы термодинамики. – М.: Госхимиздат, 1962. 444 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Статистическая физика. Часть I. – М.: Наука. 1976. – 584 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Том I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – М.: Наука. 1970. 511 с.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука. 1990. 591 с.
6. Федотов П.В., Кочетков А.В. Уравнения состояния в молекулярно-фотонной теории газов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 9, 5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/28TVN517.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
7. Кочетков А.В., Федотов П.В. Полная классификация моделей идеального газа Идентификационный номер статьи в журнале: 01TVN517 // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, 5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/01TVN517.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. Рус., англ.
8. Кочетков А.В., Федотов П.В. Расширение понятия «идеальный газ» // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, 4 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/29TVN417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. Рус., англ.
9. Кочетков А.В., Федотов П.В. Уравнения состояния газа и модель идеального газа // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, № 3 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/62TVN317.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. Рус., англ.
10. Федотов П.В., Кочетков А.В. Молекулярная кинетически-потенциальная модель идеального газа // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, № 3 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/63TVN317.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. Рус., англ.
11. Федотов П.В., Кочетков А.В. Тепловая фотоника. О фазовых переходах первого и второго рода // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», Том 8, № 5 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/68TVN516.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
12. Кочетков А.В., Федотов П.В. Необходимые дополнения к теории реальных газов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Т. 8, № 2 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/104TVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. экрана. Яз. англ., рус. DOI: 10.15862/104TVN216.
13. Кочетков А.В., Федотов П.В. Уточнение перечня базовых параметров термодинамического состояния газа // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Т. 8, № 2 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/103TVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ., рус. DOI: 10.15862/103TVN216.
14. Кочетков А.В., Федотов П.В. Интерпретация опытных данных по сжимаемости газов при различных условиях. Атомно-фотонный газ // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Т. 8, № 2 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. DOI: 10.15862/130TVN216.
15. Кочетков А.В., Федотов П.В. Проблемы гармонизации радикальных противоречий в аксиоматике естественных наук. – М.: Машиностроение, 2015. – 320 с. ISBN 978-5-94275-800-4.

Kochetkov Andrey Viktorovich

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

Fedotov Petr Viktorovich

JSC research center of technical regulation, Saratov, Russia
E-mail: klk50@mail.ru

Conditional and true adiabats

Abstract. The article provides a detailed analysis of the experiments of Clement-Desmor and Gay-Lussac. Based on the methodological analysis of the above experiments and comparing the results with other experiments of adiabatic processes, it is concluded that all adiabatic processes are divided into two classes: conditionally or quasi adiabatic and truly adiabatic processes.

The fundamental differences between conditionally adiabatic and true adiabatic processes consist in a change in the temperature in the adiabatic process. In conditionally adiabatic processes the temperature remains constant, in truly adiabatic processes the temperature changes.

The processes in the experiments of Clement-Desorme and Gay-Lussac, the temperature at the beginning and at the end of the experiments remains constant, and therefore they must be attributed to conditionally adiabatic processes. In the experiments of E. Darwin and Dalton, the temperature varied, and therefore these experiments should be attributed to true adiabatic processes.

The Poisson adiabatic equation describes conditionally adiabatic processes, since in an implicit form, but strictly, requires the fulfillment of the condition of constant temperature.

Keywords: adiabatic processes; experiments on the study of adiabatic processes: Clement-Desorma; Gay-Lussac; E. Darwin and Dalton; methods for determining the adiabatic constant; the Poisson adiabat