

Корректность знаков слагаемых энергетических воздействий

в первом законе термодинамики и газодинамике

А.В. Мамошкин, теплоэнергетик, РФ, Neptyn@mail.ru

Аннотация. Знаки слагаемых энергетических воздействий в первом законе термодинамики в дифференциальной форме предлагается определять по физическому принципу сохранения суммарных изменений энергии системы и наружной среды, а в интегральной форме - математическими операциями интегрирования по направлению потока газа (или последовательных состояний неподвижного газа). Рекомендуется отказаться от использования теплотехнического правила знаков и условных понятий физически не существующих отрицательных энергий.

Ключевые слова: первый закон термодинамики, теплотехническое правило знаков, термодинамика газовых потоков, система уравнений закона обращения воздействий.

В различных областях энергетики при разработке тепловых машин, турбин, компрессоров, реактивных двигателей и т.п. используется математический аппарат прикладной газовой динамики, где важным разделом является вывод и анализ системы дифференциальных уравнений обращения воздействий на одномерные стационарные газовые потоки, впервые сформулированные в 1946 году Вулисом Л.А. [1]. В 1950 году автор [2] приводит анализ результатов пяти видов воздействий (геометрическое dF/F , расходное dG/G , тепловое dQ , механическое dL , и трения $dL_{тр}$) на поток газа. Эта система пяти дифференциальных уравнений, называемая часто **законом обращения воздействий** (ЗОВ), позволяет выполнить расчет относительных изменений параметров движущегося газа (скорости $d\omega/\omega$, температуры dT/T , давления dP/P , плотности $d\rho/\rho$, числа Маха dM^2/M^2) при различных воздействиях, а также определить условия перехода через скорость звука ($M=1$), например, для ускорения (торможения) потока газа при геометрическом воздействии необходимо сменить сужение на расширение (или наоборот), при тепловом воздействии необходимо сменить нагрев на охлаждение (или наоборот), при механическом воздействии необходимо сменить отвод работы на подвод работы (или наоборот).

Относительное изменение скорости потока по уравнению ЗОВ имеет вид:

$$\frac{d\omega}{\omega}(M^2-1) = -\frac{k-1}{a^2}dQ - \frac{1}{a^2}dL - \frac{k}{a^2}dL_{тр} + \frac{dF}{F} - \frac{dG}{G} \quad (1)$$

По этому уравнению при отводе механической работы (механическое сопло, турбина) $dL > 0$ и движении с трением $dL_{тр} > 0$ поток газа ускоряется $d\omega/\omega > 0$ в дозвуковой области при $M < 1$. Подвод механической энергии крыльчаткой (вентилятор в газоходе), наоборот замедляет поток! Эти парадоксальные выводы были в дальнейшем повторены многими авторами практически во всех последующих трудах по газодинамике [3]...[7]. Этот вывод авторы подтверждают не только формулами, но и рисунками:

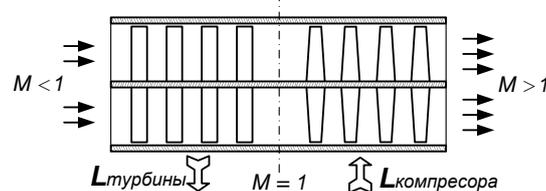


Рис.1

Здесь математика победила логику и физический смысл.

Трудно объяснить логически, с позиции сохранения энергии, выработку газовым потоком механической энергии в турбине и одновременное увеличение при этом кинетической энергии потока на выходе.

Вышеотмеченные логические противоречия ускорения потока газа при отборе механической работы и при движении с трением в канале постоянного сечения послужили предпосылкой для описанного далее анализа корректности знаков слагаемых энергетических воздействий в первом законе термодинамики для движущегося газа, являющегося исходным уравнением системы ЗОВ.

Первый закон (начало) термодинамики, утверждающий сохранение энергии в тепловых процессах, со времени его появления 1842-1847 г., практически не оспаривался и не был предметом специальных обсуждений, в отличие от многочисленных трудов по второму закону (началу) термодинамики.

Уравнения первого закона термодинамики для неподвижного и движущегося газа имеют общепринятые виды математической записи. Полемика была и частично сохраняется лишь по вопросу разграничения названий: первый закон или первое начало термодинамики, или уравнение сохранения энергии, или по Вукаловичу М.П...[10] «первое начало термодинамики – закон сохранения и преобразования энергии».

Рассмотрим уравнение сохранения энергии для движущегося газа в общепринятой форме записи в газодинамике [1]...[7], в которой согласно трактовке закона, подведенное к газу количество тепла dQ расходуется на выработку механической работы dL и на повышение энергии газа (внутренняя, потенциальная и кинетическая энергии):

$$\frac{R}{k-1}dT + d\left(\frac{P}{\rho}\right) + \frac{1}{2}d\omega^2 = dQ - dL \quad (2)$$

Напрашивается очевидный вопрос: почему добавляемая к газу тепловая энергия dQ и отнимаемая от газа механическая энергия dL записываются по другую сторону равенства, а не вместе с энергетическими слагаемыми газа?

После выполнения перестановки слагаемых получим:

$$\frac{R}{k-1}dT + d\left(\frac{P}{\rho}\right) + \frac{1}{2}d\omega^2 - dQ + dL = 0 \quad (3)$$

Становится еще непонятнее, математически получается, что количество тепла, наоборот, отводится, а механическая работа соответственно подводится к энергии газового потока. Почему?

Это кажущееся противоречие можно объяснить, вероятно, тем, что уравнение сохранения энергии (2), в противоположность своему названию, написано **не по физическому принципу сохранения энергии**. Как можно сохранять энергию газового потока, добавляя и отнимая от него разное количество энергии? Уравнение составлено **по принципу сохранения баланса преобразований** тепловой и механической энергий, полученных /отданных потоком газа {правая часть уравнения (2)} в суммарное изменение внутренней, потенциальной и кинетической энергий потока {левая часть уравнения (2)}.

Поэтому в классической трактовке закона [10] «закон сохранения и преобразования энергии» уместно исключить союз «и».

Существенный недостаток такой записи заключается в том, что полученное / отданное газом количество теплоты dQ и работы dL физически не существуют в газе (нет теплорода и флогистона, нет живых сил), а сразу преобразуются в изменения параметров газа, определяющих перечисленные энергетические составляющие потока. Поэтому, если для уравнения энергии принимается принцип баланса преобразования энергий, похожий на «бухгалтерский учет», то впоследствии, в уравнениях системы ЗОВ, мы вынуждены сопоставлять изменения параметров газа с виртуальными количествами энергии: полученного газом тепла и отданной работы, так как в начальной 1-й точке потока их еще нет, а во 2-й точке потока их уже нет.

Как определяются знаки энергетических воздействий в первом законе термодинамики по уравнению (2)? Исходное уравнение первого начала термодинамики изначально записывается, как правило, в интегральной форме, а знаки энергетических воздействий устанавливаются по так называемому **теплотехническому правилу знаков** для теплоты и работы [2], [8].

По этому правилу «ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМИ считают теплоту, подводимую к системе и работу, совершаемую системой (отводимую от газового потока), а ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ – теплоту, отводимую от системы и работу, совершаемую над системой».

Следует отметить, что существуют еще другие правила знаков: **термодинамическое правило знаков** международного союза химиков ИЮПАК, по которому, наоборот, «работу, совершаемую системой, считают отрицательной», а также **термохимическое правило знаков**, по которому меняется знак для количества тепла.

При этом все три формулировки правила знаков недостаточно корректны, так как имеют смысл только при условии одновременного уточнения относительного взаимного расположения слагаемых энергетических воздействий к знаку равенства в записи уравнения энергии.

Возможность использования трех соглашений правил знаков, и даже предлагаемое их комбинирование! [8] для двух энергетических воздействий количества тепла и работы наглядно свидетельствует о существовании проблемы окончательной нерешённости правильности знаков для них.

Например, в немецких учебниках по термодинамике, а также в некоторых учебниках на русском языке [13] любая подводимая к системе энергия (теплота и работа) считается ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ, а отводимая от системы энергия – ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ, что не согласуется с **теплотехническим правилом знаков**.

В большинстве трудов технической термодинамики на русском [1]...[7] и английских языках первое начало термодинамики записывается на основе приведенного ранее **теплотехнического правила знаков** для теплоты и работы [8], в формулировке которого не уточняется форма энергетических воздействий. Авторы правил не видят математической разницы алгебраического суммирования интегральной Q и L или дифференциальной dQ и dL форм записи.

Формулы, поясняющие правила [8], приведены для смешанной формы записи, например, в виде: $dU = Q - L$.

Переход к дифференциальной или интегральной формам уравнения первого начала термодинамики приводит к противоречию между правилами знаков и математическими правилами дифференцирования и интегрирования (принятыми намного раньше первого начала термодинамики), в которых приращения рассчитываются по разности значений конечной и начальной точек потока (или состояний для неподвижного газа), и тем самым однозначно математически определяют знаки результатов воздействий, что будет показано далее в примерах.

В дополнение к описанным вариантам выбора знаков слагаемых энергетических воздействий в первом законе термодинамики, можно отметить также вариант формулы универсальной записи в дифференциальной форме со знаками « $\pm dQ \pm dL$ » [7], где предлагается сделать выбор знаков слагаемых самим, в зависимости от условий применения (подвод или отвод тепла и работы) по *теплотехническому правилу знаков*, что математически также некорректно.

Дополнительную путаницу в проблему знаков слагаемых энергетических воздействий внесли используемые, как в классической термодинамике [11], так и в современных трудах [8], утверждения в правилах знаков, что теплота и работа отводятся от системы при $Q < 0$ и $L < 0$, и озвучивается при этом существование ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ значений энергий, имеющих очевидно условный характер, вследствие принятия правила оценки всех процессов с точки зрения самой системы. В технической термодинамике тепловая и механическая энергии отрицательными быть не могут, это противоречит их физическому смыслу, тепло передается только от горячего к холодному. Отрицательными могут быть только изменения энергий. Невозможно отнять от газового потока или окружающей среды количества тепла или работы, превышающие их энергетические возможности. Правильной записью отвода количества теплоты или работы должна быть запись $-Q < 0$ и $-L < 0$, при этом необходимо исключить понятия отрицательных энергий. Для наглядности, простой пример, когда мы прибавляем или отнимаем яблоки из корзины, то считаем их соответственно со знаками «+» или «-», но при этом, не появляются отрицательные яблоки и мы не можем отнять их больше содержимого корзины.

Другой пример, цикл холодильной установки, где количество теплоты системы уменьшается $\Delta Q = C(T_2 - T_1) = Q_2 - Q_1 = -Q < 0$, изменение энергии системы отрицательное, температура падает, но не меньше нуля по шкале Кельвина и без появления отрицательной энергии.

Крайне удивительно, что после 180 лет применения первого закона термодинамики знаки слагаемых энергетических воздействий в нем обосновываются не физическими или техническими принципами, математическими или логическими аргументами, а многочисленными соглашениями по правилам знаков, противоречащими друг другу, и использованием в научных трудах в уравнении энергии различных знаков слагаемых, зависящих от предпочтений и трактовок закона авторами.

Кардинально решить вопрос определения знаков энергетических воздействий, без использования условных правил, можно, по мнению автора, построив уравнение первого закона термодинамики в соответствии с его предназначением - ***по физическому принципу сохранения изменений энергии***, для чего необходимо использовать не только составляющие энергии газового потока, но и учитывать энергетические изменения наружной среды (внешней системы) $dQ_{н.с}$ и $dL_{н.с}$.

Действительно, как известно [9], «***суммарное изменение энергии системы и окружающей среды равно нулю при любых процессах их взаимодействия***». Иначе говоря, совокупная энергия системы и среды остается неизменной, когда суммарное ***изменение*** энергии системы и окружающей среды не меняется. Этот известный основополагающий принцип сохранения суммарных изменений энергии системы и окружающей среды практически не нашел применения в трудах классической термодинамики при описании первого закона термодинамики.

При использовании физического принципа сохранения изменения энергии в классических уравнениях (2) и (3) появляются слагаемые, характеризующие взаимодействие с наружной средой и уравнения приобретают следующий вид:

$$\sum dE + \sum dE_{н.с} = \frac{R}{k-1} dT + d\left(\frac{P}{\rho}\right) + \frac{1}{2} d\omega^2 + dQ_{н.с} + dL_{н.с} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{R}{k-1} dT + d\left(\frac{P}{\rho}\right) + \frac{1}{2} d\omega^2 = -dQ_{н.с} - dL_{н.с}. \quad (5)$$

При сравнении уравнений энергии (2) и (5), обнаруживаем, что при использовании принципа сохранения изменения энергии, в уравнении первого закона термодинамики в дифференциальной форме, меняются знаки механических воздействий на противоположные!, что наглядно видно, если вернуться из уравнения (5) к прежней записи (2), произведя обратную очевидную замену: $-dQ_{н.с} = dQ$; $-dL_{н.с} = dL$;

$$\frac{R}{k-1} dT + d\left(\frac{P}{\rho}\right) + \frac{1}{2} d\omega^2 = dQ + dL \quad (6)$$

Следовательно, в наиболее часто используемой в технической литературе [1]...[7] записи уравнения энергии в дифференциальной форме для движущегося газа (2) допускается грубая ошибка знака механического воздействия dL !, которое следует записывать с противоположным знаком, а именно, по уравнению (6).

В основном из-за этой ошибки в газодинамике выдвигается логически абсурдное утверждение об увеличении скорости газа дозвуковых потоков при выработке механической энергии. После замены знака механического воздействия $-dL$ на dL (или правильнее на $-dL_{н.с}$) в уравнении (1) логическое противоречие снимается, газ по уравнению замедляется после отбора механической работы и ускоряется при подводе механической энергии.

Важно отметить, что знаки энергетических воздействий в дифференциальной форме в уравнениях (5) и (6) предопределены только за счет использования предложенного принципа сохранения изменений энергии системы и наружной среды, без использования при этом ***привила знаков*** и математических правил, а

также вне зависимости от направлений воздействий (подвод или отвод тепла и работы).

Рассмотрим на примере для движущегося газа по уравнению (5) изменение знаков слагаемых энергетических воздействий при переходе от дифференциальной формы в интегральную. Обозначим для упрощения изменение суммарной энергии газового потока (внутренняя, потенциальная и кинетическая энергии) через dE .

Интегрирование уравнения (5) для интересующего нас случая подвода количества теплоты и отвода механической работы к газовому потоку дает:

$$\int_1^2 dE = - \int_{Q_{н.с}}^0 dQ_{н.с} - \int_0^{L_{н.с}} dL_{н.с}; \rightarrow E_2 - E_1 = Q_{н.с} - L_{н.с} \quad (7)$$

Разность пределов интегрирования энергетических воздействий в уравнении (7) принята по отношению к нулю, так как не зависит от величины полной энергии наружной среды. Для тепла: $Q_2 - Q_1 = 0 - Q_{н.с} = (\sum Q_{н.с} - Q_{н.с}) - \sum Q_{н.с} = - Q_{н.с}$.

Для работы: $L_2 - L_1 = L_{н.с} - 0 = (\sum L_{н.с} + L_{н.с}) - \sum L_{н.с} = L_{н.с}$.

Уравнение (7) обеспечивает баланс суммарных энергий газового потока и наружной среды при переходе от 1-ой точки газового потока ко 2-ой точке, а именно:

$$E_1 + Q_{н.с} = E_2 + L_{н.с} \quad (8)$$

Выведенное интегральное уравнение (7) повторяет классическую запись закона,

$$E_2 - E_1 = Q - L \quad (9)$$

но с существенным отличием - с заменой в первом законе термодинамики для движущегося газа в интегральной форме ранее использовавшихся энергетических воздействий Q и L , полученных /отданных потоком газа (9), на воздействия $Q_{н.с}$ и $L_{н.с}$, полученных /отданных наружной средой (7), с теми же знаками перед ними!, и поэтому общепринятое интегральное **уравнение энергии (9) следует признать ошибочным** для случая подвода количества теплоты и отвода механической работы

Интегрирование уравнения (5) для случая отвода количества теплоты и подвода механической работы к газовому потоку дает, естественно, обратные знаки для интегральных величин по отношению к уравнению (7).

Знаки слагаемых энергетических воздействий в интегральной форме в уравнении (7) определены только за счет математической операции интегрирования в зависимости от направлений воздействий (подвод или отвод тепла и работы), без использования **правила знаков**.

При попытках выполнить те же операции интегрирования энергетических воздействий для газа по уравнению (2) вместо уравнения (7), в общепринятых обозначениях dQ и dL , появляются неопределенности в выборе пределов интегрирования, так как в 1-ой точке газового потока в системе еще нет ни тепла, ни работы, а во 2-ой точке потока тепло Q уже добавлено от наружной среды и получили работу L , только тепло ушло в параметры газа, а работу, выработанную

за счет изменения параметров газа, отдала наружной среде, то есть, их уже нет во 2-ой точке потока.

Замена в уравнении сохранения энергии для движущегося газа (2) виртуальных, расчетных количеств тепла и работы, полученных/отданных газом dQ и dL , на реальные, измеряемые физически приборами, энергетические воздействия от наружной среды $dQ_{н.с}$ и $dL_{н.с}$ в уравнении (5) очевидно более предпочтительна, так как в этом случае понятия внешних воздействий на газовый поток приобретают логический смысл в математической записи уравнения.

Подтверждением того, что в уравнении сохранения энергии для движущегося газа работа должна рассчитываться по формуле (5), с энергетическими воздействиями от внешней среды, может служить практика расчета паровых турбин [14], [15]. Используется формула определения вырабатываемой механической работы на рабочих лопатках паровых активных турбин (аналог механического сопла, без геометрических воздействий), равная разности кинетических энергий пара по абсолютным скоростям на входе и выходе:

$$\frac{1}{2} d\omega^2 = -dL_{н.с}; \text{ или } L_{н.с} = \frac{1}{2} (\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (10)$$

Где: $dL_{н.с}$ (или $L_{н.с}$) – это реальная работа, полученная внешней средой на валу турбины по уравнению (5), а не отданная газом dL по классическому уравнению (2).

Следует отметить, что рассматриваемая проблема газодинамики об увеличении скорости потока после механического сопла нашла отражение не только теоретической трактовке системы уравнений ЗОВ, но и в примерах расчетов в учебниках [2], [6], показывающих рост скорости, что противоречит и логике и уравнению (10). Здесь необходимы пояснения, частично объясняющие путаницу со скоростями. Дело в том, что в расчетах турбин (компрессоров) используются, как известно, два вида скорости: абсолютная и относительная. Для лопаток активной турбины, которые можно считать аналогом механического сопла, абсолютная скорость падает по уравнению (10), а относительная скорость практически не меняется и не дает прироста механической энергии турбины. Для лопаток реактивной турбины, которые можно считать аналогом комбинированного механического и геометрического воздействий, абсолютная скорость падает, как и у активной турбины, а относительная скорость действительно растет за счет реактивности при геометрическом воздействии - уменьшении сечения (но не за счет отбора механической работы), что обеспечивает дополнительную выработку механической энергии.

Следует отметить, что на проблему знаков энергетических воздействий частично повлияло использование в технической литературе неудачных обозначений изменений количества тепла и работы в виде dQ и dL , имеющих условный характер и математически некорректных, так как это равноценно попытке определить разность от разности. Правильнее записывать в уравнениях термодинамики приращения (разности) тепловой и механической энергий со стороны газа (или наружной среды) в виде обозначений dE_Q ($dE_{Q_{н.с}}$) и dE_L ($dE_{L_{н.с}}$), которые при интегрировании превращаются соответственно в

количество тепла $\pm Q$ ($\pm Q_{н.с.}$) и работу $\pm L$ ($\pm L_{н.с.}$), являющимися алгебраическими разностями изменений соответствующих энергий. Однако такое математическое усложнение записи не дает предположительно дополнительных технических преимуществ и поэтому не обязательно к замене общепринятых обозначений.

Рассмотрим также правильность знаков слагаемых в первом законе термодинамики для неподвижного газа, имеющем вид [8]:

$$\Delta U = Q - L \quad (11)$$

или в наиболее часто используемой дифференциальной форме записи [2], [10]:

$$dQ = dU + PdV \quad (12)$$

В этом общепринятом уравнении отсутствует слагаемое работы в явном виде, поскольку вся работа принимается равной работе расширения газа. Некоторые авторы [12] используют в записи уравнения наряду с работой расширения одновременно и обозначения работы в явном виде, оговаривая при этом наличие других видов работы помимо работы расширения:

$$dQ - dL = dU + PdV = dE_0 \quad (13)$$

Применим к этому уравнению ранее использованный принцип сохранения изменения энергии не только к составляющим газа, но и к энергетическим изменениям наружной среды $dQ_{н.с.}$ и $dL_{н.с.}$:

$$dU + PdV + dQ_{н.с.} + dL_{н.с.} = 0 \rightarrow dU + PdV = dE_0 = -dQ_{н.с.} - dL_{н.с.} \quad (14)$$

Интегрирование уравнения неподвижного газа (14) для интересующего нас случая подвода количества теплоты и отвода механической работы дает повторение уравнения (7), как для движущегося газа (E_2 и E_1 – другие):

$$\int_1^2 dE_0 = - \int_{Q_{н.с.}}^0 dQ_{н.с.} - \int_0^{L_{н.с.}} dL_{н.с.}; \rightarrow E_2 - E_1 = Q_{н.с.} - L_{н.с.} \quad (15)$$

Для неподвижного газа мы получили уравнение первого закона термодинамики аналогичное классической записи закона, но с существенным отличием - с заменой ранее использовавшихся энергетических воздействий Q и L , полученных /отданных газом, на воздействия $Q_{н.с.}$ и $L_{н.с.}$, полученных /отданных наружной средой (15), с теми же знаками перед ними!

На основании вышеизложенных пояснений, рекомендуется в первый закон термодинамики для неподвижного газа в дифференциальной форме (13), также как и для движущегося газа, внести изменения путем замены слагаемых энергетических воздействий количества тепла и работы dQ и dL со стороны газа на слагаемые энергетических воздействий со стороны внешней среды $dQ_{н.с.}$ и $dL_{н.с.}$ по уравнению (14).

Следовательно, знаки слагаемых энергетических воздействий в первом законе термодинамики в дифференциальной форме и для движущегося газа и для неподвижного газа должны определяться законом сохранения суммарных изменений энергии системы и наружной среды, а в интегральной форме знаки

определяются математическими операциями интегрирования по направлению газового потока (или последовательных состояний неподвижного газа), без использования *теплотехнического правила знаков*.

ВЫВОДЫ

1. Знаки слагаемых энергетических воздействий в первом законе термодинамики, насчитывающем 180 лет применения, обосновываются не физическими или техническими принципами, математическими или логическими аргументами, а многочисленными соглашениями по правилам знаков, противоречащими друг другу, и использованием в научных трудах различных знаков слагаемых в уравнении, зависящих от предпочтений и трактовок закона авторами.

2. Запись первого закона термодинамики для движущегося газа, принятая в классической термодинамике (2) *по принципу сохранения баланса преобразований тепловой и механической энергий* в энергетические слагаемые газа, и с использованием *теплотехнического правила знаков*, обуславливают грубую ошибку в знаках механической работы. Это приводит, в конечном счете, к логическим противоречиям в газодинамике, в частности в уравнениях закона обращения воздействий (1), к утверждениям об ускорении потока газа при отборе механической работы и при движении с трением, а также к выводу о замедлении потока при подводе к нему механической работы.

3. Предлагается дифференциальные уравнения первого закона термодинамики для движущегося и неподвижного газа составлять на основе *физического принципа равенства нулю суммарных изменений энергии системы и наружной среды*, автоматически предопределяющего знаки всех энергетических воздействий в дифференциальной форме (4), (5), (14).

4. Предлагается интегральные уравнения первого закона термодинамики для движущегося и неподвижного газа определять математическим интегрированием дифференциальных уравнений, составленных по п.3, с выбором пределов интегрирования по направлению газового потока (или последовательных состояний неподвижного газа), в зависимости от условий применения воздействий (подвод или отвод работы и количества теплоты), что однозначно предопределяет знаки энергетических воздействий в интегральной форме уравнения (7), (15), без необходимости применения *теплотехнического правила знаков*.

5. Рекомендуется отказаться от использования в термодинамике технически не обоснованного соглашения в форме «*теплотехнического правила знаков*» для количества тепла и работы, и связанных с ним условных понятий физически не существующих ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ энергий, как вносящих путаницу и неопределенность в знаках слагаемых энергетических воздействий первого закона термодинамики, приводящим в газодинамике к выводам, противоречащим физическому смыслу.

6. Предложенная корректировка уравнения первого закона термодинамики путем использования энергетических слагаемых внешней среды позволяет исправить уравнение относительного изменения скорости потока системы ЗОВ (1) и при этом исключить логическое противоречие, а именно, при отборе механической работы в дозвуковой области происходит не ускорение, а торможение потока газа, подвод механической энергии, наоборот ускоряет поток.

Использованные источники:

1. Вулис Л.А., О законе обращения воздействий в течении идеального газа, ДАН СССР, т. 54, вып. 8 и 9 1946 г; для реального газа – ДАН СССР, т. 56, вып. 8, 1947 г.
2. Вулис Л.А., Термодинамика газовых потоков, 1950 г.
3. Абрамович Г.Н., Прикладная газовая динамика, 3-е изд., 1969, 5-е изд., 1991 г.
4. Дейч М.Е., Техническая газодинамика, 3-е изд., 1974 г., Газодинамика, 1984 г
5. Сергель О.С., Прикладная газодинамика, 1981 г.
6. Сыркин П.Э. и др. Основы прикладной газовой динамики, 2010 г.
7. Бирюк В.В. и др. Течение сжимаемых сред, 2017 г.
8. БСЭ 2004-2017 г., энциклопедии РУНИВЕРСАЛИС, Руни.рф и Википедия.
9. Вейник А.И., Термодинамика реальных процессов, 1991 г.
10. Вукалович М.П., Новиков И.И., Термодинамика, 1972 г
11. Литвин А.М., Техническая термодинамика, 1956 г
12. Кириллин В.А., Техническая термодинамика, 1983 г.
13. Котовский В.И., Техническая термодинамика, 2015 г.
14. Кириллов И.И., Кантор С.А., Теория и конструкции паровых турбин, 1947 г.
15. Белянский С.Я., Ведяев В.А., Тепловая часть электрических станций, 1961 г.

The correctness of the signs of the terms of energy effects in the first law of thermodynamics and gas dynamics

A.V. Mamoshkin, teploenergetik, Russian Federation, Neptyn@mail.ru

Annotation. The signs of the terms of energy effects in the first law of thermodynamics in differential form are proposed to be determined by the physical principle of conservation of the total energy changes of the system and the external environment, and in integral form, the signs are determined by mathematical integration operations in the direction of the gas flow (or successive states of stationary gas). It is recommended to abandon the use of the thermal engineering rule of signs and conventional concepts of physically non-existent negative energies.

Keywords: first law of thermodynamics, thermal engineering rule of signs, thermodynamics of gas flows, system of equations of the law of reversal of effects.