

СЕКЦИЯ 5 ИСТОРИЯ ВАКУУМНОЙ И КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ

Эксергия, К.П.Д., Юбилей ...

*Н.В.Калинин, А.В.Мартынов, Е.И. Калинина
Москва, НИУ МЭИ, ул. Красноказарменная, 14*

Работа посвящена 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ, доктора технических наук, профессора МЭИ Виктора Михайловича Бродянского. Ближайшие коллеги делятся воспоминаниями о совместной работе и общении в жизни с Виктором Михайловичем. Приведены краткие выдержки из работ в последнее десятилетие в развитие технических идей и эксергетической методике, выдвигаемых В.М. Бродянским.

Exergy, KPD, Jubilee. N.V. Kalinin, A.V. Martynov, E.I. Kalinina. The work is dedicated to the 100th anniversary of the birth of the Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor of MEI Victor Mikhailovich Brodyansky. The closest colleagues share their memories of working together and communicating in life with Viktor Mikhailovich. A brief excerpt from the work in the last decade in the development of technical ideas and exergy techniques put forward by V.M. Brodyansky.

Неумолимый вечный двигатель
Время листает свои страницы: годы, пятилетия, десятилетия. Вот и минуло уже 5 лет с предыдущей памятной даты и Виктору Михайловичу Бродянскому – 100 лет!

Знаменательное событие!

Кому как не нам А.В.Мартынову и Н.В. Калинину, его первым ученикам, коллегам, активным продолжателям его научных идей, методов и методик, откликнуться на предложение конференции.

Вспоминая годы, которые нам посчастливилось работать бок о бок с Виктором Михайловичем (а долгое время, работая на кафедре ПТС, он не имел своего кабинета), сидели вчетвером и впятером в одной комнате.

Вспоминаем как, работая над своими диссертациями (Аркадий Владимирович «дул в вихревую трубу», Николай Васильевич (далее А.В. и Н.В.) крутил высокооборотный и шумный детандер), засиделись допоздна и на вопрос Виктора Михайловича « что-то не идете домой» ответили, что усиленно учим термодинамику. Виктор Михайлович рассмеялся и сказал, что мы дураки и термодинамику нельзя учить, а постигать ее непростые и иногда спорные истины надо на конкретных своих же технических вопросах, которыми ты в данный момент занят.

Сколько раз, уже на своих учениках мы убеждались в правоте и целесообразности такого подхода!

Еще одна полезная подсказка была высказана как бы мимоходом Виктором Михайловичем мне (Н.В.), глядя на подготовку к экзамену по иностранному языку для сдачи кандидатского минимума.

Надо сказать, что в то время (начало 60-х) как раз было много публикаций по эксергетическим проблемам на близком мне немецком, а потом и на французском языках. Виктор Михайлович посоветовал сделать наиболее интересную подборку статей для «тысяч», которые в результате легли в основу трех сборников переводов : «Эксергетический метод и его приложения», «Эксергия и Энергия», «Эксергия и Экономика», изданных в течение 1965÷1970г.г. в издательстве МИР.

Использовал Виктор Михайлович и переводы французских материалов для двух замечательных книг о Лазаре и Сади Карно.

И даже при сдаче экзамена по философии с легкой руки и по совету Виктора Михайловича мною (Н.В.) был написан и защищен на экзамене реферат на тему «Объединение

в едином понятии эксергия философских критериев качества и количества в их единстве и противоположности».

Наше становление как преподавателей и научных работников проходило так же и в постоянном рецензировании и критике разных статей и заявок на авторские свидетельства, которые нам Виктор Михайлович регулярно подбрасывал. «Это вам будет полезно, нечего дурака валять».

Особенно много их было (есть и сейчас) со стороны поклонников вечного двигателя и до сих пор для нас работа по обоснованной критике вечного двигателя в разных технических интерпретациях «остается интересным и поучительным эпизодом истории физики и энергетической науки» (Бродянский В.М. Вечный двигатель – прежде и теперь. От утопии – к науке, от науки к утопии. М. Физматлит. 2001г 264 с.)

Есть и конкретные вопросы, в которых Виктор Михайлович, его труды и неумирающие яркие советы постоянно помогают и сейчас в нашей многогранной повседневности.

Один из них – постоянный в научных и методических дискуссиях, это вопрос о КПД. А.В.использовал советы Виктора Михайловича в подготовке сборника задач по курсу «Термодинамические основы трансформации тепла и процессов охлаждения».

Использовал и Н.В.при подготовке последнего издания учебного пособия «Нагнетатели и тепловые двигатели». Издательство МЭИ .2018г. 10 п.л. неоднократно апробированный и наиболее корректный и универсальный подход к определению КПД как отношения создаваемого эффекта к затратам, выраженным в эксергетических величинах.

Большое значение В.М. Бродянский уделял реальной научной работе на действующих установках, так как сам был начальником кислородного цеха на «Московском Автогенном заводе» и защита его кандидатской диссертации была связана с работой кислородных установок.

Затем, когда по приглашению зав. кафедрой профессора Е.Я. Соколова, Виктор Михайлович стал работать в МЭИ на нашей кафедре в лаборатории «Холодильных установок», появилась кислородная установка высокого давления с мощным компрессором на 200 атм. Это была инициатива В.М. Бродянского, и для получения навыка в эксплуатации этой установки А.В. был командирован на «Кислородный завод, где, кроме всего прочего можно было научиться определять концентрацию кислорода на приборе «Гемпель».

Там же впервые под руководством В.М. Бродянского была изготовлена вихревая труба, которую испытывал аспирант Лейтес И.Л., а затем и в МЭИ по инициативе Виктора Михайловича была изготовлена вихревая труба.

Результаты научных исследований неоднократно докладывались на научных конференциях по «вихревому эффекту», которые проводились в Куйбышевском «Авиационном институте» под руководством Меркулова А.П. и в дальнейшем во многих городах таких как Одесса, Николаев, Очаков, где председателем «Вихревых конференций» был неизменно В.М.Бродянский. Все «вихревики» со всего Советского Союза собирались на этих конференциях и многие вопросы, связанные с определением эффективности установок естественно переходили на обсуждение эксергии, которой В.М. Бродянский под руководством профессора И.П. Ишкина посвятил свою дальнейшую работу, переросшую в докторскую диссертацию.

Это был сложный период научной полемики В.М. Бродянского с противниками эксергетического метода, особенно с одесским профессором Д.П. Гохштейном, который отстаивал более сложный энтропийный метод. Однако, будучи блестящим лектором и оппонентом, В.М. Бродянский всегда побеждал, отстаивая более простой и эффективный эксергетический метод анализа.

Большую помощь и поддержку в становлении эксергетического метода оказала и кафедра термодинамики МЭИ и, в особенности, ее заведующий М.П. Вукалович.

Применяемые во многих случаях в учебных и научных изданиях для формирования КПД величины не представляющие эффекта действия того или иного процесса или устройства (например адиабатный или изотермический КПД компрессора) не дают возможность показать создаваемый эффект и на его основе определить эффективность действия.

Также и другой распространенный способ определения эффективности, как отношения составляющих энергетического баланса (того что получим к тому, что затратили) дает во многих широко известных технических примерах в результате значения КПД в рамках

$$\eta = \frac{$E_{\text{получено}}$}{$E_{\text{затрачено}}$} <math><math>\eta < 1</math>, $\eta > 1$$$

что вызывает справедливые недоразумения и нарекания составителей и пользователей.

Это относится, в первую очередь, к холодильным установкам, в которых такой показатель назван только холодильным коэффициентом ϵ (но не КПД!) и особенно в тепловом насосе, в котором подобный коэффициент трансформации μ всегда больше единицы.

Причина превышения численных значений коэффициентов (заметим их никто не называет КПД) «порога единицы» широко известна, тем не менее, не всегда и не всем до конца понимаема.

Она объясняется некорректностью отношения или суммирования разных по качеству видов энергий - работы и теплоты, теплоты разных потенциалов.

Решение возникающего недоразумения наиболее наглядно было представлено создателями, сторонниками и последователями эксергетического метода, оценки эффекта и на его базе эффективности любых процессов трансформации энергии в различных процессах, установках и системах с учетом не только количества, но и качества энергии, в частности его температурного уровня.

С использованием понятия качества энергии становится возможным избежать упомянутых недоразумений введением КПД η_e названным эксергетическим и формировать его в наиболее простом случае (один поток отводится, другой подводится) как $\eta_e = E_3/E_2$

где E_3 – эксергия полученного эффекта

E_2 – эксергия затраченной энергии

Другой немаловажной особенностью является необходимость корректной оценки двухцелевых процессов и установок, а также установок с тремя и более потоками в виде суммарного эффекта.

В таком случае эксергетический КПД η_e представляется как отношение суммарного эффекта $\sum E_3$ к суммарным затратам $\sum E_2$

При энергетическом подходе такое суммирование неправомерно, т.к. потоки неаддитивны.

Величина эксергетического КПД всегда соответствует условию $0 < \eta_e < 1$, т.к. разность $\sum E_2 - \sum E_3 = D$ определяет потери эксергии, тогда как в энергетическом балансе энергия не теряется, а только трансформируется из одних видов в другие.

Ниже приводятся конкретные примеры составления КПД для наиболее распространенных в технике случаев: процессов расширения и сжатия.

Для расширительных машин как силовых (паровых и газовых турбин) так и детандеров (низкотемпературных и высокотемпературных газовых, использующих избыточный перепад давлений) КПД может быть записан как

$$\eta_e^m = \frac{N_m + E_2}{\sum E_{ex}}$$

где N_m - отведенная полезная мощность турбины, отданная генератору, насосу или компрессору;

E_2 - эксергия рабочего тела на выходе турбины;

$\sum E_{ex}$ - сумма потоков эксергии подведенных к турбине

Если на входе в турбину подводится тепло или холод, то

$$\sum E_{ex} = E_{pm\ ex} + E_{Q\ ex}$$

где $E_{pm\ ex}$ - эксергия рабочего тела на входе;

$E_{Q\ ex}$ - эксергия подведенного на входе тепла E_{Qm} или холода E_{Qx} .

Для компрессоров в обобщенном виде КПД определяется как

$$\eta_e^k = \frac{e_2 - e_1}{l_k} = \frac{G_k(e_2 - e_1)}{N_k}$$

где e_2 и e_1 - соответственно эксергии на выходе и входе компрессора

ℓ_k и N_k - соответственно затраченная работа или мощность.

Выражение для эксергетического КПД может быть также использовано и при оценке эффективности компрессорной установки с охлаждением, в которой отводимая теплота полезно используется. В таком случае компрессорная установка должна быть представлена как двухцелевая, производящая два продукта: сжатый воздух и теплоту:

$$\eta_e^{ycm} = \frac{E_{C.B} + E_Q}{N_k} = \frac{e_{C.B}V_{C.B} + Q_{ym}\tau_e}{N_k}$$

где $e_{C.B}$ - эксергия сжатого воздуха в количестве $V_{C.B}$;

Q_{ym} - отводимое и утилизированное тепло

$\tau_e = \frac{T-T_{oc}}{T}$ - коэффициент работоспособности

N_k - потребляемая мощность компрессора.

Показательный пример неправомерного использования разности энтальпии сжатого газа на выходе из нагнетателя компрессорной станции повышения давления в магистрали, продемонстрирован в аналогичной статье в материалах IX конференции, опубликованной в 2014г. [1]

Авторами (Н.В. Калинин и Р.Р. Сагитов) было показано, что использование энтальпии на выходе адиабатного компрессора в качестве составляющей эффекта и далее в определении эффективности приводит к парадоксу: рост энтальпии увеличивает КПД компрессора, но отрицательно сказывается на магистрали, т.к. растут гидравлические потери.

Только эксергетический КПД, но уже не компрессора, а системы компрессор плюс холодильник на выходе дает с использованием эксергетического метода логичный и корректный показатель.

Очень важные и полезные применения эксергетического метода дает использование эксергии при распределении затрат первичной энергии на продукты многоцелевых установок, с учетом не только количества и качества производимого продукта.

Наиболее ярко это проявляется в воздухоразделительных установках, производящих 2-3 и более продуктов [2].

Так при числе « i » продуктов ВРУ доля эксергии, затраченной на выработку i -го продукта разделения воздуха составит

$$m_i = \frac{e_i V_i}{\sum_{i=1}^n e_i V_i} = \frac{E_i}{\sum_{i=1}^n E_i}$$

удельный расход эксергии

$$\bar{E}_i = \frac{m_i N_k}{V_i}$$

где e_i, \bar{E}_i - удельные и полные эксергии продукта;

V_i - количество продукта;

N_k - потребляемая мощность многоцелевой установки.

Методика распределения затрат для многоцелевых ВРУ была в течение 70-80-х лет разработана и апробирована Калининой Е.И. и использована в организациях ГИПРОКИСЛОРОД и ВНИИКРИОГЕНМАШ для определения затрат и тарифов на продукты разделения воздуха.

Литература.

1. Н.В.Калинин, Р.Р.Сагитов, Е.В.Жигулина . Оценка эффективности работы компрессорных станций с использованием эксергетической методики. Материалы IX Международной Научно-технической конференции. Москва. Сокольники 2014г.
2. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М. Энергия. 1973г. 296 с.