

Мићовићеве замисли из педесетих и шездесетих година 19. века о оснивању Хемијског факултета и деоби Природно-математичког факултета, као и раније идеје Лека и Лозанића о ширењу и модернизовању Хемијског завода и Универзитета говоре да су били знатно испред свога времена, да су видели даље и више од осталих

* * *

Два наша хемичара, Сима Лозанић и Вукић Мићовић, нашли су се на челу Универзитета у времену пресудном за судбину Универзитета, ове највише и најзначајније просветне и научне институције, и својим ауторитетом и угледом обезбедили да Универзитет заузме место које му припада у европској култури.

Abstract

NASLOV NA ENGLISKOM

Snezana Bojovic

Faculty of Chemistry, Belgrade

This year we are celebrating one hundred years of Belgrade University. Two of our chemists, Sima Lozani and

Vukic Micovic, were at the head of the University in times crucial for the destiny of this highest and most important educational and scientific institution, and ensured, with their authority and reputation, the respective place within European culture.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Бојовић, *Сима Лозанић, 1847-1935*, Принцип, Београд, 1996.
2. С. Бојовић, Марко Леко (1853-1932), Живот и дело српских научника, 4, САНУ, Београд 1998.
3. Д. Виторовић, С. Бојовић, Ж. Чековић, Вукић М. Мићовић 1896-1981, Хемијски факултет, Универзитет у Београду, 1996.
4. Ж. Чековић, Вукић М. Мићовић (1896-1981), Живот и дело српских научника, 6, САНУ, Београд .
5. С. Бојовић, *Закон о Универзитету из 1954. године*, Годишњак за друштвену историју, 10, 1-3 (2003) 193-205.
6. Извештај о раду Универзитета у школској 1958/59. години, Београд, 1959.



Миодраг Здујић, Институт техничких наука САНУ, Кнез Михаилова 35, Београд, Е-пошта: zdujic@itn.sanu.ac.yu

ИДЕАЛНА ТОПЛОТНА МАШИНА САДИ КАРНОА

„Дух се буди у додиру са нередом и са неправдом: оно ишло јесте ”на свом месту”, оно ишло је природно, оставља га равнодушним, чини га широмим, док му фрустрирација и лишавање одговарају и оживљавају га.“ – Емил Сиоран

ИЗВОД

Излазак из штампе књиге „Размишљања о покретачкој снази ватре и о машинама за развијање ове снаге“ („Рефлексионс sur la Puissance Motrice de Feu et sur les Machines Propres a Développer cette Puissance“), Сади Карноа, 1824. године, може се узети за датум рођења термодинамике као науке. У свом бесмртном делу Сади Карно је дао науци два плодотворна концепта: реверзибилност и циклус. Помоћу ова два нова концепта он је, у једном од најблиставијих имагинација у историји науке, показао да је од свих машина које раде између два резервоара топлоте на различитим температурама, реверзибилна машина најефикаснија. То је чувени Карноов принцип - основа Другог закона термодинамике.

НОМО NOVUS

Прелаз из осамнаестог у деветнаести век беше време бурних друштвених промена у Европи. „Та прекретница обележена је у светској историји великим догађајем -Француском револуцијом. Како је Париз тада постао расадник великих друштвених идеала тако је он то био и на пољу наука.“^[1] „Револуција (је) више него сваки претходни период у историји, створила – по истом обрасцу као авантура – личности које су се у искушењима пробудиле и чије су судбине за пример: терен повољан за *Номо новуса*.“^[2] У тим бурним временима у Паризу су живели математичар Лагранж (Joseph-Louis Lagrange; 1736–1813), Лаплас (Pierre Simon-Laplace; 1749–1827), Коши (Augustin Louis Cauchy; 1789–1857), Монж (Gaspard Monge; 1746–1818), физичари Фурије (Joseph Fourier; 1749–1830), Навије (Louis M. H. Navier; 1785–1836), Поасон (Siméon Denis Poisson; 1781–1840), Кулон (Charles Augustin de Coulomb; 1736–1806), хемичари Лавоазије (Antoine Laurent Lavoisier; 1743–1794), Бертоле (Claude Louis Berthelot; 1748–1822), зоолог Кивије (Georges Cuvier; 1769–1832),¹ да поменемо са-

¹ Оснивач упоредне анатомије и палеонтолог; присталица, данас поново актуелне тзв. доктрине катастрофа, по којој су, наспрот Дарвиновој теорији еволуције, животињске врсте непроменљиве.

мо неке највеће. Била су то немирна и несигурна времена. Као жртва терора који су завели јакобинци, оптужен да је као закупац пореза оштетио државу и по кратком поступку осуђен на смрт, на гиљотини је 8. маја 1794. г., скончао живот Антоан Лавоазје отац модерне хемије. Тих дана смртне казне гиљотином су била свакодневна. Народ исцрпљен од немаштине и глади и навикнут на свакодневне егзекуције није се окупио у већем броју да присуствује смакнућу једног од најблиставијих умова које је Француска дала. Неколико његових највернијих пријатеља, Лагранж и Борда (Jean Charles Borda; 1749– 1822), математичари, Кулон, физичар, Еји (René-Just Haüy; 1743– 1822), минералог и Деламбр (Jean Baptiste Joseph Delambre; 1749– 1822), астроном из прикрајка је посматрало егзекуцију. Кад је пала његова глава, Лагранж је погледао на свој сат и рекао: „Њима је потребан само секунд да одрубе његову главу, а можда ће проћи и сто година док се не роди поново слична њој.“ [3].

Лагранжова слутња се није обистинила. Проћи ће две године од погубљења Лавоазјеа, а прворазредном математичару и једном од значајних људи Француске револуције, Лазару Карноу родиће се син Сади. У своме кратком животу, живео је 36 година, Сади Карно је објавио само једно дело – довољно да га сматрају једним од највећих физичара деветнаестог века – са открићем које ће по значају поредити са Ајнштајновом теоријом релативитета. [4]. Међутим, „слава тог открића никад није прешла преко граница релативно уског круга научника и инжењера. То може изгледати и чудно, али није толико чудно колико сама историјска чињеница што је требало пуних двадесет шест година док је то откриће могло прокрчити себи пут, чак и у узак круг првих научника Европе.“ [5].

Године 2004., навршило се 180 година од појављивања књиге Сади Карноа и нека то буде повод да једним кратким приказом његовог дела¹ изразимо поштовање овоме великану светске науке – зачетнику термодинамике – због историјске важности коју је Карноов рад одиграо у развоју термодинамике као и чињенице да Карноов циклус може да служи као образац за разумевање основних термодинамичких појмова.

ДУХ СЕ БУДИ У ДОДИРУ СА НЕРЕДОМ

Сади Карно се родио и живео у променљивим политичким временима. Његов живот је везан за политичку судбину оца Лазара (слика 1), убеђеног републиканца, пуну узлета и падова. И поред тога овај изузетан човек је написао бројна дела из геометрије (једна теорема носи његово име), механике, војних наука, политике и поезије [7]. Сади Карно је наследио од свог оца могућност генерализације фундаменталних процеса и проширио очеве идеје о механици на топлотне процесе.

Сади Карно (Nicolas Léonard Sadi Carnot) је рођен 1. јуна 1796. г., у Паризу у Палати Мали Луксембург



Слика 1. Лазар Карно, познат као "Организатор победе" и "Велики Карно", отац Сади Карноа.



Слика 2. Савремени изглед Палате Мали Луксембург (Palais du Petit-Luxembourg) у којој је рођен Сади Карно.

¹ О животу Сади Карноа већ је било писано у Хемијском прегледу, [6].

(Palais du Petit-Luxembourg) (слика 2), данас у склопу великог комплекса које н(и)оци назив Сенат, у којој су његов отац Лазар и мајка Софија живели док је Лазар био члан Директоријума (највишег тела извршне власти, који је трајао од 1795 до 1799. г). Име је добио по чувеном персијском песнику и филозофу Садију од Ширази (Saadi Abdullah Muslihuddin; 1184–1291). Лазар Карно се 1807., повлачи (се) из јавног живота¹ и посвећује својим научним истраживањима и образовању своја два сина које подучава математици, природним наукама као и језицима и музици. У лицеју Шарлемањ (Charlemagne) Сади се спрема за пријемни испит за Политехнику (Ecole Polytechnique) и 1812., са шеснаест година бива примљен. Ова знаменита школа је основана 1794., на иницијативу Лазара Карноа и Гаспара Монжа, који је био и један од њених директора. Октобра 1814., дипломира на Политехници као шести у Артиљеријској класи (слика 3). Од тада ради као војни инжењер селећи се



Слика 3. Портрет седамнаестогодишњег Сади Карноа у униформи Политехничке академије (1813. г.).

из места у место. Године 1821., одлази у Магденбург да обиђе оца у изгнанству и млађег брата Хиполита. Схватајући значај парне машине, која је у Магденбург стигла две године раније, отац – проводећи доста времена у разговорима о њој – утиче на свога си-

на да се посвети проучавању рада парне машине. У то време у Енглеској је већ на стотине парних машина коришћено за различите намене као што су вађење воде из рудника, ковање гвожђа и упредање предива. Незадовољан својом војном каријером демобилише се 1828., и од тада се посвећује науци. Предузима далекосежна истраживања физичких особина гасова и пара, посебно њихових "еластичних истезања" (топлотних особина). Премореност је утицала на његово здравље. Јуна 1832., разбољева се од запаљења плућа праћено шарлахом. Још недовољно опорављен бива заражен колером која је харала Паризом и умире 24. августа 1832., у 36-тој години живота (слика 4). Опширнији биографички подаци о



Слика 4. Портрет Сади Карноа из 1832. године.

Сади Карноу дати су у литератури [6], (*Хемијски преглед*, 2003, 44, 30-32.)

Презиме Карно носи угледна француска породица пореклом из Бургундије чији родослов сеже све до тринаестог века [7]. Поред његовог оца Лазара Карноа (Lazare Nicolas Marguerite Carnot; 1753–1823), научника, генерала, државника, члана Комитета јавног спаса и организатора војске Француске револуције, познатог као "организатор победе" или "велики Карно"², значајни су и Садијев млађи брат, Хиполит (Lazare Hippolyte Carnot; 1801–1888), министар просвете и његов син Франсоа Сади Карно (Franjois

1 Године 1815., за време Наполеонових чувених "сто дана", Лазар Карно поново ступа на политичку сцену постављеним за министра унутрашњих послова. После пораза код Ватерлоа, Наполеон је протеран на острво Света Јелена, а Лазар Карно одлази прво у Варшаву, а затим у Магденбург. Из Немачке се више никада није вратио у Француску. Пепео његових посмртних остатака је пренесен у Пантеон 1889, у време кад је његов унук Сади Карно био Председник републике.

2 Као посланик Конвента, народне скупштине, он је 1793., гласао за погубљење Луја XIV.

Marie Sadi Carnot; 1837– 1894), председник Француске Републике од 1887 до 1894. г.¹

Књига наслова *Размишљања о покретачкој снази ватре и о машинама за развијање ове снаге (Reflexions sur la Puissance Motrice de Feu et sur les Machines Propres a Développer cette Puissance)* је изашла из штампе 12. јуна 1824.² Ова књижица од 118 страна је штампана у тиражу од 600 примерака о Садијевом сопственом трошку. Писана популарним стилем, без употребе математике била је намењена широком кругу читалаца. Карно је наставио своја истраживања и после објављивања ове књиге. Белешке ових истраживања су сачуване и штампане постхумно у другом издању које је приредио Хиполит Карно 1878.³

У време појављивања ова расправа није побудила веће занимање код савременика, мада је већ 26. јула исте године Пјер Жерар (Pierre Simon Girard; 1765-1836) дао опширан приказ књиге у Академији наука у Паризу. Приказ је био повољан и штампан је у Енциклопедијској ревији (Revue encyclopédique). Недостатак приказа је можда у томе што, мада су у њему у целости наведене теореме и закључци, он није истакао веома оригинално Карноово резонување за извођење резултата [9]. Могуће је да је и Карноова природа имала извесну улогу у занемаривању његовог рада; брат и пријатељи су га описивали као повученог и ћутљивог мада изразито знатижељног за науку и технику. Поред тога, неки сматрају [10] да разлог може бити и тај што он није припадао тадашњем водећем кругу научника.

Књига је брзо распродата и било ју је готово немогуће наћи. Када је двадесет једногодишњи Келвин 1845., боравио у Паризу где је радио са Рењоом (Henri Victor Regnault, 1810- 1878) покушао је да је набави, на његово изненађење, ње није било чак ни у библиотеци Политехнике, док ниједан књијар није чуо за име аутора. Данас је ова знаменита књига преведена на више језика. Енглески превод се у целости може преузети са Интернета [11]. Шта год да је био разлог њеног занемаривања, тек ће десет година касније, 1834., Клапејрон (Benoit Pierre Emill Claapeyron; 1799- 1864) схватити значај и правилно растумачити *Рефлексије*, тада већ две године покојног Карноа. Клапејрон је Карноове идеје преточио у аналитичке зависности и њих приказао графички, каквим се и данас приказује Карноов кружни циклус. Клапејрон је применио тзв. индикаторски дијаграм (зависност притиска од запремине) који је први био користио Џејмс Ват (James Watt; 1736- 1816) за анализу рада своје парне машине. Овај Клапејронов рад (Memoire sur la puissance de la chaleur, Journal de

l'ecole polytechnique, 1834, 14, 170.) ће касније имати важног утицаја на Келвина и Клаузијуса (Rudolf Julius Emmanuel Clausius; 1822-1888) који су се, уосталом, преко њега и упознали са Карноовим делом. Келвин и Клаузијус ће дати коначни облик другом закону термодинамике.

Датум појављивања ове књиге се може узети као почетак рађања науке за коју ће двадесет и пет година касније Вилијам Томсон (лорд Келвин) (William Thomson (Lord Kelvin); 1824– 1907) сковати термин термодинамика с намером да означи везу између топлоте и механичког рада. Током времена значење овог термина се проширило на све трансформације између свих форми енергије у којима се она може манифестовати - топлотне, механичке, електричне и радијационе.

СВАГДА ГДЕ ПОСТОЈИ РАЗЛИКА У ТЕМПЕРАТУРИ МОЖЕ СЕ ПРОИЗВЕСТИ ПОКРЕТАЧКА СИЛА

Намера Сади Карноа је била да у својој расправи одговори на два суштинска питања, прво: колики је максимални рад (Карно га назива покретачка снага ватре) који се може добити топлотном машином и друго: да ли постоји неки бољи медијум од водене паре за развијање покретачке снаге.⁴

„Често је претресано питање да ли је покретачка снага топлоте ограничена или је без граница; да ли могућа усавршавања ватрених машина имају границу која се може одредити, границу коју нам природа ствари не допушта да пређемо било на који начин или се напротив ова усавршавања могу бескрајно проширивати. Такође је дуго тражено, и тражи се још данас, да ли не постоји погоднији агенс него водена пара за развијање покретачке снаге ватре; на пример, да ли би атмосферски ваздух, у том погледу, имао велике предности. Ставили смо себи у задатак да ова питања подвргнемо смишљеном испитивању.“

Карно даље наставља:

„Појава производње кретања помоћу ватре није посматрана са довољно општег гледишта ... Да би се принцип произвођења кретања помоћу топлоте посматрао у свој његовој општости, треба га замишљати независно од ма каквих механизама, од ма каквог посебног агенса; треба утврдити резонувања која се могу применити на само на парне машине него на сваку ватрену машину која се да замислити, каква год била употребљена супстанција и на који год се начин деловало на њу.“

1 То је онај Карно кога Михајло Петровић Алас помиње у својим писмима из Француске док је био на студијама на чувеној Високој нормалној школи (École Normale Supérieure); као један од најбољих студената своје генерације Мика Алас је два пута, 1893 и 1894. г., присуствовао пријему код председника Француске Републике, тада Франсоа Сади Карно-а [8].

2 У култури Срба, година 1824., је обележена изласком првог броја часописа *Сербски лейпциг*, кога је у Пешти покренуо Георгије Магарашевић. Од 1873. године носи данашње име *Лейпцигски списак*.

3 Међу вредним књигама које је Михајло Пупин поклатио Београдском Универзитету била је и *Reflexions*; она је и данас у фонду „Универзитетске библиотеке Светозар Марковић“.

4 Сви наводи из Карноовог дела преузети су из књиге *На изворима физике*, [12], у којој се налази српски превод самог почетка ове књиге; курзивом су истакнути важни искази, како је то учињено и у оригиналу.

У следећем параграфу Карно позива на успостављање теорије, какве већ постоје за машине код којих је покретач људска или животињска снага, вода или струја ваздуха:

„Сви случајеви су предвиђени, сва кретања која се могу замислити подложна су општим принципима темељно утврђеним и употребљеним у свакој прилици. То је особина потпуне теорије. Слична теорија, очигледно, недостаје ватреним машинама. Нећемо је имати док физички закони не буду довољно проширени, довољно уопштени, да се унапред могу знати сва дејства топлоте која на одређени начин делује на било које тело.“

Цела Карноова књига посвећена је овој циљу - успостављању закона термодинамике.

Трагајући за општим принципима производње рада парне (топложне) машине Карно је схватио да је први и неопходан услов - топлотни ток, а да би он могао да се оствари неопходна су два извора (резервоара) топлоте сталних температура:

„Произвођење покретачке снаге у парним машинама није...изазвано стварном потрошњом топлоте него њеним *преносом са топлог на хладно тело*.“

У време када је Карно стварао своју теорију топлотних машина сматрало се да је топлота флуид назван калорик којим су у мањој или већој количини "натопљена" сва тела. Грејање и хлађење су упијање, односно отпуштање ове "непондерабилне субстанце". Присталице ове теорије топлоте која је била актуелна од 1780 до 1860 били су Лаваозије, Лаплас, Фурије, Поасон и други. Радовима Томсона (грофа Румфорга) (Benjamin Thomson (Count Rumford); 1753–1814), Дејвија (Hemphry Davy; 1778–1829) и Џула (James Prescott Joule; 1818–1829), ова теорија биће одбачена и замењена динамичком теоријом топлоте по коме је топлота један вид енергије. Без обзира на то што је Карно користио погрешну теорију његови закључци су били исправни. Из његових постхумно објављених забележака види се да је током својих даљих истраживања полако напуштао "калоричну" теорију топлоте.

Затим следи општи закључак:

„...*свагда где постоји разлика у температури може се произвести покретачка сила*. Обрнуто, где год се ова снага може трошити, могуће је створити разлику у температури, могуће је изазвати поремећаје топлотне равнотеже.“

За добијање максималне снаге тј. највећег искоришћења топлоте Карно је даље описао идеалну топлотну машину која ради између два стална извора топлоте и низ операција које она треба да обави. Решавајући овај проблем он је дао науци два веома плодотворна концепта. Први је реверзибилност - појава која подразумева да бесконачно мале промене спољашњих услова којима је тело (уопштено систем) изложено проузрокују обрнути смер процеса.

Карно није користио реч "реверзибилност", коју је први у термодинамичком смислу употребио шкотски физичар Тејт (Peter Guthrie Tait) 1876. [13]. При термодинамичким разматрањима неопходно је дефинисати систем, околину и границу између њих. У савременој термодинамици реверзибилни процес се дефинише као гранични случај квази-статичког процеса у коме повећање ентропије постаје занемарљиво мало. За овакав процес крајња ентропија је једнака почетној и процес може тећи у оба правца [14].¹ Циклус се дефинише као процес у коме се систем враћа у своје почетно стање после низа узастопних промена.² Реверзибилна машина може вршити механички рад преносом топлоте са топлотом на хладнији резервоар; она може радити тачно обрнуто – преношењем исте количине топлоте са хладног на топао резервоар користећи исту количину рада. Током својих операција машина пролази кроз циклус стања тако да се после произведеног рада топлотним током она враћа у своје почетно стање спремна да иде кроз циклус поново. На тај начин, после обављеног циклуса спољашњи рад који заостаје је стварни обављени рад или уопштеније промене које су се десиле у околини.

Потребан услов да би се добио максималан рад, Карно закључује, је:

„...*да у телу употребљеним за стварање покретачке моћи топлоте не настаје никаква промена температуре која није изазвана променом запремине*.“

Овај услов ће се постићи ако је разлика у температури веома мала тј. температурни градијент минималан и ако се сабијање (компресија) и ширење (експанзија) гаса (паре) обављају веома лагано тако да је унутрашња температура свуда једнака тј. температура гаса (паре) равномерна.

„Карно затим показује помоћу најједноставније врсте логике која је икада употребљена у научном размишљању, да се под идеалним условима највећи износ механичког рада може добити прелазом одређене количине топлоте са датог вишег температурног нивоа на нижи ниво, при чему максимум зависи од почетне и завршне температуре и ни од чега другог.“ [5]. То је чувени Карноов принцип који онако како га је Карно исказао гласи:

„*Покретачка снага топлоте независна је од агенса који су стављени у покрет да је изведу; његова количина одређена је једино температурама тела између којих се врши, у крајњем резултату, пренос топлоте*.“

Карноов принцип се може другим речима исказати као [15]: „Од свих машина које раде између истог извора топлоте и расхлађивача, реверзибилна машина је најфикаснија. (...) Ефикасност реверзибилне машине не зависи од материјала с којим се ради.“

1 Математички, реверзибилан процес је онај за који је интеграл промене ентропије нула, $\oint dS = 0$

2 Математички, циклични процес је онај за који је интеграл промене унутрашње енергије нула, $\oint dU = 0$

Карноов циклус је најефикаснији могући термодинамички циклус. Он се састоји од четири основна реверзибилна процеса па је стога и циклус у целини реверзибилан. Четири реверзибилна процеса су: (1) адијабатска компресија са неке ниже температуре, T_h до неке више температуре, T_l ; (2) изотермске експанзије на вишој температури, T_l ; (3) адијабатске експанзије од T_l до T_h и (4) изотермске компресије на температури T_h . Иреверзибилна топлотна машина која ради између два топлотна резервоара на константним температурама не може имати ефикасност већу него реверзибилна машина која ради између те две температуре. Карноов принцип представља, у суштини, други закон термодинамике и стога се са правом Сади Карно сматра творцем овог закона [10].

РЕВЕРЗИБИЛНА МАШИНА ЈЕ НАЈЕФИКАСНИЈА

„Помоћу (...) нових концепата он је приступио, у једном од најблиставијих имагинација у историји науке, показивању да са топлотним резервоаром дате температуре из кога се топлота може узимати радном супстанцом, и са другим резервоаром на нижој температури коме се топлота може предати, највећа могућа количина рада се може добити када се сви процеси са радном супстанцом одигравају реверзибилно.“ [16]. Карноова аргументација иде, укратко, овако. Претпоставимо да имамо машину која може да произведе већу количину рада него реверзибилна циклична машина. Тада би било могуће добијати рад бесконачно на следећи начин. У првом кораку одведимо топлоту из топлијег резервоара у хладнији резервоар користећи ефикаснију машину. После тога, одведимо исту количину топлоте натраг из хладнијег резервоара у топлији резервоар користећи реверзибилну машину. Због тога што прва ефикаснија машина производи (даје) више рада него реверзибилна машина то се добија изванредан вишак рада. Понављањем ових поступака може се добити неограничена количина рада једноставним пребацивањем извесне количине топлоте напред и назад између топлијег и хладнијег резервоара. Карно закључује да би то било немогуће:

„То би било не само непрекидно кретање него бесконачно стварање покретачке снаге без трошења топлоте и било каквог другог агенса. Слично стварање је сасвим противно досад примењеним идејама, законима механике и праве физике, оно је недопустиво.“

Мора се, дакле, закључити да је реверзибилна машина уједно и најефикаснија машина.

Савремени приступ Карноовом циклусу је обично преко ефикасности система. Ефикасност се најлакше изражава преко апсолутних температура, концепта који је тек касније увео Келвин, уосталом, баш разматрајући Карноов циклус. Поред тога, Карно је веровао у калоричну теорију топлоте и због тога он није разматрао могућност да се рад врши на рачун претварања једног дела топлоте у рад.

Уместо тога он је размотрио максималну "добит", која представља количину рада која се може добити од дате количине горива (нпр. угља).

О запањујућој јединствености Карноовог доказа чини се да је на најбољи начин рекао професор Доџ [17], у сво(је)м сада већ класичном, уџбенику *Хемијске инжењерске термодинамике* из 1944. г.: „По свом карактеру доказ је тако свеопшти а(б)пстрактан да он не задовољава многе навикле да размишљају са много конкретнијим појмовима. За друге он (Карноов принцип) може изгледати тако очигледан закључак да доказ и није потребан. У ствари, доказ принципа на било какав формалан начин није више потребан; огромна грађа експерименталних чињеница и искустава је изграђена на њему – ниједна чињеница није се показала да је у супротности са њим. Доказ је, без обзира, од највећег интереса самом чињеницом да принцип који доказује на тако једноставан начин има тако универзалну вредност (...) Иако је принцип невероватно једноставан у исказу, његова потпуна импликација се одмах не схвата и потребно је дуготрајно искуство његове примене на различите проблеме пре него што се призна његова зачуђујућа свестраност.“

ЈЕДАН БРОЈЧАНИ ПРИМЕР КАРНООВОГ ЦИКЛУСА

Покушајмо да представимо Карноов циклус са појмовима из нашег свакодневног живота. Нека нам бицикличка пумпа буде цилиндар који ће вршити рад. Пумпу ћемо преправити тако што ћемо је обмотати неким изолационим материјалом (на пример стиропором), црево уклонити, тако да ће се размена топлоте вршити преко дна пумпе. Нека су димензије овог нашег цилиндра: висина, $h = 25$ cm и пречник, $d = 2$ cm. Када је клип у максималном положају запремина цилиндра, означимо је са V_3 ће бити: $V_3 = \pi r^2 h_3 = 7,83 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, где r означава полупречник цилиндра ($r = 0,01$ m), тако да је површина попречног пресека, тј., површина клипа, $S = \pi r^2 = 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Нека је притисак у цилиндру једнак атмосферском притиску, $p_3 = 1 \times 10^5$ Pa. Узмимо две довољно велике посуде (*термосића*) тако да доведена и одузета топлота не мења њихову температуру приметно; у првој нека кључа вода а у другој нека имамо смешу воде и леда. На тај начин смо добили два *шолојина резервоара*, први на температури $T_l = 373$ K а други на $T_h = 273$ K. Количина ваздуха (број молекула, n) у максималном положају на температури T_h је: $n = (p_3 V_3) / (RT_h) = 3,46 \times 10^{-3} \text{ mol}$, где је $R = 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, универзална гасна константа. Сабијмо ваздух у нашем цилиндру до $1/5$ почетне висине, тако да је сада висина 5 cm. Поставимо сада дно цилиндра на резервоар топлоте, $T_l = 373$ K и сачекајмо да се успостави *шолојина равнотежа*. Израчунајмо сада почетне услове са којим отпочињемо наш циклус, $V_1 = \pi r^2 h_1 = 1,57 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ и $p_1 = (nRT_l) / V_1 = 6,83 \times 10^5$ Pa. Остале "тачке" у Карноовом циклусу можемо да израчунамо на следећи начин. Притисак p_2 израчунавамо из

једначине за *адијабатску компресију* од температуре T_h до T_t [18]:

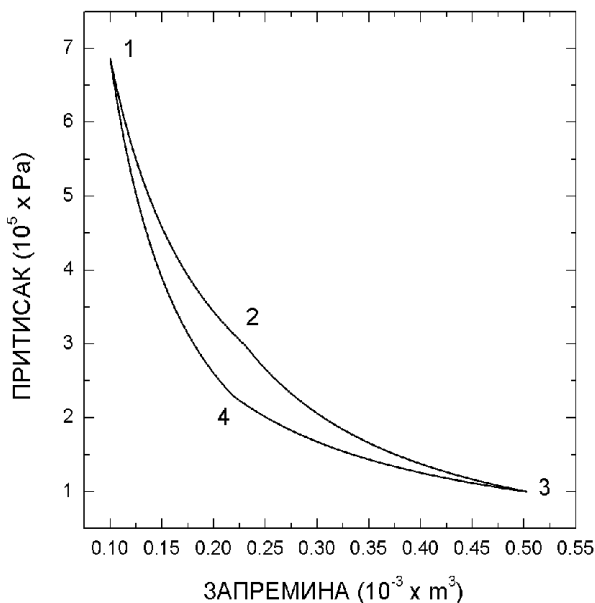
$$p_2 = \left(\frac{p_3^{1-\kappa} T_h^\kappa}{T_t^\kappa} \right)^{\frac{1}{1-\kappa}}$$

где је $p_3 = 1 \times 10^5$ Pa и $\kappa = 1,40$ однос топлотних капацитета при сталном притиску и сталној запремини $\kappa = c_p/c_v$. Сада можемо да израчунамо и запремину $V_2 = (nRT_t)/p_2 = 3,60 \times 10^{-5}$ m³. На исти начин израчунавамо притисак и запремину, p_4 и V_4 , из *адијабатске експанзије* од p_1, V_1, T_t до p_4, V_4, T_h :

$$p_4 = \left(\frac{p_1^{1-\kappa} T_t^\kappa}{T_h^\kappa} \right)^{\frac{1}{1-\kappa}} \text{ и } V_4 = \left(\frac{p_1^{1-\kappa} T_t^\kappa}{T_h^\kappa} \right)$$

Тако се добија да је $p_4 = 2,29 \times 10^5$ Pa и $V_4 = 3,43 \times 10^{-5}$ m³.

Сада можемо да отпочнемо процес полазећи од стања p_1, V_1 и T_t . Пустимо да се клип *лагано* помера навише тако да је температура по целој запремини униформна (изводимо тзв. *квасиситатички процес*). Да би гас могао да се шири а да при томе његова температура остаје непромењена он мора да "узима" топлоту од топлотног резервоара (у нашем случају довољно велике посуде са водом на температури кључања). У току ове *изојермске експанзије* (Карно изотерму описује као: „топлота употребљена... у приликама где не настаје промена температуре (...) топлота изазвана променом запремине.“), притисак ће опадати и запремина ће се повећавати све до тачке p_2, V_2 (слика 6). Током ове изотермске



Слика 5. Карноов циклус приказан у p - V дијаграму.

експанзије клип ће извршити механички рад [18]:

$$W_{is1,2} = Q_{is1,2} = nRT_t \ln(V_2/V_1)$$

који износи $W_{is1,2} = 8,90$ J. По конвенцији, рад се усваја да је позитиван ако он повећава енергију система. Ако се запремина смањује, рад се врши на систем, повећавајући енергију система и усваја се да је негативан. Јасно је (из искуства знамо) да ће услед трења и провођења (губитака топлоте кроз зидове цилиндра) $Q_{is1,2} > W_{is1,2}$, а да ће само у *идеалном* (замисљеном) случају важити једнакост. Сада одвојимо цилиндар од извора топлоте и пустимо да се клип *лагано* помера услед разлике притисака у цилиндру и околине, без размене топлоте са околином (тзв. *адијабатска експанзија*) све док се притисак у унутрашњости не изједначи са спољашњим (атмосферским), занемарујући тежину клипа. Тако смо стигли до тачке 3 (слика 6). Рад током ове адијабатске експанзије је [18]:

$$W_{ad2,3} = \frac{nR}{\kappa - 1} (T_t - T_h)$$

и износи $W_{ad2,3} = 7,19$ J.

Да би вратили клип у почетно стање потребно је да уложимо извршан рад. То можемо да изведемо тако што ћемо цилиндар оптеретити тегом масе, $m = 18,68$ kg. Ову потребну масу ћемо израчунати из почетних услова: $F_1 = p_1 S$, где је F_1 сила која одговара почетном притиску, p_1 а S површина клипа, па је $m = (p_1 - p_3)S/g$ ($g = 9,81$ m s⁻²). Овако оптерећен клип ћемо *полако* померати надолу вршећи *изојермску компресију*; да би гас "одржавао" константну температуру он ће топлоту "предавати" хладнијем резервоару, тј., нашој довољно великој посуди у којој се налази смеша воде и леда. Израчунајмо ову количину топлоте коју гас предаје током ове изотермске компресије о тачке 3 до тачке 4:

$$Q_{is3,4} = nRT_h \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

одакле се добија да је предата количина топлоте, $Q_{is3,4} = -6,51$ J. Само у случају да је процес *реверзибилан* наш тег ће извршити исти толики рад! Наравно, искуство нам говори да ћемо у стварним условима морати да уложимо већи рад, $W_{is3,4} \geq Q_{is3,4}$, због тога што не можемо да остваримо потпуну изолацију зидова цилиндра и због трења између клипа и зида цилиндра. Каже се да долази *дисипације* (расипања) механичке енергије (у топлотну).

Када смо гас сабили до притиска p_4 и запремине V_4 , одвојимо цилиндар од резервоара топлоте и пустимо да наш тег настави да *лагано* сабија гас без икакве размене топлоте са околином тј., да врши *адијабатску компресију* до почетног стања p_1, V_1, T_t . Клип ће се померати надолу зато што је спољашњи притисак са којим делујемо (тежина клипа са тегом) већи од унутрашњег у цилиндру. Наравно, и у овом процесу мораћемо да уложимо већи рад од идеалног:

$$W_{ad4,1} = \frac{nR}{\kappa - 1} (T_h - T_t)$$

који износи, $W_{ad4,1} = -7,19 \text{ J}$.

На овај начин извршили смо један *циклус* и наша топлотна машина је спремна за следећи.

Укупан рад који је наша топлотна машина извршила је $W_{is3,4} + W_{ad2,3}$ док је рад који смо морали да "утрошимо" (обавимо) да би смо *систем* вратили у почетно стање је $W_{is3,4} + W_{ad4,1}$. Нето рад (вишак рада) ће бити једнак разлици (апсолутних вредности): $\Delta W = W_{is1,2} + W_{ad2,3} - W_{is3,4} - W_{ad4,1}$. Како су $W_{ad2,3}$ и $W_{ad4,1}$ једнаки а супротног знака остаје да је нето рад једнак: $W_{is1,2} - W_{is3,4}$, а како је $W_{is1,2} = Q_{is1,2}$ и $W_{is3,4} = Q_{is3,4}$, следи: $\Delta W = Q_{is1,2} - Q_{is3,4} = 8,90 - 6,51 \text{ J} = 2,39 \text{ J}$. У сваком циклусу, овај рад могао би да се употреби за дизање масе, $m = 40,24 \text{ kg}$ (приближно једне чаше воде) на висину од једног метра, $\Delta W = mgh$.

Изрчунајмо *систем корисног дејства* (ефикасности) наше идеалне (реверзибилне) топлотне машине, који се дефинише као однос између рада који машина може да изврши и топлоте предате машини [18]:

$$\eta = \frac{\Delta W}{Q_{is1,2}} = \frac{Q_{is1,2} - Q_{is3,4}}{Q_{is1,2}}$$

Увршавањем датих вредности за $Q_{is1,2}$ и $Q_{is3,4}$ у горњу једначину добија се да је степен корисног дејства, $\eta = 0,27$. Ова вредност представља максимално искоришћење ("добит") од топлотне машине која ради између два топлотна резервоара на температурама $T_t = 373 \text{ K}$ и $T_h = 273 \text{ K}$. У стварним (реалним) условима ефикасност ће бити мања услед топлотних губитака. Како се степен корисног дејства (ефикасност) може одредити и из израза [18]:

$$\eta = \frac{T_t - T_h}{T_t}$$

то значи да ће за свако *нејовраћни циклус* бити:

$$\frac{Q_{is1,2} - Q_{is3,4}}{Q_{is1,2}} < \frac{T_t - T_h}{T_t}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Миланковић, *Сисци из историје наука*, Изабрана дела, књига 5, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1997, ц. 266.
2. Жан-Луј Дерсел, Уводна реч, у књизи: Жозеф де Местр, *Сисци о револуцији*, Градац, Чачак – Београд, с. 14.
3. Ференц Сабадвари, *Анџоан Лоран Лавоазје*, Музеј науке и технике и Завод за уџбенике и наставна средства, Београд 1997, с. 132.
4. Е.Т. Јајенс, *The Evolution of Carnot's Principle in Maximum-Entropy and Bayesian Methods in Science*

and Engineering, vol. 1, 1988, Eds. G.J. Ericson and C.R. Smith, Kluwer, Dordrech, p. 267. (<http://bayes.wustl.edu/etj/articles/ccarnot.pdf>)

5. М. Pupin, Nova reformacija, u knjizi *Monografije, Izabrana dela*, drugi tom, Zavod za izdavanje udžbenika i nastavna sredstva, Beograd, 1997. Prevod knjige *The New Reformation*, Charles Scribner's Sons, New York, 1927. (preveo Vojin Popović).
6. D. Živković, D. Manasijević, I. Maihajlović, Sadi Kar- no – O životu znamenitog termodinamičara ??? veka, *Hemijski pregled*, **44** (2003) 30-32.
7. <http://www.carnot.org>
8. D. Trifunović, *Bard srpske matematike Mihailo Petrović Alas*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, prvo izdanje, Beograd, 1991, s. 165.
9. http://www-groups.dsc.st-andrews.ac.uk/čhistory/Mathematics/Carnot_Sadi.html
10. H. Erlichson, Sadi Carnot, 'Founder of the Second Law of Thermodynamics', *Eur. J. Phys.* **1999**, *20*, 183-192. (<http://www.iop.org/EJ/article/0143-0807/20/3/308/ej908.pdf>)
11. S. Carnot, *Reflections on the Motive Power of Heat*, translated by R.H. Thruston. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1943. (<http://www.history.rochester.edu/steam/carnot/1943>)
12. S. Marić, "Na izvorima fizike - Izbor iz dela velikih fizičara", Kulturni centar, Novi Sad, 1971, s. 99-109.
13. K.L. Laidler, *The World of Physical Chemistry*, Oxford University Press, Oxford, 1993, p.89.
14. H.H. Callen, *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*, John Wiley & Sons, New York, 2nd Ed., 1985, p. 98.
15. М. Pupin, Termodinamika reverzibilnih ciklusa u gasovima i zasićenim parama, u knjizi *Predavanja, Izabrana dela*, peti tom, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1997. Prevod knjige *Thermodynamics of Reversible Cycles in Gases and Saturated Vapors*, John Wiley and Sons, New York, 1894. (preveo Vojin Popović)
16. deo iz knjige Lynde Phelps Wheeler, *Josiah Willard Gibbs: The History of a Great Mind*, Ox Bow Press, 1998. (<http://www.thermohistory.com/historyoverview.pdf>)
17. B.F. Dodge, *Chemical Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill, 1st Ed., New York, 1944, p. 51-54.
18. D. Malić, *Termodinamika i termotehnika*, Građevinska knjiga, peto izdanje, Beograd, 1972, str. 31-65.

Abstract

IDEAL HEAT MACHINE of SADI CARNOT

Miodrag Zdujić

Institute of Technical Sciences of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Knez Mihailova 35, Belgrade

The appearance of Sadi Carnot's book "Reflections on the Motive Power of Heat" in 1824 may be taken as a date of birth of the science of thermodynamics. Carnot provided science with two fertile concepts, one is reversibility and the other one is cycle. He realized, by means of one of the simplest reasoning ever used in scientific thought, that among all possible heat engines working between two heat reservoirs at different temperatures, reversible heat engine is the most efficient. This conclusion known as Carnot's principle is the basis of the Second Law of Thermodynamics.