

ВТОРИ ПРИНЦИП НА ТЕРМОДИНАМИКАТА: ЗАЩО ПРОЦЕСИТЕ В ПРИРОДАТА И ОБЩЕСТВОТО СА НЕОБРАТИМИ?

Б. В. Тошев

Софийски университет „Св. Климент Охридски“

Резюме. В тази статия са анализирани два важни въпроса на естествознанието и обществознанието – коя е причината за необратимостта на процесите в природните и обществените системи. Отговор на този въпрос дава H- теоремата на Болцман (1896 г.) (за посоката на природните процеси) и идеите на Емерсон (1841 г.) (за посоката на процесите в обществото). Причината за еднопосочността на процесите в системата е в сблъсъка, конфликта, ударите, взаимодействието между елементите, които изграждат системата (частици – при Болцман и „партии“ – при Емерсон). Авторът защитава тезата за повече интегралност в обучението в средното и висшето образование за по-добро разбиране общото в законите, които управляват природата и обществото.

Keywords: irreversibility, second principle of thermodynamics, natural systems, social systems, H-function of Boltzmann, H-theorem of Boltzmann, Emerson

Въведение

Всички процеси в природата протичат спонтанно само в една посока. Това е опитният факт, който е в основата на втория принцип на термодинамиката. Следователно, всеки природен процес би могло да бъде дефиниционен за втория принцип на термодинамиката. Предпочитат, обаче, следните две дефиниции, защото те допускат, чрез подхода на Карно или чрез подхода на Клаузиус, получаването на аналитични изрази.

„Не е възможно пълното превръщане на топлината в работа“ или „спонтанното преминаване на топлината в работа не е възможно“ – от тук веднага следват формули, които са аналитични дефиниции на втория принцип на термодинамиката –

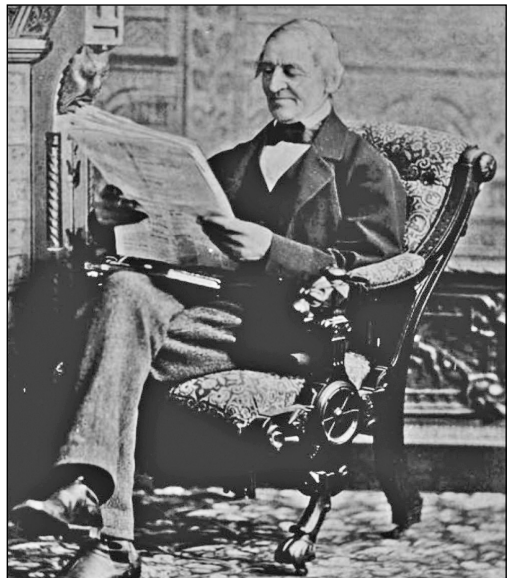
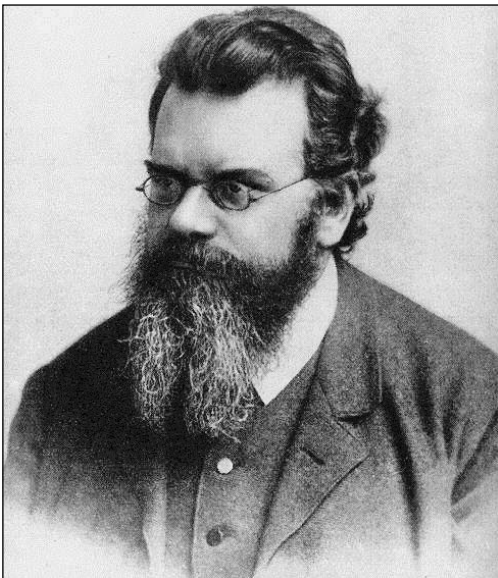
$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1)$$

$$dS \geq \frac{dQ}{T} \quad (2)$$

Формула (1) изразява коефициента на полезно действие η на една топлинна машина с работно тяло идеален газ, който участва в кръгов процес, заключен между две адиабати и две изотерми (цикъл на Карно). Машината работи между два топлинни резервоара – единият е с по-висока температура T_1 , а другият е с по-ниска температура T_2 . Ако етапите на кръговия процес са квазистатични (вж. напр. Toshev, 2013), тогава коефициентът на полезно действие на тази машина, наречена машина на Карно, се определя единствено от разликата в температурите на двата топлинни резервоара (теорема на Карно). Знакът за неравенство се използва тогава, когато в цикъла на Карно има етапи, които протичат необратимо.

Алтернативно (и много по-удобно за построяване на термодинамичния формализъм), вторият принцип на термодинамиката се записва чрез формула (2) с ентропията на системата S . Както първият принцип на термодинамиката въвежда вътрешната енергия на системата U (Toshev, 2013), така вторият принцип на термодинамиката въвежда ентропията на системата S . И двете величини – U и S , са екстензивни и са функции на състоянието.

Тази информация е позната на всички студенти, които слушат курсове по физика или физикохимия. В учебниците по физика или физикохимия подходите на Карно и Клаузиус са разгледани с нужното внимание. В учебната литература по тези предмети обаче не може да се намери отговор на въпроса защо процесите в природата



Фиг. 1. Людвиг Болцман (1844 – 1906) и Ралф Уолдо Емерсон (1803 – 1882)¹⁾

протичат *необратимо* – кой е физическият фактор, отговорен за това. Тази статия дава отговор на този въпрос. За природните системи отговорът идва от анализа на т.нар. H – теорема на Болцман, чете се „ха“ (1896 г.). Любопитно е, че и процесите в обществото имат „стрела“ – тя се определя чрез теория (1841 г.), предложена от американския философ Ралф Уолдо Емерсон, която в идеен план е пълен аналог на теорията на Болцман. Следователно еднакъв по природата си фактор определя „стрелата“ на процесите в природата и обществото. Осъзнаването на този факт е от мирогледно значение както в природознанието, така и в обществознанието.

Н-функция на Болцман

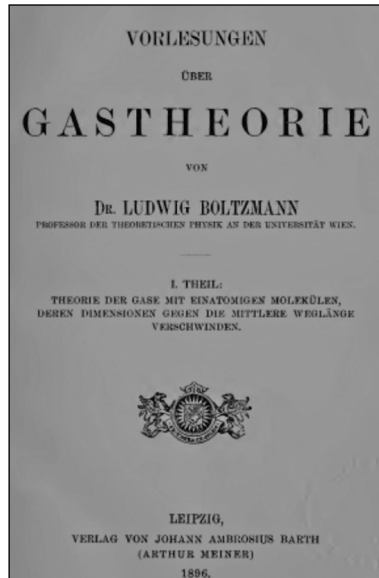
Нека с V означим броя на молекулите на един газ в обем 1 cm^3 ; газът е идеален, намира се във външно поле и не е в равновесие; тогава $v = v(\vec{r}, t)$, т.е. броят на молекулите в единичен обем зависи от времето t и от мястото $\vec{r}(x, y, z)$ на този обем в общия обем на газа. Нека да въведем елементарния обем $d\tau = dx dy dz$, x, y, z – декартови координати. Тогава $v d\tau$ е броят на молекулите в обема $d\tau$. Всяка от молекулите на газа в даден момент се движи с някаква скорост $\vec{c} = \vec{c}(u, v, w)$ между нула и безкрайност, т.е. c е непрекъснатата случайна величина; u, v и w компонентите на скоростта върху координатните оси x, y и z . Ако въведем пространството на скоростите, u, v, w , тогава $d\omega$ е елементарният обем в това фазово пространство.

Окончателно $v f(\vec{r}, \vec{c}, t) d\tau d\omega$ е броят на молекулите, които едновременно се намират в обема $d\tau$ от реалното пространство и обема $d\omega$ от пространството на скоростите. Това са част от молекулите $v d\tau$, чиито скорости са такива, че скоростните им компоненти върху осите x, y, z са в интервалите между u и $u+du$, v и $v+dv$ и w и $w+dw$: $c^2 = u^2 + v^2 + w^2$.

Ако може да се определи функцията $v f$, тогава ще може да се изчисли и въведената от Boltzmann (1896; 1898) H функция (Фиг. 3):

$$H = \iiint v f \ln v f du dv dw \quad (3)$$

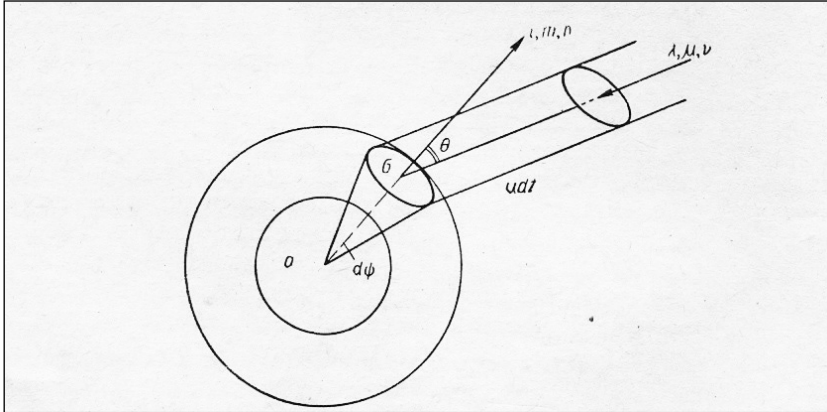
Горната дефиниция подсказва, че H е безразмерна величина (число), познаването на която ще характеризира напълно един газ, който не е в състояние на термично равновесие, поставен е във външно поле (в частност това може да бъде гравитационното поле на Земята) и неговите частици взаимодействат помежду си, като в най-простите случаи тези взаимодействия се свеждат до еластични удари. Намирането на функцията $v f$ може да стане чрез решаване, възможно поне по принцип, на *кинетичното уравнение на Болцман*.



Фиг. 2. Титулна страница на книгата на Болцман

Кинетично уравнение на Болцман

И така, вниманието ни е насочено към молекулите на газа, които се намират едновременно в обема $d\tau$ от реалното пространство и в обема $d\omega$ от пространството на скоростите; техният брой е $\nu f(\vec{r}, \vec{c}, t) d\tau d\omega$. С времето този брой се променя. Поради движението на молекулите има молекули, които напускат обема $d\tau$, но има и молекули, които влизат в него. С времето и скоростите на молекулите търпят промяна – когато системата се намира във външно поле, всяка молекула получава ускорение a , което променя скоростта ѝ c ; следователно молекула, която е била в обема $d\omega$, може да го напусне, но друга молекула, вън от този обем, може да се окаже в него. Друга причина за промяна на броя на молекулите в обема $d\omega$ е взаимодействието между тях – в най-простия случай молекулите търпят еластични удари; при такива удари по законите на еластичните удари „удрящите“ молекули променят скоростите си, например от $c(d\omega)$ до $c'(d\omega')$, а „ударените“ молекули – от $c_1(d\omega_1)$ до $c'_1(d\omega'_1)$; при такива удари молекули ще напускат обема $d\omega$, но при „обратните“ удари молекули ще влизат в него. При това $d\omega = d\omega'$ и $d\omega_1 = d\omega'_1$ (теорема на Лиувил), или $d\omega d\omega_1 = d\omega' d\omega'_1$.



Фиг. 3. Помощна схема за получаване на кинетичното уравнение на Болцман (Радушкевич, 1966)

Чрез изчислителната схема, показана на Фиг. 3, изградена на основата на често използваната в кинетичната теория на газовете идея (още от Клаузиус например) за замяна на реалното състояние на системата с хипотетично, при което всички молекули без една се разглеждат като масови точки, а една тях – сфера с радиус, равен на диаметъра на молекулата σ , блуждае между тези точки с относителна скорост, например $V = c_1 - c$, получаването на кинетичното уравнение на Болцман не среща особени затруднения:

$$\frac{\partial v f}{\partial t} + \frac{\partial v f}{\partial r} c + \frac{\partial v f}{\partial c} a = \int \sigma^2 d\psi \int v^2 (f' f'_1 - f f_1) |V| \cos \theta d\omega_1 \quad (4)$$

Трите събираеми в лявата част на това уравнение държат сметка за движението на молекулите в неравновесния газ, който е под влиянието на външно поле ($a \neq 0$), а *интегралът на ударите* в дясната част на уравнението отчита взаимодействието чрез удари между молекулите на газа. Неизвестната величина в уравнение (4) е $v f$.

Физически смисъл на Н-функцията на Болцман

Обемът $d\omega$ в пространството на скоростите е обем на *фазова клетка* в статистиката на Болцман. Фазовият обем на идеалния газ е разделен на λ на брой фазови клетки и λ е голямо число. Фазовите клетки са номерирани и например в i -тата фазова клетка има N_i молекули. Вероятността една молекула да попадне в коя да е от фазовите клетки е $\frac{d\omega}{\lambda d\omega} = \lambda^{-1}$; тогава вероятността N_i молекули да се намират в

i -тата фазова клетка ще бъде λ^{-N_i} . В такъв случай вероятността системата да бъде в дадено *микросъстояние* – N_1 в клетка № 1, N_2 в клетка № 2 и т.н. ($N_1 + N_2 + \dots = N$; N е общият брой на молекулите на газа) – ще бъде $\lambda^{-N_1} \lambda^{-N_2} \dots = \lambda^{-N}$. Този резултат показва, че всички микросъстояния на системата са равновероятни. Тогава, ако знаем броя на микросъстоянията, които реализират даденото макросъстояние на системата (това е термодинамичното състояние на системата, определено чрез стойностите на нейните параметри на състоянието (Toshev, 2013)), вероятността системата да бъде в дадено макросъстояние веднага ще бъде изчислена. Комбинаториката дава математичен израз за този брой: $\frac{N!}{\prod N_i!}$. Следователно вероятността системата да бъде в дадено *макросъстояние* ще се дава с израз: $\lambda^{-N} \frac{N!}{\prod N_i!}$. Този резултат изглежда обещаващ, но в този вид той е напълно безполезен, защото голямото число λ остава произволно и непознато. Тогава остава тази вероятност да се нормира с вероятността на друго, очевидно много малко вероятно, но изобщо възможно макросъстояние, при което всички молекули се движат с еднаква скорост, т.е. всички клетки без една са празни: $\lambda^{-N} \frac{N!}{N!0! \dots}$. Така се получава формула за термодинамичната вероятност W_T – ключова формула в статистиката на Болцман:

$$W_T = \frac{N!}{\prod N_i!} \quad (5)$$

Нека да логаритмуваме този израз, като приложим и формулата на Стьърлинг за изчисляване на факториелите на големите числа N_i и N : $\ln W_T = N \ln N - \sum N_i \ln N_i$. При граничния преход на изчезващо малки по обем фазови клетки, $N_i \rightarrow \nu f$, а сумата в горния израз се превръща в интеграл:

$$\ln W_T = - \iiint \nu f \ln \nu f \, d\nu \, d\mathbf{w} = -H \quad (6)$$

От формула (6) следва, че H -функцията на Болцман е безразмерна величина, което число намалява, когато термодинамичната вероятност на системата W_T нараства.

Нека разглежданата система се състои от две почти независими подсистеми. Тъй като ентропията на системата има свойството адитивност, то ентропията на цялата система S е сума от ентропиите на двете съставляващи я подсистеми: $S = S_1 + S_2$. Тъй като при независими събития вероятностите имат свойството мултипликативност, $W = W_1 W_2$. Остава да допуснем, че има функционална връзка между ентропия и термодинамична вероятност: $S = F(W) = F(W_1 W_2) = F(W_1) + F(W_2)$. От тук с лекота се получава диференциалното учавнение $W \frac{dF(W)}{dW} = k$. Така след интегриране с точност до константа се получава:

$$S = k \ln W_T \quad (7)$$

В тази формула k е оразмерителна константа. Може да се покаже (напр. Радушкевич, 1966), че това е константата на Болцман k (универсалната газова константа R , разделена на числото на Авогадро N_A (вж. напр. Dukov & Toshev, 2010); $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$).

Някои преценяват, че формула (6) е най-важната формула в съвременното естествознание – тъй като в изолирана система ентропията $\dot{H}$ в термодинамичния $\dot{H}$ преход към равновесното състояние нараства, тогава ще нараства и термодинамичната вероятност, ще се увеличава броят на микросъстоянията, които реализират даденото макросъстояние на системата, т.е. ще се увеличава безпорядъкът (хаосът) в нея.

Остава да сравним формули (6) и (7), за да кажем, че H -функцията на Болцман е една безразмерна ентропия:

$$S = -kH \quad (8)$$

Н-теорема на Болцман

Нека да напомним, че изучаваната система е неравновесна и търпи еволюция във времето, приближавайки се към равновесното си състояние. Тогава е важно да се види как H -функцията на Болцман се променя с времето и кои са отговорните физични фактори, които определят тези промени. В изчислителен план задачата е твърде сложна и затова ще спестим на читателя съответните математически процедури. Изчислителният метод (Болцман, 1953) се свежда до представяне на израза за диференциала dH в симетричен вид, от който веднага да може да се прецени неговият знак.

В крайна сметка тези пресмятания водят до

$$dH < 0 \quad (9)$$

Това е H -теоремата на Болцман.

Ако при пресмятанията се държи сметка единствено за собственото движение на молекулите на газа, H -функцията на Болцман във времето остава с постоянна стойност – $dH=0$. Едва при отчитане на ударите между газовите молекули промяната на H -функцията на Болцман във времето става факт, $dH < 0$.

Така чрез H -теоремата на Болцман може да се разбере коя е физическата причина за необратимостта на природните процеси – това е конфликтът, ударите, сблъсъците между елементите (частиците) на макроскопската система, която участва в термодинамичния процес. Ако нямаше такива взаимодействия в системата, тогава процесите в нея щяха да бъдат *обратими*. Така можем да заключим, че мирни и безконфликтни преходи в природата не съществуват.

Посока на процесите в обществото – идеите на Емерсон

На 9 декември 1841 г. в Бостън американският философ Ралф Уолдо Емерсон (Ralf Waldo Emerson) изнася лекция за това, какво определя посоката на процесите в обществото. Тази лекция е публикувана през 1849 г. под заглавието „The Conservative“ (Emerson, 1849).

Според представите на Емерсон посоката на процесите в обществото се определя в сблъсъка на две динамични обществени формации с ефективен размер – партии (в смисъл на части от цялото). Едната партия е наречена „партия на надеждата“ („hope party“); другата партия се нарича „партия на спомена“ („memory party“) – „иновация“ („innovation“) срещу „консерватизъм“ (conservatism), „бъдеще“ („future“) срещу „минало“ („past“). В „партията на надеждата“ влизат тези, които не са доволни от статуквото в обществото и търсят промяната му; в „партията на спомена“ остават тези, които се страхуват от „новото“, защото се опасават, че „новото“ ще ги лиши от онова, което получават от „старото“. Въпрос на личен избор е към коя от двете партии всеки ще се присъедини. Ако изборът за някого се окаже грешен, ще последва неговата обществена изолация. Каква е тази изолация, зависи от характера на новото, което ще замени старото. Например, ако промяната е Великата френска революция от 1879 г., изолацията се нарича „гилотина“. А „партията на надеждата“ винаги е верният избор. Така в сблъсъка на тези две обществени формации се осъществява развитието на човечеството и прогресът на човешката цивилизация.

Ето няколко красноречиви цитата от лекцията на Емерсон. „The two parties which divide the state, the party of Conservatism and that of Innovation, are very old, and have disputed the procession of the world ever since it was made [Тези две партии – на Консерватизма и на Прогреса съществуват, откакто свят светува].“ „Such an irreconcilable antagonism must have a correspondent depth of seat in the human constitution [Този непримирим антагонизъм е в основата на устройството на човечеството]. It is the opposition of Past and Future, of Memory and Hope, of the Understanding and the Reason [Това е опозицията между Миналото и Бъдещето, Спомена и Надеждата, Съглашателството и Аргумента]. It is the primal antagonism, the appearance in trifles of the two poles of nature [Това е първичен антагонизъм, който се проявява и в дреболиите между двата полюса на света].“

И още: „Conservatism always has the worst of the argument, is always apologizing, pleading a necessity, pleading that the change would be deteriorate; it must saddle itself with the mountainous load of the violence and vice of society, must deny the possibility of good, deny ideas, and suspect and stone the prophet; whilst innovation is always in the right, triumphant, attaching, and sure of final success [Консерватизмът винаги вижда най-лошото в аргумента, винаги се вайка, говори за обедняване, твърди,

че промяната ще бъде рушителна, ще доведе до насилие в обществото, отрича възможността за добри нови идеи...].“²⁾

Тези представи на Емерсон не са ли словесен изказ на идеите, които са зад Н-теоремата на Болцман, разкриваща същността на необратимите процеси в природата? Следователно очаква се феноменологичната термодинамика, която описва това, което се наблюдава в природата, да има своите проекции и в обществознанието. Разбира се, обществените и природните системи се различават съществено по своите размери, което означава, че светът на флуктуациите, характерен за малките системи, в голяма степен ще влияе върху поведението на обществените системи. С други думи „стрелата на процесите“ ще „трепти“ по-интензивно в обществените системи в сравнение с природните системи. Но и за тези относително малки системи термодинамиката ще запазва своята инструктивност.

Има опити за изграждане на термодинамичния апарат на обществените системи (Stepanic, Jr. et al., 2000). Тази термодинамика вече е въвела основните термодинамични величини. *Вътрешната енергия* U на обществената система може да се представи като съвкупност от всички ресурси в обществото, определени съобразно един набор от общоприети социални стандарти. Тя се състои от две части – свободна енергия F , която е мярка за способността на системата да извършва общественорелевантни действия, и втори компонент, свързан с ентропията S и социалната температура T , който включва размера на средствата, нужни за постигане и запазване на общественото благосъстояние. А величината, която показва колко ефективно една социална система се реализира чрез използване на предоставените ѝ възможности, се нарича социална температура.

Заклучение

Парцелирането на знанието в отделни научни области без връзка помежду им лишава обучаваните – студенти и ученици, от усещането за общност на законите, които управляват света. Образованието трябва да се реформулира по начин, при който този недостатък е напълно преодолян. Тази теза наскоро бе защитена и в една друга скорошна статия (Toshev, 2013).

Връщайки се към темата на настоящата статия, трябва да кажем, че наистина е важно да се помни, че процесите в природата и обществото са необратими и протичат в определена посока, като причината за това е в сблъсъка, конфликта, ударите между елементите, които изграждат системата. Мирни, безконфликтни преходи няма – безконфликтността е белег на застой.

По Emerson (1849): „It is a happiness for mankind that innovation has got on so far, and has so free a field before it. ... And this Hope flowered on what tree?... it grew on the wild crab of Conservatism. ... It predicts that amidst a planet peopled with conservatives, one Reformer may yet be born“.

БЕЛЕЖКИ

1. Open sources in Internet
2. Свободен превод (авт.)

ЛИТЕРАТУРА

- Больцман, Л. (1953). *Лекции по теории газов*. Москва: Гос. ТТЛ.
- Радущкевич, Л.В. (1966). *Курс статистической физике*. Москва: Просвещение.
- Boltzmann, L. (1896). *Vorlesungen über Gastheorie I*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Boltzmann, L. (1898). *Vorlesungen über Gastheorie II*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Dukov, I.L. & Toshev, B.V. (2010). The quantity „amount of substance“ and the unity „mole“: new trends. *Chemistry*, 19, 330 – 335 [In Bulgarian].
- Emerson, R.W. (1849). *The method of nature: nature; addresses and lectures*. Boston: Thurston, Torrey & Co, pp. 171 – 189.
- Stepanic, Jr., J., Stefancic, H., Zebec, M.S. & Perackovic, K. (2000). Approach to the quantitative description of the social systems based on thermodynamic formalism. *Entropy*, 2, 98 – 105.
- Toshev, B.V. (2012). Conceptual scheme of school course of chemistry: macroscopic approach. *Chemistry*, 21, 669 – 683 [In Bulgarian].
- Toshev, B.V. (2013). Remarks on the school chemistry in Bulgaria: chemical thermodynamics and chemical equilibrium. *Chemistry*, 22, 369 – 379 [In Bulgarian].

SECOND PRINCIPLE OF THERMODYNAMICS: WHY ARE THE PROCESSES IN NATURE AND SOCIETY IRREVERSIBLE?

Abstract. In this article two important questions are analyzed. What is the physical cause for the irreversibility of the processes in Nature? Why do processes in society have a direction? In both cases the interactions, conflicts, collisions between the entities of the systems are responsible for this fact. H-theorem of Boltzmann (1896) and Emerson's ideas (1841) are considered in details. The author advocates the idea for more generality in school disciplines for closer and deeper understanding the laws that govern Nature and Society.

Professor B.V. Toshev

✉ University of Sofia
1 James Bourchier Blvd.
1164 Sofia, Bulgaria
E-mail: toshev@chem.uni-sofia.bg