

Inoyatov Shukurillo Turg'unboevich
Namangan davlat pedagogika instituti, dotsent
Tuychiboyeva Muazzam Qurvonboy qizi
Azimova Shahnoza Akramjon qizi
Rajabov Javohir Iqboljon o'g'li
Xolmatov Isroiljon A'zamjon o'g'li
Namangan davlat pedagogika instituti magistrantlari

2D, 3D FAZA DIAGRAMMALARI VA TERMODINAMIK
POTENSIALLAR: MODELLAR VA VIZUALIZATSIYA

*Annotatsiya. Ushbu maqolada **modellar va vizualizatsiya** asosida gazlarning faza o'tishlari va konstruksiyasining qo'llanilishi tahlil qilinadi. Ideal gazlar uchun ichki energiya, Gibbs energiyasi va boshqa termodinamik parametrlar o'rganilib, ularning faza diagrammalaridagi barqaror va metastabil fazalarga ta'siri aniqlanadi. Maqolada 2D va 3D faza diagrammalari orqali ichki energiya va Gibbs energiyasi parametrlarining o'zaro bog'liqligi vizual tarzda ko'rsatiladi, shuningdek, zamonaviy vizualizatsiya metodlarini qo'llash orqali fizik parametrlar o'rtasidagi bog'liqlikni o'rganish imkonini beradi.*

***Kalit so'zlar:** Faza diagrammalari, metastabil faza, ichki energiya, Gibbs energiyasi, 2D - 3D vizualizatsiya.*

Иноятов Шукурилло Тургунбоевич
Наманганский государственный педагогический институт, доцент
Туйчибоева Муаззам Курвонбой кизи
Азимова Шахноза Акрамджон кизи
Раджабов Джавохир Икболджон огли
Холматов Исроилжон Азамджон огли
Магистранты Наманганского государственного педагогического института

2D, 3D ФАЗОВЫЕ ДИАГРАММЫ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ
ПОТЕНЦИАЛЫ: МОДЕЛИ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Аннотация. В данной статье анализируется применение фазовых переходов и конструирование газов на основе моделей и визуализации. Изучаются внутренняя энергия, энергия Гиббса и другие термодинамические параметры идеальных газов, а также определяется их влияние на стабильные и метастабильные фазы на фазовых диаграммах. В статье наглядно показана взаимосвязь между параметрами внутренней энергии и энергии Гиббса с помощью 2D и 3D фазовых диаграмм, а также изучена взаимосвязь между физическими параметрами с использованием современных методов визуализации.

Ключевые слова: Фазовые диаграммы, метастабильная фаза, внутренняя энергия, энергия Гиббса, 2D и 3D визуализация.

Inoyatov Shukurillo Turgunboevich

Namangan State Pedagogical Institute, Associate Professor

Tuychiboyeva Muazzam Kurvonboy qizi

Azimova Shahnoza Akramjon qizi

Rajabov Javohir Iqboljon og'li

Kholmatov Isroiljon A'zamjon og'li

Master students of Namangan State Pedagogical Institute

2D, 3D PHASE DIAGRAMS AND THERMODYNAMICAL POTENTIALS: MODELS AND VISUALIZATION

Abstract. This article analyzes the application of phase transitions and design of gases based on models and visualization. Internal energy, Gibbs energy and other thermodynamic parameters for ideal gases are studied, and their effect on stable and metastable phases in phase diagrams is determined. The article visually shows the relationship between the parameters of internal energy and Gibbs energy through 2D and 3D phase diagrams, and also allows studying the relationship between physical parameters using modern visualization methods.

Keywords: Phase diagrams, metastable phase, internal energy, Gibbs energy, 2D and 3D visualization.

Kirish.

Tizim holatini to'liq ifodalovchi fizik kattaliklardan biri bu termodinamik potentsiallardir. Ular issiqlik almashinuvi, ish bajarilishi, bosim, harorat, entropiya kabi o'zgaruvchilar orasidagi o'zaro bog'liqlikni matematik tarzda ifodalashga xizmat qiladi. Har bir termodinamik potentsial (ichki energiya, entalpiya, Helmholtz potentsiali, Gibbs potentsiali) turli jarayonlarni modellashtirishda qulaylik yaratadi va tizim holatining minimum potentsial shartiga asoslanadi. Termodinamik potentsiallar fizikaviy jarayonlarning yo'nalishini aniqlash, muvozanat shartlarini belgilash, shuningdek, kimyoviy va fazaviy o'zgarishlarni tahlil qilish uchun muhim ahamiyat kasb etadi. Masalan, Gibbs erkin energiyasi orqali kimyoviy reaksiya muvozanatga erishishi yoki borishi mumkinmi — degan savolga javob berish mumkin. Shuningdek, Helmholtz potentsiali yopiq tizimlarda energiyaning optimal taqsimotini aniqlashda foydalidir.

Ushbu maqolaning asosiy maqsadi — turli termodinamik potentsiallarning fizik mazmunini ochib berish, ularning o'zaro bog'liqligini ko'rsatish va muvozanat shartlarini matematik nuqtai nazardan tahlil qilishdir. Shu bilan birga, potentsiallar yordamida fizik tizimlar holatini qanday modellashtirish mumkinligini real misollar orqali ko'rsatish ham ushbu tadqiqotning dolzarb jihatidir. Maqolaning ahamiyati shundaki, u orqali o'quvchi yoki tadqiqotchi termodinamik tizimlarni matematik tilda qanday tahlil qilishni o'rganadi, potentsiallar yordamida tizimning qaysi holatga intilishi, muvozanatga qanday erishilishi va qanday parametrlar ustun rol o'ynashi haqida chuqur tasavvur hosil qiladi. Bu esa nafaqat nazariy, balki amaliy jihatdan ham energetika, issiqlik texnikasi, kimyo sanoati kabi sohalarda muhim ahamiyat kasb etadi.

Termodinamika – bu makroskopik tizimlarda energiya almashinuvi va o'zgarishini o'rganuvchi fundamental fandır. Bu fan asosan issiqlik va ish tushunchalari, ularning o'zaro bog'liqligi hamda turli fizikaviy tizimlar holatini ifodalashga xizmat qiluvchi kattaliklarni o'rganadi. Termodinamik analizda

markaziy o‘rin tutadigan tushunchalardan biri bu termodinamik potentsiallardir. Ular — tizim holatini xarakterlovchi va turli sharoitlarda (doimiy bosim, doimiy harorat, doimiy hajm va h.k.) foydali ishlarga aylantiriladigan energiyaning miqdorini ifodalaydi. Termodinamik potentsiallar to‘rt turga bo‘linadi Ichki energiya (U), Entalpiya (H), Helmholtz erkin energiyasi (F), Gibbs erkin energiyasi (G) dan iborat. Ular har biri muayyan termodinamik parametrlar (harorat, bosim, entropiya, hajm) doimiy bo‘lgan jarayonlarda foydali ma’lumot beradi. Masalan, ichki energiya (U) tizimdagi barcha energiya manbalarini (issiqlik, kinetik va potentsial energiyalar) o‘z ichiga oladi va u izoxor-izotermik jarayonlarda asosiy rol o‘ynaydi. Entalpiya ($H=U+pV$) asosan izobar jarayonlarda qo‘llaniladi, ya’ni bosim doimiy bo‘lgan jarayonlarda. Helmholtz potentsiali ($F=U-TS$) esa doimiy hajm va harorat sharoitida samarali hisoblash uchun mo‘ljallangan. Gibbs potentsiali ($G=H-TS$) esa doimiy bosim va harorat sharoitidagi jarayonlarni tahlil qilishda qo‘l keladi. Termodinamik potentsiallarning ilmiy qiymati shundaki, ularning differensial shakllari orqali termodinamikaning to‘rt asosiy qonuni hamda ko‘plab hosila tenglamalarni (masalan, Maksvell tenglamalari) keltirib chiqarish mumkin. Ularning orqali muvozanat holatini aniqlash, fazalar o‘tkazish jarayonlari, kimyoviy reaksiyalar, texnologik tizimlarni optimallashtirish va enegetik samaradorlikni baholash mumkin. Bundan tashqari, zamonaviy energetika tizimlari, kimyo sanoati, issiqlik almashinuvi apparatlari, muhandislik tizimlari, biologik sistemalar va hatto kvant sistemalarda ham termodinamik potentsiallar orqali nazariy modellashtirish keng qo‘llaniladi. Masalan, Gibbs potentsiali yordamida reaksiya boradimi yoki yo‘qmi — degan savolga javob topish mumkin: agar $G < 0$ bo‘lsa, jarayon o‘z-o‘zidan amalga oshadi. SHu bilan birga, fazaviy o‘tishlarda (masalan: suv–muz, suyuq–gaz holatlari o‘tish) Gibbs yoki Helmholtz potentsiallari o‘zaro tenglashadi. Ushbu maqola doirasida biz termodinamik potentsiallarning nazariy asoslarini batafsil tahlil qilamiz, ularning o‘zaro bog‘liqligini matematik jihatdan asoslab beramiz va amaliy jihatdan qanday qo‘llanishini misollar orqali ko‘rsatamiz. Ayniqsa, potentsiallar orqali tizimning muvozanat holatini qanday aniqlash mumkinligi,

qaysi parametrlar ta'sir etishi va qanday shartlarda tizim energiya nuqtai nazaridan eng qulay holatga erishishi masalalari yoritiladi.

Maqolaning ahamiyati shundan iboratki, u termodinamik tizimlarni faqatgina empirik yoki eksperimental emas, balki matematik modellashtirish asosida chuqur o'rganish imkonini beradi. Bu esa ilmiy izlanishlar, injenerlik loyihalari va turli texnologik jarayonlarni tahlil qilishda muhim ahamiyat kasb etadi. Potensiallarning to'g'ri tanlanishi va qo'llanilishi yordamida tizim samaradorligini oshirish, energiya yo'qotilishini kamaytirish, va optimal ishlash sharoitlarini aniqlash mumkin bo'ladi.

Hozirgi kunda ushbu soha bo'yicha Y. Grabovsky (2023) – Elastik suyuqliklar va ularning faza diagrammalari, Maxwell konstruktsiyasi yordamida suyuqlikning bosim va kimyoviy potensialini taxlil qiladi, Z.M. Xu (2024) – Qora tuynuklar va AdS faza diagrammalari, Maxwell teng maydon qonuni yordamida qora tuynuklarning termodinamik xususiyatlarini o'rganadi. C. Constantinou (2023) – Maxwell va Gibbs konstruktsiyalari o'rtasidagi farqlar va faza o'tishlarini tahlil qilish bilan, L. Del Re (2024) – Kvant tizimlaridagi simmetriya buzilgan va tartibsiz fazalar, kvant faza diagrammalarini maydon ta'siri o'rganish bilan shug'ullunib keladi. D. Greve (2025) esa – Noaniv tizimlar va ularning faza diagrammalari, bir xil va tebranishli holatlarning birga mavjudligini o'rganadi. Shu bilan birgalikda xozirda ushbu soxada quyidagi muammolar ham mavjud jumladan: Murakkab matematik hisoblar (integralni hisoblash va spinodal nuqtalarni aniqlash qiyin). Eksperimental ma'lumotlarning cheklanganligi (kvant tizimlar va qora tuynuklar uchun ma'lumotlar yetarli emas). Murakkab fizik sharoitlar (metastabil fazalar va noaniv holatlar diagrammani aniqlashni qiyinlashtiradi). Katta parametrlar soni (kichik o'zgarishlar diagramma va izotermalarni sezilarli o'zgartiradi). Nazariy va real tizimlarning farqi (ideal modellarda qabul qilingan sharoitlar real tizimlarda farq qiladi). Noaniv va biologik tizimlarda prognozlash qiyinligi bu soha bo'yicha ayrim mummolarni keltirib chiqaradi.

Nazariy qism. Termodinamik potentsiallar — bu fizika va kimyo sohasida termodinamik tizimlarni tahlil qilish uchun asosiy kontseptsiyalardan biri hisoblanadi. Ular tizimning har qanday holatini matematik va fizik jihatdan ifodalaydigan funktsiyalardir. Bu potentsiallar yordamida tizimning energiyasini, entropiyasini va boshqa termodinamik kattaliklarni kuzatish, shuningdek, turli jarayonlar jarayonidagi energiya almashinuvini tahlil qilish mumkin. Termodinamik potentsiallarda quyidagilar muhim xisoblanadi: Har qanday termodinamik tizim o'z holatini ko'rsatuvchi ayrim funktsiyalarga ega bo'ladi. Masalan, harorat, bosim, entropiya, va hajm kabi parametrlar tizimning xossalari tasvirlaydi, lekin ular to'g'ridan-to'g'ri tizimning energiya holatini aniqlash uchun yetarli emas. Termin "potentsial" bu yerda shunday funktsiyalarni anglatadi, ular Tizimning ichki energiyasini va boshqa shakllardagi energiyani ifodalaydi, Tizimning termodinamik holatini to'liq aks ettiradi, Qaysi yo'nalishda jarayon rivojlanishi mumkinligini ko'rsatadi, Tizimning muvozanat holatini aniqlashda asosiy rol o'ynaydi.

Holat funktsiyalari va potentsiallar - Termodinamikada har bir holat funktsiyasi, masalan, ichki energiya (U), entropiya (S), hajm (V), yoki bosim (P), tizimning aniq bir holatini tasvirlaydi. Ammo bu funktsiyalar termodinamik jarayonning qay yo'nalishda borishini ko'rsatmaydi. Termodinamik potentsiallar esa — shunday maxsus holat funktsiyalaridirki, ularning minimallasishi yoki maksimallasishi orqali tizimning tabiiy ravishda qay yo'nalishda rivojlanishini bilish mumkin. Ichki energiya (U) — izoentropik ($S = \text{doimiy}$) va izoxorik ($V = \text{doimiy}$) sharoitda kamayish yoki ko'payish tendentsiyasini ko'rsatadi, Entalpiya (H) — izobarik ($P = \text{doimiy}$) sharoitlarda energiyani ifodalaydi, Helmholtz erkin energiyasi (F) — izotermik ($T = \text{doimiy}$) va izoxorik sharoitlarda ozayishi orqali jarayonni ko'rsatadi, Gibbs erkin energiyasi (G) — izotermik va izobarik sharoitlarda jarayonning yo'nalishini belgilaydi. Umumiy holda, potentsiallar tashqi ta'sirlar va termodinamik o'zgaruvchilarga qarab turlicha shakllanadi. To'rt asosiy potentsialning har biri muayyan tuzilmadagi sharoitlarga mos keladi.

Ichki energiya (U) — bu fizik tizimning (jism, modda, yoki zarrachalar majmuasining) ichki mikroskopik holatida saqlanayotgan energiyasidir. Ya'ni, molekulalar, atomlar va zarrachalarning harakati va o'zaro ta'siri natijasida jamlangan energiya. U butun jismning emas, jismni tashkil etuvchi zarrachalarning energiyasi. Termodinamikada “sistema” deganda, masalan: (gaz hajmi, suyuqlik qatlami, qattiq jism bo'lagi, yoki kimyoviy reaksiyada ishtirok etuvchi moddalar majmuasi tushuniladi). SHu “sistema”ning ichki qismidagi energiya — ichki energiya (U) deb ataladi. Ichki energiya jismning mikrotuzilishi bilan bog'liq va uch asosiy qismdan tashkil topadi: Kinetik energiya — molekulalarning tartibsiz (xaotik) harakatidir ya'ni ular translyatsion (bo'sh harakat), aylanma (rotatsion), tebranish (vibratsion) kabilardir. Potentsial energiya — zarrachalar orasidagi kuch ta'siri natijasidagi energiya (masalan, molekulalar bir-biriga yaqin yoki uzoq bo'lgandagi tortish/itarash kuchlari). Ichki bog'lanish energiyasi — atomlar ichidagi elektronlar va yadro o'rtasidagi bog'lanish energiyasi xisoblanadi. Ichki energiya har qanday moddiy sistemada mavjud bo'lib, ular gazlarda — molekulalar tez harakatda, shuning uchun U asosan kinetik energiya sifatida, suyuqliklarda — molekulalar o'zaro yaqin bo'lgani uchun U da potentsial energiya ham katta rol o'ynaydi. Qattiq jismlarda — atomlar kristall panjarada tebranish holatida bo'ladi, U asosan tebranish energiyasidan iborat. Ichki energiya — bu sistema ichidagi barcha zarrachalarning mikroskopik energiyalarining yig'indisi. Uni tashqi kuzatuvchi bevosita o'lchay olmaydi, faqat o'zgarishini hisoblaydi:

$$\Delta U = Q - A \quad U = Q - A \quad \Delta U = Q - A$$

Bu — termodinamikaning 1-qonuni, ya'ni energiya saqlanish qonunining termodinamikadagi ko'rinishidir. Isitilgan gazda molekulalar tezroq harakat qiladi U ortib boradi, kengayishda ish bajargan gaz: tizim tashqi muhitga ish bergani uchun U kamayadi. Qattiq jismni qizdirish: atomlar tebranish amplitudasi ortib, ichki energiya ko'payadi. Oddiy qilib aytganda Ichki energiya — bu har bir fizik

ob'ektning ichidagi "mikrodunyo"da saqlanayotgan energiyadir. U har qanday moddada mavjud va termodinamik holatning asosiy ko'rsatkichidir.

Quyidagi formulalar hamma ishimizning asosiy vositasi bo'ldi — ulardan boshlaymiz, keyin har bosqich uchun nima kuzatilgani va nima uchun shunday bo'lgani haqida gaplashamiz.

$$dA = -SdT - PdV \Rightarrow P = -(\partial A / \partial V)_T, S = -(\partial A / \partial T)_V$$

$$G = A + PV, H = U + PV, U = A + TS$$

Ideal gaz ichki energiyasi (monatomik) va entalpiya ko'rinishi bizga avvaldan ma'lum va u quyidagi bo'ladi:

$$U = 3/2 nRT, H = 5/2 nRT$$

Ideal gazning molyar Helmholtz potentsiali (klassik translatsion komponent, termal to'lqin uzunligi Λ):

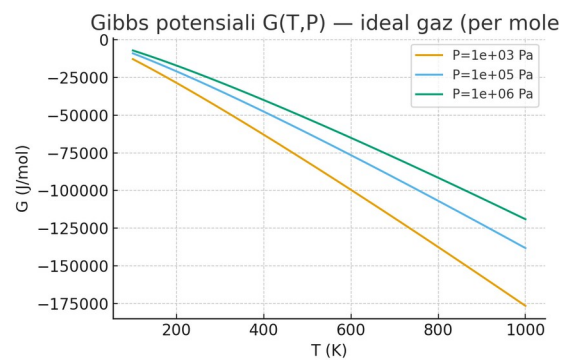
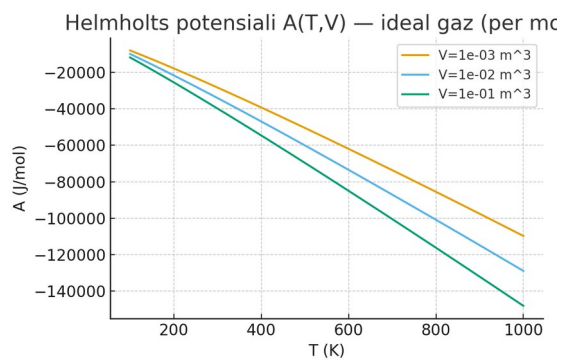
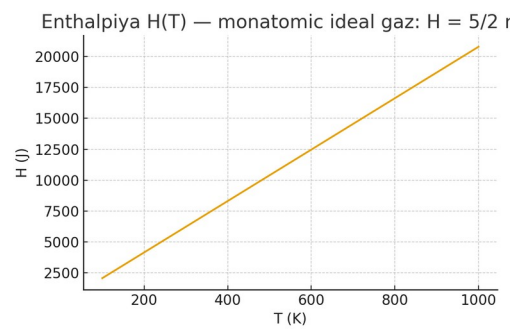
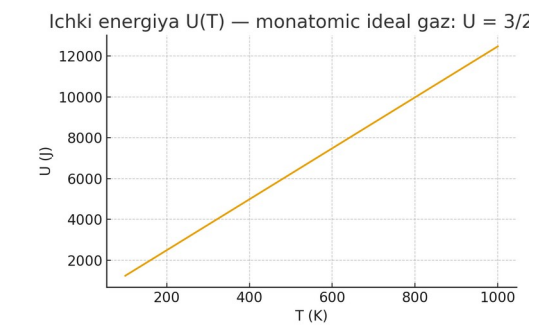
$$A_{id}(T, V) \approx -RT [\ln((V/N_A)/\Lambda(T)^3) - 1], \Lambda(T) \propto T^{(-1/2)}.$$

Van-der-Waals tenglamasi va A_{vdW} :

$$P = RT/(V-b) - a/V^2, A_{vdW}(T, V) = A_{id}(T, V-b) - a/V.$$

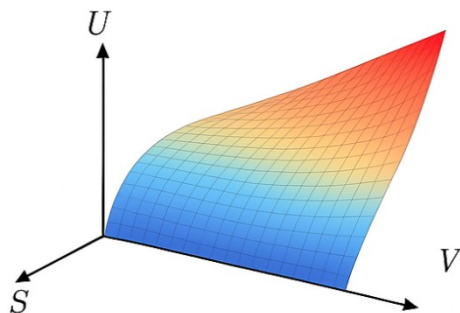
1. Ichki energiya $U(T)$ Monatomic ideal gaz uchun: $U = (3/2)nRT$. Bu funksiya T ga to'liq chiziqli.
2. Entalpiya $H(T)$ Monatomic ideal gaz uchun: $H = U + PV = (5/2)nRT$.
3. Gelmholtz potentsiali $A(T, V)$ — per mole Klassik ifoda (bir molekula orqali termal to'lqin uzunligi Λ):
4. Gibbs potentsiali $G(T, P)$ — per mole $G = A + PV_m$, ideal gaz uchun $V_m = RT/P$, shuning uchun $G = A + RT$. Grafik bir nechta bosimlar uchun ko'rsatilgan. Biz quyida yuqoridagi termodinamik kattaliklarni funktsiya sifatida ko'rib chiqamiz

2D grafiklar

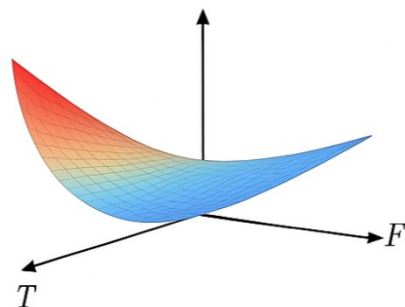


3D grafiklar

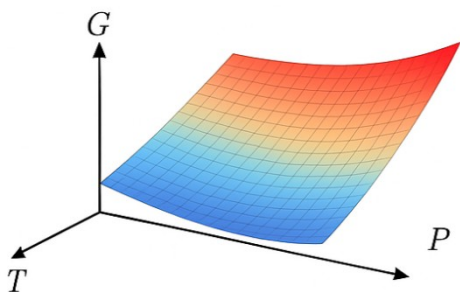
Ichki energiya (U)



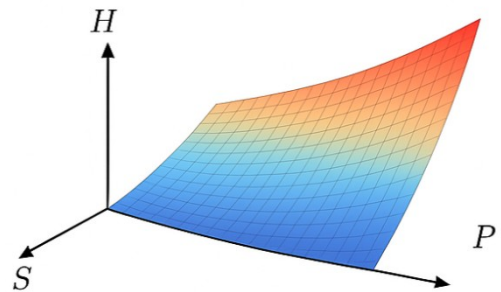
Gelmholts energiyasi (F)



Gibbs energiyasi (G)



Entalpiya (H)



Xulosa. Yuqorida barcha bosqichlarda kuzatilgan natijalar va ularning fizik-matematik mazmuni bo'yicha batafsil va tizimli xulosa keltiriladi. Monatom ideal gaz uchun ichki energiya U faqat temperatura T ga bog'liq va chiziqli $U = \frac{3}{2} nRT$

. Entalpiya $H=(5/2)nRT$ bo'lib, u ham T ga chiziqli. Gelmholtz potentsiali $A(T, V)$ translatsion entropiya va hajm ta'sirini aks ettiradi, bu yerda Gibbs energiyasi $G=A+PV$ va ideal gazda $G=A+RT$ shunday qilib, ideal gazda U mustaqil parametr sifatida faqat T ga bog'lanadi, A va G esa T va V (yoki T va P) o'rtasidagi entropik va konfiguratsion bog'liqlikni ko'rsatadi. 2D va 3D grafiklar orqali parametrlarning o'zaro bog'lanishi vizual tarzda aniq ko'rsatildi. T va P bir-biriga izobarik va izoxorik sharoitlarga qarab ta'sir ko'rsatadi. Bu katta hajmda ko'proq mikrokonfiguratsiyalar va katta entropiya bilan izohlanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

1. Grabovsky, Y. (2023). *Elastic Liquid Model and Maxwell Equal Area Construction*. [arXiv:2306.02495](https://arxiv.org/abs/2306.02495)
2. Constantinou, C., Zhao, T., Han, S., Prakash, M. (2023). *Framework for Phase Transitions between the Maxwell and Gibbs Constructions*. [Phys. Rev. D 107, 074013](https://arxiv.org/abs/2306.07401)
3. Omar, A.K. (2023). *Mechanical Theory of Nonequilibrium Coexistence and Phase Separation*. [PMC:10160997](https://arxiv.org/abs/2306.10160)
4. Laughlin, D.E. (2021). *Construction of Equilibrium Phase Diagrams: Some Errors and Corrections*. [NSF:10297302](https://arxiv.org/abs/2102.10297)
5. Müller, G. (2015). *Thermodynamics of Phase Transitions II*. [Digital Commons URI](https://arxiv.org/abs/1502.00001)
6. Masatsugu Sei Suzuki, Itsuko S. Suzuki (2015). *Understanding on Thermodynamic Properties of Van der Waals Equation of State with the Use of Mathematica*. [ResearchGate](https://arxiv.org/abs/1502.00001)
7. Thiele, U., Frohoff-Hülsmann, T., Engelnkemper, S., Knobloch, E., Archer, A.J. (2019). *First Order Phase Transitions and the Thermodynamic Limit*. [arXiv:1908.11304](https://arxiv.org/abs/1908.11304)
8. Cai, R.-G., Li, L., Li, L.-F., Yang, R.-Q. (2014). *Towards Complete Phase Diagrams of a Holographic P-wave Superconductor Model*. [arXiv:1401.3974](https://arxiv.org/abs/1401.3974)
9. Liu, H. (2021). *The Mean-Field Dividing Interface is United with the Widom Line*. [arXiv:2110.11135](https://arxiv.org/abs/2110.11135)
10. Hendi, S.H., Panahiyan, S., Momennia, M. (2015). *Extended Phase Space of AdS Black Holes in Einstein-Gauss-Bonnet Gravity with a Quadratic Nonlinear Electrodynamics*. [arXiv:1503.03340](https://arxiv.org/abs/1503.03340)