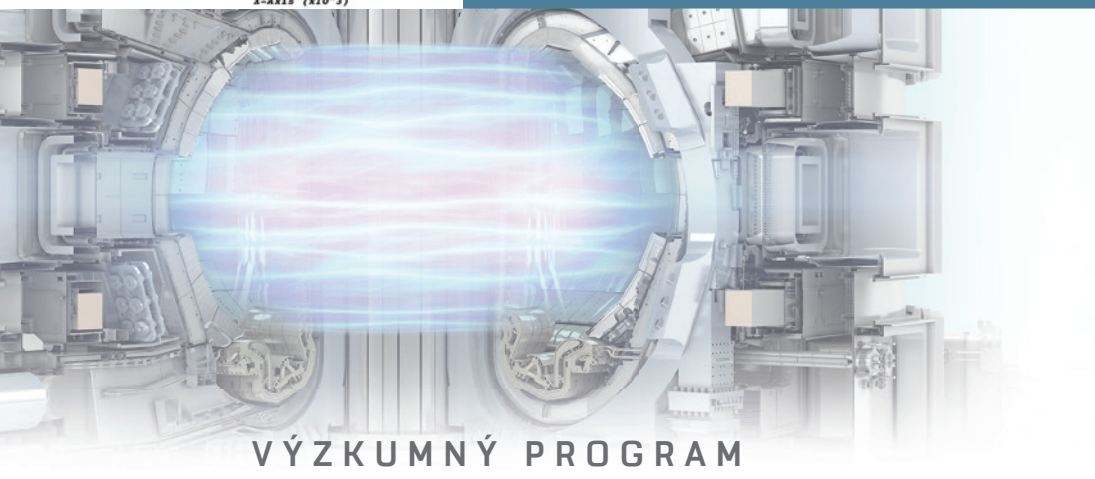


Slavomír Entler
Jan Horáček
Ondřej Ficker
Karel Kovařík
Jan Mlynář

Lawsonovo kritérium



VÝZKUMNÝ PROGRAM

UDRŽITELNÁ ENERGETIKA

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod | 3 |
| Jaderná fúze | 5 |
| Výzkum řízené fúzní reakce | 5 |
| Tokamak | 7 |
| Ohřev paliva | 9 |
| Jaderná zóna | 10 |
| Fúzní reakce | 12 |
| Fúzní reaktivita | 14 |
| Hustota a teplota plazmatu | 15 |
| Lawsonovo kritérium | 17 |
| John David Lawson | 17 |
| Interpretace rovnic Lawsonova kritéria | 19 |
| Původní Lawsonovo kritérium | 20 |
| Obecná formulace kritéria | 21 |
| Kritérium vědeckého vyrovnání | 22 |
| Kritérium zapálení | 25 |
| Kritérium inženýrského vyrovnání | 27 |
| Podkritériální energetický reaktor | 31 |
| Bezrozměrná formulace kritériálních rovnic | 33 |
| Orientační podmínky pro bezneutronovou fúzi | 34 |
| Zpřesnění kritériálních rovnic | 36 |
| Radiační ztráty | 36 |

Pokročilé kritériální rovnice ———— **40**

Energetická využitelnost fúzních reakcí ———— **47**

Závěr ———— **49**

Odkazy ———— **50**

Autorský tým ———— **52**

Úvod

Jaderná fúze je perspektivní nízkoemisní, nízkouhlíkový a nízkoodpadový energetický zdroj, který může zajistit dostatek energie pro celé lidstvo po miliony let. Energetické využití jaderné fúze významně změní světovou energetiku a díky vysokokapacitní produkci levné elektřiny vyráběné bez dopadu na životní prostředí umožní realizovat úplnou elektrifikaci většiny výrobních procesů a dopravní infrastruktury. Tím dojde k výraznému snížení negativních vlivů civilizace na životní prostředí. Zásoby fúzního paliva na Zemi jsou prakticky nevyčerpatelné a dostupné po celém světě jako příměs vody. Ve vesmíru tvoří fúzní palivo převážnou část viditelné hmoty. Při uvolňování energie bude jako odpad vznikat inertní plyn helium, který se využije přímo v elektrárně, a případně vodík využitelný v průmyslu. Množství konstrukčního odpadu bude závislé na vyspělosti fúzních reaktorů a tento odpad bude recyklovatelný.

Fúzní elektrárny budou inherentně bezpečné bez jakéhokoliv rizika závažné havárie, protože nekontrolovaná fúzní reakce je ve fúzních reaktorech fyzikálně vyloučená. Pro průběh energeticky ziskové fúzní reakce jsou nezbytné velmi vysoké teploty paliva, které na Zemi v přirozených podmínkách nejsou. Jakákoliv závažnější porucha zařízení povede k ochlazení paliva a okamžitému přerušení probíhající fúzní reakce. V reaktorech bude velmi malé množství paliva, jen několik gramů, takže ani únik paliva při poškození konstrukce reaktoru nijak neohrozí životní prostředí. Ve srovnání se všemi známými průmyslovými zdroji energie včetně obnovitelných bude dopad výroby elektřiny ve fúzních elektrárnách na životní prostředí nejnižší.¹

Jadernou fúzi ale dosud neumíme využívat. Britský inženýr J. D. Lawson byl jedním z vědců, kteří již v počátcích fúzního výzkumu upozorňovali na vysokou náročnost ovládnutí jaderné fúze, a jeho práce se stala základem pro hodnocení technické vyspělosti fúzních reaktorů na cestě k fúzním elektrárnám. V roce 1955 J. D. Lawson odvodil kritérium stanovující základní požadavky, které musí splňovat fúzní palivo, aby fúzní elektrárny dosáhly kladné energetické bilance a vyráběly užitečnou elektrickou energii. Kritérium představuje zjednodušenou energetickou bilanci elektrárny s fúzním reaktorem zaměřenou na specifické rysy fúzních elektráren, kterými jsou nutnost energeticky náročného ohřevu paliva a recirkulace výkonu ohřevu.

Na základě konceptu původního kritéria byly v průběhu následujících let definovány dvě další kritériální rovnice popisující energetickou bilanci samotného fúzního paliva, tj. bez vlivu technologie elektrárny, označované jako kritérium vědeckého vyrovnání (scientific breakeven, zkráceně breakeven), a kritérium zapálení (ignition). Původní kritériální rovnice vztažená na celou fúzní elektrárnu se označuje jako kritérium inženýrského vyrovnání (engineering breakeven).

Klíčovým dokumentem problematiky je článek J. D. Lawsona² z roku 1957. Většina knih o jaderné fúzi cituje Lawsonův přístup a uvádí základní kritériální rovnice týkající se plazmatu, nejčastěji kritéria zapálení.³⁻⁶ Několik studií se zabývá odvozením

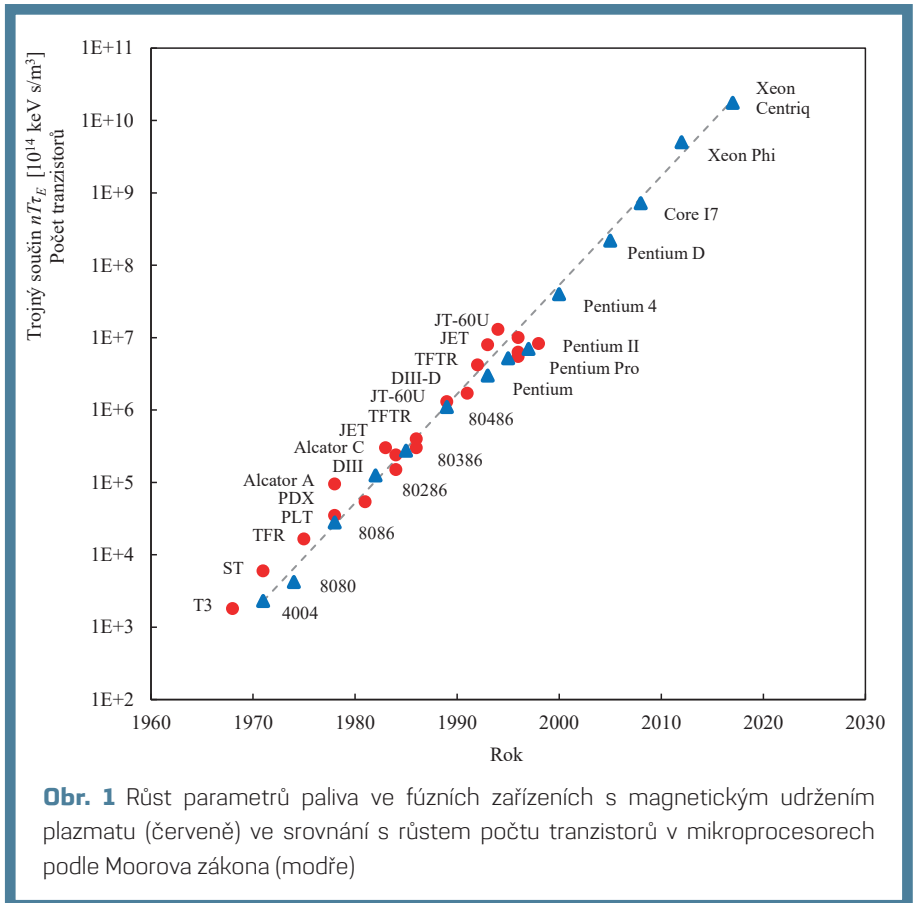
kritéria pro vědecké vyrovnání a zapálení pro fúzní reakce DT a DHe3 se započítáním přítomnosti helia⁷ nebo analýzou kritéria zapálení^{8, 9} a kritéria vědeckého vyrovnání⁹ se započítáním přítomnosti produktů reakce s explicitním vyjádřením radiačních ztrát. Kritérium inženýrského vyrovnání bylo popsáno základní rovnicí,¹⁰ avšak není předmětem žádné podrobné studie. Informace o Lawsonově kritériu lze také nalézt na internetu, avšak tyto informace jsou často nekompletní, nepřehledné a někdy i zmatečné.

Lawsonovo kritérium je použito pro zhodnocení možností energetického využití vybraných fúzních reakcí. Hodnocení se provádí pomocí kritéria inženýrského vyrovnání a platí pro zařízení s magnetickým udržením plazmatu v tepelné rovnováze, jako jsou tokamaky, na jejichž principu budou pracovat první fúzní elektrárny, a stellarátory.

Jaderná fúze

Výzkum řízené fúzní reakce

Výzkum fúzní reakce jako zdroje energie byl zahájen krátce po druhé světové válce. Na rozdíl od výzkumu řízené štěpné reakce postupoval nesrovnatelně pomaleji. Energeticky zisková fúzní reakce vyžaduje speciální podmínky, které na Zemi nemohou samovolně nastat a jejich dosažení je obtížné. Přes mnoho slepých odboček se postupně dařilo fúzní zařízení zdokonalovat. Dosahované parametry paliva ve fúzních zařízeních přitom rostly podle Moorova zákona. Moorův zákon ze světa počítačů říká,

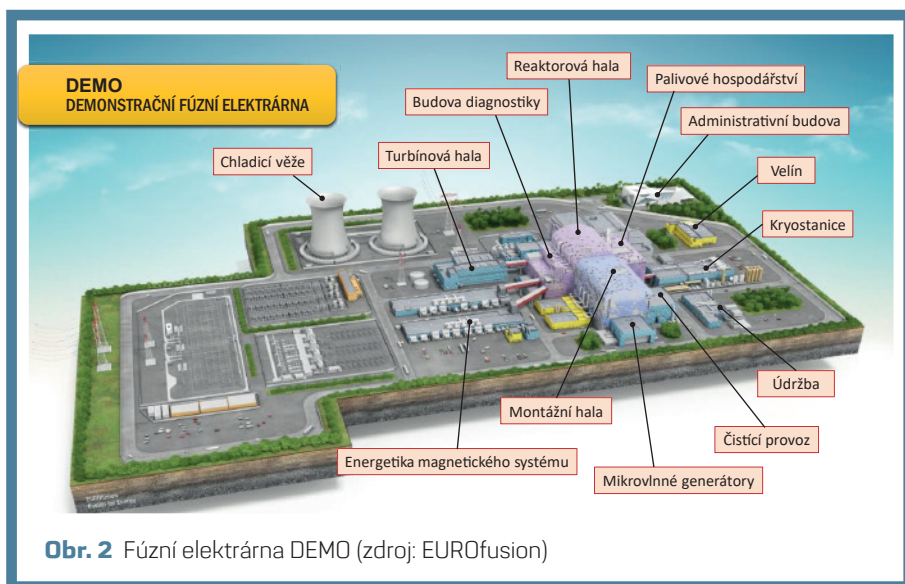


Obr. 1 Růst parametrů paliva ve fúzních zařízeních s magnetickým udržení plazmatu (červeně) ve srovnání s růstem počtu tranzistorů v mikroprocesorech podle Moorova zákona (modře)

že se počet tranzistorů v počítačových procesorech každé dva roky zdvojnásobí. Stejně rychlým tempem rostly i parametry fúzního paliva ve fúzních zařízeních vyjádřené trojným součinem hustoty a teploty paliva a doby, po kterou si palivo tyto parametry udrží (**obr. 1**). Několik desetiletí intenzivního výzkumu bylo úspěšně završeno v devadesátých letech minulého století.

Milníkem výzkumu jaderné fúze se staly úspěšné experimenty na americkém reaktoru TFTR a evropském reaktoru JET v devadesátých letech minulého století. Reaktor TFTR vyvinul v roce 1994 při řízené fúzní reakci fúzní výkon 11 MW. Reaktor JET pak v roce 1997 dosáhl špičkového fúzního výkonu 16 MW a v roce 2021 výkonu 12 MW po dobu 5 sekund. Tyto experimenty prokázaly schopnost uvolňovat energii v řízené fúzní reakci. Dalším úkolem fúzní vědecké komunity se stal vývoj energetického reaktoru a výzkum se soustředil na přípravu a realizaci projektu ITER.¹¹ Cílem projektu ITER je postavit reaktor o fúzním výkonu 500 MW a prokázat technickou realizovatelnost fúzních energetických reaktorů. Projekt ITER bude testovat řízení fúzní reakce s vysokým uvolňovaným výkonem a reaktorové technologie potřebné pro fúzní elektrárny.

Na projekt ITER navazují projekty prvních, demonstračních, fúzních elektráren, zkráceně označovaných jako DEMO (**obr. 2**). Hlavním problémem, na který naráží příprava fúzních elektráren, je nedokončený vývoj některých technologií. V evropském projektu DEMO proto figurují fáze DEMO1 a DEMO2, někdy také označované



Obr. 2 Fúzní elektrárna DEMO (zdroj: EUROfusion)

jako FLEXI-DEMO, které reflektují postupný technologický vývoj. První fúzní elektrárna DEMO1 se připravuje na bázi dostupných technologií, zatímco pokračuje vývoj technologií pro DEMO2.¹²

Na základě smlouvy o fúzním výzkumu EFDA (European Fusion Development Agreement) schválila Evropská komise v roce 2012 klíčový dokument *Fusion Electricity: A roadmap to the realization of fusion energy*, zkráceně nazývaný Fusion Roadmap, který definoval záměr Evropské unie zahájit výrobu elektrické energie pomocí jaderné fúze. Fusion Roadmap byla v roce 2018 aktualizována¹³ a přizpůsobila se harmonogramu projektu ITER. Zprovoznění prototypu fúzní elektrárny DEMO1 se předpokládá do 20 let od dosažení plného výkonu reaktoru ITER. K připojení evropské elektrárny DEMO1 do elektrické sítě by tak mělo dojít okolo roku 2060.

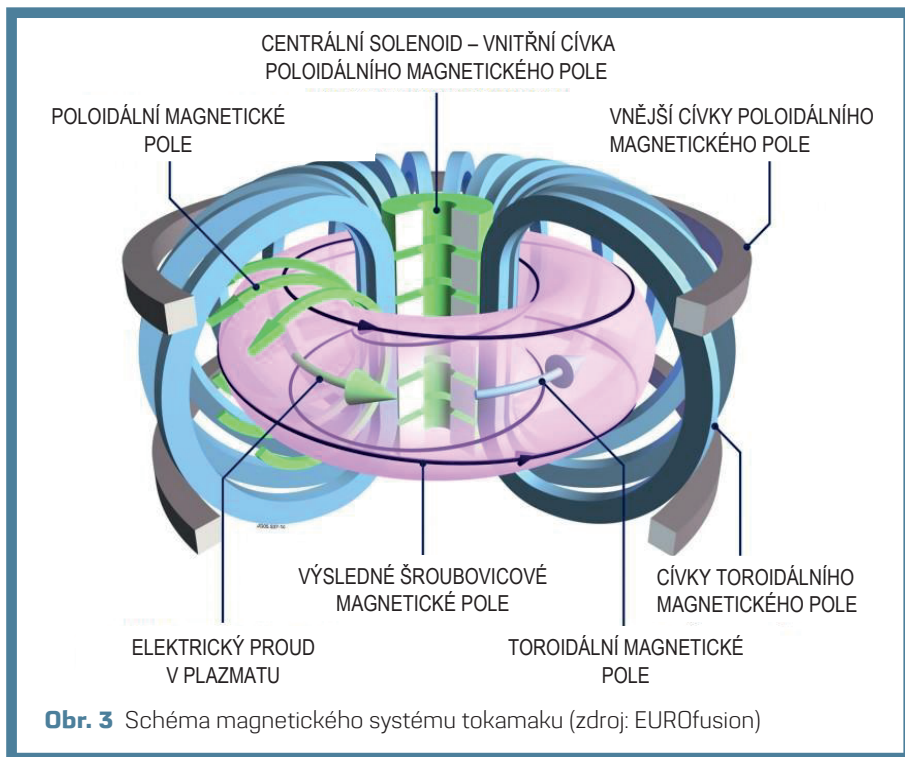
Tokamak

V průběhu desítek let fúzního výzkumu bylo postaveno velké množství různých experimentálních zařízení, protože nebylo zřejmé, jaký fyzikální koncept povede nejrychleji k cíli. Hlavní skupinu tvořily pinče, magnetické pasti, stellarátory a tokamaky využívající k udržení reagujících částic magnetické pole (Magnetic Confinement Fusion). S rozvojem urychlovačů a laserů byla postavena také řada experimentálních zařízení využívajících k udržení částic jejich vlastní setrvačnost (Inertial Confinement Fusion). Všechna tato zařízení umožnila zkoumat fyzikální a technické otázky fyziky plazmatu a jaderné fúze, avšak k energetickému využití se přiblížily pouze tokamaky.

Tokamak, stejně jako ostatní zařízení s magnetickým udržením, využívá skutečnosti, že pro dosažení energetického zisku se musí fúzní palivo ohřát na teploty v řádu stovek milionů K, při kterých je ve skupenství plně ionizovaného plazmatu. Plazma je kvazineutrální systém nabitých částic, na které je možné působit elektrickým a magnetickým polem. Magnetické pole tokamaku brání kontaktu horkého plazmatu s konstrukcí reaktoru a izoluje plazma od jeho vnitřních stěn.

Hlavní součástí tokamaků je toroidální (prstencová) vakuová nádoba, kterou obklopují magnetické cívky vytvářející v nádobě toroidální magnetické pole (**obr. 3**). V ose toroidu je umístěn centrální solenoid, jenž indukuje v plazmatu vysoký elektrický proud. Tento proud okolo sebe vytváří poloidální magnetické pole. Podél prstence komory jsou rozmístěny vnější cívky poloidálního magnetického pole. Součtem magnetického pole cívek a elektrického proudu v plazmatu vzniká helikální (šroubovicové) magnetické pole, které udržuje plazma v ose nádoby.

Izolace plazmatu magnetickým polem tokamaku ale není dokonalá. Energie z plazmatu uniká především radiací. Kvůli příčné difúzi způsobené vzájemnými srážkami částic a turbulencím také probíhá pohyb částic a přenos energie z centra



k okraji plazmatu, kde dochází k interakcím plazmatu s konstrukcí reaktoru. Měrné energetické ztráty se snižují se zvětšováním objemu plazmatu. Ve velkém objemu plazmatu dochází k většímu zpětnému pohlcování některých emitovaných elektromagnetických vln a tím ke snižování radičních ztrát.⁴ Současně klesá vliv difuze částic na udržení energie,¹⁴ protože střední volná dráha a střední doba mezi srážkami zůstávají bez ohledu na větší objem stejné. Ve velkých reaktorech je proto udržení energie v plazmatu lepší než v malých zařízeních. Teprve jakmile v budoucnu dokážeme lépe izolovat plazma, bude možné fúzní reaktory zmenšit.

Magnetické udržení plazmatu v tokamaku vychází z rovnováhy mezi tlakem plazmatu a magnetického pole. Vztah pro tlak plazmatu lze odvodit ze stavové rovnice ideálního plynu:³

$$p_{pl} = nT ,$$

kde n je hustota plazmatu a T je teplota plazmatu vyjádřená v jednotkách energie.

Tlak magnetického pole odpovídá hustotě magnetické energie a je úměrný druhé mocnině magnetické indukce:⁶

$$p_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} ,$$

kde B je magnetická indukce a μ_0 je permeabilita vakua. Stabilita plazmatu je ovlivňována řadou faktorů, například turbulencemi v plazmatu, tvarem plazmatu anebo vlastnostmi okrajové vrstvy plazmatu. Obecně ale platí, že pro stabilitu plazmatu je nezbytné udržovat výrazně vyšší tlak magnetického pole, než je tlak plazmatu.⁶ Poměr tlaku plazmatu a tlaku magnetického pole vyjadřuje faktor β :

$$\beta = \frac{2\mu_0 nT}{B^2} .$$

V současných tokamacích se faktor β pohybuje na úrovni jednotek procent.^{15, 16} V ustáleném režimu jsou faktor β a magnetické pole konstantní, a nárůst teploty plazmatu proto musí být kompenzován poklesem jeho hustoty a naopak:

$$nT \approx const .$$

Při ustáleném provozu reaktorů s magnetickým udržením je hustota plazmatu svázaná s jeho teplotou a jejich součin je limitován velikostí magnetického pole. Plazma lze například ohřát na velmi vysoké teploty, avšak jeho hustota je pak omezena dostupnou velikostí magnetického pole reaktoru:

$$nT \ll \frac{B^2}{2\mu_0} .$$

Ohřev paliva

Aby proběhla fúzní reakce, musí mít atomová jádra dostatečnou kinetickou energii na překonání elektrostatické coulombovské bariéry. Výška coulombovské potenciálové bariéry je přibližně 280 keV pro DT reakci a 210 keV pro DD reakci.¹⁷ To odpovídá teplotám 3,3 miliardy K, resp. 2,4 miliardy K. Díky kvantovému tunelování ale fúzní reakce probíhají i při mnohem nižších teplotách, a pro spuštění fúzních reakcí stačí palivo ohřát na teploty v řádu vyšších desítek až stovek milionů K.

Ohřev paliva v tokamacích probíhá okamžitě po vytvoření plazmatu díky protékajícímu elektrickému proudu. Avšak s rostoucí teplotou klesá elektrický odpor

plazmatu a tento způsob ohřevu přestává být účinným. Dosažitelná teplota závisí na velikosti proudu a pohybuje se od 20 do 50 milionů K.⁴ Další ohřev plazmatu zajišťují sofistikované systémy ohřevu. Patří mezi ně injektory svazku vysokoenergetických neutrálních částic a systémy ohřevu elektromagnetickými vlnami.⁵ Celková účinnost transformace energie z elektrické do tepelné energie plazmatu se v současnosti pohybuje okolo 20–30 procent, v budoucnu se předpokládá dosažení 60–70 procent.^{18, 19}

V energetických reaktorech bude významná část výkonu potřebného pro ohřev plazmatu dodávána probíhající fúzní reakcí. Nabité částice vzniklé při fúzní reakci zůstanou zachyceny magnetickým polem v plazmatu a procesem termalizace postupně předají svou energii částicím plazmatu. V případě dosažení stavu zapálení bude tento vlastní ohřev plazmatu dostatečný pro kompenzaci ztrát plazmatu, a jeho vnější ohřev nebude nutný. V reálném provozu ale bude vnější ohřev probíhat nepřetržitě jako vedlejší efekt při generování elektrického proudu v plazmatu. Vnější ohřev se stane také důležitým nástrojem provozního řízení plazmatu.

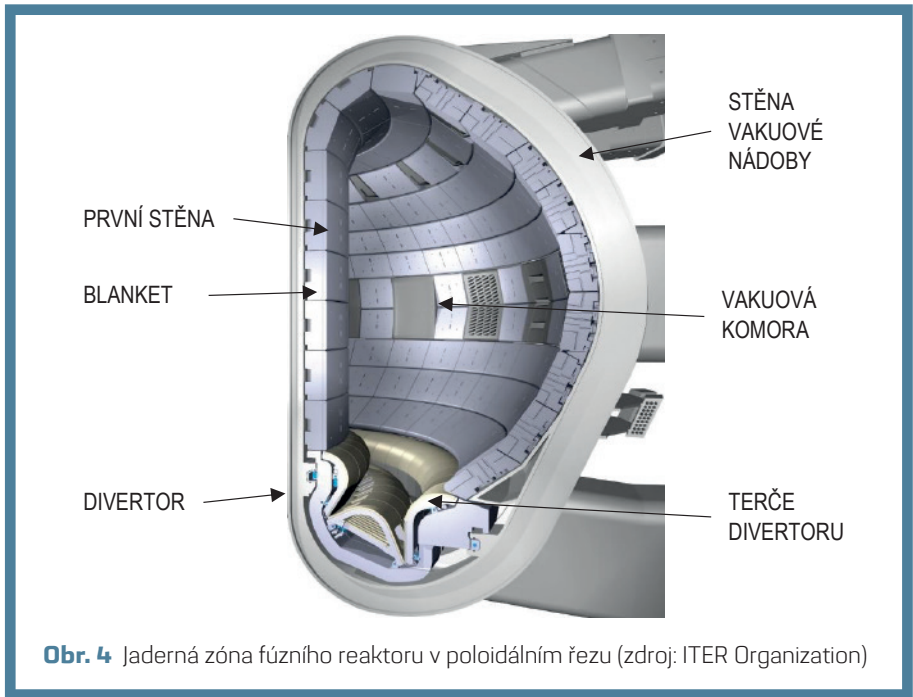
Jaderná zóna

Reaktorové konstrukce uvnitř vakuové nádoby vystavené působení plazmatu se označují jako jaderná zóna. Nabité částice uvolněné při fúzní reakci jsou zachyceny magnetickým polem a zůstávají v plazmatu, kde se termalizují a svojí energií ohřívají plazma. Neutrony bez elektrického náboje opouštějí plazma a pronikají do jaderné zóny, kde jsou absorbovány. Jako neutronové stínění za jadernou zónou slouží dvouplášťová vakuová nádoba naplněná mezi pláštěmi chladicí vodou (**obr. 4**).

Jadernou zónu tvoří první stěna, která je vystavená působení horkého plazmatu, blanket, vyplňující prostor mezi první stěnou a vakuovou nádobou, a divertor. Úkolem první stěny je absorbovat záření z plazmatu a chránit ostatní konstrukce před přímou interakcí s plazmatem. Úkolem blanketu je absorbovat neutronový tok a odvádět získanou energii ve formě tepla ven z reaktoru. V energetických reaktorech využívajících DT reakci bude v blanketu probíhat výroba tritia reakcí fúzních neutronů s lithiem. Protože je preferovaná jaderná reakce pro produkci tritia ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ exotermická, bude blanket uvolňovat další teplo a zvyšovat tak tepelný výkon reaktoru.

Ve spodní části jaderné zóny je umístěn divertor určený pro čištění plazmatu. Divertor odklání okrajové siločáry magnetického pole a směřuje okrajovou vrstvu plazmatu na své terče. Na tyto terče nepřetržitě dopadá horké plazma, které se kontaktem s povrchem terčů ochlazuje a je odčerpáváno ven z vakuové nádoby.

Chlazením jaderné zóny reaktoru je uvolněná energie odváděna z reaktoru k výrobě elektřiny. Hlavními specifiky chlazení fúzních reaktorů oproti chlazení štěpných reaktorů a ostatních energetických zdrojů jsou komplikovaná prostorově omezená



konstrukce jaderné zóny, způsobující vysoké hydraulické ztráty v chladicích kanálech, vysoká neutronová zátěž chladicích kanálů a vysoká hustota tepelného toku. Nejčastěji uvažovanými chladicími médii jaderné zóny jsou helium a voda. Helium je součástí mnoha fúzních technologií a je kompatibilní s prostředím reaktoru, avšak v podmínkách složité konstrukce jaderné zóny má omezenou schopnost odvádět tepelné toky o vysoké hustotě, a vyžaduje vysoký výkon cirkulátorů chladicích okruhů. Voda naopak není s fúzními technologiemi kompatibilní, především s technologií vysokého vakua, s lithiovou technologií blanketu nebo se silným neutronovým tokem způsobujícím transmutaci kyslíku, má však potenciál odvádět i tepelné toky o vysoké hustotě a její technologie je komerčně dostupná. V návrzích fúzních elektráren bylo pro chlazení první stěny a blanketu dosud preferováno helium o výstupní teplotě až 520 °C díky své vysoké kompatibilitě a bezpečnosti. V současnosti se prosazuje princip maximálního využití komerčně dostupných technologií jaderných elektráren, který zvýhodňuje chlazení blanketu vodou o teplotě 285–328 °C na parametrech tlakovodních štěpných reaktorů PWR. Chlazení divertorových terčů zatížených vysokými tepelnými toky se bude realizovat vodou o nízké teplotě na úrovni ~130 °C.

Dvouplášťová vakuová nádoba, jejíž funkci je také neutronové stínění, bude chlazena vodou o teplotě 100 až 200 °C.

Fúzní elektrárny budou dvouokruhové, případně tříokruhové s akumulacním meziokruhem. To umožní integrovat různé primární okruhy s odlišnými parametry a současně vytvoří bezpečnostní bariéru proti přenosu aktivovaných materiálů z reaktoru do turbínové části. Na základě principu využití komerčně dostupných řešení se pro výrobu elektřiny preferuje Rankin-Clausiiův parní cyklus. **Tabulka 1** shrnuje hlavní energetické parametry evropských modelů DEMO z roků 2015, 2017 a 2019.

Tabulka 1 Základní parametry evropských referenčních modelů fúzní elektrárny DEMO.

| Referenční model | DEMO1 2015 ²⁰ | DEMO1 2017 ²¹ | DEMO1 2019 ²² | DEMO2 2015 ²³ |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Fúzní výkon [MW] | 2037 | 1998 | 1871 | 3255 |
| Výkon blanketu [MW] | 293 | 381 | 356 | 468 |
| Jaderný výkon [MW] | 2330 | 2379 | 2227 | 3723 |
| Výkon ohřevu [MW] | 50 | 50 | 76 | 133 |
| Délka pulzu/prodlevy [min] | 120/30 | 120/14,9 | 132/14,6 | stálý |
| Tepelný výkon [MW] | 2436 | 2633 | 2491 | 4149 |
| Hrubý elektrický výkon [MW _e] | 914 | 988 | 932 | 1660 |
| Vlastní spotřeba [MW _e] | 414 | 489 | 535 | 707 |
| Čistý elektrický výkon [MW _e] | 500 | 499 | 398 | 953 |
| Hrubá účinnost [%] | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 40,0 |
| Čistá účinnost [%] | 21,5 | 21,0 | 17,9 | 25,6 |

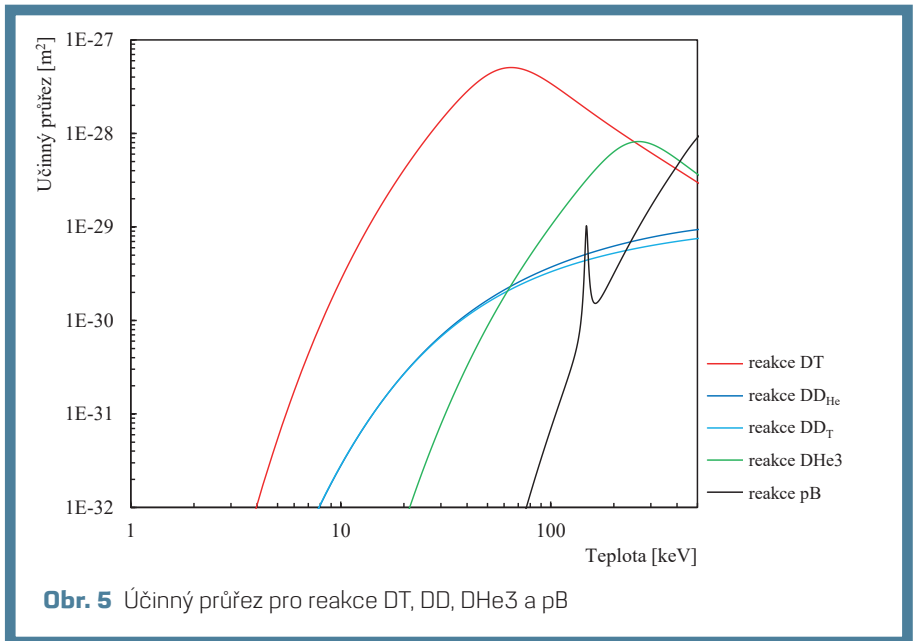
Fúzní reakce

V **tabulce 2** jsou uvedeny analyzované fúzní reakce. Reakce DT izotopů vodíku deuteria a tritia má z reakcí nejvyšší účinný průřez za nejnižší teploty (**obr. 5**), jedna ze složek paliva, tritium, se ale na Zemi téměř nevyskytuje, a bude nutné ji vyrábět ve fúzním reaktoru. Reakce jader deuteria DD má výrazně nižší účinný průřez než reakce DT, na Zemi jsou však prakticky nevýčerpateľné a dostupné zásoby paliva. Deuterium se v dostatečném množství nachází ve vodě. Reakce DHe3 je bezneutronová fúzní reakce s vysokým účinným průřezem, bohužel se zásobami paliva ³He až na Měsíci.^{24, 25} Reakce pB, někdy označovaná také jako HB nebo HB11, je bezneutronová fúzní reakce s podobně

vysokým účinným průřezem při vyšších teplotách, avšak s dostupnými zdroji paliva na Zemi,²⁶ která navíc probíhá bez parazitních reakcí produkujících neutrony.

Tabulka 2 Analyzované fúzní reakce lehkých prvků s uvedením energie jednotlivých produktů reakce.

| Označení | Reakce |
|-------------------------|--|
| DT | $D + T \rightarrow {}^4\text{He} \text{ (3,52 MeV)} + n \text{ (14,06 MeV)}$ |
| DD_T (~50%) | $D + D \rightarrow T \text{ (1,01 MeV)} + p \text{ (3,02 MeV)}$ |
| DD_{He} (~50%) | $D + D \rightarrow {}^3\text{He} \text{ (0,82 MeV)} + n \text{ (2,45 MeV)}$ |
| DHe3 | $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} \text{ (3,67 MeV)} + p \text{ (14,68 MeV)}$ |
| pB | $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 \text{ }^4\text{He} \text{ (celkem 8,7 MeV)}$ |



Některá atomová jádra se mohou slučovat s různým výsledkem. Například DD reakce má s přibližně stejnou pravděpodobností produkty ${}^3\text{He}$ nebo T, které mohou

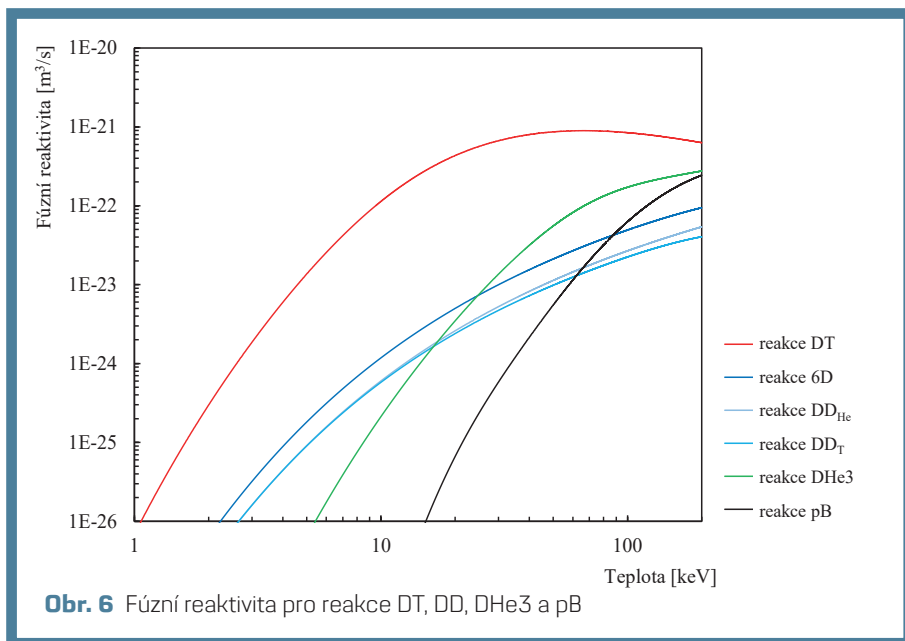
reagovat s dalšími jádry deuteria. Při teplotách vyšších než 20 keV je fúzní reaktivita reakcí DT a DHe3 vyšší než reakce DD, takže je pravděpodobné, že produkty reakce zreagují brzy po svém vzniku. Pak je možné zapsat souhrnnou reakci 6D uvedenou v **tabulce 3**. Meziprodukty jsou uvedeny v závorce.

Tabulka 3 Souhrnná reakce 6D.

| | | | | | | | | |
|----|----|---|----------------------------|---|---------------------------------|---|----------------|---|
| 6D | 6D | → | ⁴ He (3,67 MeV) | + | ⁴ He (3,52 MeV) | + | p (14,68 MeV) | + |
| | | | + p (3,02 MeV) | | + n (14,06 MeV) | | + n (2,45 MeV) | + |
| | | | + (T) (1,01 MeV) | | + (³ He) (0,82 MeV) | | | |

Fúzní reaktivita

Pravděpodobnost fúzních reakcí vychází z jejich účinného průřezu. Na **obrázku 5** je zobrazena závislost účinných průřezů reakcí na teplotě reaktantů podle aproximací Bosch-Hale¹⁷ a Nevins-Swain.²⁷ Teplota v [keV] udává kinetickou energii částic



plazmatu se střední tepelnou rychlostí. Při vysokém množství termalizovaných částic s širokým rozptylem kinetické energie se účinný průřez vyjadřuje ve formě fúzní reaktivity. Fúzní reaktivita $\langle\sigma v\rangle$ představuje průměrnou hodnotu součinu účinného průřezu reakce a relativní rychlosti jader v přes Maxwellovo-Boltzmannovo rozdělení rychlostí při teplotě T . Závislost fúzní reaktivity^{17, 27} na teplotě je zobrazena na **obrázku 6**.

Hustota a teplota plazmatu

Kriteriální rovnice jsou vyjádřeny na základě hustoty iontů paliva n_f . Rovnice lze odvodit i na základě hustoty elektronů n_e , avšak použití hustoty paliva je pro energetickou analýzu nativní. Celková hustota n_{tot} zahrnuje všechny částice plazmatu, ionty i elektrony.

Při odvození základních kriteriálních rovnic je uvažována homogenní směs reagujících atomových jader složená ze stejného počtu jader reaktantů, směs 1 : 1. Hustoty reaktantů n_{f1} a n_{f2} jsou poloviční oproti celkové hustotě paliva n_f :

$$n_{f1} = n_{f2} = \frac{1}{2}n_f .$$

Při fúzních teplotách bude palivová směs ve skupenství plně ionizovaného kvazineutrálního plazmatu a bude tvořena především ionty paliva o hustotě n_f a elektrony. V průběhu jaderné fúze bude palivová směs znečišťována nabitými produkty reakce zachycenými magnetickým polem. Celkový počet částic plazmatu n_{tot} v jednotkovém objemu pak bude tvořen také ionty a elektrony produktů reakce:

$$n_{tot} = Z_f n_f + Z_{ch} n_{ch} ,$$

$$Z_f = 1 + \sum_{i=1}^2 \frac{Z_{f i}}{2} ,$$

$$Z_{ch} = 1 + \sum_{i=1}^{c_{ch}} \frac{Z_{ch i}}{c_{ch}} ,$$

ke $Z_{f i}$ jsou protonová čísla reaktantů, $Z_{ch i}$ jsou protonová čísla nabitých produktů reakce, c_{ch} počet produktů reakce a n_{ch} jejich hustota. Znečištění plazmatu jinými ionty než produkty reakce v této analýze neuvažujeme. Pro vyjádření celkové hustoty plazmatu na základě hustoty paliva zavedeme faktor podílu paliva v plazmatu f_f :

$$f_f = \frac{n_f}{n_{tot}} .$$

Budeme předpokládat rovnost iontové teploty T_i a elektronové teploty T_e . Obecně mohou být tyto teploty odlišné, například při použití systému ohřevu, který ohřívá výlučně elektrony, nebo naopak ionty. Ve velkém objemu energetických reaktorů ale bude docházet k vyrovnávání obou teplot, a proto lze předpokládat jejich rovnost:

$$T = T_i = T_e .$$

Při směsi paliva s produkty reakce předpokládáme, že počáteční energie produktů reakce, získaná při fúzní reakci, bude předána ostatním částicím plazmatu a produkty reakce budou plně termalizované. Teploty nabitých produktů reakce a paliva pak budou vyrovnané. Teplota T je v textu uváděna v jednotkách energie [keV]:

$$T \text{ [keV]} = k_{eV} T_K \text{ [K]} / 1000 ,$$

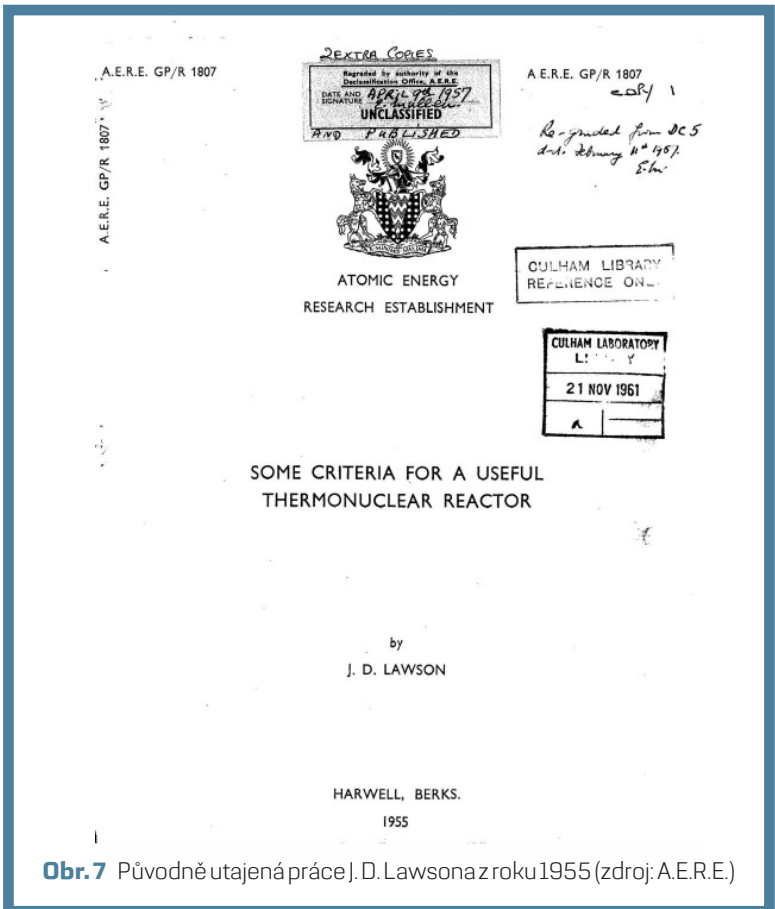
kde k_{eV} označuje Boltzmannovu konstantu v [eV/K], $k_{eV} = 8,61733326 \times 10^{-5}$ eV/K. Přepočet obou jednotek je 1 keV = 11 604 525 K.

Hustota a teplota v rovnicích udává průměrnou teplotu a hustotu v objemu plazmatu. Kritéria je možné přeformulovat i pro jiné pojetí, například pro maximální teplotu a hustotu v ose plazmatu začleněním korekčních koeficientů odpovídajících radiálnímu profilu veličin v plazmatu.

Lawsonovo kritérium

John David Lawson

V počátcích fúzního výzkumu v padesátých letech minulého století převládal mezi fyziky velký optimismus ohledně rychlosti dosažení řízené fúzní reakce.²⁸ Přitom nebylo úplně jasné, jaké musí být parametry paliva, aby bylo možné při jaderné fúzi vytvořit energetický zisk. Stanovení těchto parametrů se v roce 1955 ujal britský inženýr a fyzik John David Lawson (**obr. 7**) a svá zjištění publikoval po odtajnění fúzního výzkumu v roce 1957 v článku *Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor*.²



Obr. 7 Původně utajená práce J. D. Lawsona z roku 1955 (zdroj: A.E.R.E.)

Cílem práce bylo podle jeho vlastních slov stanovení jednoduchého vztahu, který by umožnil rychle a objektivně posoudit parametry paliva a schopnosti zařízení z hlediska výroby elektřiny v elektrárně využívající jadernou fúzi.²⁹ John David Lawson vyšel z úvahy, že pro energetické využití jaderné fúze musí proběhnout takové množství fúzních reakcí, aby uvolněná fúzní energie pokryla vlastní spotřebu elektrárny včetně energeticky náročného ohřevu paliva. Zformulované kritérium vyjadřuje, že se pro dosažení energetického zisku jaderné fúze musí atomová jádra maximálně přiblížit k sobě, musí mít energii, která umožní překonat elektrostatickou potenciálovou bariéru, a v tomto stavu musí zůstat tak dlouho, aby proběhlo dostatečné množství fúzních reakcí.

John David Lawson se narodil 4. dubna 1923 v anglickém městě Coventry, vystudoval gymnázium ve Wolverhamptonu a poté nastoupil na St John's College v Cambridgi, kde absolvoval dvouleté studium strojních věd. V roce 1943 nastoupil do společnosti Telecommunication Research Establishment v Malvernu, kde byl přidělen k práci na mikrovlnných anténách v projektu vývoje vojenského radaru. Od roku 1947 působil



Obr. 8 J. D. Lawson, 1923–2008 (zdroj: ITER Organization)

v Atomic Energy Research Establishment (AERE), kde pracoval na vývoji nového synchrotronu. V roce 1951 přešel do oddělení obecné fyziky AERE, kde se podílel na vývoji klystronu, zařízení pro generování mikrovln o vysokém výkonu. Protože pracoval ve skupině, která konstruovala také fúzní zařízení ZETA, postupně pronikal i do problematiky jaderné fúze a v roce 1955 zde sestavil kritérium označované jeho jménem.

V AERE John D. Lawson pracoval do roku 1961 a pak nastoupil do nově založeného National Institute for Research in Nuclear Science, kde pokračoval v práci na urychlovačích. V sedmdesátých letech se věnoval studiu vysokoenergetických svazků a v roce 1977 vyšla jeho kniha *The Physics of Charged-Particle Beams*. V letech 1975 až 1976 se Lawson na čas vrátil k výzkumu fúze v laboratoři v Culhamu, kde pracoval na vývoji fúzního reaktoru založeného na principu obráceného pole. V následujících letech působil v Rutherford Appleton Laboratory na vývoji laserů a urychlovačů. V roce 1983 byl zvolen členem Královské společnosti za své příspěvky k výzkumu aplikovaného elektromagnetismu, zejména fyziky svazků nabitých částic a vysoko-temperaturního plazmatu. V roce 1987 odešel do důchodu. Zemřel 15. ledna 2008.³⁰

Formulace kritéria pro energetické využití jaderné fúze byla Lawsonovým velkým vědeckým úspěchem. Lawson trval na tom, že je nutné přezkoumat, zda se ve fúzním reaktoru uvolní více energie, než kolik se spotřebuje. Tato otázka se do té doby neřešila a Lawson považoval za důležité ochladit přílišný optimismus fúzních fyziků, kteří byli přesvědčeni, že se jaderná fúze snadno a rychle ovládne a bude v krátké době využitelná v energetice.²⁸ Tento cíl se mu bezezbytku podařilo naplnit a splnění jeho kritéria se považuje za milník na cestě k využití jaderné fúze jako energetického zdroje.

Interpretace rovnic Lawsonova kritéria

Původní kritérium odvozené Johnem D. Lawsonem popisovalo podmínky, za kterých bude uvolněná energie transformovaná zařízením elektrárny vyšší než energie potřebná pro ohřev paliva. Z pohledu energetiky šlo o zjednodušenou energetickou bilanci elektrárny se zahrnutím recirkulace výkonu ohřevu paliva přes fúzní reaktor.

V současnosti Lawsonovo kritérium zahrnuje tři kritériální rovnice. Dvě z těchto rovnic popisují energetickou bilanci plazmatu, třetí popisuje energetickou bilanci elektrárny. Vyrovnání fúzního výkonu a výkonu vnějšího ohřevu plazmatu se označuje jako vědecké vyrovnání, scientific breakeven nebo zkráceně breakeven. Vyrovnání fúzního výkonu absorbovaného v plazmatu a ztrátového výkonu plazmatu se označuje jako zapálení, ignition. Vyrovnání hrubého výkonu elektrárny a vlastní spotřeby fúzní elektrárny se označuje jako inženýrské vyrovnání, engineering breakeven.

Lawsonovo kritérium bývá často špatně nebo nepřesně interpretováno. Nejčastější chybou je tvrzení, že Lawsonovo kritérium stanovuje podmínky pro dosažení

jaderné fúze: to je chybně, protože jaderná fúze může probíhat i bez splnění Lawsonových kritérií, například za pokojové teploty pomocí urychlovače. Jiným mylným tvrzením je, že Lawsonovo kritérium stanovuje podmínky pro zapálení fúzní reakce: to je nepřesné, protože kritérium zapálení představuje pouze jednu ze tří kritériálních rovnic Lawsonova kritéria.

Původní Lawsonovo kritérium

Podle Johna D. Lawsona bude fúzní elektrárna vyrábět využitelnou energii, pokud splní několik podmínek. V první řadě musí mít palivo dostatečnou teplotu. Na základě analýzy radiačních ztrát Lawson odhadl tuto teplotu pro DT reakci na 30 milionů K. Za hlavní zdroj ztrát Lawson označil brzdné záření, bremsstrahlung. Kromě reakční teploty pak musí být podle Lawsona splněna energetická bilanční rovnice:²

$$\eta (W_F + W_H) > W_H ,$$

kde η je účinnost transformace fúzní energie na energii ohřevu paliva, W_F je uvolněná fúzní energie, a W_H je energie ohřevu dodaná do paliva. Pokud definujeme parametr R jako poměr uvolněné energie a energie ohřevu:

$$R = \frac{W_F}{W_H} ,$$

pak můžeme bilanční rovnici upravit na:

$$\eta (R + 1) > 1 .$$

Na základě obvyklé účinnosti elektrárenských bloků Lawson použil účinnost konverze uvolněné tepelné energie na tepelnou energii paliva při jeho ohřevu ve výši $\eta=1/3$ (tato hodnota není v současnosti dosažitelná kvůli nízké účinnosti systémů ohřevu plazmatu) a odvodil finální podmínku pro výrobu užitečné energie:

$$R > 2 .$$

Lawson předpokládal krátké výboje s ideálním udržením plazmatu²⁸ a zavedl dobu udržení teploty paliva t_T . Parametr R pak vyjádřil vložením fúzního výkonu P_F , radiačního ztrátového výkonu P_{RAD} a vnitřní energie plazmatu:

$$R = \frac{t_T P_F}{t_T P_{RAD} + 3n_f k T_K} ,$$

kde n_f je hustota paliva, k je Boltzmannova konstanta a T_K teplota plazmatu v [K]. Jednoduchou úpravou Lawson získal vztah:

$$R = \frac{P_F/3n_f^2kT_K}{P_{RAD}/3n_f^2kT_K + \frac{1}{n_f t_T}}.$$

Fúzní výkon i radiální ztráty závisí na druhé mocnině hustoty paliva, a proto můžeme zlomky P/n_f^2 považovat za nezávislé na hustotě. Rovnici Lawson vložil do výše uvedené podmínky pro R a získal kritériální rovnici:

$$n_f t_T > \frac{6kT_K}{\frac{P_F}{n_f^2} - 2\frac{P_{RAD}}{n_f^2}},$$

kteou lze symbolicky zjednodušit do finálního tvaru:

$$n_f t_T > f(T).$$

Obecná formulace kritéria

V současném pojetí Lawsonovo kritérium v obecné formulaci udává minimální potřebnou hodnotu součinu hustoty slučovaných atomových jader n_f o teplotě T a časového intervalu τ_E , která je nutná pro dosažení energetické rovnováhy:

$$n_f \tau_E \geq f(T),$$

kde $f(T)$ je funkce závislá na typu fúzní reakce a odpovídá dané energetické bilanci. Časový interval τ_E označuje dobu udržení energie a udává, jak dlouho si palivo uchová svou vnitřní energii, v tomto případě svou hustotu a teplotu:

$$\tau_E = \frac{U}{P_L},$$

kde U je vnitřní energie plazmatu a P_L je ztrátový výkon. U tokamaků ale rovnice Lawsonova kritéria není zapsaná formálně správně, protože i její levá strana závisí na teplotě. V tokamacích je hustota plazmatu provozně svázaná s jeho teplotou, jak bylo ukázáno při popisu tokamaků, a doba udržení energie souvisí mimo jiné s radiálními ztrátami, které jsou charakteristické závislostí na teplotě ($\sim T^{1/2}$ a $\sim T^2$).

Při udržování stabilního plazmatu s konstantním faktorem β je tlak plazmatu limitovaný tlakem vnějšího magnetického pole a je konstantní. Proto nahradíme hustotu plazmatu tlakem plazmatu a omezíme platnost kritéria na úzký teplotní interval, ve kterém může být závislost doby udržení energie na teplotě zanedbána:

$$p_{pl} \tau_E \geq g(T) .$$

Dosažením vztahu pro tlak plazmatu získáme zápis Lawsonova kritéria ve formě trojného součinu:

$$n_f T \tau_E \geq g(T) .$$

Trojný součin je specifickou formulací Lawsonova kritéria pro zařízení s magnetickým udržením plazmatu v tepelné rovnováze, jako jsou tokamaky nebo stelarátory. V zařízeních s inerciálním udržením plazmatu má Lawsonovo kritérium jinou specifickou formulaci. Protože je tato analýza zaměřena na tokamaky, bude Lawsonovo kritérium dále uváděno ve formátu trojného součinu.

Kritérium vědeckého vyrovnání

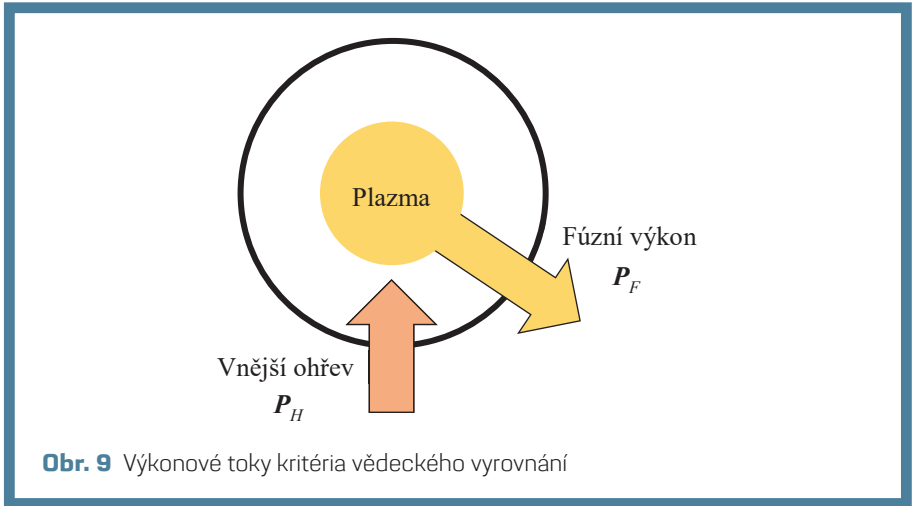
Nejjednodušším Lawsonovým kritériem je kritérium vědeckého vyrovnání. V současnosti je splnění tohoto kritéria jedním z hlavních cílů fúzního výzkumu. Kritérium popisuje bilanci mezi uvolňovaným fúzním výkonem a externím výkonem ohřevu vstupujícím do paliva (**obr. 9**). Vědecké vyrovnání (scientific breakeven) nastává, když se fúzní výkon P_F vyrovná výkonu vnějšího ohřevu P_H :

$$P_F \geq P_H .$$

Ohřev plazmatu probíhá dvěma základními mechanismy: vlastním ohřevem pomocí uvolněné fúzní energie a vnějším (externím) ohřevem. Vlastní ohřev plazmatu probíhá zachytem nabitých částic vzniklých při fúzní reakci magnetickým polem reaktoru a jejich termalizací, při které produkty reakce předávají ve srážkách svoji energii ostatním částicím plazmatu. Vnější ohřev probíhá prostřednictvím systému ohřevu plazmatu reaktoru. Cílem ohřevu je kompenzovat energetické ztráty plazmatu a udržet nebo zvýšit jeho vnitřní energii.

Za předpokladu zachytu a termalizace všech nabitých částic vzniklých ve fúzní reakci můžeme zapsat vztah pro potřebný výkon vnějšího ohřevu (budeme uvažovat ustálený stav, ve kterém se plazma nebude ohřívat):

$$P_H = P_L - \kappa_{ch} P_F ,$$



kde P_L je ztrátový výkon a faktor κ_{ch} udává poměr výkonu přenášeného nabitými produkty reakce k fúznímu výkonu. Ztrátový výkon paliva P_L lze vyjádřit jako poměr vnitřní energie plazmatu a doby udržení energie τ_E , za kterou dojde ke ztrátě této energie. Za předpokladu, že se plazma chová jako ideální plyn a jednotlivé částice jsou jednoduché hmotné body bez potenciální energie, odpovídá vnitřní energie plazmatu kinetické energii částic jednoatomového plynu a rovnice ztrátového výkonu má tvar:

$$P_L = \frac{3n_f T V}{2 \tau_E f_f},$$

kde n_f / f_f vyjadřuje celkovou hustotu plazmatu a V objem plazmatu.

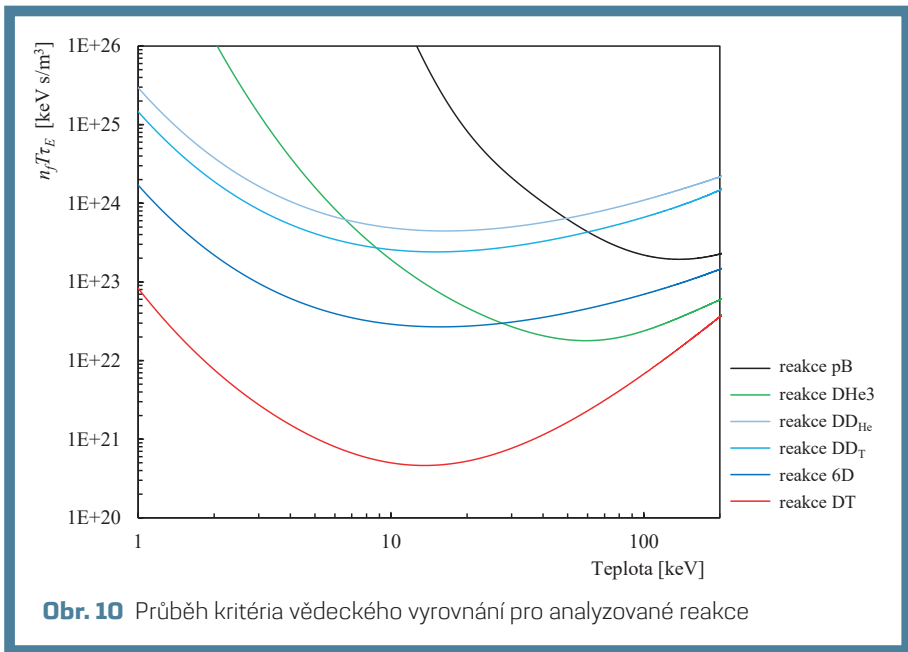
Rovnice pro výpočet fúzního výkonu P_F má při směsi reaktantů 1 : 1 tvar:

$$P_F = \frac{n_f^2}{4} \langle \sigma v \rangle E_f V,$$

kde $\langle \sigma v \rangle$ je fúzní reaktivita a E_f je energie uvolněná při jedné fúzní reakci. Po dosažení a úpravě získáme rovnici kritéria vědeckého vyrovnání:

$$n_f T \tau_E \geq \frac{6 T^2}{f_f \langle \sigma v \rangle E_f (1 + \kappa_{ch})}.$$

Kritériální křivky vědeckého vyrovnání pro analyzované reakce jsou zobrazeny na **obrázku 10**. Na rozdíl od monotónního průběhu fúzní reaktivity většiny analyzovaných reakcí na **obrázku 6** mají kritériální křivky vědeckého vyrovnání při teplotách do 200 keV globální extrém. Tento extrém, globální minimum, ukazuje teplotu, při které je splnění kritéria nejsnazší. Optimální teplota pro energetické využití fúzní reakcí neodpovídá teplotě, při níž mají reakce nejvyšší fúzní reaktivitu, ale vychází z energetické bilance plazmatu.



Pro DT reakci v čisté směsi reaktantů přechází rovnice do tvaru:

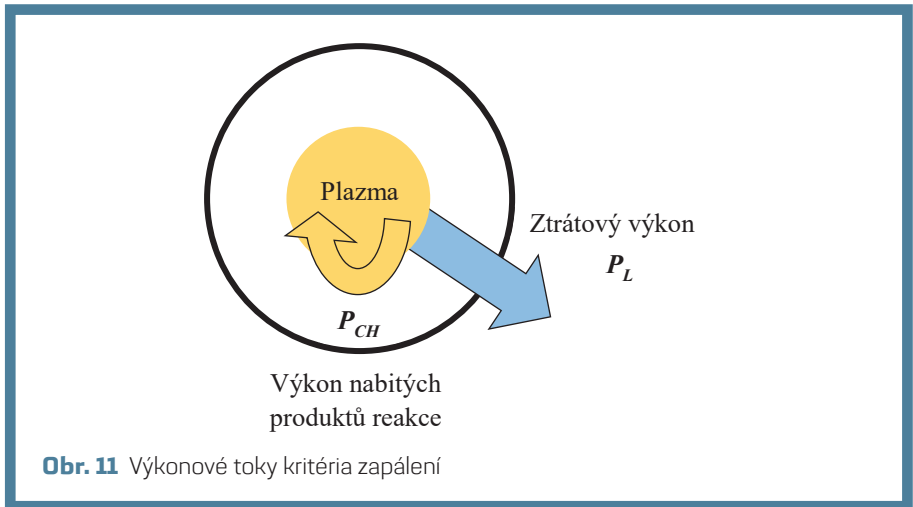
$$n_f T \tau_E \geq \frac{10 T^2}{\langle \sigma v \rangle E_f} .$$

Kritériální křivka DT reakce má minimum při teplotě 14 keV (~163 mil. K). Dosazením do rovnice v úzkém rozmezí teplot okolo uvedeného minima získáme číselné vyjádření kritéria:

$$n_f T \tau_E \geq 4,63 \times 10^{20} \text{ [m}^{-3} \text{ keV s] .}$$

Kritérium zapálení

Druhým Lawsonovým kritériem je kritérium zapálení, které porovnává fúzní výkon absorbovaný přímo v plazmatu s energetickými ztrátami plazmatu (**obr. 11**). Část fúzního výkonu se uvolňuje ve formě kinetické energie nabitých částic, které jsou zachyceny v plazmatu magnetickým polem a předávají termalizací svoji energii ostatním částicím plazmatu. Pokud výkon absorbovaný v plazmatu přesáhne jeho energetické ztráty, plazma se bude autonomně ohřívat a pro udržení jeho teploty nebude nutný vnější ohřev.



Zapálení (ignition) nastává v okamžiku, jakmile jsou energetické ztráty plazmatu P_L plně kompenzovány výkonem nabitých částic uvolňovaných při fúzní reakci P_{CH} :

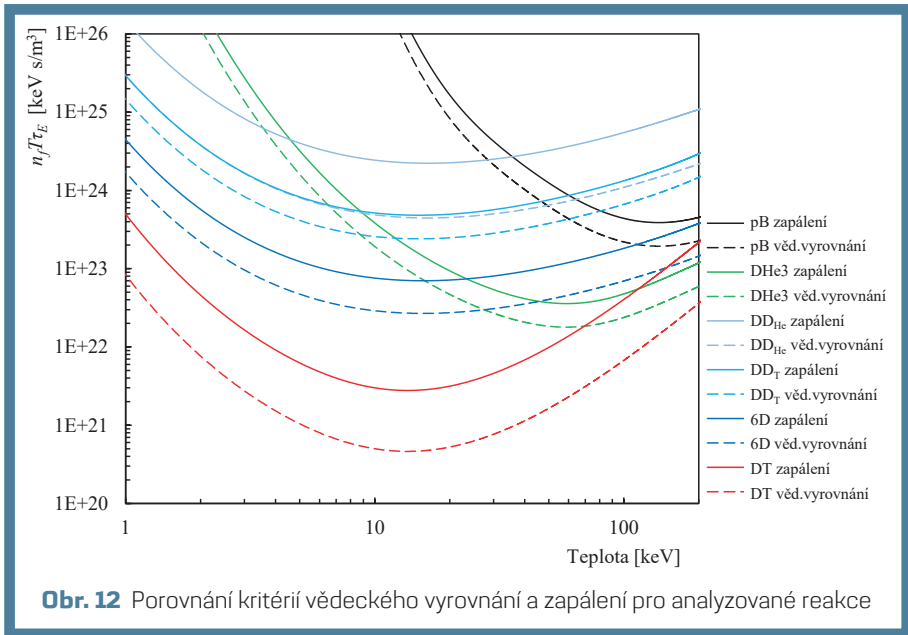
$$P_{CH} \geq P_L,$$

Stejným postupem jako v předchozím případě kritéria vědeckého vyrovnání dosazením získáme rovnici kritéria zapálení:

$$n_f T \tau_E \geq \frac{6 T^2}{f_f \langle \sigma v \rangle E_f \kappa_{ch}}.$$

Kritériální křivky vědeckého vyrovnání a zapálení pro analyzované reakce jsou zobrazeny na **obrázku 12**. V případě DT reakce s čistou směsí reaktantů přechází rovnice do tvaru:

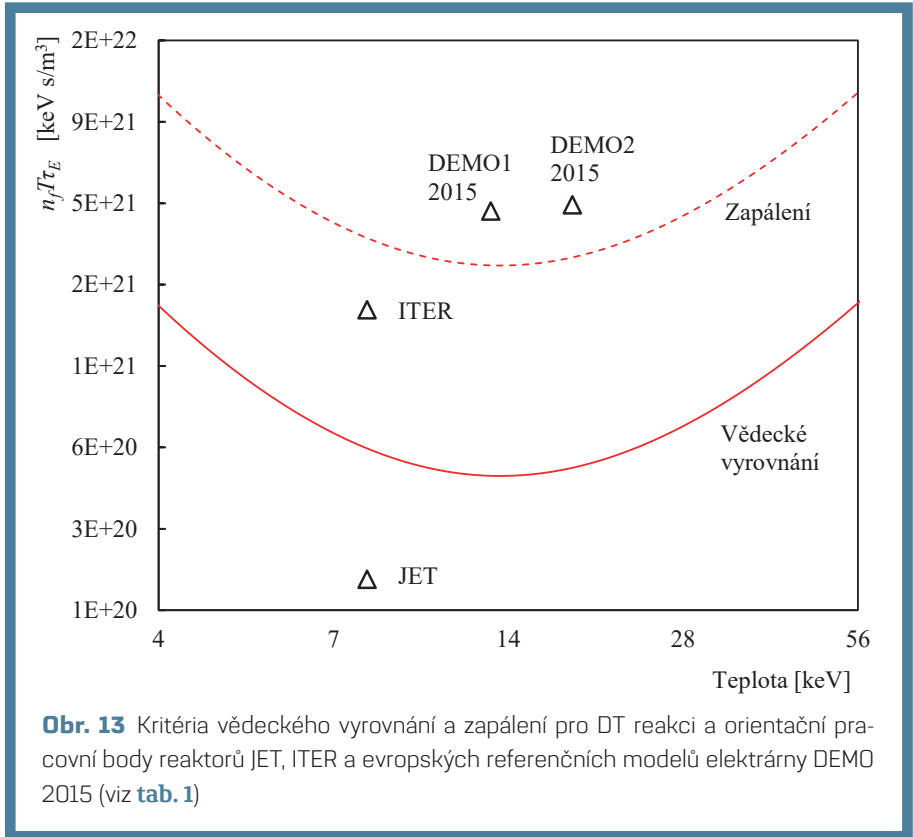
$$n_f T \tau_E \geq \frac{60 T^2}{\langle \sigma v \rangle E_f} .$$



Z porovnání rovnic vědeckého vyrovnání a zapálení je zřejmé, že je v případě DT reakce kritérium zapálení 6krát vyšší než kritérium vědeckého vyrovnání. Funkce na pravé straně rovnic mají minimum při stejné teplotě 14 keV (**obr. 13**). V úzkém rozmezí teploty poblíž uvedeného minima má kritérium zapálení DT reakce číselné vyjádření:

$$n_f T \tau_E \geq 2,78 \times 10^{21} \text{ [m}^{-3} \text{ keV s] .}$$

Pro reakci DD_{He} je kritérium zapálení 5krát vyšší než kritérium vědeckého vyrovnání a pro bezneutronové reakce DD_T , $DHe3$ a pB je 2krát vyšší.

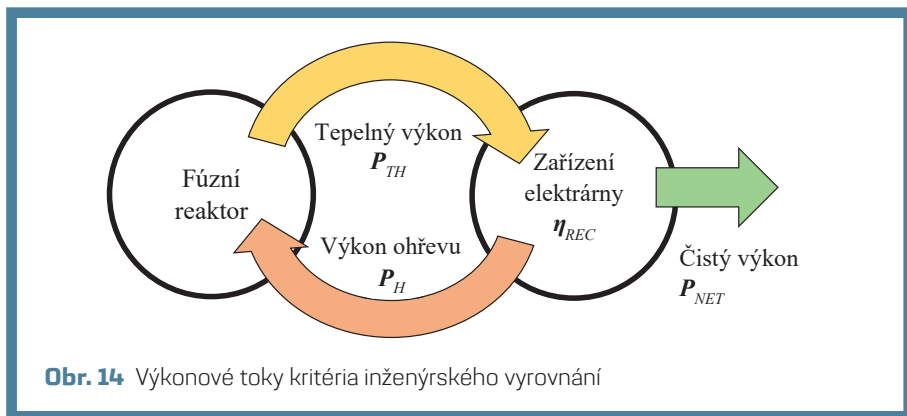


Obr. 13 Kritéria vědeckého vyrovnání a zapálení pro DT reakci a orientační pracovní body reaktorů JET, ITER a evropských referenčních modelů elektrárny DEMO 2015 (viz [tab. 1](#))

Kritérium inženýrského vyrovnání

Kritérium inženýrského vyrovnání rozšiřuje energetickou bilanci na celou fúzní elektrárnu a stanovuje parametry plazmatu, které umožní, aby fúzní elektrárna dodávala elektřinu do rozvodné sítě. Inženýrské vyrovnání (engineering breakeven) nastává v okamžiku, kdy tepelný výkon fúzního reaktoru P_{TH} transformovaný zařízením elektrárny s účinností η_{REC} dosáhne hodnoty výkonu ohřevu plazmatu P_H ([obr. 14](#)):

$$\eta_{REC} P_{TH} \geq P_H .$$



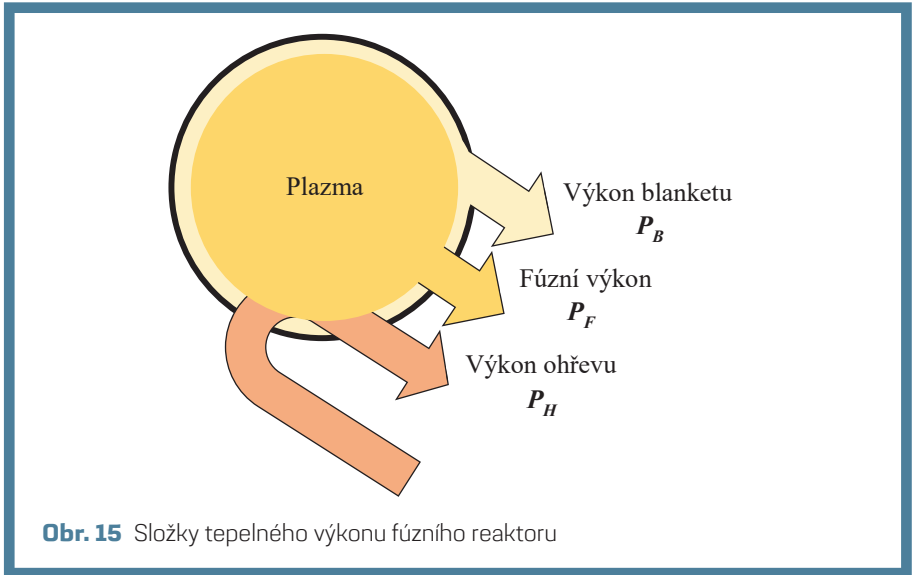
η_{REC} je celková účinnost transformace tepelného výkonu reaktoru na tepelnou energii paliva prostřednictvím zařízení elektrárny dále označovaná jako účinnost recirkulace. Tato účinnost recirkulace se skládá z účinnosti výroby elektrické energie a účinnosti systému ohřevu. Lze ji určit na základě účinností jednotlivých po sobě jdoucích technologických procesů: konverze tepelné energie na elektrickou, vlastní spotřeby elektrárny a konverze elektrické energie na tepelnou energii plazmatu:

$$\eta_{REC} = \eta_{GR} \eta_{SC}^{NH} \eta_H,$$

kde η_{GR} je hrubá účinnost výroby elektrické energie, η_{SC}^{NH} je faktor popisující vliv vlastní spotřeby elektrárny s výjimkou ohřevu plazmatu a η_H je účinnost systému ohřevu plazmatu.

Pro odvození kritériální rovnice stanovující požadavky na parametry paliva je nutné popsat tepelný výkon reaktoru P_{TH} , který se skládá z několika výkonových toků (obr. 15). Jeho hlavní složkou je uvolňovaný fúzní výkon P_F . Fúzní výkon je z plazmatu přenášen neutronovým tokem, radiací, tepelným vyzařováním a interakcemi plazmatu s vnitřní stěnou reaktoru do jaderné zóny. V jaderné zóně první generace fúzních energetických reaktorů bude probíhat výroba tritia reakcí neutronů a izotopů lithia ${}^6\text{Li}$. Tato reakce je exotermická a blanket bude produkovat tepelný výkon P_B závislý na intenzitě neutronového toku, který bude multiplikovat fúzní výkon. Třetí složkou tepelného výkonu reaktoru bude výkon ohřevu plazmatu P_H vyzařovaný z plazmatu zpět. V ustáleném tepelném stavu plazmatu bude výkon ohřevu vyzařován zpět v plné výši, a tepelný výkon reaktoru proto bude součtem jaderného výkonu a výkonu ohřevu:

$$P_{TH} = P_F + P_B + P_H.$$



Pro analýzu výkonových toků je užitečné definovat dva bezrozměrné parametry, faktor multiplikace výkonu a faktor zesílení reaktoru. Faktor multiplikace výkonu M_R je definovaný jako poměr jaderného výkonu vůči fúznímu výkonu P_F a vyjadřuje zesílení fúzního výkonu v blanketu. Faktor zesílení reaktoru Q je definovaný jako poměr fúzního výkonu P_F a výkonu vnějšího ohřevu plazmatu P_H :

$$Q = \frac{P_F}{P_H}.$$

S pomocí bezrozměrných faktorů lze tepelný výkon reaktoru zapsat na základě fúzního výkonu:

$$P_{TH} = P_F \left(M_R + \frac{1}{Q} \right).$$

Dosažením získáme kritériální rovnici inženýrského vyrovnání:

$$n_f T \tau_E \geq \Omega \frac{6 T^2}{f_f \langle \sigma v \rangle E_f \kappa_{ch}} ,$$

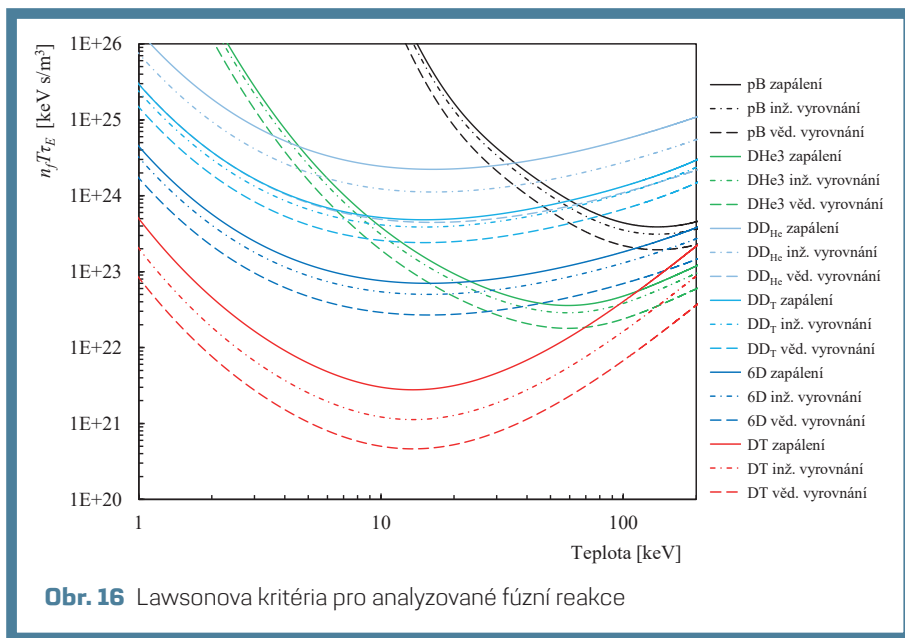
kde faktor Ω vyjadřuje vliv zařízení elektrárny:

$$\Omega = \frac{1 - \eta_{REC}}{1 + \eta_{REC} \left(\frac{M_R}{\kappa_{ch}} - 1 \right)}$$

V případě bezneutronové fúze dojde ke zjednodušení na rovnici

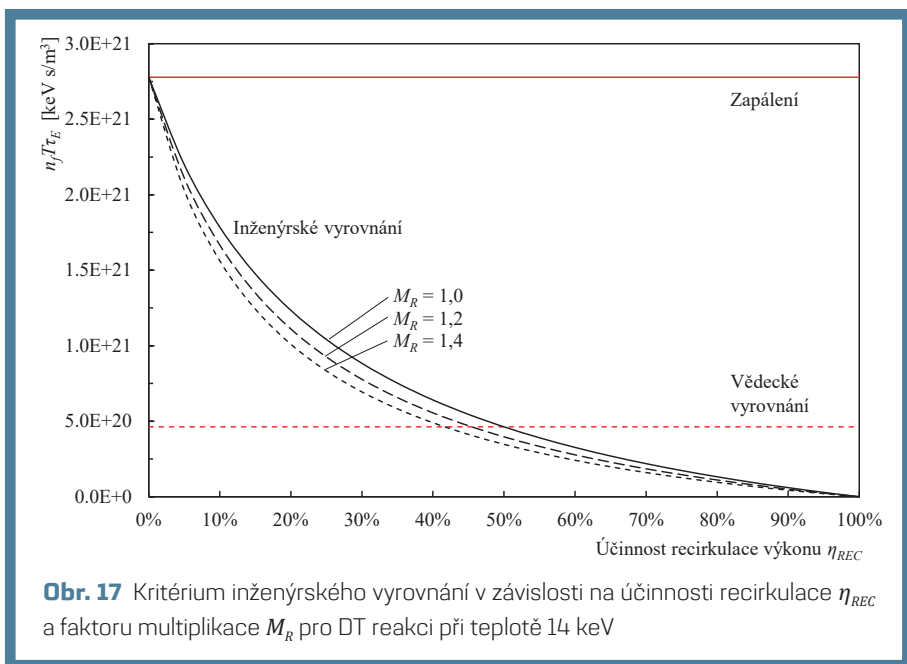
$$\Omega = 1 - \eta_{REC}$$

kteřá ukazuje, že faktor Ω reprezentuje ztráty, k nimž dochází při recirkulaci výkonu ohřevu zařízením elektrárny. Všechna tři kritéria pro analyzované fúzní reakce jsou zobrazena na **obrázku 16**. Kritérium inženýrského vyrovnání je vypočítáno pro účinnost recirkulace $\eta_{REC}=19,8$ procenta (účinnost výroby elektřiny 33% a účinnost systému ohřevu 60%).



Faktor Ω vytváří odchylku kritéria inženýrského vyrovnání od kritéria zapálení a způsobuje, že hodnota kritéria závisí na parametrech reaktoru a technologie elektrárny. V závislosti na účinnosti recirkulace výkonu ohřevu se mění od hodnoty kritéria

zapálení do nuly, jak ukazuje **obrázek 17**. Nulová účinnost recirkulace výkonu η_{REC} nastává, pokud není ohřev paliva funkční a výkon ohřevu P_H je nulový. Jestliže má fúzní elektrárna za takových podmínek vyrábět elektřinu, musí být palivo ohříváno autonomně termalizací nabitých produktů reakce, což odpovídá stavu zapálení definovanému kritériální rovnicí zapálení. Jinými slovy, pokud je účinnost recirkulace nulová nebo velmi nízká, je pro provoz elektrárny nezbytné splnění kritéria zapálení. Naopak stoprocentní účinnost recirkulace výkonu by znamenala, že výkon ohřevu recirkuluje zařízením elektrárny bez ztrát. Díky tomu se palivo udržuje na pracovní teplotě bez potřeby doplňování další energie pouhou recirkulací již dříve vloženého výkonu ohřevu. Recirkulace výkonu bez ztrát ovšem není fyzikálně možná, vysoké ztráty souvisejí především s účinností výroby elektřiny a s účinností systému ohřevu plazmatu.



Podkritériální energetický reaktor

Úsilí současného fúzního výzkumu je zaměřeno na splnění kritéria vědeckého vyrovnání. Rovnice inženýrského vyrovnání však ukazuje, že je za určitých podmínek možné vyrábět elektřinu ve fúzní elektrárně i bez splnění tohoto kritéria. Reaktor

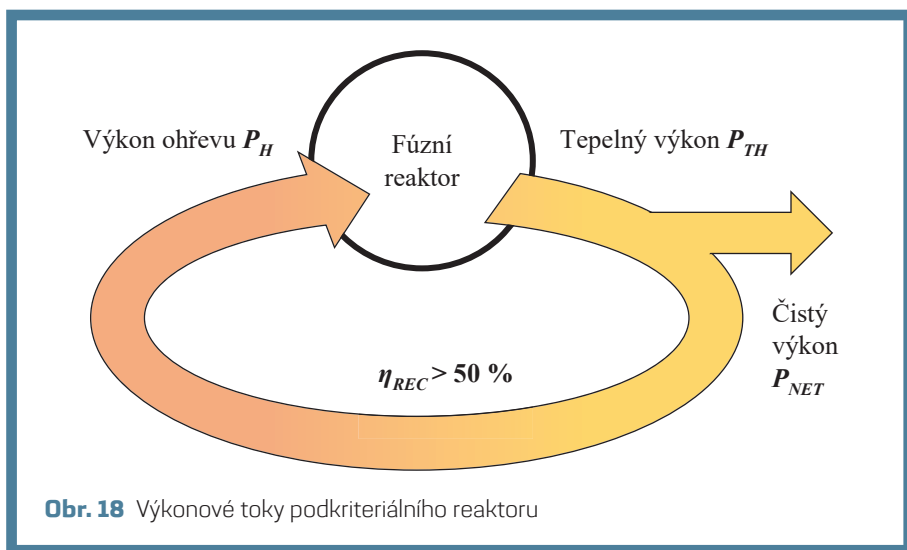
bude v takovém případě pracovat při parametrech plazmatu nižších, než vyžaduje kritérium vědeckého vyrovnání, v režimu podkriteriálního (subbreakeven) reaktoru.

Pro využití podkriteriálního reaktoru pro energetické využití vyplývá z porovnávací kritériálních rovnic vědeckého a inženýrského vyrovnání zjednodušená podmínka:

$$\eta_{REC} \geq 0,5 .$$

Při účinnosti recirkulace výkonu ohřevu vyšší než 50 procent se bude do plazmatu vracet natolik vysoké množství zpětně vyzářeného výkonu ohřevu, že bude pro vytvoření energetického zisku postačovat nižší četnost fúzních reakcí, než je potřebné pro splnění kritéria vědeckého vyrovnání. To bude mít významné důsledky: buď bude možné stavět menší kompaktní fúzní reaktory, anebo bude možné využít fúzní reakce s vysokými kritériálními požadavky.

Výzkum jaderné fúze se od samého počátku potýká s energetickými ztrátami plazmatu, které komplikují udržení stabilních parametrů plazmatu. Účinná recirkulace výkonu ohřevu by tento problém pomohla odstranit. Nesnížila by sice energetické ztráty plazmatu, ale umožnila by ztrátový výkon efektivně vracet zpět (obr. 18). Dosažení účinnosti recirkulace vyšší než 50 procent je ale obtížné. Výroba elektrické energie pomocí termodynamického cyklu dnes dosahuje účinnosti okolo 33 procent. Při aktuální účinnosti systému ohřevu na úrovni 20 procent by účinnost recirkulace byla 6,6 procenta.



Bezrozměrná formulace kritériálních rovnic

Faktor zesílení Q umožňuje zformulovat některé kritériální rovnice na základě bezrozměrných parametrů a více postihnout energetickou stránku kritériálních rovnic. Bezrozměrná formulace je užitečná v energetických analýzách, ve kterých nejsou podstatné konkrétní parametry paliva.

Kritérium vědeckého vyrovnání se použitím faktoru zesílení výrazně zjednoduší na rovnici:

$$Q \geq 1 .$$

Cílem současného fúzního výzkumu je dosáhnout zesílení Q vyššího než 1. Reaktor JET v roce 1997 dosáhl fúzního výkonu 16 MW při současném vnějším ohřevu 26 MW a zesílení Q tak bylo 0,62. Budovaný reaktor ITER překročí kritérium vědeckého vyrovnání a dosáhne zesílení $Q \approx 10$.

Kritérium zapálení nelze pomocí faktoru Q sestavit. Je možné využít skutečnost, že při dosažení a překročení kritéria zapálení nebude pro udržení fúzních reakcí potřeba vnější ohřev plazmatu. Při nulovém výkonu ohřevu pak z definice Q vyplývá:

$$Q = \infty .$$

V praxi ale bude ohřev probíhat dál především jako vedlejší produkt při generování elektrického proudu v plazmatu, i po splnění kritéria zapálení bude výkon vnějšího ohřevu nenulový. Faktor zesílení proto bude v řádu desítek až stovek v závislosti na konstrukci reaktoru.

Úpravou kritériální rovnice inženýrského vyrovnání získáme bezrozměrnou kritériální rovnici¹⁰:

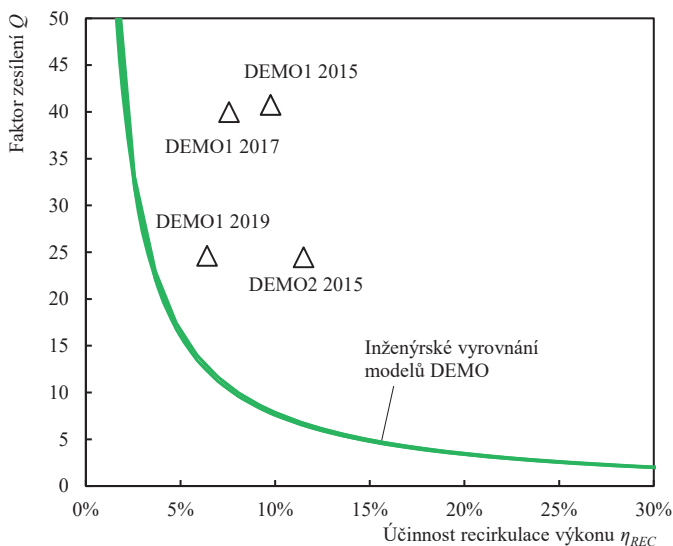
$$Q \geq Q_B ,$$

kde Q_B je kritériální faktor zesílení reaktoru nutný pro dosažení inženýrského vyrovnání

$$Q_B = \frac{1 - \eta_{REC}}{M_R \eta_{REC}} .$$

Fúzní elektrárna bude vyrábět užitečnou elektřinu, pokud zesílení reaktoru Q překročí hodnotu faktoru Q_B . Faktor Q_B přitom závisí na účinnosti recirkulace výkonu zařízením elektrárny a na velikosti multiplikace fúzního výkonu v blanketu reaktoru (obr. 19).

Bezrozměrná kritériální rovnice inženýrského vyrovnání je obecnější než trojný součin a ukazuje, že pro realizaci výroby elektřiny pro elektrickou síť není nezbytné



Obr. 19 Bezrozměrné Lawsonovo kritérium inženýrského vyrovnání a pracovní body evropských referenčních modelových elektráren podle **tabulky 1**

předepisovat konkrétní parametry plazmatu a postačí pouze splnit podmínku minimálního zesílení reaktoru, jehož velikost je závislá na účinnosti technologií elektrárny podléjících se na recirkulaci výkonu.

Orientační podmínky pro bezneutronovou fúzi

Bezneutronové fúzní reakce jsou takové reakce, při kterých nevznikají neutrony. Fúzní neutrony aktivují konstrukci reaktoru a vyžadují masivní stínění. Fúzní reaktor využívající bezneutronovou fúzní reakci by proto mohl být jednodušší a méně namáhaný.

Pro zhodnocení možnosti energetického využití těchto fúzních reakcí upravíme výchozí kritériální rovnice tak, aby porovnávaly fúzní výkon a ztrátový výkon při bezneutronové fúzi:

- pro vědecké vyrovnání $P_F \geq \frac{1}{2} P_L$,
- pro zapálení $P_F \geq P_L$,
- pro inženýrské vyrovnání $P_F \geq (1 - \eta_{REC}) P_L$.

Jednou z hlavních složek ztrátového výkonu jsou radiační ztráty P_{RAD} . Pro splnění výše uvedených rovnic proto musí být především splněny následující orientační podmínky:

- pro vědecké vyrovnání $P_F > \frac{1}{2} P_{RAD}$,
- pro zapálení $P_F > P_{RAD}$,
- pro inženýrské vyrovnání $P_F > (1 - \eta_{REC}) P_{RAD}$.

Tyto podmínky umožňují v prvním přiblížení rychle posoudit bezneutronové reakce. Pokud například radiační ztráty převyšují 5krát fúzní výkon jako u reakce pB, pak z rovnic vyplývá, že nelze dosáhnout kritéria vědeckého vyrovnání ani kritéria zapálení. Energetické využití takové reakce je v tomto přiblížení možné pouze v režimu podkritériálního reaktoru za podmínky vysoké účinnosti recirkulace nejméně 80 procent.

Zpřesnění kritériálních rovnic

Radiační ztráty

Plazma ztrácí svoji energii jako každá jiná látka třemi základními fyzikálními mechanismy: kondukcí, konvekcí a radiací. Zdokonalováním magnetického udržení a provozních režimů plazmatu dochází ke snižování ztrát konvekcí a kondukcí a rozhodujícím ztrátovým mechanismem se stává radiace.

Celkový ztrátový výkon plazmatu lze vyjádřit jako součet radiačních ztrát P_{RAD} a všech ostatních ztrát popsanych pomocí doby udržení energie $\tau'_{E'}$ která oproti τ_E nezahrnuje ztráty radiací:

$$P_L = \frac{3n_f TV}{2 \tau_E f_f} + P_{RAD} \cdot$$

Radiační ztrátový výkon plazmatu má tři hlavní složky: výkon brzdného záření, výkon rekombinačního a čárového záření a konečně ztrátový výkon cyklotronového záření. Brzdné záření je emitováno při zpomalování nabitých částic jinými nabitými částicemi. Částice ztrácí kinetickou energii a ta se uvolňuje ve formě radiace. Dalším procesem, při kterém vzniká radiace, je rekombinace iontů a elektronů plazmatu, případně exitace a deexitace elektronů. Bez ohledu na vysokou teplotu v plazmatu průběžně dochází k záchytu elektronů ionty a opětovné ionizaci a při tom dojde k vyzařování energie. V případě iontů lehkých atomů je ale výkon rekombinačního a čárového záření nízký. V reaktorech s magnetickým udržením plazmatu vzniká také cyklotronové záření emitované nabitými částicemi pohybujícími se v magnetickém poli. V magnetickém poli působí na nabitou částici Lorentzova síla, která ji odchyľuje od přímého směru. Přitom je emitován svazek záření ve směru původního pohybu částice. Výkon cyklotronového záření kvadraticky roste s teplotou a může být vysoký, avšak ve velkém objemu plazmatu je cyklotronové záření zpětně pohlcováno a ztrátový výkon tvoří jen malou část výkonu záření. Absorpce plazmatu je ale spektrálně závislá a pro některé vlnové délky je plazma opticky tenké, pro jiné opticky tlusté.

Pro výpočet výkonu brzdného záření lze použít rovnici:⁴

$$P_{br} = g \frac{e^6}{6(3/2)^2 \pi^2 \epsilon_0^3 c^3 h m_e^2} \sum_{i=1}^{c_i} (Z_i^2 n_i) n_e T_e^{\frac{1}{2}} V ,$$

kde $g = 2\sqrt{3}/\pi$ označuje Gauntův faktor, e elementární náboj, ϵ_0 permitivitu vakua, c rychlost světla, h Planckovu konstantu, m_e hmotnost elektronu, Z , protonové číslo i -tého iontu, n_i hustotu i -tého iontu, c_i počet iontů, n_e elektronovou hustotu a T_e elektronovou teplotu. Po dosazení konstant a převodu iontové a elektronové hustoty na hustotu paliva získáme rovnici [keV/s]:

$$P_{br} = a_{br} z_{br} n_f^2 T^{\frac{1}{2}} V ,$$

$$a_{br} = 3,34 \times 10^{-21} ,$$

$$z_{br} = \left[\frac{Z_{f1}^2 + Z_{f2}^2}{2} + \sum_i^{c_{ch}} \left(\frac{Z_{ch i}^2}{c_{ch}} \right) \frac{1 - z_f f_f}{z_{ch} f_f} \right] \left[\frac{z_{ch} - 1 - (z_{ch} - z_f) f_f}{z_{ch} f_f} \right] .$$

V případě čisté směsi vodíkových izotopů je $z_{br} = 1$. Pro ostatní analyzované reakce je koeficient z_{br} a odpovídající radiální ztráty vyšší. Například v případě paliva pB budou ztráty způsobené brzdným zářením za stejných podmínek 39krát vyšší než v případě DT paliva.

Rovnice pro výpočet výkonu rekombinačního záření má tvar:³¹

$$P_{re} = g \frac{e^6}{6(3/2)^{\frac{1}{2}} \pi^{\frac{3}{2}} \varepsilon_0^3 c^3 h m_e^{\frac{3}{2}}} \sum_{i=1}^{c_i} [Z_i^2 n_i \left(\frac{E_\infty^{Z_i-1}}{T_e} \right)] n_e T_e^{\frac{1}{2}} V ,$$

kde E_∞ je ionizační energie v [keV]. Při teplotách významně vyšších, než je ionizační energie, bude zlomek $E_\infty/T_e \ll 1$ a díky tomu bude výkon rekombinačního záření ve srovnání s výkonem brzdného záření velmi malý. Ve fúzních energetických reaktorech bude teplota plazmatu o 3 řády vyšší než ionizační energie vodíku 13,6 eV. V analyzovaných reakcích má nejvyšší ionizační energii bor, avšak pouze 340 eV v nejvyšší ionizační úrovni. Při teplotách plazmatu nad 10 keV proto může být u všech analyzovaných reakcí výkon rekombinačního záření zanedbán.³ Stejně může být zanedbáno i čárové záření. Rekombinační a čárové záření budou hrát roli v případě nečistot v plazmatu s vysokým protonovým číslem, které ale v této studii pomíjíme.

Výkon cyklotronového záření je úměrný druhé mocnině magnetické indukce:⁴

$$P_{cy} = \frac{e^4}{3\pi \varepsilon_0 m_e^3 c^3} B^2 n_e T_e V .$$

Rovnici upravíme vyjádřením B pomocí faktoru β . Cyklotronové záření je ve velkém objemu plazmatu intenzivně zpětně pohlcováno. Proto byl pro analýzu zvolen velmi nízký ztrátový výkon ve výši 0,1 procenta cyklotronového záření.⁴ Rovnice ztrátového výkonu má pak při konzervativním předpokladu $\beta = 3,5\%$ tvar [keV/s]:

$$P_{cl} = a_{cl} z_{cl} n_f^2 T^2 V .$$

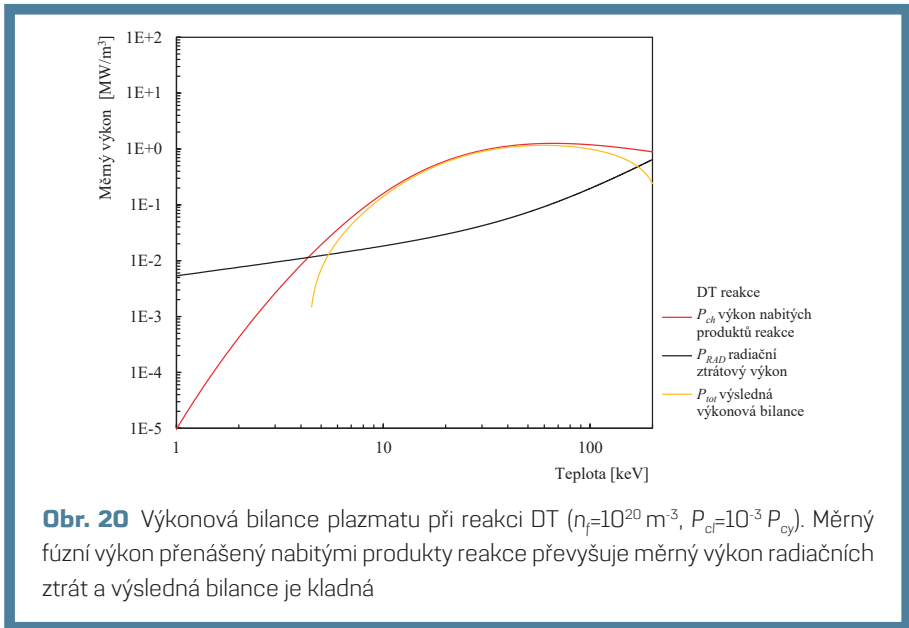
$$a_{cl} = 4,46 \times 10^{-24} ,$$

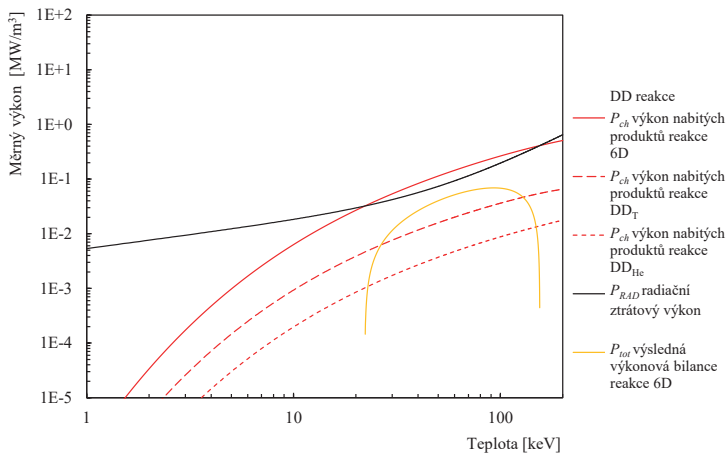
$$z_{cl} = \frac{z_{ch} - 1 - (z_{ch} - z_f) f_f}{z_{ch} f_f^2} .$$

Uvedené cyklotronové ztráty ovšem mohou být vlivem různých procesů i řádově odlišné. Především bude docházet k odrazu unikajícího záření od kovové první stěny zpět do plazmatu a ke zvýšení jeho reabsorpce.³² Reabsorpce cyklotronového záření ale může být výrazně snížena relativistickými efekty, a ztráty mohou dosáhnout naopak až desítek procent radičního výkonu.³³ Také faktor β může být různý. Proto byly analyzovány varianty se ztrátovým výkonem v rozsahu od 0,001 procenta do 10 procent cyklotronového záření.

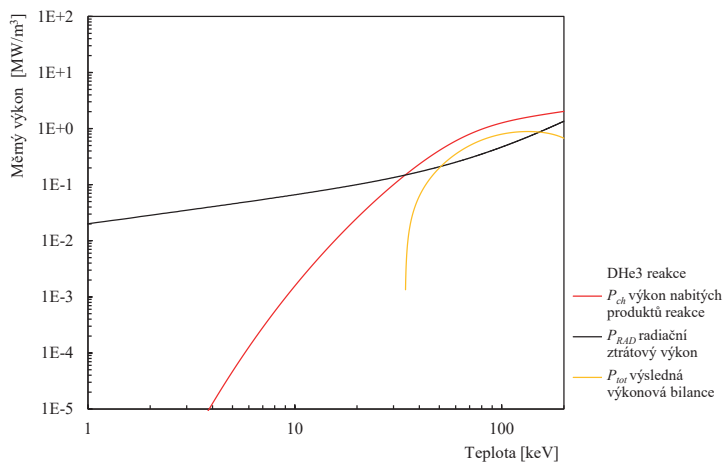
Obrázky 20–23 ukazují měrný radiční ztrátový výkon, měrný fúzní výkon přenášený nabitými produkty reakce při hustotě paliva 10^{20} částic/m³ a celkový měrný výkon po odpočtu radičních ztrát, který naznačuje schopnost reakce splnit kritérium zapálení v souladu s orientačními podmínkami z předchozí kapitoly.

V případě DT reakce, 6D reakce a DHe3 reakce je celková výkonová bilance kladná, a proto je z výkonového hlediska možné dosáhnout stavu zapálení. V případě

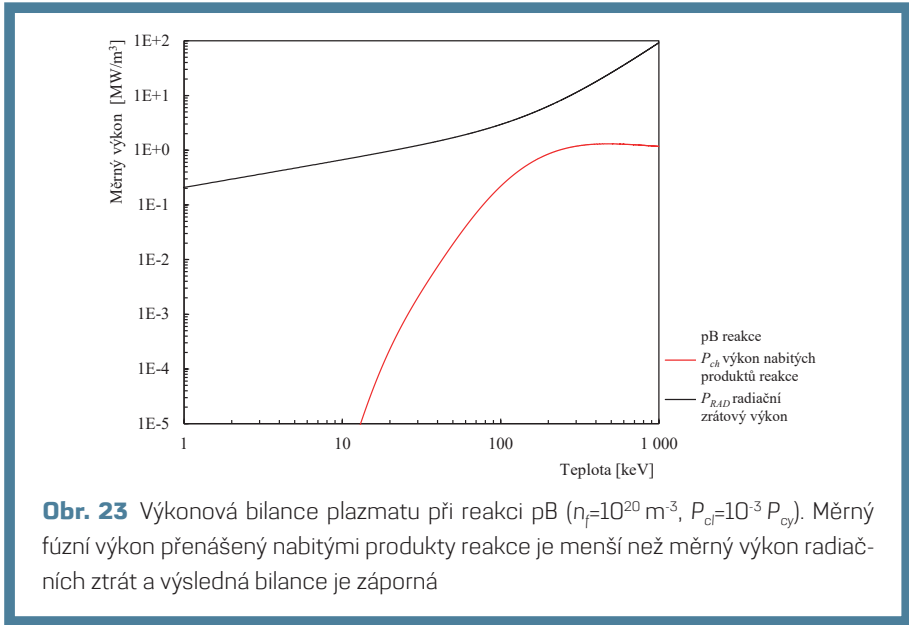




Obr. 21 Výkonová bilance plazmatu při reakcích DD a 6D ($n_i=10^{20} \text{ m}^{-3}$, $P_{ci}=10^{-3} P_{cy}$). Měrný fúzní výkon přenášený nabitými produkty reakcí DD_T a DD_{He} je menší než měrný výkon radičních ztrát a pouze souhrnná reakce 6D má kladnou energetickou bilanci



Obr. 22 Výkonová bilance plazmatu při reakci DHe3 ($n_i=10^{20} \text{ m}^{-3}$, $P_{ci}=10^{-3} P_{cy}$). Měrný fúzní výkon přenášený nabitými produkty reakce převyšuje měrný výkon radičních ztrát a výsledná bilance je kladná



reakcí DD a reakce pB je měrný výkon přenášený nabitými produkty reakce menší než měrný radiální ztrátový výkon, a proto při těchto reakcích nemůže být stav zapálení dosažen. To je významný rozdíl oproti základním Lawsonovým rovnicím, podle kterých je dosažení kritéria zapálení možné pro všechny analyzované reakce, jak ukazuje **obrázek 12**.

Pokročilé kritériální rovnice

Pokročilé rovnice Lawsonova kritéria odvodíme podobně jako základní rovnice, avšak explicitně vyjádříme radiální ztráty. Kritériální rovnice pak mají tvar:

- vědecké vyrovnání

$$n_f T \tau'_E \geq \frac{6 T^2}{f_f ((\sigma v) E_f (1 + \kappa_{ch}) - 4 a_{br} z_{br} T^{\frac{1}{2}} - 4 a_{cl} z_{cl} T^2)}$$

- zapálení

$$n_f T \tau'_E \geq \frac{6 T^2}{f_f ((\sigma v) E_f \kappa_{ch} - 4 a_{br} z_{br} T^{\frac{1}{2}} - 4 a_{cl} z_{cl} T^2)}$$

- inženýrské vyrovnání

$$n_f T \tau'_E \geq \frac{6 T^2}{f_f (\langle \sigma v \rangle E_f (\frac{M_R \eta_{REC}}{1 - \eta_{REC}} + \kappa_{ch}) - 4 a_{br} z_{br} T^{\frac{1}{2}} - 4 a_{cl} z_{cl} T^2)} .$$

Během probíhajících fúzních reakcí se budou v plazmatu hromadit nabitě produkty reakce, nejčastěji ionty helia. Vzdůstající koncentrace nabitých produktů reakce bude snižovat koncentraci paliva v plazmatu, a tím bude klesat četnost fúzních reakcí. Pro udržitelný provoz reaktoru proto musí být produkty reakce z plazmatu odváděny. I malá příměs produktů reakce v plazmatu bude komplikovat průběh fúzních reakcí, a pro splnění kritériálních rovnic bude nezbytné dosáhnout vyšších parametrů paliva.

Odvod nabitých produktů reakce z plazmatu bude zajišťovat palivový systém reaktoru. Palivový systém bude doplňovat nové čisté palivo a současně bude odčerpávat z plazmatu nespálené palivo kontaminované produkty reakce. Nové palivo se bude do plazmatu majoritně doplňovat injektáží zmražených palivových pelet. Přesně zvolená rychlost vstřelování palivových pelet zajistí, aby pelety doletěly až k ose plazmatu a zde se rozpustily. Doplnované čisté palivo bude z centrální oblasti plazmatu vytlačovat palivo znečištěné produkty reakce do okrajové oblasti až za poslední uzavřený magnetický povrch. Divertované siločáry magnetického pole odvedou částice plazmatu z okrajové vrstvy plazmatu do oblasti divertoru, kde kontaktem částic s divertorovými terči nebo plynem před terčí dojde k jejich ochlazení. Z prostoru divertoru se bude ochlazený plyn odčerpávat vakuovými čerpadly ven z reaktoru.

Rychlost vzniku nabitých produktů reakce je v ustáleném stavu dána četností fúzních reakcí a počtem nabitých částic vzniklých při každé reakci. Úbytek nabitých produktů reakce lze popsat podobně jako ztrátový výkon na základě doby udržení nabitých produktů reakce, která udává, za jak dlouho by všechny nabitě částice vzniklé při reakci unikly z plazmatu. Podíl paliva v plazmatu f_f určíme z bilanční rovnice vzniku a úbytku nabitých produktů:

$$\frac{1}{4} n_f^2 \langle \sigma v \rangle c_{ch} = \frac{n_{ch}}{\tau_{ch}} ,$$

kde τ_{ch} je doba udržení nabitých produktů reakce v plazmatu. Zavedeme faktor ξ_p vyjadřující poměr mezi dobou udržení nabitých částic τ_{ch} a dobou udržení energie τ'_E . Doba udržení τ'_E popisuje ztráty částic plazmatu a energie, kterou nesou, a odpovídá době udržení částic plazmatu.⁹ Zahrnutím bilanční rovnice vzniku a odvodu nabitých produktů do pokročilých kritériálních rovnic vzniknou rovnice třetího stupně umožňující nalézt ustálený podíl paliva f_f . Hledaným řešením rovnic jsou reálné kladné podíly, jež jsou menší než podíl paliva v čisté palivové směsi:

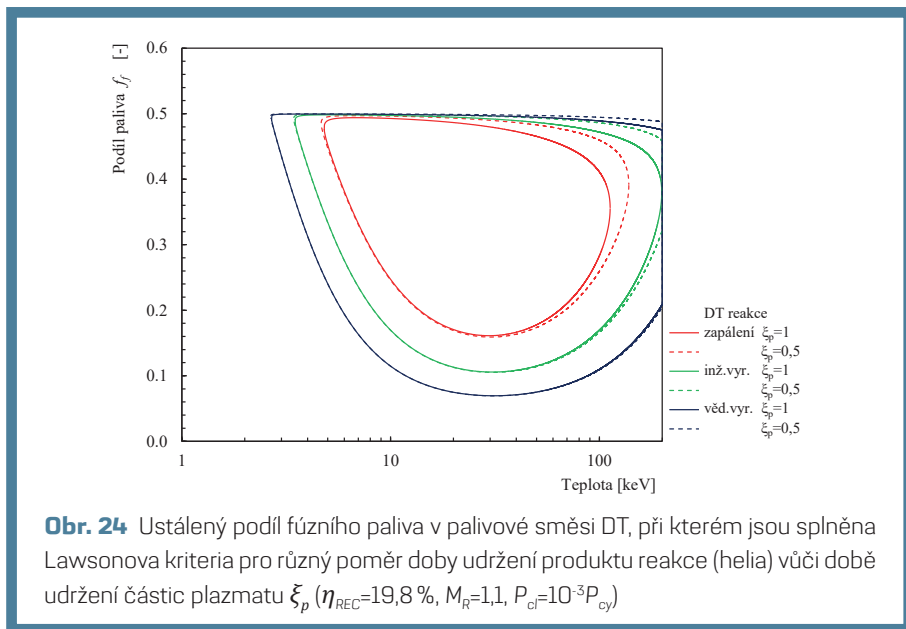
$$f_f^{clean} > f_f > 0 .$$

Pokud má rovnice dvě vyhovující řešení, pak tato řešení ohraničují oblast, ve které se musí parametry plazmatu udržovat, aby bylo kritérium splněno, tj. pro trojný součin je stanovena nejenom spodní hranice splnění kritéria, ale také horní hranice.

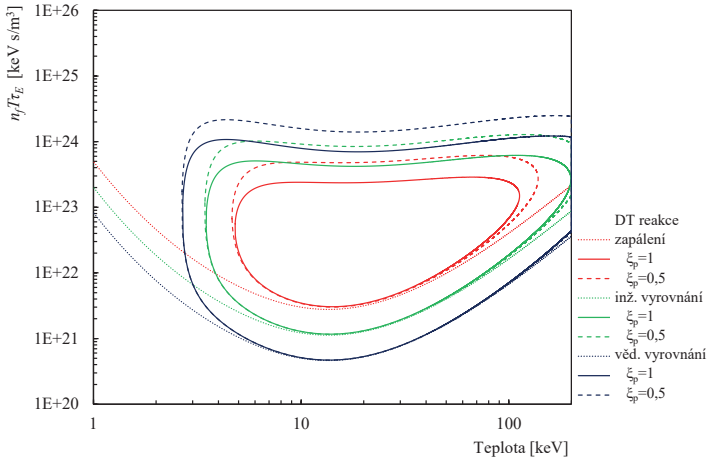
Horní limit pro trojný součin vyjadřuje skutečnost, že s nárůstem trojného součinu roste četnost fúzních reakcí způsobující růst množství produktů reakce v plazmatu. Tím klesá hustota paliva, a četnost reakcí se proto naopak snižuje. S růstem množství produktů reakce v plazmatu také rostou radiační ztráty a klesá udržení energie v plazmatu. Výsledkem uvedených procesů je rovnovážný stav charakteristický ustáleným poměrem paliva a produktů reakce.

Graf na **obrázku 24** ukazuje ustálený podíl fúzního paliva DT v plazmatu pro jednotlivá kritéria v závislosti na teplotě. Kriteriaální křivky analyzovaných reakcí jsou zobrazeny na **obrázcích 25–28**. Kriteriaální křivky vymezují uzavřené oblasti, ve kterých parametry plazmatu splňují kriteriaální požadavky.

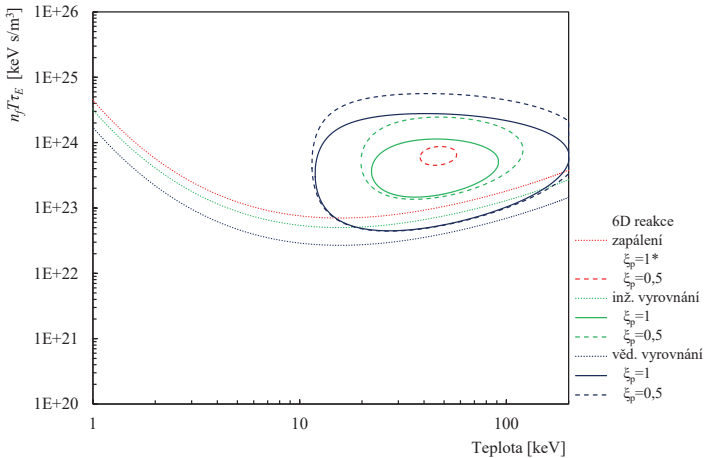
Pro grafy byly zvoleny hodnoty faktoru ξ_p ve výši 1 a 0,5. V případě $\xi_p = 1$ je doba udržení produktů reakce stejná jako doba udržení všech částic plazmatu. V případě $\xi_p = 0,5$ jsou produkty reakce odváděny z plazmatu dvakrát rychleji než ostatní částice plazmatu.



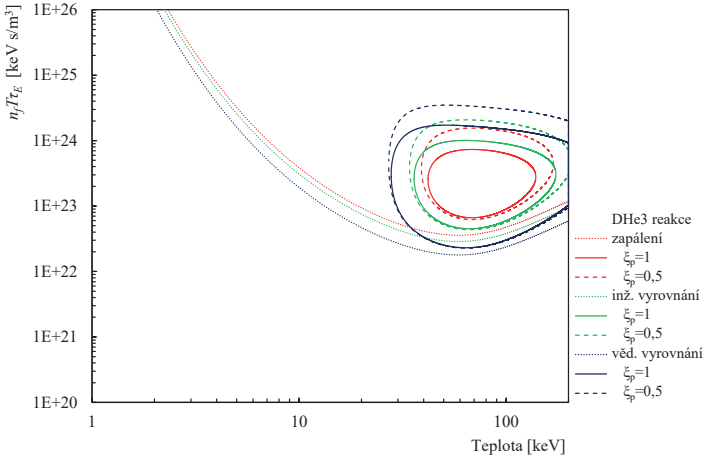
Obr. 24 Ustálený podíl fúzního paliva v palivové směsi DT, při kterém jsou splněna Lawsonova kritéria pro různý poměr doby udržení produktu reakce (helium) vůči době udržení částic plazmatu ξ_p ($\eta_{REC}=19,8\%$, $M_R=1,1$, $P_{CI}=10^{-3}P_{cy}$)



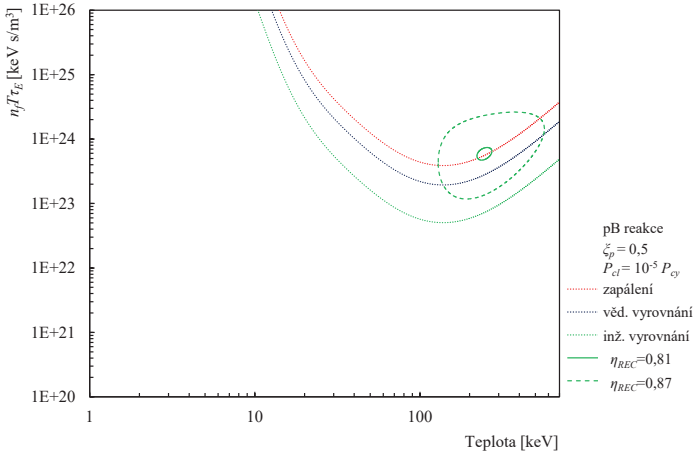
Obr. 25 Kriteriaální křivky reakce DT ($\eta_{REC}=19,8\%$, $M_R=1,1$, $P_{cl}=10^{-3}P_{cy}$). Tečkovaně jsou zobrazeny křivky základních rovnic



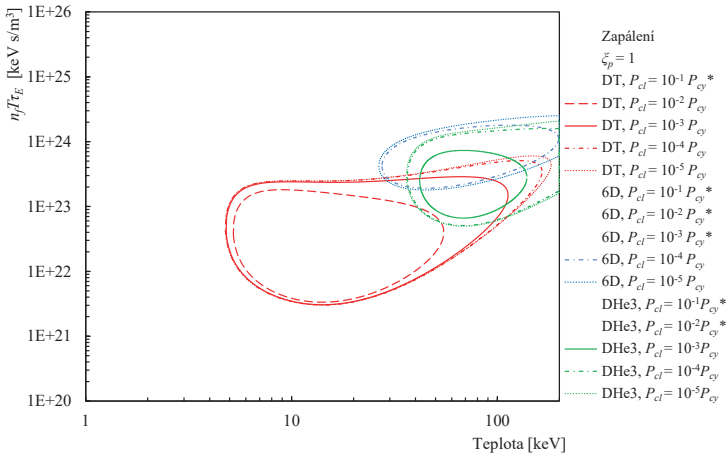
Obr. 26 Kriteriaální křivky reakce 6D ($\eta_{REC}=19,8\%$, $M_R=1$, $P_{cl}=10^{-3}P_{cy}$). Tečkovaně jsou zobrazeny křivky základních rovnic. *Dosažení kritéria zapálení při $\xi_p=1$ je při stanovených podmínkách fyzikálně vyloučeno



Obr. 27 Kriteriaální křivky reakce DHe3 ($\eta_{REC}=19,8\%$, $M_R=1$, $P_{ci}=10^{-3}P_{cy}$). Tečkovaně jsou zobrazeny křivky základních rovnic



Obr. 28 Kriteriaální křivky reakce pB ($M_R=1$, $P_{ci}=10^{-5}P_{cy}$). Tečkovaně jsou zobrazeny křivky základních rovnic. Zobrazené křivky inženýrského vyrovnání odpovídají účinnosti recirkulace výkonu ohřevu 81% a 87% za podmínky intenzivního odstraňování helia $\xi_p=0,5$ a zanedbatelných ztrát cyklotronového záření na úrovni 0,001%. Dosažení vědeckého vyrovnání a zapálení je při stanovených podmínkách fyzikálně vyloučené

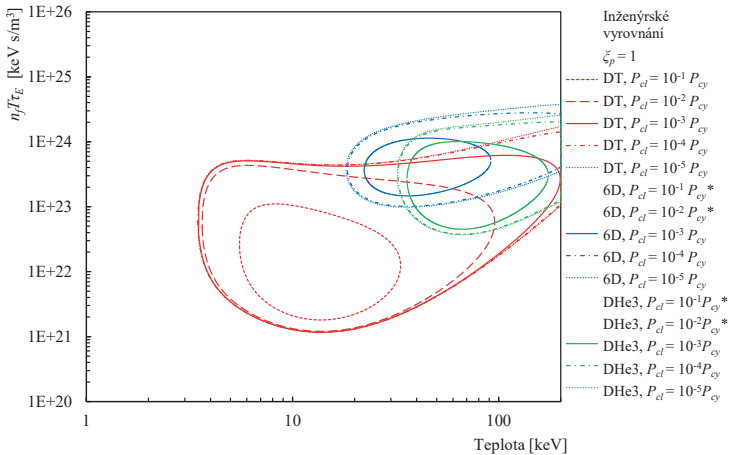


Obr. 29 Porovnání kritériálních křivek zapálení analyzovaných reakcí pro různé ztrátové výkony cyklotronového záření P_{ch}^* . Reakce DT nedosáhne zapálení při ztrátách cyklotronového záření vyšších než 1 %, reakce 6D a DHe3 nedosáhnou zapálení při ztrátách vyšších než 0,01 %, resp. 0,1 % cyklotronového záření

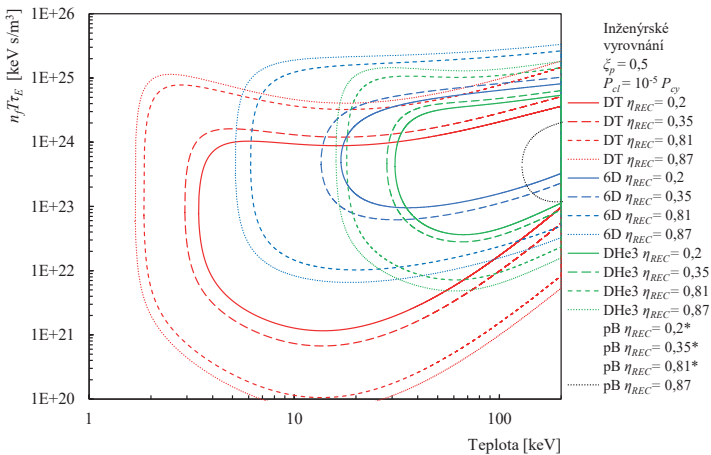
Na **obrázku 29** jsou porovnány kritériální křivky zapálení. Z analyzovaných reakcí mohou stavu zapálení dosáhnout pouze reakce DT, 6D a DHe3. Žádná z analyzovaných reakcí by nedosáhla zapálení, pokud by byly ztráty cyklotronového záření na úrovni 10 procent nebo vyšší. Zapálení reakcí 6D a DHe3 vyžaduje velmi nízké ztráty cyklotronového záření ve výši maximálně 0,01 procenta, resp. 0,1 procenta.

Na **obrázku 30** je zobrazeno porovnání kritériálních křivek inženýrského vyrovnání při účinnosti recirkulace 19,8 procenta. Dosáhnout inženýrského vyrovnání a vyrábět užitečnou elektřinu mohou za těchto podmínek opět pouze reakce DT, 6D a DHe3. Dosažitelnost kritérií významně závisí na velikosti ztrát cyklotronového záření. Při ztrátách na úrovni 10 procent cyklotronového záření by bylo možné energeticky využít pouze reakci DT, zbývající dvě reakce mohou splnit kritérium, pokud ztráty cyklotronového záření nepřekročí 0,1 procenta.

Obrázek 31 zobrazuje kritériální křivky inženýrského vyrovnání analyzovaných reakcí v závislosti na účinnosti recirkulace výkonu ohřevu plazmatu. S růstem účinnosti recirkulace bude možné provozovat energeticky ziskový reaktor v širším rozsahu parametrů plazmatu. Vysoká účinnost recirkulace nad 80 procent umožní i energetické využití reakce pB v souladu s **obrázkem 28**.



Obr. 30 Porovnání kriteriálních křivek inženýrského vyrovnání analyzovaných reakcí při $\eta_{REC}=19,8\%$ pro různé ztrátové výkony cyklotronového záření. *Reakce 6D a DHe3 mohou splnit kritérium, pokud ztráty cyklotronového záření nepřekročí 0,1%. V případě reakce pB je dosažení inženýrského vyrovnání za stanovené účinnosti vyloučeno



Obr. 31 Porovnání kriteriálních křivek inženýrského vyrovnání analyzovaných reakcí pro různé účinnosti recirkulace. Vyšší účinnost recirkulace zvětšuje rozsah parametrů, při kterých může být dosaženo inženýrského vyrovnání. *V případě reakce pB je inženýrské vyrovnání dosažitelné pouze při účinnosti recirkulace vyšší než 80%. Křivka pro 81% je mimo rozsah grafu při teplotách 200–300 keV (viz **obr. 25**)

Při analýze nebyla započtena přítomnost nečistot v plazmatu. V reálném provozu fúzního reaktoru bude docházet k interakci plazmatu s okolními konstrukcemi reaktoru, při kterých se budou do plazmatu uvolňovat atomy konstrukčních materiálů. Tyto atomy se stanou zdrojem záření, a zvláště nečistoty s vysokým protonovým číslem budou zvyšovat radiační ztráty vysokou intenzitou brzdného, rekombinačního a čárového záření. Vyšší ztrátový výkon zmenší operační prostor parametrů paliva. Kvůli nečistotám může tento operační prostor i zaniknout a splnění kritérií nebude možné.

Energetická využitelnost fúzních reakcí

Z výsledků je zřejmé, že nejdosažitelnější fúzní reakcí je reakce izotopů vodíku deuteria a tritia DT. Fúzní reaktor využívající reakci DT může splnit všechna Lawsonova kritéria v širokém rozsahu parametrů plazmatu. Protože je deuterium na Zemi dobře dostupné a tritium lze vyrábět přímo ve fúzních reaktorech, bude se tato reakce využívat v první generaci fúzních elektráren.

Jednotlivé reakce DD mají kvůli nízkému fúznímu výkonu vyloučené vědecké vyrovnání a zapálení a jejich energetická využitelnost je možná pouze v souhrnné reakci 6D. Reakce ale bude vyžadovat nejméně 130krát vyšší trojný součin parametrů paliva oproti DT reakci. S pomocí škálování doby udržení energie³⁵ je možné pro tento součin orientačně odhadnout magnetické pole potřebné pro udržení plazmatu: reakce 6D bude vyžadovat ve srovnání s reakcí DT přibližně 11krát silnější magnetické pole. Reaktor ITER bude mít v ose plazmatu magnetické pole o velikosti 5,3 T (při maximálním poli 11,8 T), takže fúzní reaktory uvolňující energii reakcí jader deuteria budou muset vytvořit v ose plazmatu magnetické pole o velikosti nejméně 59 T. To je ale v současnosti vysoko nad našimi možnostmi. Proto je jednou z podmínek realizace fúzních elektráren využívajících reakci DD zásadní pokrok ve vývoji nových suprařivých materiálů a suprařivých magnetických cívek, které by dokázaly vytvořit takto silná magnetická pole ve velkém objemu reaktoru.

Mírnější požadavky na parametry paliva klade bezneutronová fúzní reakce DHe3. Pro využití této reakce by bylo nutné dosáhnout přibližně 40krát vyšší trojný součin parametrů paliva oproti DT reakci, a vytvořit proto v ose plazmatu magnetické pole nejméně 31 T. Při využívání reakce DHe3 by docházelo k menší aktivaci konstrukce jaderné zóny reaktoru než v případě DT reakce vyvolané pouze neutrony z parazitních fúzních reakcí DD a DT. Zásadní překážkou využití reakce je ale nedostatek ³He na Zemi. I v případě, že by se potvrdily zásoby ³He na Měsíci, představuje jeho těžba s ohledem na předpokládanou nízkou výtěžnost velkou výzvu a odsouvá využívání reakce DHe3 do vzdálené budoucnosti.

Využití reakce pB jader vodíku a boru klade v současnosti nesplnitelné požadavky na reaktor a technologii elektrárny. Uvolňovaný fúzní výkon je příliš nízký

ve srovnání s obvyklými ztrátami při recirkulaci výkonu ohřevu paliva, a kritérium inženýrského vyrovnání může být splněno pouze při velmi vysoké účinnosti recirkulace, v analyzovaném případě vyšší než 80 procent. Reakce bude také vyžadovat podobně vysoké magnetické pole jako reakce 6D. Kvůli vysokým radiačním ztrátám je přitom vyloučeno dosažení vědeckého vyrovnání a zapálení.

Závěr

Při zjednodušení, z nichž nejvýznamnější jsou předpoklad čisté palivové směsi a zanedbání závislosti doby udržení energie v palivu na teplotě, lze odvodit základní rovnice Lawsonova kritéria popisující vědecké vyrovnání, zapálení a inženýrské vyrovnání. Tato kritéria již několik desítek let definují cíl, ke kterému směřuje fúzní výzkum.

Zatímco je kritérium vědeckého vyrovnání symbolické povahy a nemá praktický význam, kritérium zapálení řeší reálnou energetickou bilanci paliva. S výrobou elektřiny pak souvisí kritérium inženýrského vyrovnání, které do energetické bilance zahrnuje recirkulaci výkonu ohřevu paliva zařízením elektrárny. Kritérium aplikuje na fúzní elektrárny základní podmínku výroby elektřiny pro elektrizační soustavu spočívající v tom, že pro výrobu užitečné elektřiny musí mít elektrárna čistou účinnost větší než nula.

Započtení přítomnosti nabitých produktů reakce v plazmatu a explicitních radiálních ztrát umožňuje odvodit pokročilá kritériální rovnice, jež kladou na fúzní palivo kvalitativně a kvantitativně vyšší požadavky než základní rovnice. Pokročilá rovnice vymezují rozsah provozních parametrů paliva a v některých případech vylučují splnění kritérií. Jejich aplikace umožňuje porovnat různé fúzní reakce z hlediska použitelnosti ve fúzních elektrárnách a potvrzuje, že využití reakce DT pro energetické účely je možné a ve srovnání s ostatními dostupnými reakcemi nejsnazší. Využití reakcí DD, DHe3 a pB vyžaduje podstatně silnější magnetický systém reaktoru, než jsme dnes schopni postavit. Reakce DHe3 je také bez dostupných zdrojů ^3He na Zemi a reakce pB bude využitelná jen za podmínky velmi vysoké účinnosti technologií elektrárny.

Vývoj fúzních reaktorů již dávno překročil hranice fyzikálního výzkumu. Provozní scénáře fúzních reaktorů narážejí na technologické limity, jako je dosažitelná velikost magnetického pole, dostupnost odolných materiálů jaderné zóny nebo schopnost chladicích kanálů odvádět vysoký výkon z reaktoru. Proto se fúzní výzkum rozrůstá do mnoha odvětví a stává se multidisciplinárním. Vzhledem k probíhajícím klimatickým změnám lze současně očekávat nárůst zájmu o jadernou fúzi jako jediného průmyslového zdroje čisté energie, který známe. Bez ohledu na expandující rozsah fúzního výzkumu a velký technologický pokrok Lawsonovo kritérium dál vytyčuje směr k fúzním elektrárnám.

Odkazy

1. Entler, S. a kol., Approximation of the Economy of Fusion Energy. *Energy* 152 (2018), 489.
2. Lawson, J. D., Some criteria for a power producing thermonuclear reactor. *Proc. Phys. Soc. B* 70, 6 (1957); původně výzkumná zpráva: A.E.R.E. Report GP/R 1807, Harwell, Berks 1955, A.E.R.E. Amplified version, Harwell, Berks, 1956.
3. Glasstone, S. a kol., *Controlled Thermonuclear reactions*. New York: Robert E. Krieger Publishing Company Huntington, 1975.
4. Wesson, J., *Tokamaks*. Fourth Edition. Oxford, UK: Oxford University Press Inc., 2011.
5. Freidberg, J. P., *Plasma physics and fusion energy*. New York: Cambridge University Press, 2007.
6. Kikuchi, M. a kol., *Fusion Physics*. Vídeň: International Atomic Energy Agency, 2012.
7. Van Oost, G. a kol., Thermonuclear burn criteria. *Fusion Science and Technology* 61 (2012), 17.
8. Reiter, D. a kol., Burn condition, helium particle confinement and exhaust efficiency. *Nuclear Fusion* 30 (1990), 2141.
9. Rebhan, E. a kol., Effect of helium concentration on ignition curves with energy confinement time including radiation losses. *Nuclear Fusion* 36 (1996), 264.
10. Entler, S., Engineering Breakeven. *Journal of Fusion Energy*, 34 (2015), 513.
11. ITER, www.iter.org, 18. 2. 2022.
12. Federici, G. a kol., European DEMO design strategy and consequences for materials. *Nuclear Fusion* 57 (2017), 092002.
13. Donne, T. a kol., *Fusion Electricity. A Roadmap to the Realization of Fusion Energy*. EUROfusion, 2018.
14. Mlynář, J., Termojaderná fúze a difúze (o náhodné procházce). *Rozhledy matematicko-fyzikální* 1 (2014), 5.
15. Strait, E. J., Stability of high beta tokamak plasmas. *Physics of Plasmas* 1 (1994), 1415.
16. Zohm, H., *Magnetohydrodynamic Stability of Tokamaks*. Weinheim: Wiley-VCH, 2015.
17. Bosch, H. S. a kol., Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities. *Nuclear Fusion* 32 (1992), 611.
18. Pamela, J. a kol., Efficiency and availability driven R&D issues for DEMO. *Fusion Engineering and Design* 84 (2009), 194.
19. McAdams, R., Beyond ITER: Neutral beams for a demonstration fusion reactor (DEMO). *Review of Scientific Instruments* 85 (2014), 02B319.
20. Kemp, R., DEMO1 Reference Design April 2015. Interní dokument EUROfusion IDM EU_2LBJRY, EUROfusion, 2015.
21. Morris, J., DEMO1_Reference_Design_-_2017_March. Interní dokument EUROfusion IDM EFDA_D_2NDSKT v1.0, EUROfusion, 2019.
22. Morris, J., PROCESS 2019 Baseline Input/Output Files. Interní dokument EUROfusion IDM EFDA_D_2NBQ4R v1.0, EUROfusion, 2019.
23. Kemp, R., DEMO2 Reference Design May 2015. Interní dokument EUROfusion IDM EU_D_2LCBVU, EUROfusion, 2015.
24. Wittenberg, L. J. a kol., A Review of ^3He Resources and Acquisition for Use as Fusion Fuel. *Fusion Technology* 21 (1992), 2230.

25. ESA, 2021. https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Energy/Helium-3_mining_on_the_lunar_surface, 18. 2. 2022.
26. Hora, H. a kol., Road map to clean energy using laser beam ignition of boron-hydrogen fusion. *Laser and Particle Beams* 35 (2017), 730.
27. Nevins, W. M. a kol., The thermonuclear fusion rate coefficient for p-11B reactions. *Nuclear Fusion* 40 (2000), 865.
28. Mlynář, J., Padesát let Lawsonových kritérií. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* 3 (2006), 231.
29. Mlynář, J., FOCUS ON: JET, Interview with JD Lawson. Culham Science Centre, Abingdon: EFDA JET Close Support Unit, 2007.
30. Wikipedie, [https://en.wikipedia.org/wiki/John_D._Lawson_\(scientist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/John_D._Lawson_(scientist)), 11. 9. 2021.
31. Richardson, A. S., NRL Plasma Formulary, NRL/PU/6770--19-652. Washington: Naval Research Laboratory, 2019.
32. Stott, P. E., The feasibility of using D-3He and D-D fusion fuels. *Plasma Physics and Controlled Fusion* 47 (2005), 1305.
33. Albajar, F. a kol., Improved calculation of synchrotron radiation losses in realistic tokamak plasmas. *Nuclear Fusion* 41 (2001), 665.
34. Mikkelsen, M. R., Core fuelling to produce peaked density profiles in large tokamaks. *Nuclear Fusion* 35 (1995), 521.
35. ITER Physics Expert Group on Confinement and Transport et al, Chapter 2, 1999. Plasma confinement and transport. *Nuclear Fusion* 39 (1999), 2175.

Autorský tým

Ing. Slavomír Entler, Ph.D. – pracuje v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a vyučuje na Fakultě strojní a Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Zabývá se vývojem magnetické diagnostiky pro fúzní reaktory ITER a DEMO a problematikou integrace jaderné fúze do energetiky.

Mgr. Jan Horáček, DSc. – pracuje v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a vyučuje na Matematicko-fyzikální fakultě UK. Zabývá se fyzikou okrajového plazmatu, problematikou interakce plazma–stěna a otázkami udržitelné energetiky.

Ing. Ondřej Ficker – doktorand FJFI ČVUT v Praze, pracuje v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. Zabývá se problematikou ubíhajících elektronů, tomografií plazmatu, měřením neutronů a výstavbou nového tokamaku COMPASS-U.

Ing. Karel Kovařík, Ph.D. – pracuje v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. Zabývá se vývojem magnetické diagnostiky, proudovými nestabilitami okrajového plazmatu a výstavbou nového tokamaku COMPASS-U.

prof. RNDr. Jan Mlynář, Ph.D. – pracuje na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze a v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. Věnuje se rozvoji výuky termojaderné fúze, problematice ubíhajících elektronů a tomografii plazmatu.

Nová strategie Akademie věd České republiky

motto: „Špičkový výzkum ve veřejném zájmu“

Program Udržitelná energetika

Lidská civilizace byla vždy formována dostupností energie v různých jejích formách a je na ní životně závislá. Bez spolehlivých a dostatečných dodávek energie bychom se museli rozloučit s mnoha výtobky civilizace, které považujeme za samozřejmé. Celosvětová spotřeba energie činí asi 580 mil. Tj ročně. Největší část vyrobené energie končí v průmyslu a dopravě.

Hlavním zdrojem energie jsou dosud fosilní paliva s podílem přibližně 83 procent. Podíl obnovitelných zdrojů energie sice roste, dosahuje však pouze okolo 15 procent. Se stoupající spotřebou energie je tato situace dlouhodobě neudržitelná. Zdroje fosilních paliv jsou omezené a emise vznikající při jejich spalování mohou mít v dohledné době fatální dopad na klima na naší planetě. Do hry tak vstupují nové faktory a energetiku čeká v příštích desetiletích zásadní přeměna směrem k udržitelnosti. Legislativní rámec této přeměny v našich podmínkách stanovil balíček Fit for 55 v rámci Zelené dohody pro Evropu – závazku Evropské unie dosáhnout do roku 2050 klimatické neutrality.

Výroba, transport, skladování a využívání energie ve všech jejích formách představuje složitý systém, jehož pochopení vyžaduje znalosti z mnoha vědních oborů. Probíhající změny mohou mít značné socioekonomické dopady pramenící z rizik v podobě nestability a nedostupnosti dodávek energie, vysokých cen energií nebo hrozeb pro politickou soudržnost hospodářských celků s odlišnými zájmy. V programu *Udržitelná energetika* spojují své síly ústavy AV ČR a jejich externí partneři z oblasti přírodních, technických a společenských věd na řešení mezioborových výzkumných výzev a dopadu probíhající přeměny energetiky na společnost.

Program pokrývá klíčové oblasti spojené s přechodem k udržitelné energetice. Obnovitelné a jaderné zdroje energie nabízejí nízkoe emisní řešení potřeb primární energie. V oblasti jaderné energie je třeba hledat nová řešení pro termojadernou fúzi a zajistit bezpečnost existujících jaderných elektráren se štěpnými reaktory. Nestálost výroby energie z obnovitelných zdrojů a postupná decentralizace výroby vytváří tlak na skladování energie v dosud nevídané míře. Velkou roli v této oblasti může sehrát vodík, který je do budoucna považován za hlavní zdroj energie pro oblast dopravy. Je třeba minimalizovat vliv energetického využití paliv na životní prostředí.

Pokrok v těchto oblastech vyžaduje pochopení a přijetí ze strany veřejnosti. Proto je důležitou součástí programu popularizace a přenos poznatků do vzdělávací sféry.

Koordinátor

- doc. Ing. Miroslav Chomát, CSc.

Koordinační pracoviště

- Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i.
- Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.

Partnerská pracoviště

- Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.
- Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.
- Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, v. v. i.
- Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i.
- Ústav informatiky AV ČR, v. v. i.
- Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i.
- Ústav makromolekulární chemie AV ČR, v. v. i.
- Sociologický ústav AV ČR, v. v. i.
- Národohospodářský ústav AV ČR, v. v. i.
- Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.
- Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.
- Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

Externí pracoviště

- České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
- České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
- Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta
- Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemické technologie
- Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská
- Západočeská univerzita v Plzni, Research and Innovation Centre for Electrical Engineering (RICE)
- Státní úřad pro jadernou bezpečnost
- ÚJV Řež, a. s.
- Centrum výzkumu Řež, s. r. o.
- ČEPS, a. s.
- Česká vodíková technologická platforma (HYTEP)

V roce 1955 britský inženýr J. D. Lawson odvodil kritérium popisující podmínky, za kterých se může jaderná fúze stát zdrojem užitečné energie. Kritérium představuje zjednodušenou energetickou bilanci elektrárny s fúzním reaktorem zaměřenou na specifické rysy fúzních elektráren, jimiž jsou nutnost energeticky náročného ohřevu paliva a recirkulace výkonu ohřevu. Na základě konceptu původního kritéria byly v průběhu následujících let definovány dvě další kritériální rovnice popisující energetickou bilanci samotného fúzního paliva, tj. bez vlivu technologie elektrárny, označované jako kritérium vědeckého vyrovnání a kritérium zapálení. Původní kritériální rovnice vztažená na celou fúzní elektrárnu se označuje jako kritérium inženýrského vyrovnání.

Lawsonovo kritérium umožňuje zhodnotit možnosti energetického využití různých fúzních reakcí. Hodnocení je provedeno pro fúzní reakce deuteria a tritia (DT), deuteria (DD), deuteria a helia ^3He (DHe3) a vodíku a boru (pB). Výsledky ukazují, proč je DT reakce v současnosti jedinou energeticky využitelnou fúzní reakcí. Ostatní reakce vyžadují oproti reakci DT dokonalejší reaktory, než zatím umíme postavit. Využití reakce pB je navíc podmíněno velmi vysokou účinností zařízení elektrárny.



STRATEGIE AV21

Edice Strategie AV21 | Udržitelná energetika

Slavomír Entler, Jan Horáček, Ondřej Ficker, Karel Kovařík, Jan Mlynář |
Lawsonovo kritérium

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., pro Kancelář Akademie věd ČR,
Národní 3, 117 20 Praha 1. Grafická úprava Robin Brichta. Fotografie na obálce
EUROfusion Consortium a ITER Organization.

Technická redaktorka Ivana Říhová. Obrazová redaktorka Lucie Veselá.
Odpovědná redaktorka Dana Packová.

Vydání 1., 2023. Ediční číslo 12985. Sazba a tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jínonická 80, 158 00 Praha 5.

<http://av21.avcr.cz>

ISBN 978-80-200-3449-6



9 788020 034496