

Planeta ve skleníku

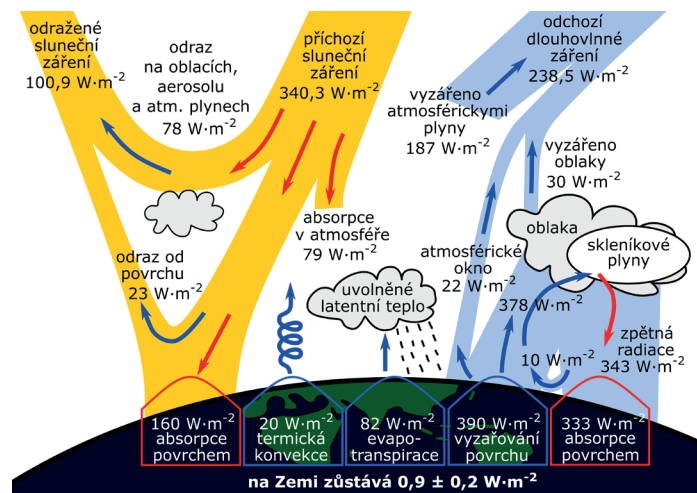
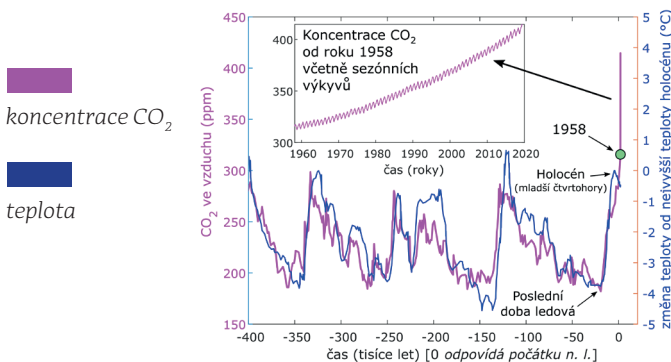
- Oxid uhličitý, metan a některé další plyny emitované lidskou civilizací absorbují infračervené záření zemského povrchu, které by jinak odešlo do vesmíru. To způsobuje globální oteplování. Pro zdánlivou podobnost s funkcí skleníku se tyto plyny označují jako skleníkové.
- Současná koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře je nejvyšší za posledních 800 tisíc let. Emise skleníkových plynů rostou tempem přes 1 % ročně. Tento nárůst je způsoben především zvyšováním emisí na obyvatele v rozvojových zemích. V rozvinutých zemích se většinou daří emise postupně snižovat, ale z hodnot řádově vyšších, než které jsou dosahovány v rozvojevém světě.
- Antropogenní emise oxidu uhličitého (CO₂) přesahují 37 Gt (miliard tun) CO₂ ročně. Emise dalších skleníkových plynů se přepočítávají na ekvivalent emisí oxidu uhličitého, CO₂e. Globální emise skleníkových plynů již překročily 54 Gt CO₂e ročně. Z největší části jsou spojeny s výrobou elektřiny a tepla (31 %), zemědělstvím a lesním hospodářstvím (18 %) a průmyslovou výrobou (12 %). Tyto zdroje jsou řádově mohutnější než lidské dýchání, které je součástí přirozeného koloběhu mezi biosférou a ovzduším a činí 3 Gt CO₂ ročně.
- Povrchové vrstvy polárních pevnin a moří obsahují obrovské množství metanu ve formě hydrátů podobných ledu. Tento metan může být částečně využit, ale jeho spontánní uvolnění v důsledku tání by znamenalo eskalaci globálního oteplování.
- Pařížská dohoda vyžaduje udržení nárůstu průměrné globální teploty výrazně pod hranicí 2 °C oproti hodnotám před průmyslovou revolucí. Již tato hodnota představuje výraznou klimatickou změnu.
- Pokles emisí v EU při současném ekonomickém růstu je do značné míry umožněn masovou výrobou v jiných zemích. Například kolem 70 % některých produktů klíčových pro snižování emisí je vyráběno v Číně. Cestou k zásadní redukci emisí skleníkových plynů při zachování ekonomického rozvoje je razantní nasazení obnovitelných energetických zdrojů a jejich rychlý rozvoj založený na výzkumu a nových objevech.

CO NÁS HŘEJE A CO CHLADÍ? ENERGETICKÁ BILANCE ZEMĚ

Tok energie od Slunce má vzhledem k jeho vysoké teplotě charakter krátkovlnného záření.

Na horní vrstvu atmosféry dopadne v průměru přibližně $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ slunečního záření. Téměř stejná hodnota, v průměru jen o $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ menší, odchází ze Země do vesmíru. Pro teplotu zemského povrchu jsou rozhodující překážky stojící v cestě těmto energetickým tokům. Zemský povrch má poměrně nízkou teplotu, a proto vyzařuje v infračervené (dlouhovlnné) oblasti. Jen velmi malá část tohoto záření projde atmosférou přímo do vesmíru. Většina dlouhovlnného záření povrchu Země je absorbována skleníkovými plyny. A většina celkové energie absorbované v atmosféře se dlouhovlnným zářením dostává dolů na zemský povrch. Tento tzv. skleníkový efekt zásadním způsobem ovlivňuje zemské klima. Bez něj by byla průměrná povrchová teplota Země, pokud by měl stejnou odrazivost, okolo $-18 \text{ }^\circ\text{C}$, nikoli pro život příjemných $+15 \text{ }^\circ\text{C}$. Zvyšováním koncentrace skleníkových plynů dochází ke zvyšování dlouhovlnného záření atmosféry dolů na zemský povrch a tím ke zvyšování teploty na Zemi se všemi jeho důsledky.

Vývoj vzdušných koncentrací CO_2 a povrchové teploty Země



Obr. 1. Energetická bilance atmosféry a zemského povrchu. Energetické toky (roční průměry) jsou vztaženy na jeden čtvereční metr povrchu.

Obr. 2 ukazuje jasnou korelaci teploty povrchu Země se vzdušnými koncentracemi CO_2 v průběhu posledních 400 tisíc let a zároveň závratný růst koncentrace CO_2 v posledních desetiletích. Současná koncentrace CO_2 tak převyšuje nejvyšší hodnoty za posledních 400 tisíc let přibližně o 100 ppm (parts per milion – molekula CO_2 na jeden milion molekul atmosférických plynů). Přitom takový rozdíl byl v minulosti svázán se změnami teploty kolem $3 \text{ }^\circ\text{C}$ a s drastickými změnami zemského klimatu – např. od poslední doby ledové, kdy se zalednění přiblížilo k současnému území ČR.

CO JSOU „SKLENÍKOVÉ PLYNY“?

Skleníkové plyny jsou plyny v atmosféře, které absorbují a vyzařují infračervené záření. Hlavním přírodním skleníkovým plynem je vodní pára. Lidstvo přispívá ke skleníkovému efektu emisemi oxidu uhličitého, metanu, halogenovaných uhlovlodíků (plyny obsahující fluor, chlor a brom), oxidů dusíku a emisemi způsobenými změnami v koncentracích troposférického a stratosférického ozonu. Tyto plyny setrvávají v atmosféře desítky a v některých případech až tisíce let. Hlavní atmosférické plyny dusík (N_2), kyslík (O_2) a argon (Ar), tvořící 99,96 % objemu atmosféry, ke skleníkovému efektu nepřispívají. Mezi umělé skleníkové plyny patří zejména chladiva, hnací plyny v aerosolových rozprašovačích a rozpouštědla na bázi halogenovaných uhlovlodíků, dále pak fluorid sírový (SF_6) a fluorid dusitý (NF_3). Relativní vliv jednotlivých plynů je nejčastěji charakterizován pomocí tzv. potenciálu globálního oteplování (Global Warming Potential – GWP). GWP je poměr energie infračerveného záření, kterou zachytí kilogram dané látky vypuštěné do

atmosféry za určitou dobu (nejčastěji 100 let), k energii zachycené kilogramem emisí CO_2 . GWP zohledňuje také životnost plynu v atmosféře. Ekvivalentní hmotnost emisí oxidu uhličitého CO_2e se určuje na základě GWP.

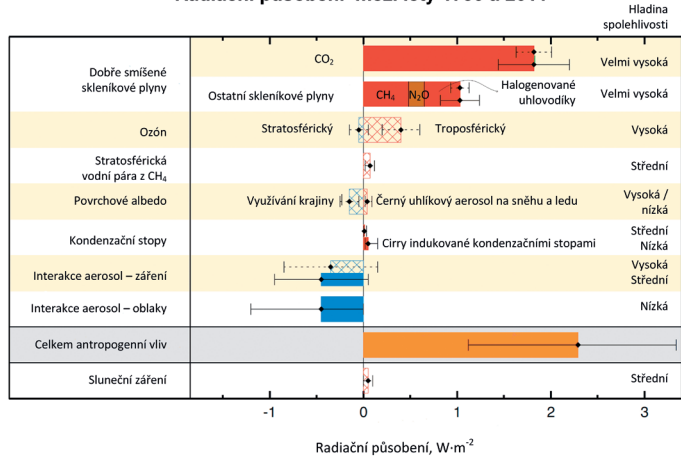
Tabulka ukazuje GWP a podíl jednotlivých skleníkových plynů na tzv. radiačním působení (Radiative Forcing, RF), jehož definice vychází z energetické bilance atmosféry. V ustáleném stavu je součet energetických toků na hranici stratosféry a troposféry roven nule. Přitom toky směrem k zemskému povrchu (sluneční záření) bereme jako kladné a toky směrem do vesmíru (odražené světlo a infračervené záření povrchu a atmosféry) jako záporné. Pokud atmosférický systém nějakým způsobem změníme, např. zvýšením koncentrace nějakého skleníkového plynu, narušíme tím ustálený stav a na horní hranici troposféry vznikne nenulový tok energie, jehož velikost v jednotkách $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ vyjadřuje RF. Při výpočtu RF jsou uvažovány nezměněné teploty troposféry a zemského povrchu, což je abstrakce potřebná pro transparentní vyjádření RF.

| Název | Chemický vzorec | Životnost v atmosféře (roky) | GWP 100 let | Podíl na radiačním působení ^{*.5} | Zdroj / použití |
|----------------|------------------------------------|------------------------------|-------------|--|--|
| oxid uhličitý | CO_2 | (100–150) | 1 | 66 % | spaliny z dopravy, při produkci elektřiny a v průmyslu |
| metan | CH_4 | 12,4 | 28 | 16 % | zpracování zemního plynu a ropy, chemický průmysl, zemědělství |
| oxid dusný | N_2O | 121 | 265 | 6 % | zemědělství |
| R12 | CCl_2F_2 | 100 | 10 200 | 5 % | již nepoužívané chladivo způsobující úbytek ozónu, nahrazeno R134a |
| R22 | CHClF_2 | 11,9 | 1760 | 1,4 % | chladivo používané v rozvojových zemích jako alternativa R11 a R12 |
| R134a | CH_2FCF_3 | 13,4 | 1300 | 0,5 % | chladivo postupně nahrazované s ohledem na vysoké GWP |
| R1234yf | $\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$ | 10,5 dní | < 1 | - | chladivo používané v automobilech |
| R14 | CF_4 | 50 000 | 6630 | 0,1 % | výroba optických vláken, chladivo pro nízké teploty |
| fluorid sírový | SF_6 | 3200 | 23 500 | 0,2 % | nevodivé medium v elektrotechnice |

* Pro rok 2019, určeno na základě celkového radiačního působení (RF) skleníkových plynů kromě vody, které činí $3,14 \text{ W}/\text{m}^2$

⁵ Celkový podíl halogenovaných uhlovlodíků (CFC, HFC, HCFC, PFC) činí zhruba 12 %

Radiační působení mezi lety 1750 a 2011



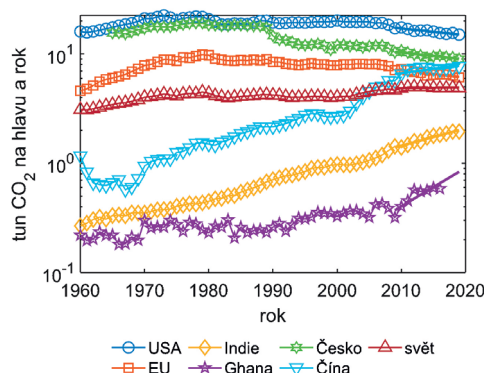
Zdaleka nejvýznamnější je radiační působení skleníkových plynů. Zřetelný je také vliv troposférického ozonu, který vzniká v důsledku emisí oxidů dusíku (NOx), oxidu uhelnatého (CO) a těkavých organických látek (VOC). Existují také nezanedbatelné antropogenní vlivy působící opačným směrem, tj. efektivně ochlazující zemský povrch. K těm patří zvýšená koncentrace aerosolů, které zvyšují odrazivost (albedo) atmosféry a jako kondenzační jádra také přispívají ke zvýšení albeda oblaků.

Kam to spěje?

Emise CO₂ rostou tempem asi 1,1 % ročně. Obr. 4 ukazuje emise CO₂ ve vybraných zemích vztažené na osobu a rok. V rozvinutých ekonomikách emise mírně klesají z vysokých hodnot, zatímco v rozvojovém světě prudce narůstají z hodnot zhruba o jeden až dva řády nižších. Tento růst zřetelně souvisí s nárůstem životní

Obr. 3. Odhady radiačního působení různých antropogenních vlivů v jednotkách W·m⁻² (tj. ekvivalentní změny radiačních toků způsobené jednotlivými vlivy) pro rok 2011 vzhledem ke stavu před průmyslovou revolucí (rok 1750). Nejistoty jsou uvedeny jako chybové úsečky.

Obr. 4. Emise CO₂ na osobu a rok v různých státech, v EU a v celém světě.



úrovně. Zvláštní pozornost zasluhuje Čína, kde extenzivní rozvoj ekonomiky v minulých desetiletích vedl k emisím převyšujícím průměr EU. Na tom má ovšem podíl i skutečnost, že Čína a rozvojové země přebírají část energeticky náročné výroby pro spotřebu v rozvinutých zemích, a to včetně technologií klíčových pro snižování emisí; např. 70 % fotovoltaických panelů a 73 % lithiových baterií je vyráběno v Číně. Česko s ohledem na energeticky náročnou průmyslovou výrobu převyšuje v emisích na hlavu průměr EU. Tempo jejich snižování v posledních letech poněkud zaostává za evropským průměrem.

MEZINÁRODNÍ DOHODY A LEGISLATIVA OHLEDNĚ SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ

V roce 1988 byl Světovou meteorologickou organizací (WMO) a Programem OSN pro životní prostředí (UNEP) zřízen **Mezivládní panel pro změnu klimatu (IPCC)**. Mezinárodní jednání vyústila za posledních přibližně 30 let v následující smlouvy a dohody:

- **Rámcová úmluva Organizace spojených národů o změně klimatu** přijatá 9. května 1992 v New Yorku.
- **Kjótský protokol** k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu přijatý v prosinci 1997, doplněný o Dodatek z roku 2012, na jehož základě bylo prodlouženo závazkové období Kjótského protokolu do roku 2020.
- **Pařížská dohoda** přijatá 12. prosince 2015, jejímž cílem je zlepšit globální reakci na hrozby změny klimatu, a to v návaznosti na udržitelný rozvoj a úsilí o vymýcení chudoby, mimo jiné pomocí **udržení nárůstu průměrné globální teploty výrazně pod hranicí 2 °C** oproti hodnotám před průmyslovou revolucí a úsilí o to, aby tento nárůst nepřekročil hranici 1,5 °C.

Evropská unie se snaží snižovat své emise skleníkových plynů prostřednictvím stanovených cílů, kterými jsou:

- **snížení emisí o 20 %** do roku 2020 oproti roku 1990,
- **snížení emisí nejméně o 40 %** do roku 2030 oproti roku 1990,

- **cíl klimatické neutrality do roku 2050** (deklarován ve sdělení Komise Zelená dohoda pro Evropu z prosince 2019).

Stěžejním předpisem je směrnice Evropského parlamentu (EP) a Rady 2003/87/ES, kterou je od roku 2005 zaveden **systém EU pro obchodování s emisemi skleníkových plynů (EU ETS)**. Do českého práva implementuje tuto směrnici zákon č. 383/2012 Sb. Emise, které nespádají do EU ETS, jsou upraveny zejména rozhodnutím EP a Rady č. 406/2009/ES o úsilí členských států snížit emise skleníkových plynů, aby byly splněny závazky v oblasti snížení emisí skleníkových plynů do roku 2020.

Dalšími důležitými předpisy EU v oblasti skleníkových plynů jsou:

- Nařízení EP a Rady (EU) č. 517/2014 o fluorovaných skleníkových plynech a o zrušení nařízení (ES) č. 842/2006 a nařízení EP a Rady (ES) č. 1005/2009 o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu. V právním řádu ČR navazuje na tyto předpisy EU zákon č. 73/2012 Sb.
- Směrnice EP a Rady 2009/31/ES o geologickém ukládání oxidu uhličitého. Tuto směrnici implementuje do českého práva zákon č. 85/2012 Sb.

TECHNOLOGIE CCS A CCU

Snižování obsahu skleníkových plynů v atmosféře lze dosáhnout kombinací různých opatření. Technologie CCS a CCU (souhrnně také CCSU z angl. Carbon Capture, Storage and Utilization) zahrnují metody k zachytávání CO₂ ze spalin a jeho následnou recyklaci a využití nebo trvalé skladování. Při využití i ukládání CO₂ dochází ke spotřebě energie. Je tedy potřeba nalézt řešení, která povedou ke kompromisu mezi ekonomickými a technickými požadavky a společenskými dopady způsobenými změnou klimatu.

Výsledkem **zachytávání CO₂** ze spalin je plyn, jenž obsahuje také malé množství příměsí (zejména N₂, SO₂, NOx), které je potřeba pro některá další využití CO₂ ze zpracovávaného plynu oddělit. K tomu slouží příslušné separační technologie založené na chemické absorpci a adsorpci, fyzikální absorpci a adsorpci, kryogenní separaci a membránové separaci.

Ukládáním CO₂ (technologie CCS) se myslí uložení oxidu uhličitého zabírající jeho uvolnění do atmosféry. Např. rozpouštění CO₂ pod hladinou oceánu se za ukládání nepokládá, protože hla-

dina oceánu je v kontaktu s atmosférou. Trvalým ukládáním se pak myslí ukládání na dobu srovnatelnou s předpokládaným trváním lidské civilizace.

Geologické ukládání spočívá v injektáži CO₂ pod zemský povrch do vrstev skály v hloubkách pod 610 m, kde je CO₂ již v kapalné fázi, nebo do hornin, v nichž dochází k chemickým reakcím a následně mineralizaci. K ukládání CO₂ lze také využít vyčerpaná ropná nebo plynová pole.

Ukládání a skladování CO₂ v hlubokém oceánu se nevyužívá kvůli obavám z možnosti acidifikace velkých objemů mořské vody v důsledku tvorby kyseliny uhličitě a hydrogenuhlíčitanových iontů. Kromě toho existují mezinárodní předpisy zakazující ukládání odpadu do oceánu (včetně antropogenního CO₂). Tato omezení jsou vytyčena v Londýnské úmluvě (London Convention on Ocean Dumping) z roku 1972 a v Úmluvě Organizace spojených národů o mořském právu (UNCLOS, United Nations Convention of the Law of the Sea) z roku 1982.

Využití CO₂ (technologie CCU) může mít různé formy, jako je například jeho **přeměna** na jiné produkty, nebo dokonce paliva. Dále může být použito jako **technologická tekutina**, což zahrnuje všechny aplikace, ve kterých se CO₂ nepřemění na jiné chemikálie, ale nahradí látku ovlivňující ovzduší, vodu nebo půdu.

Pokročilé biologické použití zahrnuje vázání CO₂ do biomasy za průmyslových podmínek odlišných od přírodních. Jedním z výsledků může být například výroba biopaliv s téměř neutrálními emisemi (quasi-zero emission).

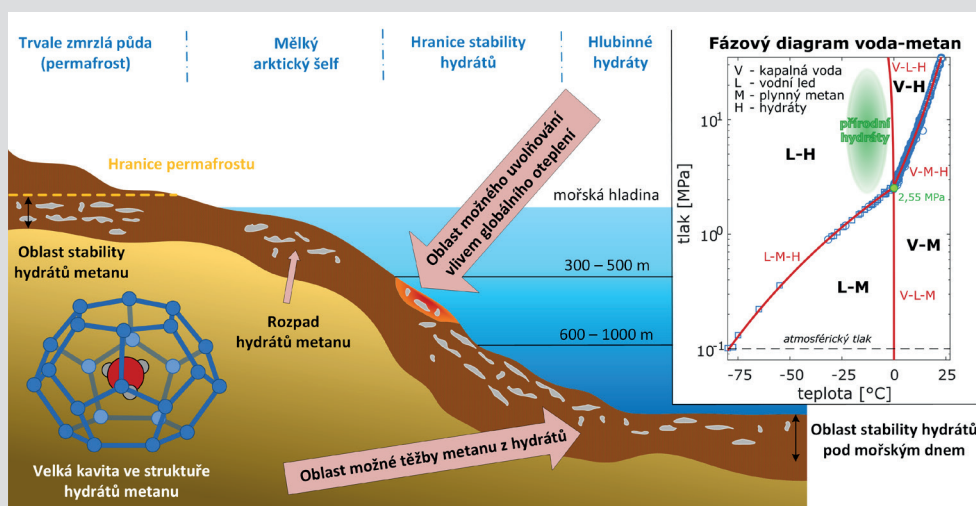
Možnosti skladování přebytků elektrické energie nebo elektrické energie z volatilních zdrojů lze hledat v **tepelné nebo elektrochemické nebo fotokatalytické konverzi CO₂** na jeho redukované formy, jako je metan nebo kapalné uhlovodíky a další látky (CO, CH₃OH, CH₄, C₂H₅OH, C₂H₄, alkoholy), tj. v technologiích Power-to-Gas a Power-to-Liquid směřujících k produkci plyných či kapalných paliv. Suchá reformace metanu (nebo jiných uhlovodíků) produkuje tzv. syngas (H₂-CO) používaný pro syntézu metanolu a benzínu.

SKLENÍKOVÉ PLYNY VE FORMĚ HYDRÁTŮ PLYNŮ – ZDROJ ENERGIE, ČI ENVIRONMENTÁLNÍ HROZBA?

Kromě plynů v atmosféře se na Zemi nachází velké množství skleníkových plynů, které se aktuálně na skleníkovém efektu přímo nepodílejí.

Jedná se zejména o zásoby metanu ve formě hydrátů plynů vyskytujících se na mořském dně v kontinentálním pevninském šelfu v hloubce zhruba od 300 m a v trvale zmrzlé půdě (permafrostu), např. v severních částech Ruska a Kanady. Hydráty plynů jsou krystalické směsi vody a plynů tvořící tzv. klatrátovou strukturu připomínající vodní led, kdy molekuly vody vázané vodíkovými vazbami dávají vzniknout kavitám (dutinám) obsahujícím molekuly plynu. V případě hydrátů metanu je klatrátová struktura tvořena zhruba z 13 až 15 % molekulami metanu a zbytek molekulami vody. Hydráty plynů jsou obecně stabilní při teplotách pod teplotou okolí 25 °C a tlacích v řádu několika MPa. Při nižších tlacích a vyšších teplotách dochází k rozkladu hydrátů plynů na kapalnou vodu a plyn.

Přírodní zásoby metanu ve formě hydrátů se stávají předmětem zájmu jakožto možný zdroj energie, kdy by například hydráty metanu mohly být uměle nahrazovány hydráty CO₂ vykazujícími vyšší stabilitu v závislosti na teplotě a tlaku. Odhady množství přírodního metanu ve formě hydrátů se různí, řádově se odhadují na 10¹⁵ m³, což je zhruba desetkrát více, než jsou odhady zásob zemního plynu.



Obr. 5. Hydráty metanu v přírodě a diagram pro vodu + metan.

Na druhou stranu masivnější uvolnění metanu z hydrátů do moře a do atmosféry by mohlo vést ke katastrofickým a nezvratným změnám klimatu. Vliv metanu na globální oteplování může být v horizontu 100 let až 28krát větší než v případě CO₂. Některé studie ukazují, že masivní uvolnění přírodních hydrátů metanu způsobilo v minulosti v nejstarších třetihorách před necelými 56 miliony lety globální nárůst teploty, a to o 4 až 5 °C během relativně krátké doby kolem 20 000 let.

NADĚJÍ JE VÝVOJ NOVÝCH TECHNOLOGIÍ VYUŽITELNÝCH I V ROZVOJOVÝCH ZEMÍCH

Závazek Pařížské dohody udržet nárůst průměrné teploty pod 2 °C je velmi ambiciózní a obtížně dosažitelný při zachování pomalého tempa snižování emisí v rozvinutých zemích a zároveň přetrvávajícího závažného růstu emisí v rozvojovém světě. Při současném stavu techniky, kdy spalování fosilních paliv v energetice a dopravě je většinou výrazně levnější než využití obnovitelných zdrojů nebo jaderné energie, nelze očekávat zásadní změnu. Ačkoliv

státní zásahy podporující rozšiřování obnovitelných zdrojů energie mohou emise skleníkových plynů významně omezit, reálnou cestou k udržení přijatelné úrovně globálního oteplení je razantní nasazení obnovitelných energetických zdrojů a intenzivní výzkum a vývoj nových energetických technologií, které budou ekonomicky výhodné a využitelné i v rozvojových zemích.

Přehled použité literatury: <http://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/avex/>

AVex 2/2020: PLANETA VE SKLENÍKU, SRPEN 2020

AVex je nezávislé expertní stanovisko, které Akademie věd České republiky připravuje pro orgány státu a jeho představitele jako odborný podklad ve věcech veřejných záležitostí.

Odborným garantem stanoviska je Ústav termomechaniky AV ČR.

Odpovědná redaktorka: Markéta Růžičková, e-mail: avex@kav.cas.cz, <http://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/avex/>

Kontaktní osoba: Ing. Jiří Plešek, CSc., e-mail: plesek@it.cas.cz