



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

STUDIUM REAKCÍ KYSLÍKU A OZÓNU NA POVRCHU PEVNÝCH LÁTEK

STUDY OF OXYGEN AND OZONE REACTIONS ON THE SURFACE OF SOLID MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Staněk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Mgr. Věra Mazánková, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1856/2022 Akademický rok: 2022/23
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Student: **Filip Staněk**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Mgr. Věra Mazánková, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Studium reakcí kyslíku a ozónu na povrchu pevných látek

Zadání bakalářské práce:

1. Proveďte rešerši na téma plazmochemické generace a technologických aplikací ozónu.
2. Prostudujte možné reakční mechanismy ozónu na povrchu křemenného skla.
3. Naučte se pracovat s experimentálním zařízením pro generaci ozónu.
4. Změřte časový vývoj koncentrace ozónu v experimentálním zařízení.
5. Určete rychlostní konstanty pro tvorbu a zánik ozónu.

Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2023:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Filip Staněk
student

doc. Mgr. Věra Mazánková,
Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářské práce se zabývá studiem reakcí kyslíku a ozonu na povrchu pevných látek. Ozon, jedna z forem kyslíku, je vysoce reaktivní molekulou, která je známa zejména díky svým dezinfekčním vlastnostem. Teoretická část této práce má za cíl shrnout poznatky o základních vlastnostech ozonu, technologických aplikacích, generaci tohoto plynu a mechanismech reakcí ozonu na povrchu některých materiálů. Experimentální část sestává z řady pokusů, které jsou zaměřeny na vznik a zánik ozonu na povrchu skleněné kyvety. Ozon byl pro naše účely generován dielektrickým bariérovým výbojem a jeho koncentrace byla měřena absorpční spektrometrií.

ABSTRACT

This bachelor's thesis is concerned with the study of ozone and oxygen on the surface of solid substances. Ozone, one of the forms of oxygen, is a highly reactive molecule that is particularly known thanks to its disinfectant properties. The theoretical part of this work describes the fundamental properties of ozone, the technological applications, the synthesis of this gas and the mechanism of the reactions on the surface of some materials. The experimental part consists of a number of experiments that are focused on the formation and degradation of ozone on the surface of a glass cuvette. Ozone was, for our purposes, generated by DBD, its concentration was measured by absorption spectrometry.

KLÍČOVÁ SLOVA

ozon, povrchové reakce, generace ozonu

KEY WORDS

ozone, surface reactions, generation of ozone

STANĚK, Filip. *Studium reakcí kyslíku a ozónu na povrchu pevných látek*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/147914>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Věra Mazánková.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl především poděkovat své vedoucí doc. Mgr. Věře Mazánkové, Ph.D. za ochotu, trpělivost a pomoc při řešení rozličných problémů. Upřímné díky také patří rodině a přátelům za jejich podporu v čase mých studií.

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1	Základní vlastnosti ozonu.....	8
2.2	Technologické využití ozonu.....	9
2.3	Způsoby generace ozonu.....	10
2.3.1	Dielektrický bariérový výboj (DBD).....	10
2.3.2	UV záření.....	11
2.3.3	Elektrolýza vody.....	12
2.3.4	Zero ozone efekt.....	12
2.4	Povrchové reakce ozonu.....	13
2.4.1	Rozklad ozonu na površích kovů a jejich oxidů.....	13
2.4.2	Reakce s křemenným sklem.....	13
2.4.3	Mechanismus srážek a adsorpce.....	13
2.5	Metody stanovení koncentrace ozonu.....	14
2.5.1	Jodometrická titrace.....	14
2.5.2	Indigová metoda.....	14
2.5.3	Titrace v plynné fázi.....	14
2.5.4	Fotochemická metoda.....	14
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	16
3.1	Schéma měřicí aparatury.....	16
3.2	Instrumentace.....	16
3.3	Metodika.....	17
3.3.1	Vznik ozonu povrchovými reakcemi v závislosti na složení vstupního plynu a promývacího plynu.....	17
3.3.2	Vznik ozonu povrchovými reakcemi v závislosti na složení promývacího plynu.....	17
3.3.3	Ověřovací experiment.....	18
3.3.4	Degradace ozonu.....	18
4	VÝSLEDKY A DISKUSE	19
4.1	Vznik ozonu povrchovými reakcemi v závislosti na složení vstupního plynu a promývacího plynu.....	19
4.1.1	Stanovení rychlostní konstanty vzniku ozonu povrchovými reakcemi.....	21
4.2	Vznik ozonu povrchovými reakcemi v závislosti na složení promývacího plynu....	22
4.3	Ověřovací experiment.....	25
4.4	Degradace ozonu.....	25

5 ZÁVĚR.....	28
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29
SEZNAM POUŽÍVANÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	31

1 ÚVOD

V předešlých letech byl ozon vnímán zejména jakožto užitečný prostředek díky svým antimikrobiálním vlastnostem. Jeho aplikace jsou však mnohem rozmanitější, než by se na první pohled mohlo zdát.

Pro lidstvo a další živé organismy je ozon nesmírně důležitý. Ve výšce 30 až 40 km se nachází ozonová vrstva, která obsahuje nadstandardní koncentraci tohoto plynu. Tato vrstva hraje zásadní roli při ochraně před UV zářením, jehož původcem je Slunce. Záření tohoto charakteru, které nese dostatečnou energii, může způsobovat nevratné změny biologických komponent. Poslední dobou se ukazuje, že ozonová vrstva slábne, na některých místech dokonce už vznikají díry. Důvodem těchto změn bylo prokazatelně vypouštění látek zvaných freony, což jsou organické sloučeniny fluoru a chloru, do atmosféry. Právě poslední zmíněný prvek je největším ničitelem ozonové vrstvy. Dnes je již jejich používání zakázáno.

V dobách pandemie ozon našel své využití jako dezinfekční prostředek. Nyní je používán při čištění různých prostorů, pomůcek či oděvů. Jeho oxidační vlastnosti mu umožňují nejen kvalitně čistit, ale i redukovat nevábné chutě či pachy a dokonce bělit.

Vlastnosti, které z ozonu dělají spolehlivého pomocníka, zároveň mohou působit negativně, a to především při vyšších koncentracích. V případě nežádoucího výskytu tohoto plynu v nižších vrstvách atmosféry mluvíme o tzv. přízemním, troposférickém ozonu. Tato modifikace kyslíku dokáže poškodit jak živočichy, tak rostlinstvo. Naštěstí náš čich dokáže detekovat ozon již při velmi malých množstvích.

Ozon je velmi nestabilní, je tedy nemožné ho uchovávat, pro každé nové použití si musíme ozon vytvořit. To nám umožňují generátory. Na výrobu ozonu není třeba žádných složitých a drahých reaktantů, bohatě postačí vzduch. Samotné ozonizátory jsou celkem dostupná zařízení, nejdražší položkou při výrobě ozonu bude pravděpodobně elektrická energie.

Tato bakalářská práce se taktéž zabývá reakcemi ozonu na povrchu pevných látek. Experiment spočívá v měření časového průběhu koncentrace ozonu ve skleněné kyvetě. Skleněnou kyvetou je nejprve proháněn ozon, po určité době je tato kyveta profouknuta kyslíkem (resp. směsí argonu a kyslíku) a následně je pomocí absorpční spektrometrie sledován nárůst absorpce v UV oblasti. Výstupem této práce by měly být časové závislosti koncentrace ozonu pro vznik i zánik, jejichž diskuse povede k určení faktorů, které ovlivňují rychlost vzniku, resp. zániku ozonu povrchovými reakcemi.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Základní vlastnosti ozonu

Ozon O_3 lze charakterizovat jako tříatomovou alotropickou modifikaci kyslíku. Za standardních podmínek se jedná o vysoce reaktivní jedovatý plyn namodralé barvy s příznačným zápachem. O objev ozonu se v roce 1840 zasloužil německo-švýcarský profesor chemie C. F. Schönbein. Ten si při svých pokusech všiml, že plyn vznikající na anodě při elektrolýze vody má stejnou vůni jako plyn produkovaný obloukovým výbojem mezi elektrodami. Z toho plyne i pojmenování, které pochází z řeckého ozein (cítit, vonět) [1; 2].

Molekula ozonu je lomená, velmi podobnou strukturu mají např. molekuly $ONCl$ či ONO^- . Spektroskopické metody založené na měření v oblastech mikrovlnného záření vedly ke zjištění, že vazebný úhel je $116,8^\circ$ a délka vazby odpovídá hodnotě $127,8$ pm. Jednotlivé atomy kyslíku jsou spojeny σ vazbou, přičemž zbývající elektrony, které se nepodílejí na této vazbě, utvářejí π systém. Mluvíme tedy o situaci, kdy je řád $O-O$ vazby roven 1,5. Z tohoto důvodu je možná existence dvou rezonančních struktur (viz Obrázek 1) [1].



Obrázek 1: Rezonanční struktury ozonu

Při teplotě $-112^\circ C$ nastává přechod plynného ozonu na tmavě modrou kapalinu. Pevný ozon má fialovo černou barvu a začíná vznikat při překročení $-193^\circ C$. Příčinou těchto zbarvení je intenzivní absorpce v červené oblasti spektra ($500-700$ nm). V obou skupenstvích je ozon výbušný kvůli rozkladu na plynný O_2 [1].

Mezi jednu z nejzásadnějších vlastností ozonu bezesporu patří jeho značná absorpce ultrafialového záření ($220-290$ nm). Ozonová vrstva ve stratosféře je tedy zásadní pro ochranu zemského povrchu před UV zářením, jehož přirozeným zdrojem je Slunce. Je také vhodné zmínit, že díky absorpci v UV oblasti je možné s výhodou využít absorpční spektrometrie pro stanovení množství ozonu [1].

Ozon podléhá rozkladu v důsledku absorpce elektromagnetického záření (1). Mimo jiné bývá ozon rozkládán i působením chloru, který pochází z freonů (2). Studie prokázala, že jeden atom chloru je schopen rozložit 100 000 molekul O_3 . Postupným ubýváním ozonu dochází k zeslabování ozonové vrstvy a ke vzniku ozonový děr, což vede k vyšší propustnosti nebezpečného UV záření [1].



Tabulka 1 shrnuje některé další fyzikální a chemické vlastnosti ozonu a zároveň je srovnává s kyslíkem.

Tabulka 1: Srovnání vlastností ozonu a kyslíku [3]

Chemická značka	O ₃	O ₂
Teplota varu	-112 °C	-183 °C
Teplota tání	-193 °C	-218 °C
Molární hmotnosti	48 g·mol ⁻¹	32 g·mol ⁻¹
Magnetický charakter	diamagnetický	paramagnetický
Hustota při 0 °C, 101,3 kPa	2,143 kg·m ⁻³	1,429 kg·m ⁻³
Rozpustnost ve 100 ml H ₂ O při 0 °C, 101,3 kPa	106 mg	7 mg

Co se toxicity týká, inhalace ozonu je škodlivá zvláště pro orgány dýchací soustavy. Při nižších koncentracích působí dráždivě, přičemž u jedince se objevují nespecifické příznaky (např. kašel, bolest hlavy, pálení očí). Vyšší koncentrace způsobují především plicní otoky a s tím spojenou respirační paralýzu. Smrt při koncentraci vyšší než 10 ppm nastává v řádu hodin. Citlivost našich receptorů na charakteristický zápach ozonu je však velmi vysoká, jsme schopni rozpoznat přítomnost ozonu již při koncentraci 0,01 ppm [3; 4].

2.2 Technologické využití ozonu

Ozon není pouze dezinfekčním prostředkem, ale má celou řadu dalších možných využití, a to díky své vysoké reaktivitě a oxidačním vlastnostem.

Úprava pitné vody se řadí mezi jedno z jeho prvotních využití. Ozon dokáže odstranit sloučeniny těžkých kovů, zredukovat nepříjemné pachy či chutě a také má antimikrobiální účinek, a to je pro danou aplikaci zásadní. Mechanismus inaktivace mikroorganismů spočívá v oxidaci jejich tukových či bílkovinných obalů, což způsobí jejich poškození. Tímto je umožněn průchod dalších oxidovadel až k jádru a konečným vyústěním je poškození RNA či DNA a tím i schopnosti reprodukce. Obecně jsou antimikrobiální účinky ozonu aplikovatelné i v dalších sférách průmyslu (např. v potravinářství či medicíně). Nicméně i konverze znečištěných vod na pitnou formu pomocí ozonu má své nevýhody. Tou nejznámější je pravděpodobně vznik vedlejších produktů při ozonizaci vod obsahujících organické polutanty, mnohdy tyto meziproducty mají neprozkoumané toxikologické následky. Řešením může být použití směsi ozonu a peroxidu vodíku, která významně snižuje tvorbu takových meziproductů [5].

Ozon je překvapivě využitelný i v rámci textilního průmyslu. Kromě již výše zmíněné dezodorizace či dezinfekce můžeme vyzdvihnout i bělicí schopnosti této molekuly. Mechanismus opět pracuje s oxidací. Tentokrát jsou však oxidací podrobeny alkenové skupiny modrého indigového barviva. Tento způsob bělení je zvláště spjatý s úpravou džínoviny. Mimo jiné se proces, který využívá ozonizace k bělení, označuje pojmem dry bleaching. Na rozdíl od wet bleaching (konvenční způsob bělení využívající páru a vodu, generuje velká množství odpadní vody) procesu je dry bleaching ekonomičtější a přívětivější k životnímu prostředí [5].

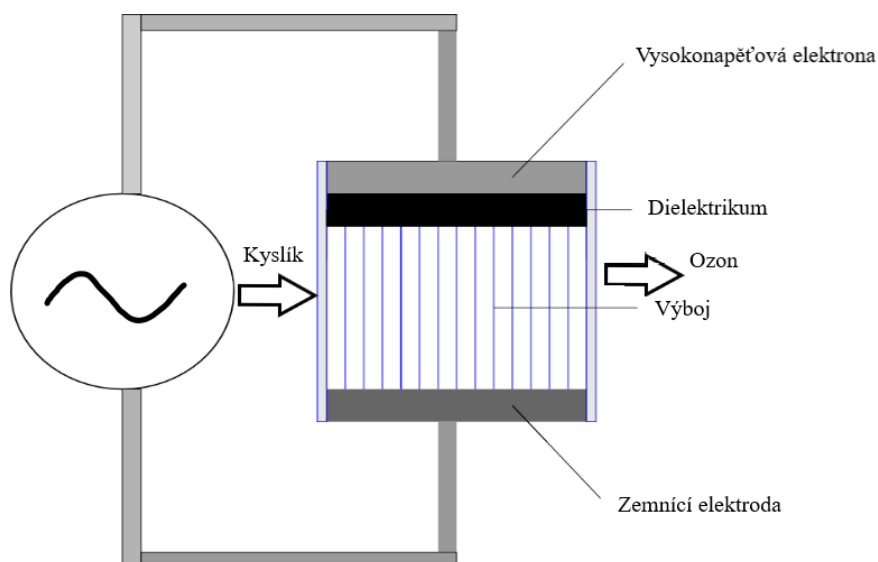
Navzdory sterilizačnímu potenciálu je ozon při čištění lékařských pomůcek prozatím příliš nepoužíván. Tepelně odolné materiály jsou sterilizovány za pomoci horké páry, pro sterilizaci tepelně citlivých je hojně využíván ethylen oxid (EtO), který je hořlavý, výbušný a karcinogenní. Nicméně jedna ze studií přišla se systémem, který by využíval ozon namísto EtO, čímž by mohla být snížena závislost na této nebezpečné látce. Funkce přístroje byla založena na generaci ozonu pomocí V-UV excimerové lampy (172 nm). Vědci díky němu úspěšně odstranili jeden z nejvíce rezistentních mikroorganismů z kontaminovaného zařízení [5].

2.3 Způsoby generace ozonu

Obecně je ozon v atmosféře generován chemickou reakcí zahrnující sluneční záření a molekulární kyslík. V prvním kroku UV záření rozštěpí O_2 na O . Poté se tento vysoce reaktivní atomární kyslík kombinuje s molekulárním za vzniku ozonu. Ozon je poměrně nestabilní molekula s poločasem rozpadu 45 minut při teplotě $20\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 101,3 kPa, rozpadá se na molekulární kyslík. Z tohoto důvodu není možné ozon uchovávat v tlakových lahvích jako je tomu u jiných plynů. Tím pádem, pokud ozon chceme kontinuálně využívat při nějaké aplikaci nebo studovat jeho vlastnosti, je nutné si jej stále generovat některou z níže uvedených metod [6].

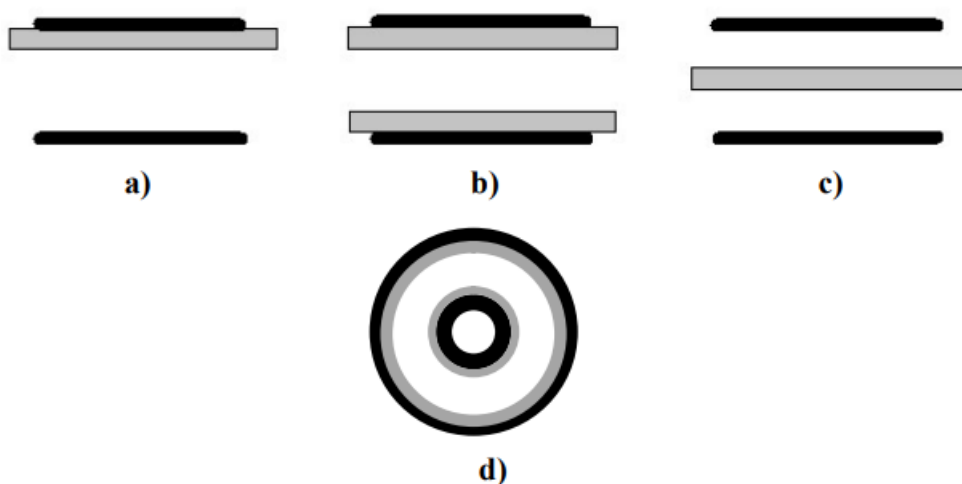
2.3.1 Dielektrický bariérový výboj (DBD)

Nejvyužívanější a nejvhodnější metoda. Generace dielektrickým bariérovým výbojem je zprostředkována zařízením, které se skládá z elektrod a dielektrika umístěného v prostoru mezi těmito elektrodami (Obrázek 2). Připojíme-li zdroj střídavého napětí, tak mezi elektrodami vznikne výboj, který je díky přítomnosti dielektrika tvořen mikrovýboji. Pokud se v prostoru mezi elektrodami nachází molekuly kyslíku, dojde k rozštěpení vazeb a vzniku radikálů. Tyto radikály se mohou zpětně rekombinovat s kyslíkovými molekulami za vzniku ozonu [7; 8].



Obrázek 2: Schéma DBD zařízení; převzato a upraveno [12]

Různá uspořádání těchto plazmatických generátorů ozonu je zdokumentováno na Obrázek 3

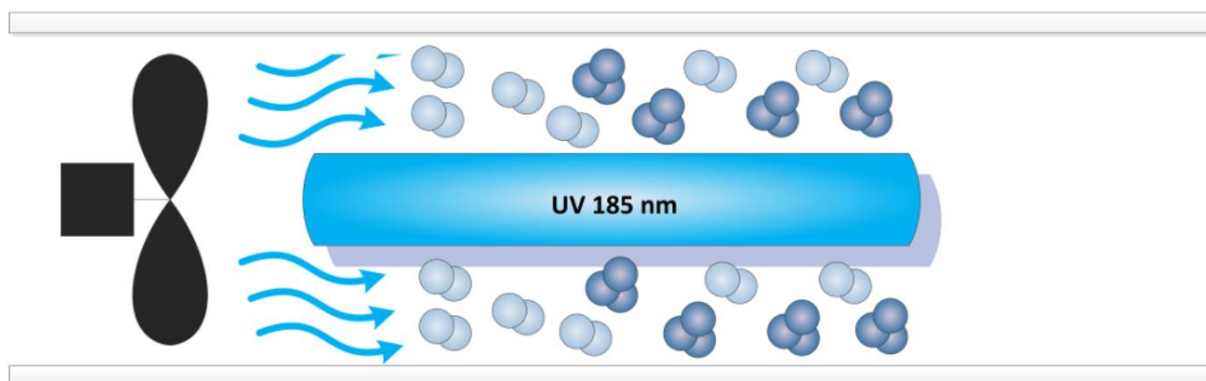


Obrázek 3: Rovinná (a, b, c) a cylindrické (d) uspořádání, černá místa reprezentují elektrody, šedá dielektrikum

Pro syntézu ozonu lze použít okolní vzduch nebo čistý kyslík, který dává vyšší výtěžky. Výtěžnost také ovlivňuje vlhkost vstupního média, a to negativně. Je tedy nezbytné vzduch, resp. kyslík vysušit. K tomu nám slouží např. zeolitové síto. Generace ozonu je doprovázená tvorbou tepla, jako chladivo nejčastěji volíme vodu [7].

2.3.2 UV záření

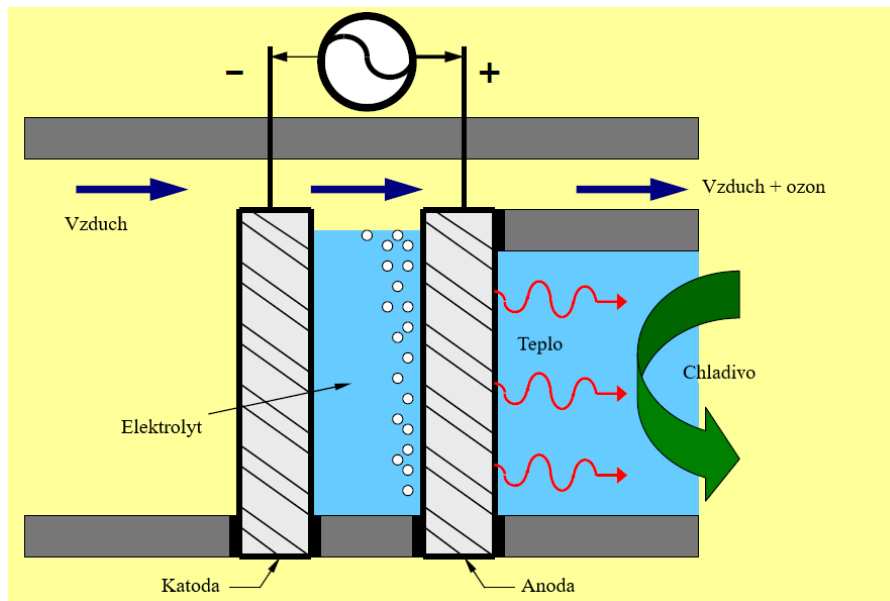
Způsob, který je založen na přirozeném vzniku ozonu ve stratosféře. Vznik ozonu z kyslíku je podmíněn dostatečnou energií, kterou má záření o vlnových délkách 100 až 240 nm. Pro tyto účely lze použít rtuťovou nízkotlakou UV lampu s dvěma píky v UV oblasti (185 nm a 254 nm). Schéma zařízení je velmi jednoduché, v podstatě se jedná o trubici, v níž je umístěna UV lampa (Obrázek 4). Na rozdíl od předchozí metody, u generace pomocí záření nezáleží mnoho na koncentraci kyslíku ve vstupním plynu. Avšak i zde je vhodnější použít suchý plyn. Nevýhodou této metody je nižší výtěžnost [9].



Obrázek 4: Schéma zařízení pro tvorbu ozonu pomocí UV záření; převzato a upraveno [9]

2.3.3 Elektrolýza vody

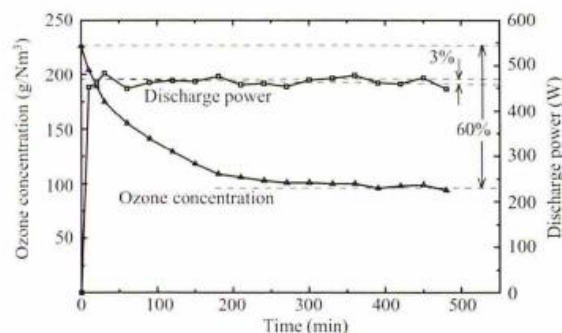
Předchozí metody byly založeny na štěpení kyslíku v plynném skupenství, tato metoda však pracuje primárně s kapalinou (H_2O). Opět se jedná o dvojici elektrod napájenou vnějším zdrojem napětí (Obrázek 5). Tyto elektrody jsou ponořeny do vody. Molekula H_2O je štěpena na H_2 a O_2 , přičemž může dojít i k homolytické disociaci kyslíku na radikály. Ty poté reagují s O_2 za vzniku O_3 . V případě, že bychom chtěli dosáhnout co nejlepších výsledků, museli bychom zajistit izolaci kyslíku od vodíku. Tato metoda je jednoduchá a poměrně stará, i přesto však není úplně spolehlivá, pokud nepoužíváme velmi čistou vodu. Dalšími nevýhodami jsou vysoké energetické náklady a krátká životnost elektrod [10].



Obrázek 5: Schéma elektrolytického generátoru ozonu; převzato a upraveno [10]

2.3.4 Zero ozone efekt

Generace ozonu je rovněž ovlivněna tzv. zero ozone efektem. Tento jev je pozorován u DBD generátorů, které pracují nepřetržitě po dobu několika hodin a které operují s velmi čistým kyslíkem. Čím déle je takový generátor v provozu, tím nižší koncentrace ozonu je schopen vyprodukovat. Důvodem tohoto poklesu je saturace a oxidace povrchu elektrody kyslíkovými atomy. Tento problém je možné poměrně snadno vyřešit, stačí jako vstupní plyn použít směs kyslíku a nějakého inertního plynu (např. N_2) [11; 12].



Obrázek 6: Závislost koncentrace ozonu a výkonu na čase; důkaz platnosti zero ozone efektu [11]

2.4 Povrchové reakce ozonu

Reakce ozonu na povrchu pevných látek jsou zajímavé z různých důvodů. Jedná se o reakce související s rozkladem ozonu a poškozením daného povrchu. Jak již bylo popsáno, použití ozonu je úzce spjato s jeho schopností oxidovat různé látky a zároveň jeho využití pro průmyslové účely souvisí s implementací účinných katalyzátorů pro jeho rozklad.

2.4.1 Rozklad ozonu na površích kovů a jejich oxidů

První studie o katalyzovaném rozkladu plynného ozonu ukázaly, že degradace ozonu je urychlena v přítomnosti Pt, Pd, Ru, Cu, W a dalších kovových prvků. Za závěrů navazujících studií vyplynulo, že stříbro je lepším katalyzátorem než měď, palladium a cín. Taktéž bylo provedeno srovnání kovů a jejich oxidů, které dokázalo, že s rostoucím oxidačním číslem zároveň roste schopnost katalýzy těchto oxidů. Tyto výsledky mohou být interpretovány tak, že ionty příslušných kovů mají vyšší aktivitu než samotné kovy a také byl pozorován pozitivní vliv náboje při katalyzované reakci [13].

Nadále byly prováděny četné experimenty, z nichž lze usuzovat, že stěžejní roli hraje i teplota. Například při velmi nízkých teplotách ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) byla aktivita oxidu nikelnatého nulová, nicméně platina zůstala aktivní. Nutno dodat, že v rozmezí teplot $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ byly aktivity platiny i oxidu nikelnatého identické [13].

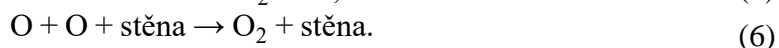
Bylo objeveno, že oxidy přechodných kovů projevují vůbec nejvyšší katalytickou aktivitu, pokud mluvíme o rozkladných reakcích ozonu. Zvláště pak vynikal oxid mangičitý, který je znám pro své katalytické účinky i v jiných oblastech chemie [13].

2.4.2 Reakce s křemenným sklem

Sklo, jakožto amorfni látka s dlouhou historií, vyniká mimo jiné i svou odolností vůči různým činitelům. Není tomu jinak i s ozonem, který sklo nijak nepoškozuje. Nevýhodou tohoto materiálu je však jeho křehkost, což snižuje aplikovatelnost [14; 15].

2.4.3 Mechanismus srážek a adsorpce

Běžný mechanismus rozkladu ozonu je založen na srážkách s určitými chemickými sloučeninami anebo stěnami nádob, ve kterých je tento plyn uchováván:



V roce 1953 se pánové Harteck a Dondes vyslovili, že v přítomnosti látek pevného skupenství může docházet k těmto jevům:

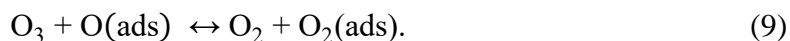
- adsorpci kyslíkových atomů:



- rekombinaci adsorbovaných kyslíkových atomů:



Adsorbované kyslíkové atomy mohou způsobit rozklad ozonu [16]:

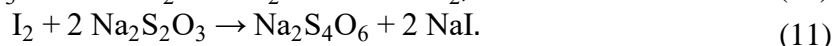
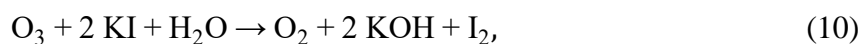


2.5 Metody stanovení koncentrace ozonu

Znát přesnou koncentraci ozonu je nejen výhodné, ale i důležité, a to například z důvodu jeho jedovatosti. Pro tento účel bylo vyvinuto a prozkoumáno několik metod. Z hlediska principu lze tyto metody rozdělit na chemické a fotochemické.

2.5.1 Jodometrická titrace

Tato chemická metoda patří mezi nejstarší způsoby stanovení koncentrace ozonu. Vyznačuje se vysokou přesností, avšak je trochu náročnější na obsluhu. Základem tohoto typu stanovení je reakce mezi ozonem a jodidem draselným:



Jedná se o nepřímou titraci, kdy nejprve necháme probublávat známý objem ozonizovaného vzduchu do pufru obsahujícího jodid draselný a poté titrujeme vyloučený jod thiosíranem draselným. Hlavními faktory, které ovlivňují přesnost výsledků, jsou povaha pufru, množství jodidu draselného a způsob cirkulace ozonizovaného vzduchu (probublávání či vstřikovávání). Hlavní nevýhodou této metody je její nespecifičnost, tedy v případě, že analyzovaný vzduch bude obsahovat látky, které jsou, podobně jako ozon, oxidačními činidly, tak výsledky stanovení ozonu budou značně ovlivněny. Zásadním problémem může být i diskontinuita procesu, titraci je možné provádět jen jednou za čas [17].

2.5.2 Indigová metoda

Tato švýcarská metoda spočívá v odbarvení modrého indigového barviva ozonem, přičemž tato reakce není ovlivněna dalšími sloučeninami, které jsou obsaženy ve vzorku. Jedná se o poměrně jednoduchý a rychlý děj. Bývá používána zejména při stanovení ozonu ve vodě. Koncentrace ozonu je poté úměrná lineárnímu poklesu absorbance při vlnové délce 600 nm. Přesnost této metody je tedy závislá na kvalitě použitého spektrofotometru. Indigová metoda, podobně jako jodometrie, vyžaduje určitý čas, jedná se opět o metodu off-line [18].

2.5.3 Titrace v plynné fázi

Alternativní metoda stanovení ozonu, která je založena na reakci mezi plynným ozonem a oxidem dusnatým:



Reakce je i za standardních podmínek velmi rychlá a v případě, že pracujeme s přebytkem oxidu dusnatého, tak dokonce minimalizujeme vznik vedlejších produktů (oxid dusičný). Koncentraci vzniklé oxidu dusičitého je možné určit chemiluminiscenčními detektory [19; 20].

2.5.4 Fotochemická metoda

Nejpoužívanější metoda vycházející z vlastností ozonu absorbovat UV záření. Původně byla vyvinuta pro měření koncentrace ozonu ve vzduchu, avšak je použitelná i vodných

prostředích, poněvadž UV záření při vlnové délce 254 nm je absorbováno pouze ozonem. Schopnost určitých látek pohlcovat záření je vyjádřena tzv. absorpčním účinným průřezem σ . Stěžejním pilířem absorpce je Lambert-Beerův zákon (7). Ten popisuje, že intenzita světla klesá při prostupu světla určitým prostředím (např. ozonovým plynem) exponenciálně [20].

$$\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) = \ln T_r = \frac{-\sigma N_A P l c}{10^6 R T}, \quad (13)$$

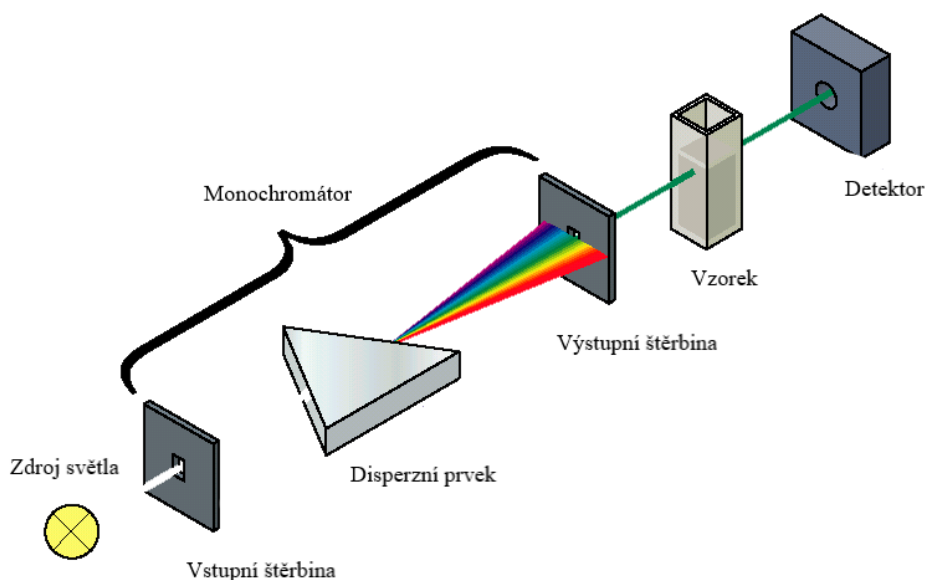
kde c je koncentrace v ppm, I_0 je intenzita dopadajícího záření, I_t je intenzita prošlého záření, l je optická dráha v m, N_A je Avogadrova konstanta ($6,022142 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), P je tlak v atm, R je univerzální plynová konstanta ($8,205746 \cdot 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T je termodynamická teplota v K, T_r je transmittance a σ je absorpční účinný průřez v m^2 [21].

V případě, že budeme pracovat za standardních podmínek, je možné tento zákon značně zjednodušit:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I_t}\right) = A = \epsilon l c, \quad (14)$$

kde A je absorbance, l délka optické dráhy v cm, c je koncentrace v $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ a ϵ je molární extinkční koeficient v $\text{l} \cdot \text{mol}^{-1}$. Veličiny absorbance, transmittance, molární extinkční koeficient a absorpční účinný průřez jsou závislé na vlnové délce [22].

Zařízení, která jsou schopna měřit absorpci světla, se nazývají spektrometry (obecnější termín) či spektrofotometry (určeny přímo pro měření intenzity světla). Instrumentace těchto přístrojů je poměrně jednoduchá (viz Obrázek 7). Jako ideální zdroj záření pro stanovení ozonu lze použít rtuťovou výbojku, z jejíhož spektra je možno vybrat vlnovou délku 253,7 nm. Největší výhodou této fotochemické metody je možnost provádět měření kontinuálně [23].

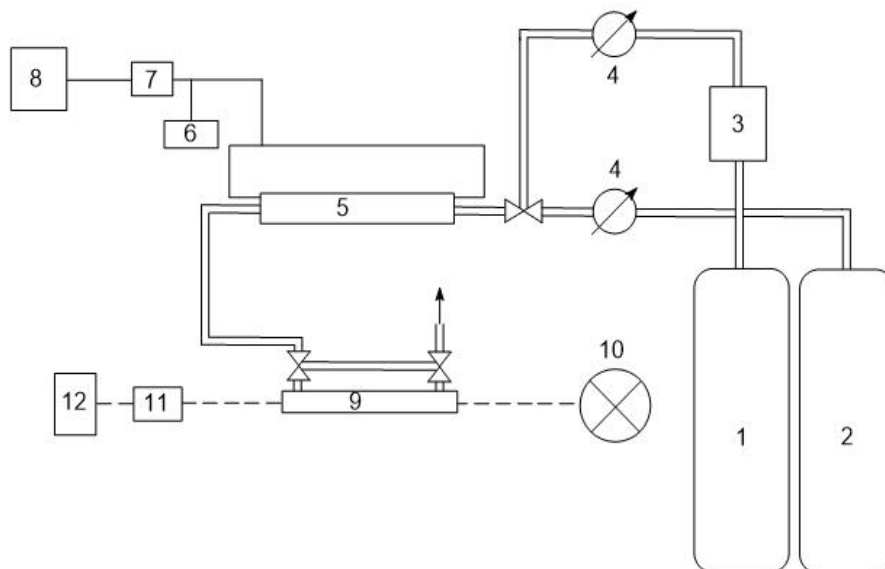


Obrázek 7: Instrumentace spektrofotometru; převzato a upraveno [23]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části této bakalářské práce bylo provedeno několik pokusů, které se primárně týkaly tvorby a zániku ozonu. Ozon byl produkován dielektrickým bariérovým výbojem. Koncentrace ozonu byla stanovována pomocí absorpční spektrometrie.

3.1 Schéma měřící aparatury



Obrázek 8: Schéma aparatury: 1 – zásobní láhev kyslíku; 2 – zásobní láhev argonu; 3 – zeolitové síto; 4 – průtokoměry; 5 – ozonizátor; 6 – osciloskop; 7 – transformátor; 8 – zdroj napětí; 9 – skleněná kyveta; 10 – světelný zdroj; 11 – spektrometr; 12 – počítač

3.2 Instrumentace

Ozon byl generován ozonizátorem, který byl přímo pro naše účely vyrobený firmou Lifetech. Tento ozonizátor má cylindrickou konfiguraci DBD, jeho vnější, uzemněná elektroda je z nerezové oceli typu SS 316 L. Vnitřní povrch této elektrody je tvořen dielektrikem z korundové keramiky Luxal 203 s minimálním obsahem oxidu hlinitého. Vysokonapěťová, vnitřní elektroda ve tvaru válce o vnějším průměru 17 mm je ze stejného materiálu jako vnější elektroda. Délka ozonizátoru je 240 mm. Jako chladivo byla použita studená voda.

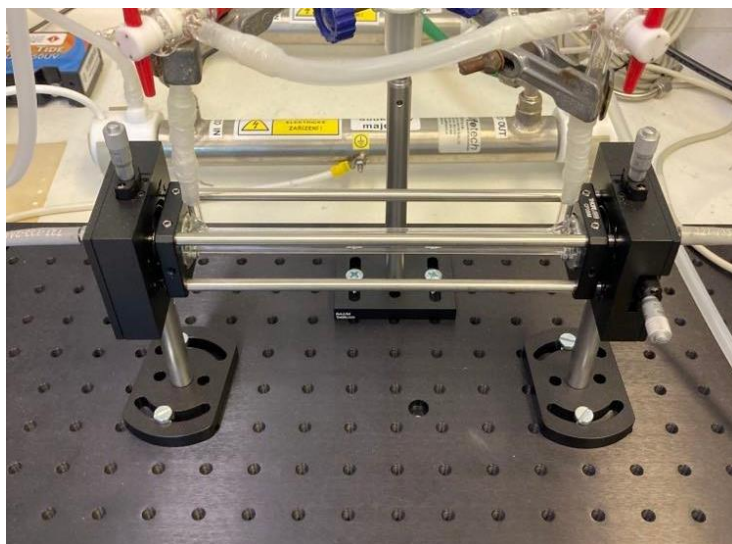
Napětí bylo ozonizátoru dodáváno zdrojem vysokofrekvenčního napětí rovněž značky Lifetech. Pro záznam elektrických veličin byl použit osciloskop Tektronix TDS 2024 C. Elektrické napětí bylo měřeno pomocí vysokonapěťové sondy a k měření proudu byla využita Rogowského cívka.

Regulace průtoků plynů byla řízena dvěma průtokoměry, pro ozon byl použit Bronkhorst EL-FLOW, který povoluje nastavit průtok v rozmezí 0–2 l/min. Toto zařízení bylo obsluhováno pomocí softwaru na PC. Průtok argonu byl usměrňován průtokoměrem značky Omega s maximálním výkonem 5 l/min, jeho obsluha byla prováděna ručně. V rámci experimentů bylo pracováno s plyny o velmi vysoké čistotě (kyslík 99,9999 % a argon 99,996 %).

Křemenná kyveta o délce 180 mm a průměru 12 mm, do které byl vháněn vzniklý ozon, byla uchycena v experimentální aparatuře sestavené z dílů Thorlabs. Pomocí mikroposuvů byla

kyveta nastavena tak, aby kolimátory, ke kterým byly upevněny konce optických kabelů, byly namířeny přesně proti sobě. Díky přesnému zaměření bylo možné provádět měření absorpčních spekter.

Jako zdroj světla byl použit přístroj Ocean Optics DT-MINI-2-GS, který obsahuje deuteriovou a wolfram-halogenovou lampu. Intenzita světelného záření byla měřena spektrometrem Ocean Optics Red Tide USB650UV s rozsahem 200-880 nm a rozlišovací schopností 2 nm.



Obrázek 9: Experimentální aparatura z dílů Thorlabs

3.3 Metodika

Celkem byly provedeny 3 sady experimentů, v nichž byl prozkoumán vznik ozonu povrchovými reakcemi a následně i jeho rozklad, a 1 ověřovací pokus.

3.3.1 Vznik ozonu povrchovými reakcemi v závislosti na složení vstupního plynu a promývacího plynu

V první sérii pokusů byl ozon vyráběn nejprve z čistého kyslíku a poté ze směsi kyslíku a argonu, přičemž byly zvoleny následující poměry vstupního plynu $O_2 : Ar - 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40, 40 : 60$ a $20 : 80$. Všechna dílčí měření byla provedena třikrát. Průtok vstupního plynu vždy odpovídal hodnotě 2 l/min. Zdroj napětí byl zapnut 4 hodiny před samotným měřením, s tím, že vznikající ozon proudil po celou tuto dobu skleněnou kyvetou. Po uplynutí 4 hodin byl výboj vypnut a skleněná kyveta byla na 10 sekund promývána plynem, jehož složení odpovídalo vstupnímu plynu. Poté byla kyveta uzavřena a bylo započato vlastní měření. Absorpční data byla zaznamenávána každou sekundu po dobu 20 minut. Výše uvedené platí pouze pro první měření daného dne. V rámci jednoho dne se však uskutečnilo více měření, mezi nimiž byla přestávka 15 minut. Po tuto dobu byla kyveta promývána ozonem.

3.3.2 Vznik ozonu povrchovými reakcemi v závislosti na složení promývacího plynu

Hlavní odlišnost od předchozí série pokusů spočívala v tom, že jako vstupní plyn pro generaci ozonu byl v této sadě experimentů používán výhradně 100% kyslík. Složení promývacího plynu bylo měněno. Tato série měření byla rozdělena na dvě části. V první části, která se týkala směsí o složeních $O_2 : Ar - 100 : 0, 80 : 20$ a $40 : 60$, byly parametry stejné jako u

předchozí sady experimentů (viz 3.3.1). U druhé části, směsi $O_2 : Ar - 60 : 40$ a $20 : 80$, byla prodloužena doba promývání z 10 sekund na 60 sekund (ostatní parametry se nelišily od části první).

Nakonec byl jako promývací plyn použit čistý argon, ten byl proměřen dvakrát (pro dobu promývání 10 i 60 sekund).

3.3.3 Ověřovací experiment

Tento dílčí experiment měl pouze za úkol dokázat, že po druhém promytí kyvety dochází jen k zanedbatelnému vzniku ozonu povrchovými reakcemi. Vstupním i promývacím plynem byl zvolen 100% kyslík, průběh byl velice podobný jako u první sady, avšak po 20minutovém měření (záznam dat každou sekundu, 20 minut) následovalo 2. propláchnutí (10 sekund) a poté opět 20 minut měření.

3.3.4 Degradace ozonu

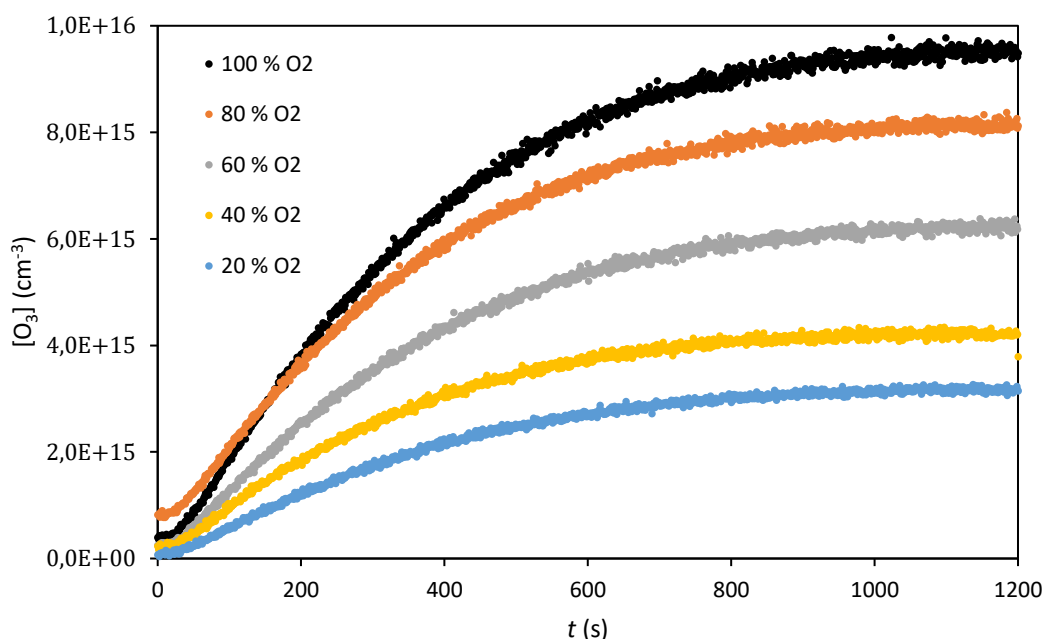
V poslední sérii experimentů byl studován rozklad ozonu. Ozon byl opět produkován z čistého kyslíku. Nejprve byl po 30 minut zajištěn průchod ozonu skleněnou kyvetou. Po této době byla kyveta uzavřena a vzápětí bylo spuštěno zaznamenávání absorpčních dat. Záznam probíhal každou sekundu po dobu 30 minut.

U studia degradace ozonu byl vyzkoušen ještě další přístup. Do skleněné kyvety byl vpouštěn ozon po dobu asi 30 minut. Po této době byl ozonizátor vypnut a do kyvety byl po dobu 1 minuty vháněn kyslík. Následně byl na velmi krátkou chvíli (asi 3 sekundy) zapnut výboj. Poté byla kyveta uzavřena a byl spuštěn záznam absorpčních dat se stejným krokem i délkou (každou sekundu, 30 minut). Tento způsob měření byl proveden i pro 5 a 10minutové intervaly vhánění kyslíku.

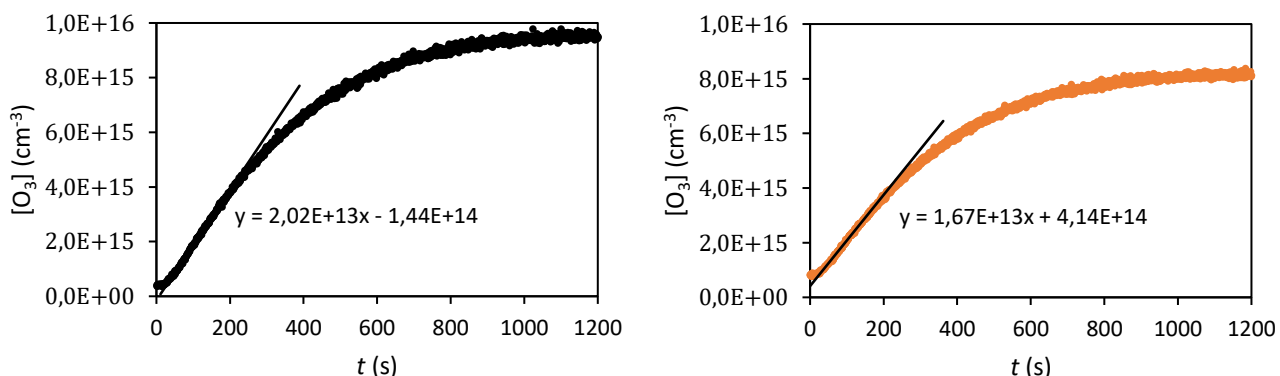
4 VÝSLEDKY A DISKUSE

4.1 Vznik ozonu povrchovými reakcemi v závislosti na složení vstupního plynu a promývacího plynu

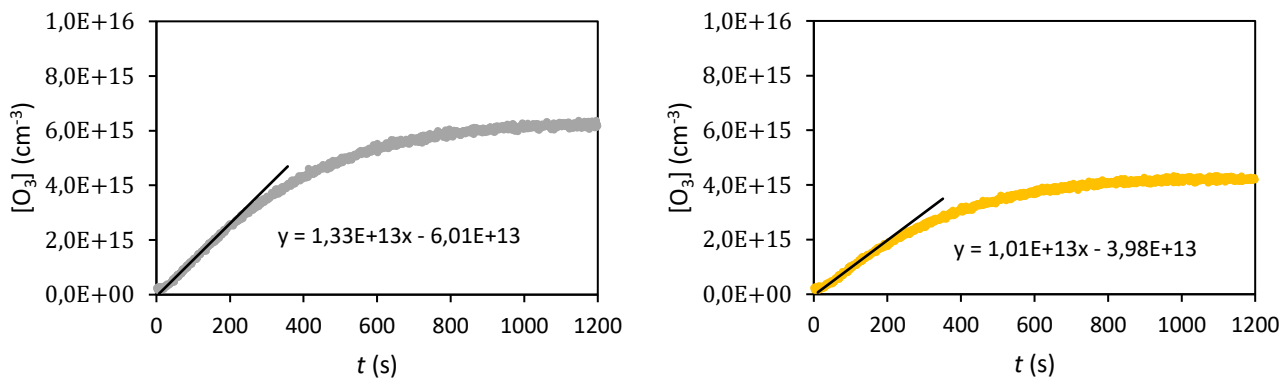
Výstupem z měření byla absorpční spektra (závislost absorbance na vlnové délce), která byla pomocí softwaru Ocean Optics ukládána do textového editoru ve formě číselných dat. Tato spektra byla na základě Lambert-Beerova zákona převedena na časový vývoj koncentrace ozonu v cm^{-3} . Pro každý poměr vstupního, resp. promývacího plynu byl sestaven odpovídající graf. Všechny grafy mají stejná měřítka obou os, a to zejména proto, aby bylo snazší si všimnout případných rozdílů. Ze stejného důvodu byl vytvořen i souhrnný graf (Obrázek 10), který zobrazuje výsledky všech měření první série.



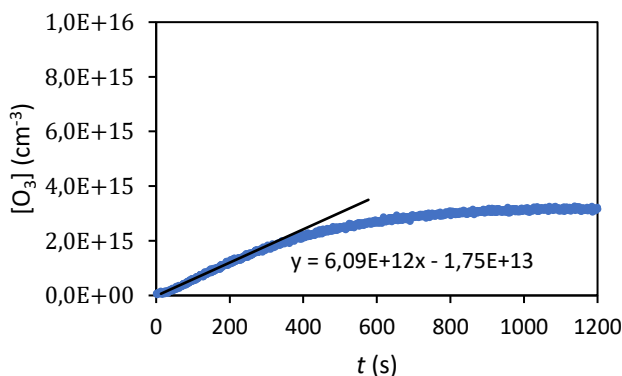
Obrázek 10: Časový vývoj koncentrace ozonu pro všechny poměry vstupního plynu



Obrázek 11: Závislost koncentrace vznikajícího ozonu na čase pro 100% kyslík (vlevo) a pro směs $\text{O}_2 : \text{Ar} 80 : 20$ (vpravo)



Obrázek 12: Závislost koncentrace vznikajícího ozonu na čase pro směs $O_2 : Ar$ 60 : 40 kyslík (vlevo) a pro směs $O_2 : Ar$ 40 : 60 (vpravo)



Obrázek 13: Závislost koncentrace vznikajícího ozonu na čase pro směs $O_2 : Ar$ 20 : 80

Z přiložených grafických závislostí jednoznačně vyplývá, že existuje určitý vztah mezi vznikem, resp. rychlostí vzniku, ozonu a složením vstupního či promývacího plynu. Nejlépe je tato skutečnost patrná právě na Obrázku 10. Vidíme, že s klesajícím obsahem kyslíku ve směsi, klesá i hodnota směrnice přímky, která je úměrná rychlosti vzniku ozonu.

Určení těchto směrnic probíhalo následujícím způsobem. Pro každou závislost byla nalezena lineární oblast, ta se nejčastěji vyskytovala v prvních 200 sekundách měření (každý graf byl však posuzován individuálně). Tato část byla posléze proložena přímkou ve tvaru:

$$y = ax + b, \quad (15)$$

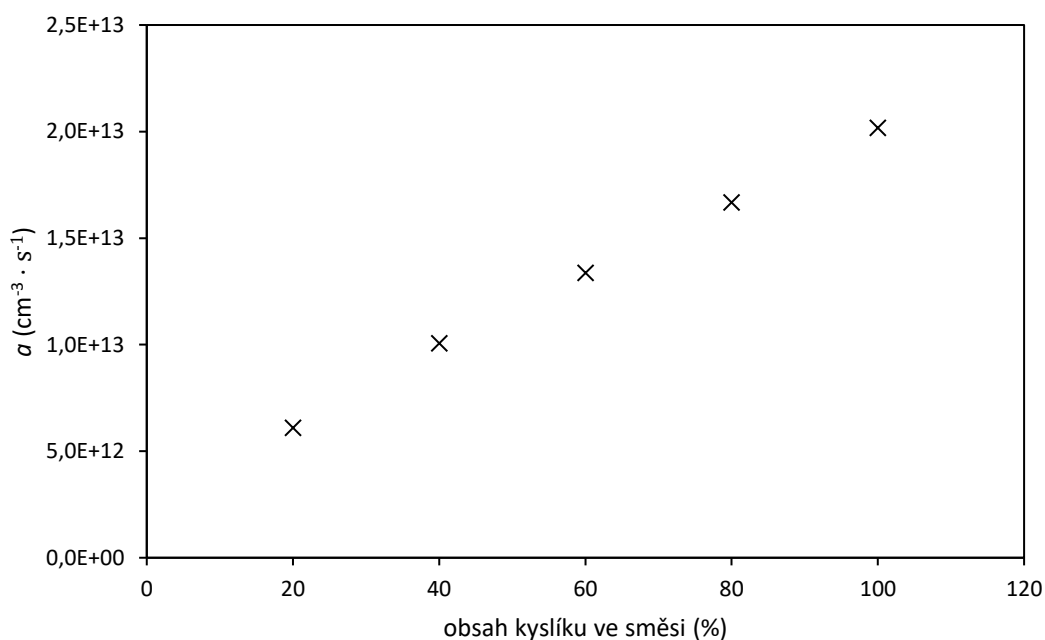
kde a představuje směrnici přímky a b je posun vzhledem k ose y .

Alternativně je možné použít i funkci linregrese (Excel), která z vybraných dat vypočítá nejen směrnici a posun, ale taktéž jejich nejistoty. Pro zřehlednění jsou směrnice společně s jejich nejistotami uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2: Nalezené směrnice a jejich nejistoty

Obsah kyslíku ve směsi (%)	$a \cdot 10^{13} \text{ (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$\Delta a \cdot 10^{13} \text{ (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$
20	0,609	0,004
40	1,007	0,013
60	1,337	0,013
80	1,668	0,012
100	2,017	0,009

Z vypočtených směrnic byl rovněž sestrojen graf (Obrázek 14), který ukazuje, že vztah mezi směrnicí a složením je lineární.



Obrázek 14: Závislost hodnoty směrnice přímky na obsahu kyslíku ve směsi

První sada experimentů nám tedy potvrdila existenci vztahu mezi vznikem ozonu a složením vstupního či promývacího plynu. Bohužel jsme však nebyli schopni určit, jestli hlavním faktorem je složení vstupního plynu, nebo složení promývacího plynu. K tomu účelu byla navrhována další série experimentů.

4.1.1 Stanovení rychlostní konstanty vzniku ozonu povrchovými reakcemi

Rovnice, která popisuje vztah mezi rychlostní konstantou (k) a směrnicí přímky (a), byla odvozena v diplomové práci A. Krzyžánkové [24]:

$$k = \frac{a \cdot R}{2 \cdot n_0^2(\text{O}_{\text{ads}})}, \quad (16)$$

kde R je poloměr kyvety (v našem případě 6 mm) a $n_0(\text{O}_{\text{ads}})$ počáteční koncentrace atomárního kyslíku, která odpovídá hodnotě $10^{16}/2 \text{ cm}^{-2}$.

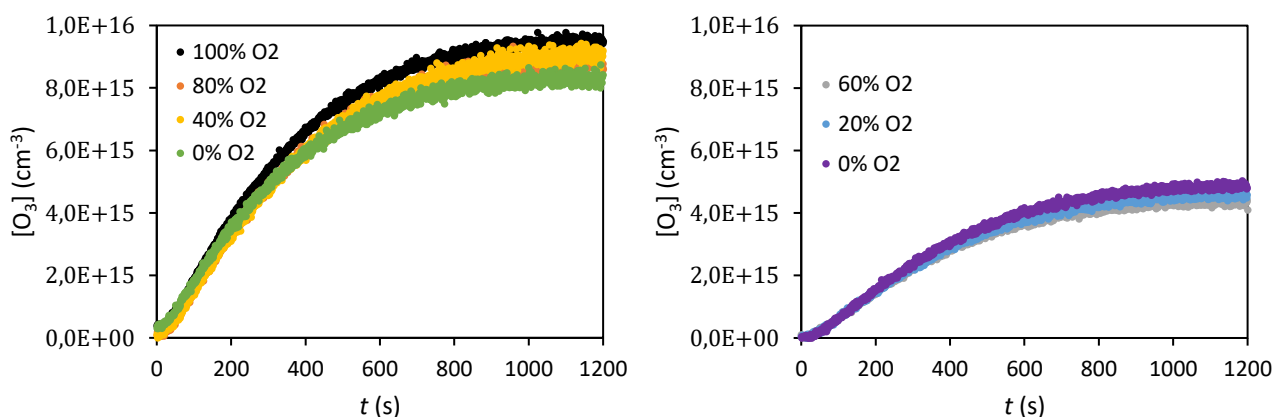
Tato rovnice vychází z předpokladu, že na začátku je velice nízká koncentrace ozonu a také že promývacím plynem je 100% argon, tím pádem nebude vznikat ozon reakcí kyslíku z objemu.

Po dosažení hodnoty směrnice $a = 1,71 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ (100% argon, Tabulka 3) nám vyjde hodnota rychlostní konstanty $k = 2,05 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

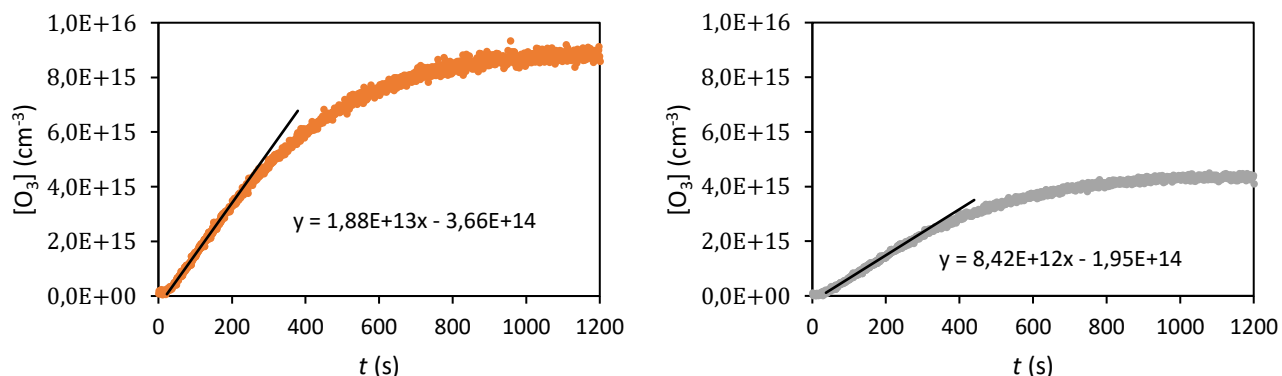
Pro srovnání, hodnota v práci [24] byla $k = 1,56 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, což je o řád nižší než naše hodnota. Tento rozdíl lze nejpravděpodobněji vysvětlit tak, že povrch kyvety, která byla při experimentech použita v práci [24], nebyl totožný s povrchem naší kyvety.

4.2 Vznik ozonu povrchovými reakcemi v závislosti na složení promývacího plynu

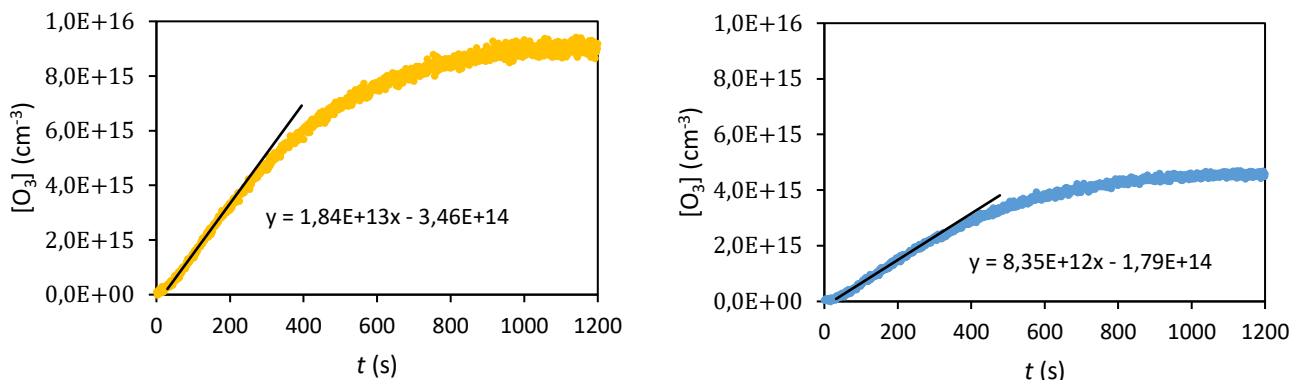
Jak již bylo popsáno v metodice, tak tato sada pokusů byla rozdělena na 2 části, které se lišily dobou promývání. Z tohoto důvodu byly mimo jiné sestrojeny 2 souhrnné grafy (viz Obrázek 15). Postup převodu absorpčních spekter na časovou závislost koncentrace ozonu a tvorby ostatních grafů se nijak nelišil od předchozí série experimentů.



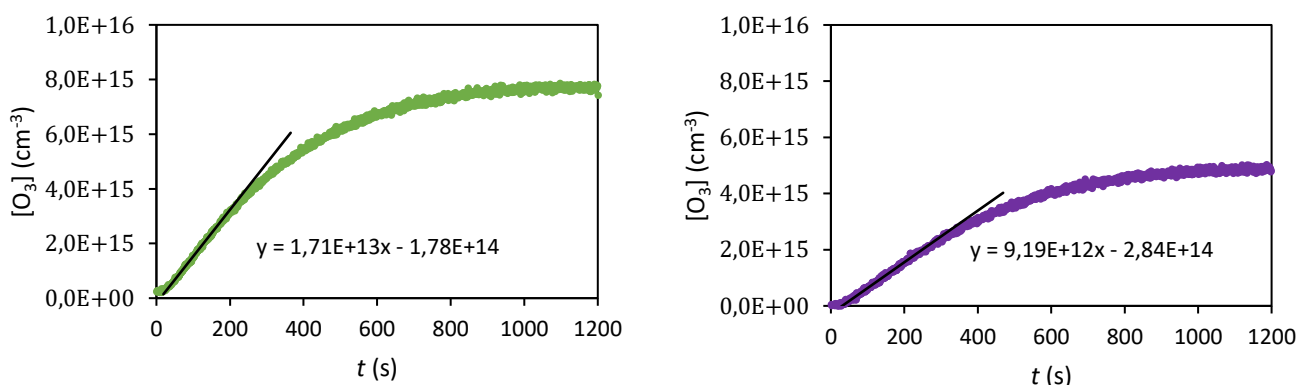
Obrázek 15: Závislost koncentrace ozonu na čase pro všechny poměry promývacího plynu, délka promývání 10 sekund (vlevo), délka promývání 60 sekund (vpravo)



Obrázek 16: Závislost koncentrace vznikajícího ozonu na čase pro směs $O_2 : Ar$ 80 : 20 – délka promývání 10 sekund (vlevo) a pro směs $O_2 : Ar$ 60 : 40 – délka promývání 60 sekund (vpravo)



Obrázek 17: Závislost koncentrace vznikajícího ozonu na čase pro směs $O_2 : Ar$ 40 : 60 – délka promývání 10 sekund (vlevo) a pro směs $O_2 : Ar$ 20 : 80 – délka promývání 60 sekund (vpravo)



Obrázek 18: Závislost koncentrace vznikajícího ozonu na čase pro směs $O_2 : Ar$ 0 : 100 – délka promývání 10 sekund (vlevo) a pro směs $O_2 : Ar$ 0 : 100 – délka promývání 60 sekund (vpravo)

Z výsledků obou sérií experimentů vyplývá, že hlavním faktorem, který ovlivňuje rychlost vzniku ozonu, je složení vstupního plynu, poněvadž v této sérii je měněno pouze složení promývacího plynu. Toto je dobře zachyceno např. na Obrázku 15, kde vidíme, že náklony daných závislostí jsou si navzájem velmi podobné, pokud bereme v potaz stejnou délku promývání. Tyto experimenty tedy odhalili ještě i další skutečnost, a to, že rychlost vzniku ozonu závisí i na délce promývání.

Obdobně, jako u předchozí série, i zde byly vypočteny směrnice přímk lineárních oblastí a jejich nejistot pomocí funkce linregrese (Excel). Tyto hodnoty byly opět uspořádány do Tabulky 3 a Tabulky 4.

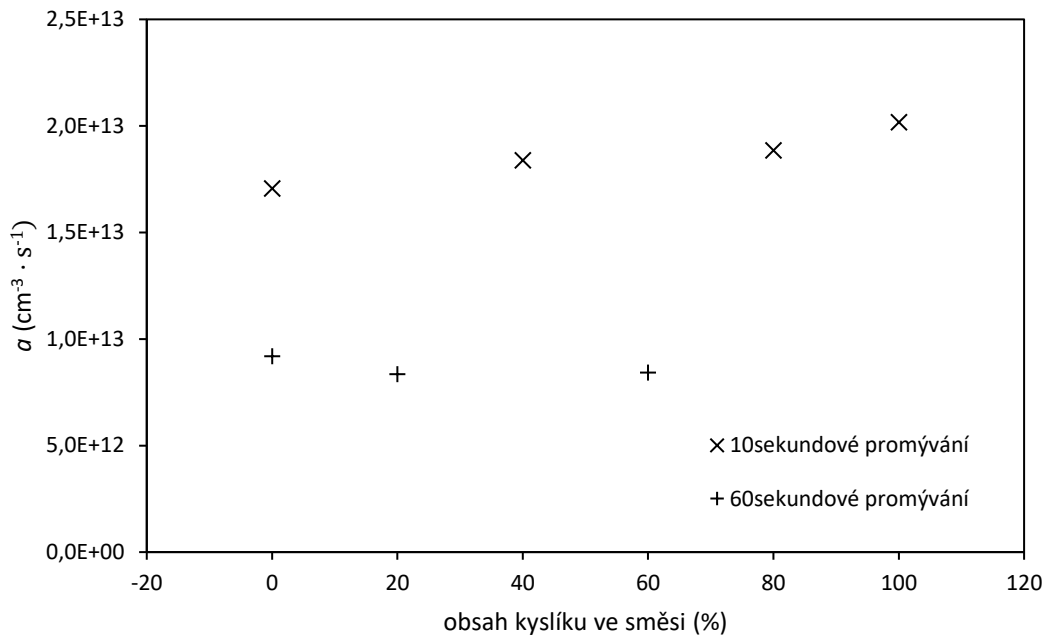
Tabulka 3: Nalezené směrnice a jejich nejistoty pro dobu promývání 10 sekund

Obsah kyslíku ve směsi (%)	$a \cdot 10^{13} \text{ (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$\Delta a \cdot 10^{13} \text{ (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$
0	1,706	0,012
40	1,84	0,02
80	1,88	0,02
100	2,017	0,009

Tabulka 4: Nalezené směrnice a jejich nejistoty pro dobu promývání 60 sekund

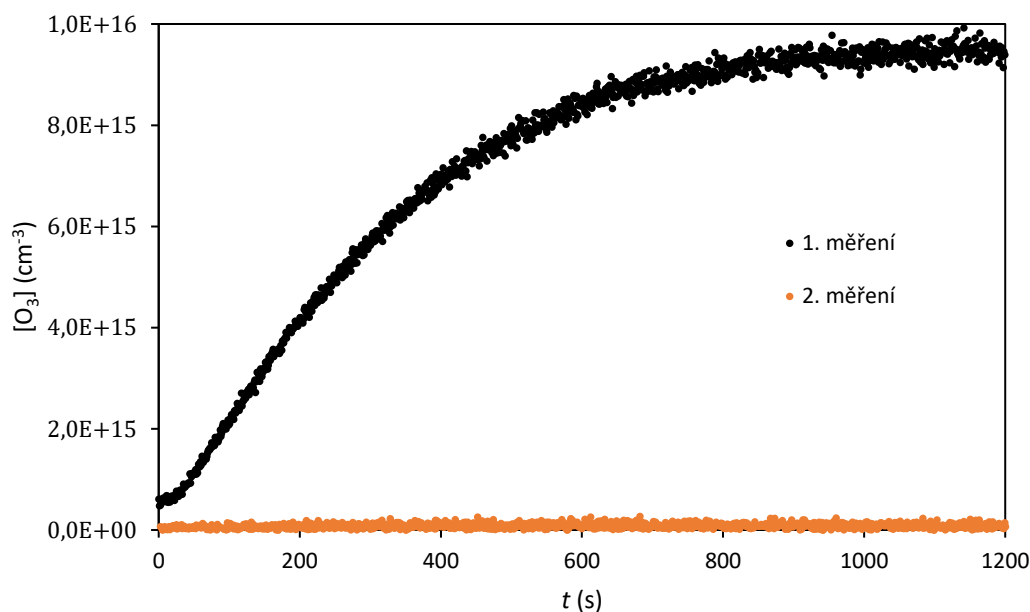
Obsah kyslíku ve směsi (%)	$a \cdot 10^{13} \text{ (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$\Delta a \cdot 10^{13} \text{ (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$
0	0,919	0,008
20	0,835	0,009
60	0,842	0,006

Nalezené směrnice byly opět vyneseny do grafu (viz Obrázek 19), který jen potvrzuje výše zmíněné informace.



Obrázek 19: Závislost hodnoty směrnice přímky na obsahu kyslíku ve směsi pro obě doby promývání

4.3 Ověřovací experiment



Obrázek 20: Porovnání časového vývoje vzniku ozonu po prvním a druhém profouknutí kyvety čistým kyslíkem

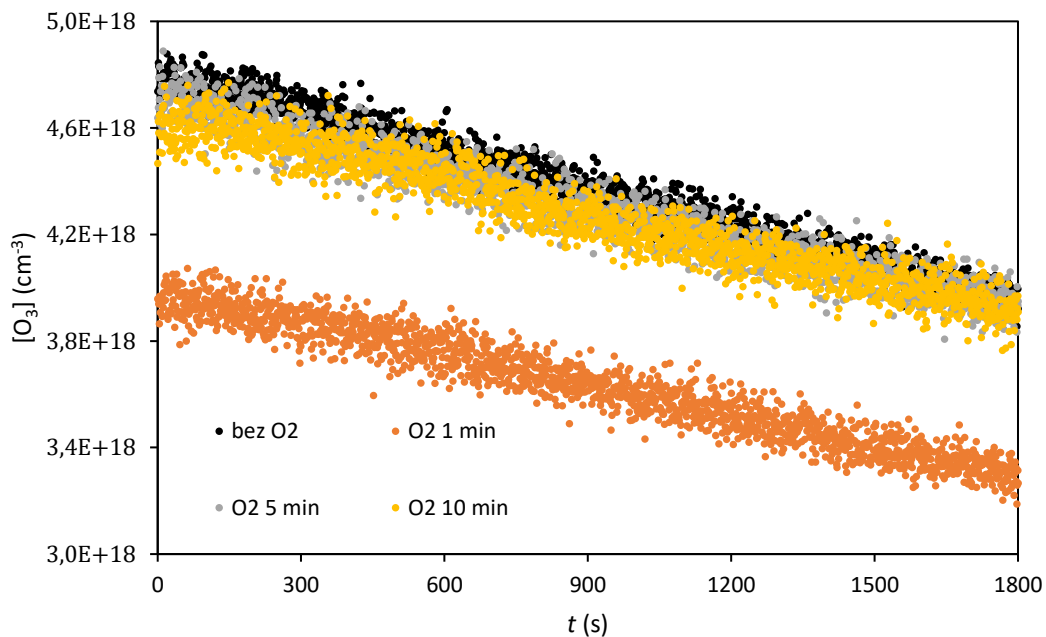
Předchozí experimenty se věnovaly zkoumání možných faktorů (složení vstupního/promývacího plynu, délka promývání), které ovlivňují zejména rychlost vzniku ozonu. Tento však měl za úkol dokázat, že dochází pouze k zanedbatelné tvorbě ozonu po druhém promytí kyvety. Výsledky ukázaly, že ozon po druhém propláchnutí už prakticky nevzniká (viz Obrázek 20), což umožňuje jednodušší interpretaci experimentů týkajících se vzniku ozonu (4.1 a 4.2).

4.4 Degradace ozonu

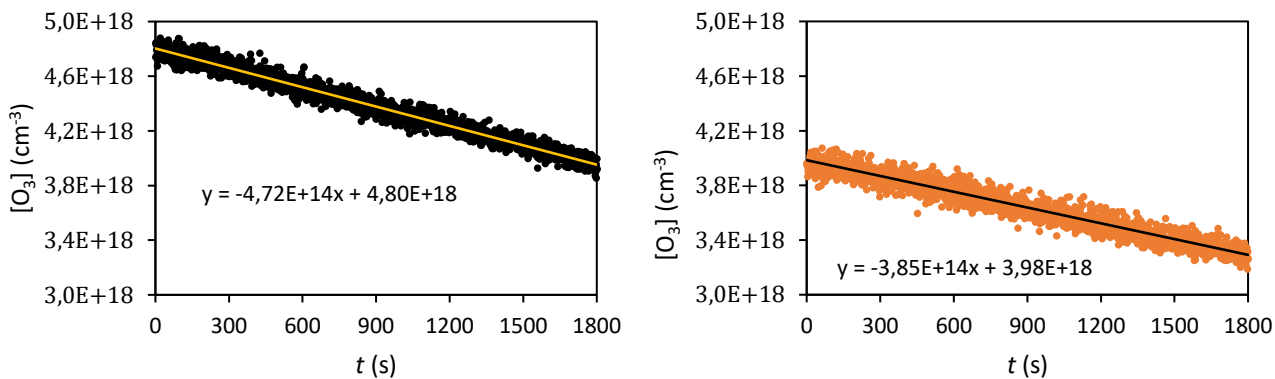
Z teorie víme, že ozon je poměrně nestabilní molekula s krátkým poločasem rozpadu. Jeho rozpad může být popsán rovnicí (1), ale i rovnicí (9), pokud bereme v potaz povrchové reakce. Při poslední sadě experimentů jsme tedy vycházeli z předpokladů, že obě možnosti rozkladu jsou jinak kineticky zabarvené. Kinetika určité reakce je vyjádřena rychlostní konstantou, a ta zase souvisí se směrnici přímky (v případě časové závislosti koncentrace).

V rámci degradace ozonu byl proveden experiment, při kterém byl studován rozklad z celého objemu. U toho (viz Obrázek 22– levý graf) byl předpokládán nejrychlejší pokles koncentrace ozonu. Dále jsme sledovali rozklad ozonu povrchovými reakcemi, které měly být pomalejší, a to z důvodu složitějšího mechanismu.

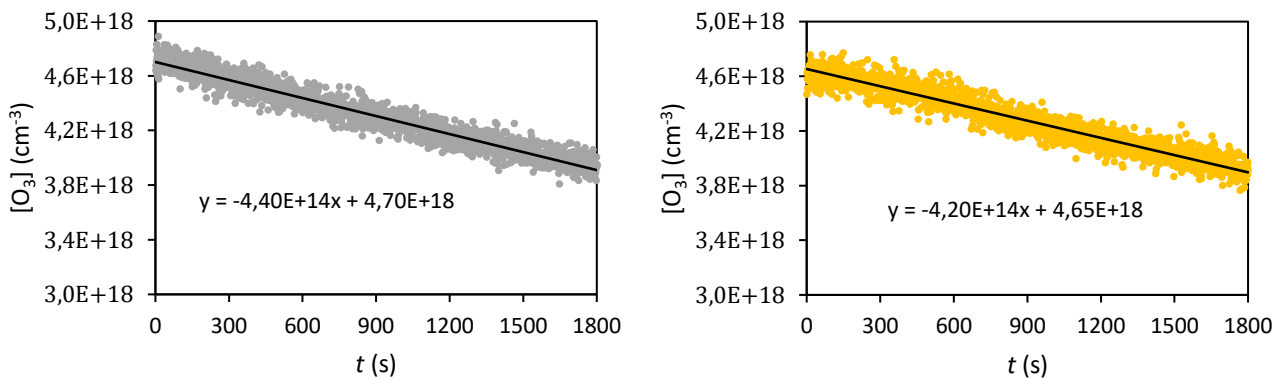
Pokud však srovnáme získané výsledky – směrnice, tak zjistíme, že se příliš neliší (viz Obrázek 22 a Obrázek 23). Nicméně hodnota směrnice pro degradaci z celého objemu (Obrázek 22 – levý graf) je z hlediska absolutních čísel nejvyšší, což potvrzuje naši myšlenku. Rozdíly mezi ostatními směrnici jsou bohužel příliš nevýrazné, není tedy možné s jistotou například tvrdit, že zvyšující se doba promývání vyústí v nižší hodnoty směrnice dané závislosti či naopak.



Obrázek 21: Degradace ozonu; porovnání různých metod měření



Obrázek 22: Degradace ozonu bez promývání kyslíkem (vlevo) a po minutovém propláchnutí kyslíkem (vpravo)



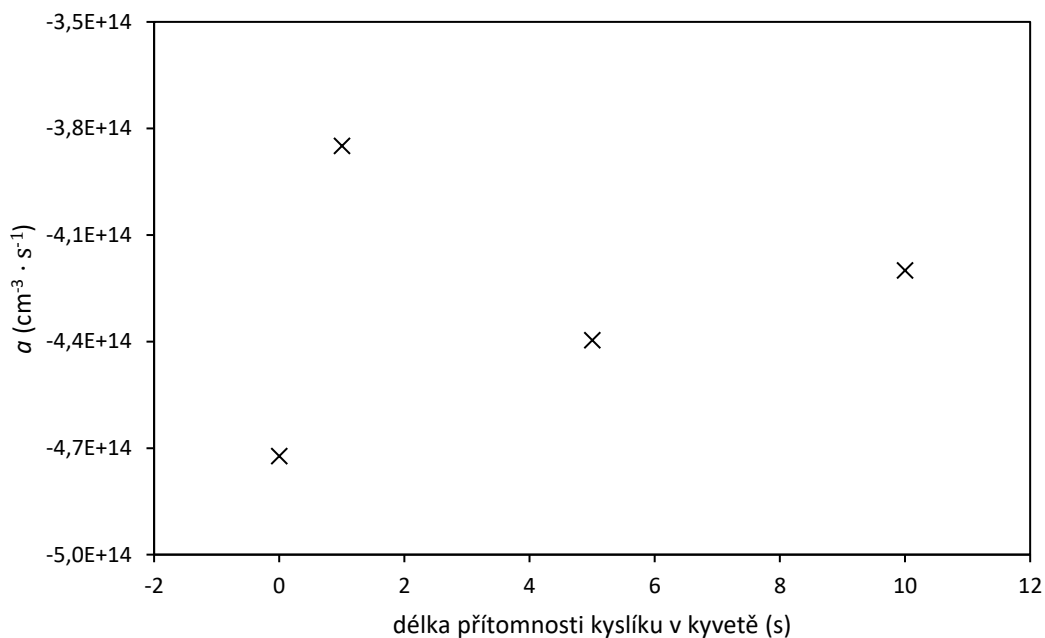
Obrázek 23: Degradace ozonu po 5minutovém promývání kyslíkem (vlevo) a po 10minutovém propláchnutí kyslíkem (vpravo)

I u poslední série měření byly směrnice přímk a jejich odchylky nalezeny pomocí funkce linregrese (Excel). Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 5. Na rozdíl od předchozích experimentů zde nebylo nutné vyhledávat lineární oblasti, poněvadž data vykazují lineárnost v celém rozsahu měření.

Tabulka 5: Nalezené směrnice a jejich nejistoty

Délka působení kyslíku (min)	$a \cdot 10^{14} (\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta a \cdot 10^{14} (\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$
0	-4,72	0,02
1	-3,85	0,02
5	-4,40	0,03
10	-4,20	0,03

Obrázek 24 graficky znázorňuje závislost nalezených hodnot směrnic na délce promývání kyvety kyslíkem.



Obrázek 24: Závislost hodnoty směrnic na délce promývání kyvety kyslíkem

5 ZÁVĚR

Cílem této závěrečné práce bylo prozkoumat reakce vedoucí ke vzniku a zániku ozonu na povrchu křemenné kyvety z hlediska chemické kinetiky. Pro tvorbu ozonu byl použit ozonizátor fungující na principu DBD. Koncentrace tohoto plynu byla stanovována pomocí absorpční spektrometrie.

První experimenty se zabývaly vznikem ozonu na povrchu křemenné kyvety. Vstupní i promývací plyn měl v tomto případě stejné složení. Bylo zjištěno, že rychlost vzniku ozonu souvisí se složením, a to buď vstupního plynu, nebo promývacího plynu, nebo obou. Nastavení této sady experimentů nám bohužel nedovolovalo jednoznačně určit, který z plynů více ovlivňuje výsledné závislosti.

Druhá série experimentů měla tedy za úkol odhalit hlavní faktor ovlivňující rychlost vzniku ozonu povrchovými reakcemi. Složení vstupního plynu zůstalo pro dílčí experimenty této sady jednotné (vždy 100% kyslík), složení promývacího plynu bylo měněno. Tato série byla taktéž rozdělena na dvě části, v první byla doba promývání ponechána na 10 sekundách a ve druhé jsme vyzkoušeli proplachovat delší dobu (60 sekund). Výsledky prokázaly, že složení vstupního plynu hraje větší roli v rychlosti tvorby ozonu než složení promývacího plynu. Poměrně překvapivé bylo i zjištění, že délka promývání také ovlivňuje rychlost vzniku ozonu.

Další experiment byl ověřovacího charakteru. Metodika byla téměř totožná s metodikou první série. Jediná změna spočívala v tom, že jsme propláchli kyvetu dvakrát, a to z důvodu, abychom zjistili, jestli ozon vzniká i po druhém promytí. Naštěstí pro nás bylo prokázáno, že po druhém propláchnutí kyvety již ozon prakticky nevzniká, což značně zjednodušuje vyhodnocení výsledků prvních dvou sérií.

V poslední řadě byla studována degradace ozonu. V rámci těchto experimentů byl prostudován rozklad ozonu jak z celého objemu, tak i pouze na povrchu. Bylo předpokládáno, že v důsledku složitějšího mechanismu bude rozpad ozonu povrchovými reakcemi pomalejší, což se i potvrdilo. Pro rozklad povrchovými reakcemi byly navrženy 3 experimenty, které se lišily v délce přítomnosti kyslíku v kyvetě. Bohužel z výsledků těchto experimentů nejsme schopni určit jaký je vztah mezi délkou promytí a degradací ozonu povrchovými reakcemi.

Závěrečným odstavcem této práce bych chtěl nastínit, jakým směrem je možné se ubírat nadále. Veškeré experimenty byly prováděny za laboratorní teploty. Domnívám se tedy, že by mohlo být zajímavé vyzkoušet, jak vliv by na vznik či rozpad ozonu měla zvýšená teplota.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GREENWOOD, N.N. a A. EARNSHAW. *Chemistry of the Elements*. 2. School of Chemistry, University of Leeds, U.K.: Butterworth-Heinemann, 1997. ISBN 978-0-7506-3365-9.
- [2] RUBIN, Mordecai B. THE HISTORY OF OZONE. THE SCHÖNBEIN PERIOD, 1839-1868. *Bull. Hist. Chem.* 2001, **26**(1), 40-56
- [3] BOCCI, Velio. Physical-Chemical Properties of Ozone – Natural Production of Ozone: The Toxicology of Ozone. *OZONE* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, 2010-09-24, 1-4 [cit. 2023-01-31]. ISBN 978-90-481-9233-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-90-481-9234-2_1
- [4] BOCCI, Velio. Ozone Toxicity: Biological Risk, Toxicology and First Aid. *Oxygen-Ozone Therapy* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002, 2002, 41-42 [cit. 2023-01-31]. ISBN 978-90-481-6008-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-015-9952-8_5
- [5] EPELLE, Emmanuel I., Andrew MACFARLANE, Michael CUSACK, Anthony BURNS, Jude A. OKOLIE, William MACKAY, Mostafa RATEB a Mohammed YASEEN. Ozone application in different industries: A review of recent developments. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2023, 454 [cit. 2023-01-31]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2022.140188
- [6] How is ozone formed in the atmosphere? *Chemical Sciences Laboratory* [online]. [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2010/twentyquestions/Q2.pdf>
- [7] Ozone Decomposition. *LENNTECH* [online]. [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/library/ozone/generation/ozone-generation.htm>
- [8] CHALMERS, I.D., L. ZANELLA a S.J. MACGREGOR. Ozone synthesis in oxygen in a dielectric barrier free configuration. *Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference* [online]. IEEE, 1995, 1249-1254 [cit. 2023-01-31]. ISBN 0-7803-2791-8. Dostupné z: doi:10.1109/PPC.1995.599787)
- [9] Ozone production from UV. In: *OXIDATION TECHNOLOGIES, LLC*. [online]. [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://www.oxidationtech.com/ozone/ozone-production/uv-lamp.html-9>
- [10] ELECTROLYTIC OZONE PRODUCTION. In: *OXIDATION TECHNOLOGIES, LLC*. [online]. [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://www.oxidationtech.com/media/wysiwyg/Electrolytic.png>
- [11] MURAYAMA, K., N. MATSUMURA, M. TAGUCHI, Y. KATOH, K. TERANISHI, S. SUZUKI a H. ITOH. Experimental investigations of the ozone zero phenomenon. *The European Physical Journal Applied Physics* [online]. 2009, **47**(2) [cit. 2023-05-06]. ISSN 1286-0042. Dostupné z: doi:10.1051/epjap/2009075
- [12] ITOH, Haruo, Takashi NAGAI, Masaki TAGUCHI, Kenji TERANISHI a Susumu SUZUKI. Advancement of ozone zero phenomenon by surface deterioration of stainless—steel electrode. *Plasma Research Express* [online]. 2021, **3**(3) [cit. 2023-05-18]. ISSN 2516-1067. Dostupné z: doi:10.1088/2516-1067/ac14ae

- [13] BATAKLIEV, Todor, Vladimir GEORGIEV, Metody ANACHKOV, Slavcho RAKOVSKY a Slavcho RAKOVSKY. Ozone decomposition. *Interdisciplinary Toxicology* [online]. 2014, 7(2), 47-59 [cit. 2023-01-31]. ISSN 1337-9569. Dostupné z: doi:10.2478/intox-2014-0008
- [14] WHAT IS GLASS?. *CORNING MUSEUM OF GLASS* [online]. December 2, 2011 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.cmog.org/article/what-is-glass>
- [15] Materials resistant to Ozone. *LENNTECH* [online]. December 2, 2011 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/ozone-resistant.htm>
- [16] OUEDERNI, A., Q. LIMVORAPITUK, R. BES a J.C. MORA. *Ozone decomposition on glass and silica* [online]. 1996, 18(5), 385-416 [cit. 2023-05-18]. ISSN 0191-9512. Dostupné z: doi:10.1080/01919512.1996.10382852
- [17] THELAMON, Claude. Measurements of Ozone Concentration. *Polymer Testing*. 1982, 3, 143-150
- [18] BADER, H. a J. HOIGNÉ. Determination of ozone in water by the indigo method. *Water Research* [online]. 1981, 15(4), 449-456 [cit. 2023-05-06]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1354(81)90054-3
- [19] TANIMOTO, Hiroshi, Hitoshi MUKAI, Shigeru HASHIMOTO a James E. NORRIS. Intercomparison of ultraviolet photometry and gas-phase titration techniques for ozone reference standards at ambient levels. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2006, 111(D16) [cit. 2023-05-06]. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/2005JD006983
- [20] MAJEWSKI, Jacek. Methods for measuring ozone concentration in ozone-treated water. *Przeгляд Elektrotechniczny*. 2012, 88(9), 253-255. ISSN 0033-2097.
- [21] MARCUS, Tay C. E., Michael DAVID, Maslina YAACOB, et al. Alternative wavelength for linearity preservation of Beer-Lambert Law in ozone concentration measurement. *Microwave and Optical Technology Letters* [online]. 2015, 57(4), 1013-1016 [cit. 2023-05-06]. ISSN 08952477. Dostupné z: doi:10.1002/mop.29005
- [22] DELGADO, Rosario. Misuse of Beer-Lambert Law and other calibration curves. *Royal Society Open Science* [online]. 2022, 9(2) [cit. 2023-05-19]. ISSN 2054-5703. Dostupné z: doi:10.1098/rsos.211103
- [23] NOVOTNÁ, Radka, Tomáš ŠILHA a Zdeněk TRÁVNÍČEK. SPEKTRÁLNÍ METODY STUDIA CHEMICKÝCH LÁTEK. In: *Univerzita Palackého v Olomouci* [online]. Olomouc, 2021 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://www.prf.upol.cz/fileadmin/userdata/PrF/katedry/afc/Studijni_materialy/Spektra_lni_metody.pdf
- [24] KRZYŽANKOVÁ, Anežka. *Studium reakcí kyslíku a ozónu na povrchu konstrukčních materiálů*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131418>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Věra Mazánková.

SEZNAM POUŽÍVANÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

UV	ultrafialové záření
RNA	ribonukleová kyselina
DNA	deoxyribonukleová kyselina
DBD	dielektrický bariérový výboj
I_t	intenzita prošlého záření
I_0	intenzita dopadajícího záření
T_r	transmitance
σ	absorpční účinný průřez
N_A	Avogadrova konstanta
P	tlak
l	optická dráha
R	poloměr kyvety
T	termodynamická teplota
A	absorbance
ε	molární extinkční koeficient
a	směrnice přímky
Δa	nejistota směrnice přímky
k	rychlostní konstanta