

**SCIENTIFIC
STUDIES**

**PRACE
NAUKOWE**

Krystyna Kostyrko, Paweł Wargocki

Pomiary zapachów i odczuwalnej jakości powietrza w pomieszczeniach

Measurements of odours
and perceived indoor air quality in buildings



Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa 2012

KOMITET REDAKCYJNY SERII

Redaktor naczelny	LESŁAW BRUNARSKI
Zastępca redaktora	HALINA PREJZNER
Sekretarz	MICHAŁ GAJOWNIK
Członkowie	BARBARA SZUDROWICZ
	ANDRZEJ CHOLEWICKI
	LECH CZARNECKI

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. ZBIGNIEW POPIOŁEK

dr inż. JERZY SOWA

Redakcja
IZABELA MIKA

Skład
SŁAWOMIR KOSIARSKI

© Copyright by Instytut Techniki Budowlanej
Warszawa 2012

*Czteryśta pięćdziesiąta szósta pozycja
„Prac naukowych ITB”*

ISBN 978-83-249-6772-8 (PDF)



Instytut Techniki Budowlanej

Dział Upowszechniania Wiedzy

02-656 Warszawa, ul. Ksawerów 21, tel.: 22 843 35 19

www.itb.pl

Sklep internetowy klient.itb.pl

Spis treści

<i>Streszczenie</i>	7
<i>Summary</i>	8
<i>Od Autorów</i>	9
Spis najważniejszych symboli	11
1. Wstęp – postrzeganie zapachów	13
1.1. Wprowadzenie	13
1.2. Postrzeganie zapachu	14
Bibliografia do rozdziału 1	23
2. Wprowadzenie do metrologii zapachu.....	25
2.1. Cechy i miary odczuwanych wrażeń węchowych.....	25
2.2. Stężenie zapachowe, stężenie masowe odorantu wywołującego wrażenie zapachowe, próg wyczuwalności dla odorantu, próg zapachowy, intensywność zapachu (cechy mierzalne).....	26
2.3. Rodzaj zapachu i próg jego rozpoznania – cechy mierzone w skali subiektywnej oceny.....	41
2.4. Emisja zapachu – cecha mierzalna w skalach wzorców.....	52
2.5. Stopień, w jakim wrażenia zapachowe są przyjemne (w skali hedonicznej i w skali PI) – cechy mierzone w skalach subiektywnej oceny podobieństwa	55
2.6. Poziom uciążliwości zapachu	57
Bibliografia do rozdziału 2	61
3. Kryteria oceny zapachowych zanieczyszczeń powietrza.....	67
3.1. Kryteria oceny zanieczyszczeń (zapachowych) powietrza jednakowe dla środowiska zewnętrznego i wewnętrznego.....	67
3.2. Kryteria oceny jakości (zapachowej) powietrza w troposferze, na zewnątrz budynków.....	70
3.3. Kryteria oceny jakości (zapachowej) powietrza w środowisku wewnętrznym	78
3.4. Kryteria oceny jakości (zapachowej) powietrza w środowisku wewnętrznym – podsumowanie.....	86
Bibliografia do rozdziału 3	88
4. Podstawy wiedzy o jakości powietrza wewnętrznego (odczuwanej przez ludzi) i o złych zapachach w pomieszczeniach jako markerach tej jakości.....	91
4.1. Pomiary jakości powietrza wewnętrznego odczuwanej przez ludzi.....	91
4.2. Wpływ temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz intensywności zapachów (stężeń odorantów) na wynik oceny jakości powietrza odczuwanej przez ludzi	96

4.3. Interakcja zapachów ze źródeł zanieczyszczeń w pomieszczeniach wentylowanych. Zjawiska addytywności wrażeń węchowych, synergii i znoszenia się zapachów	101
Bibliografia do rozdziału 4	107
5. Diagnozowanie problemu złego zapachu powietrza w budynku	113
5.1. Wprowadzenie	113
5.2. Pierwszy etap diagnozowania problemu złego zapachu (od momentu zetknięcia się człowieka z zapachem do momentu złożenia skarg przez użytkowników budynku).....	116
5.3. Drugi etap diagnozowaniu problemu złego zapachu (od momentu analizy zebranych skarg do momentu postawienia diagnozy).....	149
Bibliografia do rozdziału 5	166
6. Badania laboratoryjne i dane dotyczące emisji zanieczyszczeń zapachowych w różnych budynkach i w różnych warunkach środowiska wewnętrznego	171
6.1. Pierwotne oraz wtórne źródła zanieczyszczeń zapachowych	171
6.2. Metody badania emisji zanieczyszczeń (zapachowych) z powierzchni materiałów budowlanych i elementów wyposażenia budynków nieprzemysłowych. Stan normalizacji badań	185
6.3. Omówienie zbiorów wartości odniesienia dopuszczalnych stężeń oraz emisji zanieczyszczeń (zapachowych) w pomieszczeniach	201
Bibliografia do rozdziału 6	223
7. Ograniczanie zapachów występujących w różnych budynkach i w różnych warunkach środowiska wewnętrznego	235
7.1. Wykorzystanie zjawisk sorpcji w ograniczaniu zapachów w pomieszczeniach przez stosowanie materiałów mocno adsorbujących odoranty, np. płyt gipsowych.....	235
7.2. Unormowane metody etykietowania (ang. labelling systems) emisji zanieczyszczeń z materiałów budowlanych nisko emitujących, stosowane przez niektóre kraje europejskie	237
7.3. Zasady usuwania lub modyfikacji (neutralizacji) zanieczyszczeń zapachowych emitowanych do środowiska	249
7.4. Zasady usuwania lub niszczenia zanieczyszczeń zapachowych we wnętrzach pomieszczeń. Krytyczna analiza skuteczności oczyszczaczy	255
7.5. Oczyszczacze domowe do eliminacji lub niszczenia zanieczyszczeń zapachowych we wnętrzach. Omówienie zasad działania i przykłady rozwiązań	257
7.6. Przykład badania efektywności działania oczyszczacza fotokatalitycznego (z wykorzystaniem zespołu probantów oraz metod analizy chemicznej).....	262
Bibliografia do rozdziału 7	268
8. Analiza sensoryczna zapachów	275
8.1. Analiza sensoryczna w zastosowaniu do określania cech zapachów	275
8.2. Oznaczanie stężenia zapachowego metodą olfaktometrii dynamicznej	289
Bibliografia do rozdziału 8	314

9. Pomiary zapachu przez oznaczanie stężeń odorantów w powietrzu metodami laboratoryjnej analizy chemicznej (metody referencyjne).....	319
9.1. Pobieranie próbek i oznaczanie zawartości odorantów metodami analizy chemicznej – znormalizowanymi	319
9.2. Oznaczanie zawartości odorantów metodami chemicznymi (referencyjnymi), nieznormalizowanymi.....	331
Bibliografia do rozdziału 9	353
10. Pomiary i monitorowanie zapachu przez oznaczanie stężeń odorantów miernikami przenośnymi (metody wskaźnikowe, analizatory chemiczne, nosy elektroniczne)	359
10.1. Wprowadzenie	359
10.2. Przyrządy kolorymetryczne do selektywnego oznaczania określonych odorantów.....	362
10.3. Elektroniczne nosy zawierające matryce czujników gazowych.....	365
10.4. Detektory chemiczne odorantów, zintegrowane (lub nie) z matrycami czujników nosów elektronicznych	381
10.5. Analizatory chemiczne związków zapachowych, zminiaturyzowane lub zrealizowane jako mikrostruktury zintegrowane (lub nie) z matrycami czujników nosów elektronicznych	387
10.6. Kalibracja przenośnych analizatorów chemicznych oraz nosów elektronicznych.....	397
10.7. Charakterystyki metrologiczne nosów elektronicznych i ich spójność pomiarowa ze stężeniem zapachowym zmierzonym olfaktometrem	402
10.8. Porównanie technik pomiarowych i podsumowanie	403
Bibliografia do rozdziału 10	406
11. Koszty pogorszonej jakości powietrza i występowania w pomieszczeniu złych zapachów.....	409
11.1. Wprowadzenie	409
11.2. Koszty ponoszone przez osoby prywatne i pracodawców	410
11.3. Koszty ponoszone przez pracodawcę przy spadku produktywności i korzyści przy wzroście produktywności.....	411
11.4. Koszty społeczne.....	417
11.5. Koszty zdrowotne.....	418
11.6. Koszty związane z konserwacją i ochroną materiałów budowlanych oraz wyposażenia budynku	422
11.7. Przykład obliczenia zysków z poprawy jakości powietrza w pomieszczeniach	423
Bibliografia do rozdziału 11	430
12. Indeks angielsko-polski	433
13. Skorowidz.....	445

Od Autorów

Monografia zawiera informacje o metodach pomiaru zapachów i o ocenie odczuwalnej jakości powietrza, a także o środkach technicznych oraz urządzeniach do ograniczania w pomieszczeniach stężeń odorantów powodujących uciążliwe zapachy. Opisaliśmy również koszty złej jakości powietrza w pomieszczeniach, zarówno ponoszone bezpośrednio przez użytkowników pomieszczeń, jak i przez najemców oraz pracodawców. Koszty te wynikają z pogorszenia warunków zdrowotnych i obniżenia produktywności. Są one znaczne również w porównaniu z kosztami zwiększonego zużycia energii w budynku.

Według zebranych przez nas opinii monografia jest pierwszą na polskim rynku pozycją wydawniczą dotyczącą tych zagadnień. Problemy związane z jakością powietrza w pomieszczeniach są szeroko badane poza granicami kraju, w krajach wysoko rozwiniętych, co ma znaczący wpływ na poprawę warunków użytkowania budynków. Wdrożenie w Polsce pomiarów opisywanych w monografii może przynieść wymierne korzyści i rzutować na podniesienie konkurencyjności polskiego budownictwa. Monografia wpisuje się w ogólny cel działalności Instytutu Techniki Budowlanej, którego zadaniem jest zapewnienie jakości polskiego budownictwa i ochrona użytkowników obiektów budowlanych.

Jest nam miło podziękować recenzentom monografii, Panu prof. dr. hab. Zbigniewowi Popiołkowi oraz Panu dr. Jerzemu Sowie, za wnikliwe jej przeczytanie, wskazanie niedociągnięć oraz za sugestie dotyczące łatwiejszego wykładu na temat stanu wiedzy o pomiarach jakości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach, a w szczególności stanu wiedzy o pomiarach zapachów metodami analizy sensorycznej oraz analizy chemicznej dostosowanej do oznaczania w powietrzu śladowych stężeń odorantów niosących te zapachy.

Monografię opracowaliśmy wspólnie, ale i oddzielnie, z dwóch punktów widzenia, dwóch specjalności, które reprezentujemy, oraz z dwóch miejsc w Europie, w których żyjemy i pracujemy zawodowo, tj. z duńskiego Lyngby i z Warszawy. Ponieważ tyle nas różni, chcielibyśmy też indywidualnie, zgodnie z tym co dla nas ważne, zadedykować swoją pracę nad monografią.

„Wszystkim metrologom, którzy borykają się z pomiarem wielkości słabo mierzalnych”.

Krystyna Kostyrko

Kiedy pierwszy raz przed wieloma laty natrafiłem na polskie tłumaczenie książki „Komfort cieplny” prof. P.O. Fangera, nie przypuszczałem, że przyjdzie mi kiedykolwiek wydać monografię wspólnie z jednym z jej tłumaczy. Później przez lata pracowałem z prof. Fangerem w Danii, który zawsze bardzo dobrze wspominał trafność polskiego tłumaczenia swojej książki. Nie mylił się ani trochę. Przekonałem się o tym, ponieważ również nasza współpraca podczas pisania tej monografii układała się doskonale. Dla mnie jej opublikowanie ma szczególne znaczenie, bo tym samym udało mi się spełnić życzenie nieżyjącego już prof. Fangera, który przez lata namawiał mnie, abym publikował w Polsce.

Chciałbym też podziękować mojej rodzinie za wyrozumiałość, że rezygnując ze wspólnie spędzonego czasu, umożliwiła mi spędzanie wielu godzin nad opracowaniem tekstu. Książkę dedykuję moim Rodzicom, którzy tak jak i ja nie sądzili, że moje 4-miesięczne stypendium naukowe w Danii przerodzi się w 20-letnią przygodę z nauką, której jednym z efektów jest ta publikacja.

Paweł Wargocki

Spis najważniejszych symboli

Symbol	Znaczenie symbolu (definicja)	Jednostka
<i>ACC</i>	– średnia ocena akceptowalności jakości powietrza	
<i>c</i>	– stężenie zanieczyszczeń powietrza	mg/m ³ ; ppmv*)
<i>C_{th}</i>	– próg węchowej wyczuwalności dla odorantu (stężenie progowe węchowej wyczuwalności; $C_{th} = c$ [mg/m ³], gdy zapach wyczuwa 50% zespołu reprezentatywnego dla populacji; $C_{th} = 1$ ou/m ³)	mg/m ³
<i>C_{od}</i>	– stężenie zapachowe (stężenie odorantów wyrażone w jednostkach zapachowych w metrze sześciennym)	ou/m ³
<i>C_{od,E}</i>	– stężenie zapachowe (liczba europejskich jednostek zapachowych na 1 m ³ gazu w jednostkach standardowych)	ou _E /m ³
<i>C_{od60}</i>	– średnia wartość <i>C_{od}</i> w powietrzu w otoczeniu emitora, odniesiona do 60 minut	ou _E /m ³
<i>C_{od60}^{max}</i>	– maksymalna w skali roku wartość <i>C_{od}</i> 60	ou _E /m ³
<i>c_{od60}^{99,8}</i>	– percentyl 99,8 <i>C_{od}</i> 60 (stężenie obliczane na podstawie statystycznego rozkładu wielu wyników pomiarów; prawdopodobieństwo wystąpienia w ciągu roku wartości większych od $c_{od60}^{99,8}$ jest mniejsze od 0,2%)	
<i>D₅₀</i>	– dawka odorantu, którą może wyczuć 50% populacji w postaci bodźca sensorycznego	
EROM	– masa europejskiego wzorca zapachowego	μg n-butanolu
<i>ITE_{subst}</i>	– ocena progu indywidualnego dla znanej substancji	mg/m ³
<i>ou_E</i>	– europejska jednostka zapachowa (ilość odorantu(ów), która po odparowaniu do 1 m ³ obojętnego gazu w warunkach standardowych wywołuje fizjologiczną reakcję zespołu oceniającego (próg wyczuwalności) równoważną reakcji wywołanej przez masę europejskiego wzorca zapachu EROM odparowaną do 1 m ³ obojętnego gazu w warunkach standardowych)	
<i>Q_{od}</i>	– strumień zapachowy gazu wonnego (zapachowe natężenie przepływu emitowanych odorantów, np. C_{od} [ou _E /m ³] × V [m ³ /s])	ou _E /s

q	– emisja odorantów (masowe natężenie przepływu emitowanych odorantów, np. $c [mg/m^3] \times V [m^3/s]$)	mg/s; $\mu g/s$
q_{pow}	– emisja odorantów odniesiona do powierzchni emitującej (strumień masy odorantu wydzielany ze źródła zapachu, jakim jest jednostkowa powierzchnia emitująca)	mg/(m ² ·h)
$q_{c,pow}$	– strumień powietrza wentylacyjnego wymagany ze względu na komfort użytkowników budynku, odniesiony do 1 m ² powierzchni wentylowanego pomieszczenia	m ³ /(h·m ²)
$q_{c,os}$	– strumień powietrza wentylacyjnego wymagany ze względu na komfort użytkowników budynku, odniesiony do 1 osoby przebywającej w pomieszczeniu	m ³ /(h·os)
$q_{h,pow}$	– strumień powietrza wentylacyjnego wymagany ze względu na zdrowie użytkowników budynku, odniesiony do 1 m ² powierzchni wentylowanego pomieszczenia	m ³ /(h·m ²)
$q_{h,os}$	– strumień powietrza wentylacyjnego wymagany ze względu na zdrowie użytkowników budynku, odniesiony do 1 osoby przebywającej w pomieszczeniu	m ³ /(h·os)
PD	– odsetek niezadowolonych z jakości powietrza	%
S	– intensywność zapachu	
S_0, S_Z	– intensywność zapachu próbki gazu nie rozcieńczonego S_0 i po jego rozcieńczeniu Z razy czystym powietrzem S_Z	
S_5	– średnia intensywność zapachu powietrza odniesiona do 5 minut kontroli w warunkach rzeczywistych	
V	– objętość	l, m ³
\dot{V}	– strumień objętości	m ³ /s
Z	– stopień rozcieńczenia badanego gazu czystym powietrzem	
Z_{50}	– stopień rozcieńczenia na progu wyczuwalności 50%	
Z_{ITE}	– ocena progu indywidualnego wyczuwania zapachu wyrażona jako stopień rozcieńczenia	
\bar{Z}_{ITE}	– średnia geometryczna Z_{ITE} dla wszystkich członków zespołu w jednym pomiarze	
$\bar{Z}_{ITE,pan}$	– średnia geometryczna Z_{ITE} dla wszystkich uprawnionych członków zespołu po powtórnej weryfikacji	
ε_v	– efektywność wentylacji	
η_{od}	– skuteczność dezodoryzacji	

^{*)} ppmv objętościowe (litrów gazu na milion litrów mieszaniny tego gazu z innymi)

1. WSTĘP – POSTRZEGANIE ZAPACHÓW

1.1. Wprowadzenie

Rozważając metodykę pomiarów zapachu, nawet w warunkach ustalonej emisji, które możliwe są do przyjęcia przy rozpatrywaniu pomieszczeń, napotkać można wiele niespójności i pytań zarówno przy ustalaniu procedur pomiarowych, jak i przy wyborze aparatury. Jednakże pomiary zapachu połączone z pomiarem sensorycznym jakości powietrza wewnętrznego (ang. IAQ – *Indoor Air Quality*) są prowadzone, toteż monografia prezentuje przegląd teorii i praktyki tych pomiarów (metrologię) i ustalone w ostatnich latach zasady zunifikowanej olfaktometrii.

Człowiek wyczuwa węchem nawet niezmiernie małe stężenia związków chemicznych niosących zapach wdychanego powietrza, np. trójmetyloaminy, rozpoznawalną jako zapach ryb, już w stężeniu 10^{-4} ppmv. Związki chemiczne, których zapach człowiek wyczuwa, noszą nazwę odorantów [1, 2, 4, 14] i od tego słowa przyjęto termin **odory** (ang. *odours*) do określania nieprzyjemnych (drażniących, dokuczliwych) zapachów, zaś przyjemne zapachy (np. w perfumiarstwie) noszą nazwę **woni** (ang. *fragrances*), a w przemyśle spożywczym – nazwę **aromatów** (ang. *aroma*).

Metoda olfaktometrii, w której węch człowieka wykorzystuje się jako czujnik zapachu, oparta jest na modelu metrologicznym, który zawiera dużo uproszczeń, pomiar obejmuje wprowadzić wszystkie składniki zapachu, ale ich nie rozróżnia. **Metody analizy instrumentalnej GC** (chromatografia gazowa), **GC-MS** (spektrometr masowy sprzężony z chromatografem gazowym), **IMS** (spektrometria ruchliwości jonów) oraz **spektrometria IR** (w zakresie bliskiej podczerwieni) umożliwiają wprowadzić wykrycie stężenia odorantu prawie na poziomie węchu człowieka (aminy 0,002 ppmv), ale ta wysoka czułość dotyczy gazów czystych, a więc nie całego zapachu. Ponadto wiele związków (odorantów) jest trudno wykrywalnych lub ich wykrycie tymi metodami w ogóle nie jest możliwe. W koncepcji **elektronicznego nosa** zawarte jest dążenie do objęcia pomiarem całego zapachu i do uzyskania niskich niepewności pomiaru, lecz jak dotąd nie zmniejszono tej niepewności poniżej 10–15%. Ponadto e-nosy są podatne na czynniki zakłócające i pozostaje problemem skorelowanie ich wskazań z wynikami pomiaru zapachu metodą olfaktometryczną (waczenia) przy wykorzystaniu ocen ludzi.

Według raportów JPL-NASA [11] niepewności pomiaru przy użyciu e-nosa, a w szczególności granice detekcji zapachów wyczuwanych przy

użyciu e-nosa, są stale zmniejszane. Próg detekcji (dla czystych gazów) sięga tysięcznych części ppmv, zakresy pomiaru stężeń wykrywanych przy użyciu e-nosa rozpoczynają się od 1 lub kilku ppmv (a krzywą kalibracji udaje się wyznaczyć z punktów skorelowanych do wartości $R^2 = 0,86$). Próg oznaczalności stężenia zapachu przy użyciu e-nosa, z matrycami czujników chemicznych, został w ostatnich latach obniżony nawet 10-krotnie przez zastosowanie modułu desorpcji termicznej (ang. *Thermal Desorption Unit*) sprzężonego z zestawem czujników zapachu.

W pracach Uniwersytetu Iowa [12] wykazano jednakże, że wyniki pomiaru odczytane z e-nosa z matrycami czujników chemicznych są wyraźnie mało skorelowane z wynikami pomiaru stężenia zapachowego olfaktometrem (podano nawet współczynnik korelacji $R^2 < 0,2$).

Temat instrumentalnego pomiaru zapachów w pomieszczeniach nie jest reprezentowany w dokumentach normatywnych i opisach badań związanych z „jakością powietrza wewnętrznego” IAQ. Na przykład w normie PN-EN 15251:2007 [13] na temat wymagań dla środowiska wewnętrznego w projektowaniu i ocenie budynków, w załączniku H w opisie metodyki prowadzenia ocen subiektywnych środowiska wewnętrznego przez mieszkańców, zalecono jedynie ankietowe badania odbioru zapachów w skali subiektywnego odbioru bodźców. Takie ujęcie w normach problemu złych zapachów w środowisku wewnętrznym wynikało do niedawna z utrwalonego przekonania o określonej potocznie niemierzalności zapachów w pomieszczeniach.

1.2. Postrzeganie zapachu

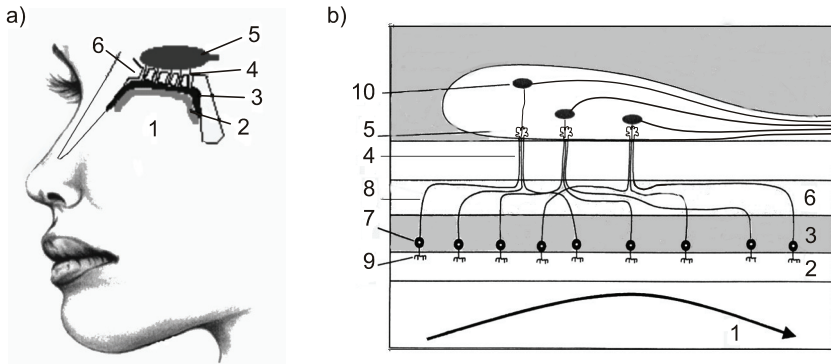
Zmysł węchu jest jednym z najbardziej złożonych i najstarszych zmysłów (receptory węchowe istniały już u robaków w erze prekambryjskiej, tj. przed 800 milionami lat).

Zmysł węchu, tak jak smaku, należy do zmysłów chemicznych. Postrzeganie odorów, zapachów i aromatów nie jest możliwe, jeżeli związki chemiczne nie dotrą do strefy pola węchowego zlokalizowanej w czaszce. Każdy strumień powietrza wachany przez człowieka zawiera cząstki jakiejś substancji chemicznej niosącej zapach (odorantu).

Odorant musi mieć określone właściwości budowy cząsteczkowej po to, aby mógł być wykrywany (odczuwany) jako zapach przez receptory komórek węchowych. Musi być rozpuszczalny w wodzie, mieć wystarczającą prężność pary, być związkiem mało polarnym, mieć pewną zdolność rozpuszczania się w tłuszczach, być powierzchniowoczynny i, jak podaje Lefingwell [1], mieć ciężar cząsteczkowy mniejszy niż 294.

Wrażenie zapachu odczuwane przez człowieka generowane jest w czaszce pokazanej w przekroju na rysunku 1.1a, a ściślej w obrębie dwóch pól węchowych o powierzchniach ok. 2,5 cm², usytuowanych na przodzie czaszki, między oczami, w obydwu jamach nosowych. Jak pokazano na ry-

sunku 1.1a, powietrze z cząstkami odorantu wpada przez nozdrza do jamy nosowej (1) i napotyka warstwę (2) śluzu węchowego o grubości ok. 4 μm , którym jest roztwór wodny różnych białek (ang. *G-olf*), enzymów, polisacharydów pokrywających nabłonek węchowy (3). Ponad polem węchowym, po drugiej stronie blaszki sitowej (6) ograniczającej jamę nosową, znajduje się opuszka węchowa (5) połączona z nabłonkiem węchowym (3) włóknami nerwowymi (4) przewodzącymi impulsy węchowe z jamy nosowej.



Rys. 1.1. Narząd zmysłu węchu

a) przekrój czaszki przez wnękę nosową, b) pole węchowe;

- 1 – jama nosowa, 2 – śluz węchowy, 3 – nabłonek węchowy, 4 – włókna nerwowe,
5 – opuszka węchowa, 6 – blaszka sitowa, 7 – komórka węchowa receptorowa,
8 – wypustka osiowa (akson), 9 – rzęski, 10 – kłębuszki węchowe

Na rysunku 1.1b pokazano budowę pola węchowego wg NPL [2]. Nabłonek węchowy (3) zbudowany jest z różnego rodzaju komórek, z których najważniejsza jest **komórka węchowa receptorowa** (7) (ang. *olfactory receptor cell*) nazwana tak, ponieważ na powierzchni jej ściany komórkowej znajduje się receptor węchowy. Komórki węchowe, które się stale odnawiają (całkowita liczba tych komórek u człowieka wynosi 10÷50 mln), zbudowane są z ciała komórki i odchodzących od niej dwóch rodzajów wypustek – z jednej strony z długiej wypustki osiowej (8), noszącej nazwę **aksonu**, a z przeciwnej strony z licznych **dendrytów**, z których jeden zakończony jest rzęskami (9) z osadzonymi na nich receptorami węchowymi. Rzęski (w liczbie od 8 do 20, o długości na $\geq 30 \mu\text{m}$, zanurzone są w śluzie i skierowane do jego warstwy powierzchniowej, stykającej się z cząstkami odorantu w jamie nosowej) działają jak „palce” węchowe.

Gdy cząstki odorantu wciągnięte do jamy nosowej przedostaną się do rzęsek, zostają przechwycone przez „pasujące” do danego typu odorantu receptory węchowe. Komórki zostają pobudzone i powstaje impuls węchowy, który jest przekazywany dalej do mózgu przez aksony (8). Aksony wielu różnych komórek węchowych skupiają się, tworząc włókna nerwowe, które penetrują blaszkę sitową (6), przebijając się do kłębuszków węchowych (10)

ukrytych wewnątrz opuszki węchowej (5) właściwej dla danego nozdrza. Grupowanie aksonów pozwala na synchroniczny odbiór sygnałów z dużej liczby komórek, nawet nieumiejscowionych w bezpośrednim sąsiedztwie.

Sygnały pochodzące od milionów komórek węchowych rozrzuconych na powierzchni pola węchowego docierają za pośrednictwem aksonów do opuszki węchowej i na jej powierzchni materializuje się szablon danego zapachu. Wzór powierzchniowy aktywowanych komórek węchowych w polu węchowym dla każdego złożonego zapachu jest inny.

Zagadnienie dotyczące tego, jak przy spełnieniu jakich warunków cząsteczki odorantu mogą zostać przechwycone przez receptor węchowy i go aktywować, tłumaczy kilka teorii, w tym:

a) stereochemiczna teoria percepcji zapachu Paulinga i Amoore'a [3], która przyjmuje jako podstawę klasyfikacji zapachu kształt przestrzenny cząsteczki odorantu. O wrażeniu węchowym człowieka decyduje dopasowanie struktur przestrzennych nośnika zapachu – odorantu i mówiąc obrazowo „gniazda” bioreceptora w komórce węchowej. Podręcznik [4] podaje, że np. związek pierścieniowy 1,1,3-trimetylo-2-(but-1-en-3-ono)-cykloheksan ma zapach fiołków, lecz jeżeli na piątą pozycję pierścienia wprowadzi się jeszcze jedną grupę metylową – kształt cząsteczki się zmieni i związek będzie mieć zapach suchych liści,

b) wibracyjna teoria percepcji zapachu głosi, że receptory węchowe wykrywają częstości drgań cząsteczkowych odorantu (pasma osmiczne w zakresie podczerwieni),

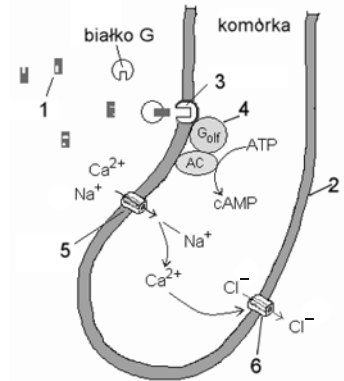
c) elektrochemiczna teoria rozpuszczania się cząsteczek odorantu w ściance komórkowej receptora i zmiany własności komórki powodowane zmianą stężenia jonów wewnątrz komórki. Teoria wiąże się z odkryciem rodziny białek przezłonowych *G_{olf}* sprzęgających się z receptorami węchu w celu utworzenia GPCRs (ang. *G-protein-coupled receptors*). Przy czym zjawisko to dotyczy tylko cząstek białka zakodowanych przez określone geny, co daje podstawy do zrozumienia zasady rozróżniania zapachów [5, 6, 7].

Opis uproszczonego modelu odpowiedzi receptorów węchowych na zapach wg teorii (c)

Choć każda z teorii ma swoich zwolenników i była udowadniania, to rozpatrzony tu będzie model według teorii (c) – najnowszej wyjaśnionej w istotnym zakresie i nagrodzonej nagrodą Nobla w 2004 r. [6]. Uproszczony model [5, 18] obejmuje proces powstawania i przetwarzania impulsu węchowego, od momentu wychwycenia cząstki odorantu przez receptor komórki węchowej do momentu dotarcia sygnału elektrycznego do kory mózgowej, z uwzględnieniem reakcji elektrochemicznej, dzięki której proces ten zachodzi.

Na rysunku 1.2 [18] pokazano przekrój rzęski należącej do ciała komórki węchowej. Można na nim prześledzić podstawowe reakcje powstawania i przetwarzania sygnału elektrycznego w odpowiedzi na bodziec węchowy. Rzęska zanurzona jest w środowisku śluzu, który pokrywa pole węchowe. Wypełnione cytoplazmą wnętrze rzęski oddziela od środowiska śluzu wę-

chowego, do którego dociera odorant (1), błona komórkowa (ang. *olfactory membrane*) (2) o grubości zaledwie około 5 nm. Na rzęście, na powierzchni pokrywającej ją błony komórkowej, umiejscowiony jest receptor węchowy (3).



Rys. 1.2. Elementy odbioru i przetwarzania impulsów (za zgodą Tima Jacoba z Uniwersytetu Cardiff [18])

1 – odorant, 2 – błona komórkowa, 3 – receptor węchowy, 4 – białko *G_{olf}*, 5 i 6 – kanały jonowe

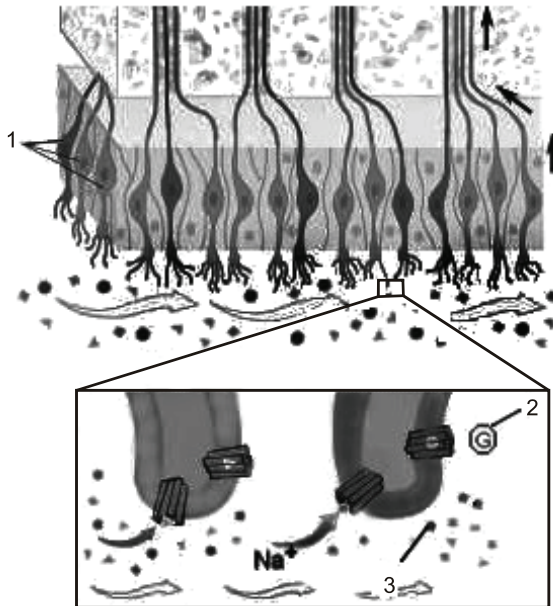
Cząstka odorantu przedostaje się ze śluzu do błony komórkowej i zostaje przechwycona przez receptor węchowy (3), który zostaje wówczas pobudzony (przez bodziec węchowy) do aktywacji cząstki białka G określonego rodzaju, obecnej w środowisku lub syntetyzowanej. Następnym etapem procesu powinno być sprzężenie cząstki białka z receptorem węchu. Jednakże proces ten następuje tylko wtedy, gdy rodzaj białka (typ G, ang. *G-proteins: G-s and/or G-olf*) „pasuje” do odorantu i gdy białko zostanie odpowiednio zakodowane przez określony gen. Jeżeli warunki te są spełnione, następuje sprzężenie receptora (3) z białkiem *G_{olf}* (4) (wewnątrz komórki, tj. po stronie cytoplazmy). Proces ten wywołuje reakcję wytwarzania enzymu ATP, który nosi nazwę cykazy adenowej (etap ATP-azy) i który pobudza wewnątrz komórki węchowej. Uruchomione zostaje wytwarzanie związku cyklicznego AMP, czyli cząsteczek cAMP. Związek cAMP stanowi neuroprzekaźnik działający jak wewnątrzkomórkowy hormon. Spełnia on rolę wtórnego przekaźnika, znanego pod nazwą angielską „*second messenger*”, który aktywuje kanały jonowe (5) i (6) przecinające błonę komórkową. Na koniec następuje fosforylacja kanałów jonowych i ich otwarcie (rys. 1.2), co powoduje uruchomienie procesu dyfuzji jonów (pompa sodowo-potasowa) przez błonę komórkową do wnętrza (5) i na zewnątrz (6) komórki.

Jak już powiedziano, sygnały pochodzące od milionów komórek węchowych docierają za pośrednictwem aksonów do opuszki węchowej (rys. 1.1). W obszarze tych milionów aksonów materializuje się, na powierzchni opuszki węchowej, szablon danego zapachu (ang. *pattern of activity*) zależny od tego, przez jakiego rodzaju komórki węchowe zostały przechwycone z powodzeniem cząstki odorantu. Uчени sądzą obecnie, że szablon ten przenosi się na swoisty wzór powierzchniowy w polu węchowym i że każdy zapach ma inny wzór aktywowanych komórek węchowych. Badania nad

powstawaniem wzoru zapachu i nad przesyłaniem go dalej z opuszki węchowej do odpowiednich obszarów mózgu uhonorowane zostały w 2004 r. nagrodą Nobla w dziedzinie medycyny dla Richarda Axela z Columbia University College oraz dla Lindy Buck z Fred Hutchinson Cancer Research Center [6].

Uczeni wykazali, że białka *Golf* są selektywnie dobierane przez komórkę węchową do typu odorantu, z czego wynika, że komórki węchowe muszą różnić się między sobą. Sprzęgnięte z białkami receptory węchowe, które oznaczono symbolem GPCRs (ang. *G-protein-coupled receptors*), też różnią się między sobą, choć należą do jednej dużej „rodziny”. Gdy odoranty stanowią kompozycję różnych cząstek zapachowych, powstają różne receptory GPCRs z białkami różnie kodowanymi, a taka organizacja układu postrzegania zapachu prowadzi do powstawania kombinacji kodowych (ang. *combinatorial code forming*) [17]. Odkrycia te dały podstawę do rozumienia naszej zdolności rozróżniania i pamiętania około 10 000 zapachów.

Ponadto Linda Buck wykazała, że elektryczne sygnały nerwowe przetransmitowane do głębszych warstw neuronów mózgu są rozpoznawane jako zapach dopiero wówczas, gdy przekroczona zostanie wartość potencjału progowego sygnału i że po przeanalizowaniu wracają one z powrotem do zdefiniowanych mikroregionów kory mózgowej, gdzie są zapamiętywane.



Rys. 1.3. Detekcja zapachu przez człowieka 1 – komórki węchowe receptorowe różnych rodzajów, 2 – cząstki białka *Golf*, 3 – cząstki odorantu [1, 6, 21]

Odorant → wychwytywanie odorantu przez receptor węchu → receptor pobudzony przez bodziec węchowy → sprzęgnięcie receptora w narządzie węchu z białkiem G → aktywacja komórki węchowej w sposób pośredni (reakcja kaskadowa wytwarzana wewnątrz komórki enzymu ATP → wytwarzanie „wtórnego przekaźnika”, związku chemicznego cAMP → depolaryzacja błony komórkowej) → otwarcie kanału jonowego → powstawanie potencjału jonowego receptorowego o amplitudzie proporcjonalnej do bodźca węchowego → sygnał elektryczny

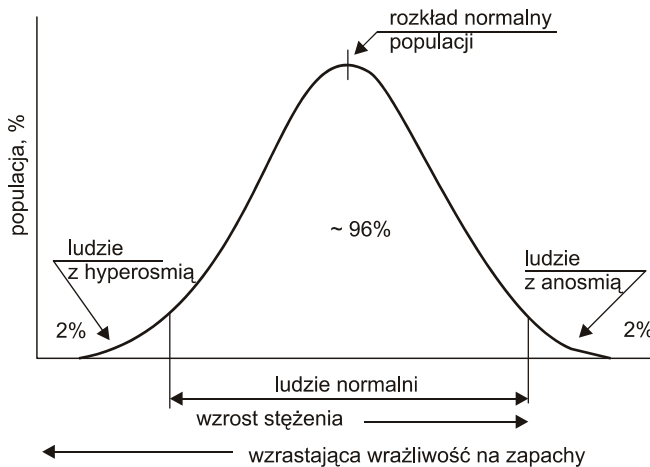
1.2.1. Podsumowanie opisu uproszczonego modelu postrzegania zapachu

Podsumowując przebieg powstawania, przetwarzania, przekazywania i przesyłania do mózgu sygnału elektrycznego wywołanego przez bodziec węchowy, można nakreślić schematycznie kolejność procesów zilustrowanych na rysunku 1.3 [1, 6, 21].

1.2.2. Osobnicza zdolność postrzegania zapachu

Zdolność postrzegania różnych zapachów (wrażliwość na zapachy) w reprezentatywnej dla danej populacji próbie statystycznej ludzi podobnego wieku ma postać rozkładu normalnego (patrz rys. 1.4).

Na krańcach krzywej rozkładu normalnego znajduje się po 2% populacji ludzi cierpiących na *anosmię* (niewrażliwych na zapach) oraz ludzi cierpiących na *hiperosmię* (nadwrażliwych na zapach). Ludzi czujących zapachy „normalnie” jest około 96% [8]. Jak zbadano, istnieje w obrębie populacji prawidłowość podobnego odbioru bodźców węchowych, tj. wykrywania progów wyczuwalności niezależnie od rodzaju odorantu (z tolerancją 2%).



Rys. 1.4. Krzywa rozkładu wrażliwości ludzi na zapachy [8]

Zdolność postrzegania zapachu przez człowieka zależy od jego stanu zdrowia i wieku. U ludzi starszych zdolność postrzegania zapachów zanika, ponieważ zmniejsza się liczba komórek węchowych i występuje niemożność wykonania w organizmach prawidłowej syntezy białek przezbłonowych G_{olf} w polu węchowym. Badania przeprowadzone w Szwecji przez Olofssona [15] wykazały liniowy spadek wrażliwości węchu z wiekiem u dorosłych i starszych mężczyzn oraz kobiet (od 45 do 90 lat). Spadek występował w tym przedziale wieku u około 22% kobiet i u około 16% mężczyzn.

U kobiet w wieku 45–50 lat odbiór wrażeń węchowych był od 5 do 6% mocniejszy niż u mężczyzn.

Ponadto w odbiorze zapachów dużą rolę odgrywa, jak już powiedziano, pamięć zapachów i skojarzenia. W praktyce rozpoznanie rodzaju zapachu (i jakościowych klas zapachu) jest często zakłócone, ponieważ trakt przepływu impulsów węchowych prowadzi do części mózgu najbardziej związanej z emocjami. Ponadto jednym z elementów rozpoznawania zapachów jest pamięć odpowiednich wzorców znanych z wcześniej przetartych szlaków czucia bodźców węchowych (tzw. efekt Prousta [16], który nawiązuje do twórczości Marcela Prousta „wszystko niby w Combray”).

Zarówno w przypadku gorszego stanu zdrowia, jak i palenia papierosów próg wyczuwalności zapachu podwyższa się (np. 4 razy przy paleniu papierosa) lub obniża (np. 0,8 razy przy żuciu gumy podczas testu, przez chłopca w wieku 18 lat).

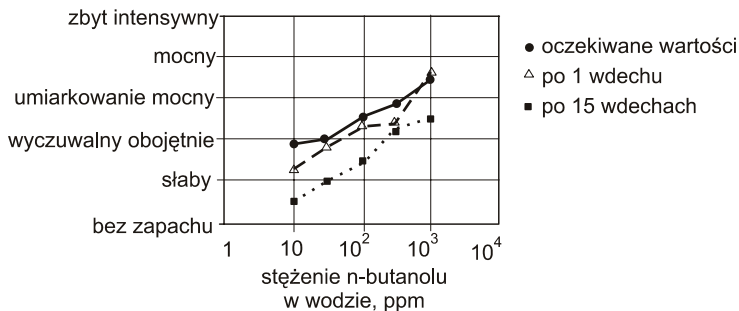
Niezależnie od tego, z uwagi na czułość sensoryczną zmysłu węchu i znane wyprzedzenie wyczuwania zapachu przed objawami np. zatrucia, czynione są próby wykorzystania postrzegania zapachu przez człowieka jako sygnału alarmowego. Próby te mają udowodnić, że postrzeganie zapachów przez ludzi zatrudnionych w zamkniętych pomieszczeniach i symptomy zdrowotne stanowiące reakcję na typowe zanieczyszczenia zapachowe pomieszczeń mogą stanowić wstępny wskaźnik jakości powietrza w pomieszczeniach i na stanowiskach pracy. Takie wykorzystanie skarg zatrudnionych pracowników biurowych na zapachy proponuje kanadyjska organizacja Health Canada [9], zalecając korzystanie z tablicy 1.1.

Traktowanie postrzegania zapachów jako wskaźników zanieczyszczenia powietrza może być jednak zawodne, ponieważ, jak ostatnio udowodniono, osobnicza zdolność postrzegania intensywności zapachu (co jest ważne szczególnie w pomiarach olfaktometrycznych) zmienia się z liczbą przeprowadzonych testów wachania zapachu nad roztworami n-butanolu, acetonu lub innych odorantów. Prawdliwość tę potwierdziły wyniki badań przeprowadzonych na Osaka University przez Takemura i in. w 2008 r. [10] na 6-osobowej grupie probantów wyszkolonych i wyselekcjonowanych (z 60-osobowej grupy) pod kątem powtarzalności ocen. Wyniki badań z Osaka University [10] zacytowano na rysunku 1.5.

W trakcie piętnastu serii badań przeprowadzonych w ciągu 5 dni stwierdzono, że krzywa teoretyczna ocen intensywności zapachu nad roztworami wodnymi n-butanolu o rosnącym stężeniu (od 1 ppm stężenia n-butanolu w wodzie do 10^4 ppm) nie pokrywa się z krzywą rzeczywistych ocen już w trzecim dniu badań. Przy ósmej serii badań zapach nad roztworem n-butanolu o stężeniu, który powinien być trochę wyczuwany (niedrażniący), wyczuwany jest jako słaby, a przy piętnastej serii, 5. dnia testowego już nawet zapach nad roztworem o stężeniu 100 ppm wyczuwany jest jako słaby, a nad roztworem 10 ppm jest niewyczuwalny.

Tablica 1.1. Zapachy i symptomy zdrowotne ich postrzegania jako wskaźniki zanieczyszczenia powietrza w budynkach [9]

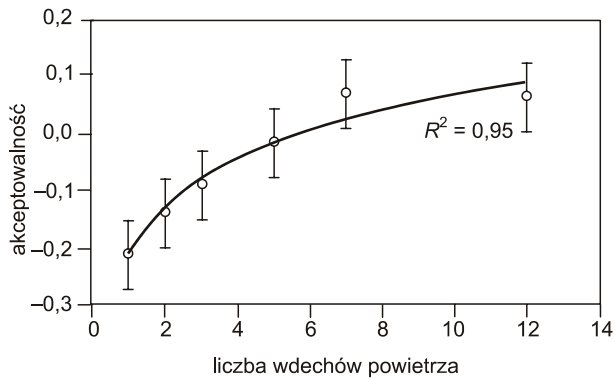
Rodzaj zapachu	Źródło lub powód zanieczyszczenia (zapachowego) powietrza w pomieszczeniu	Symptomy zdrowotne postrzegania zapachu (skargi)
Spaliny samochodowe, opary oleju silników diesla	pomieszczenia garażowe lub migracja zapachów z tych pomieszczeń, tlenek węgla	ból głowy, nudności, zawroty głowy, zmęczenie
Zapach ciała ludzkiego	zatłoczenie, słaba wentylacja (wysoki poziom dwutlenku węgla)	ból głowy, zmęczenie, duszność
Stęchły zapach	materiały zanieczyszczone mikrobiologicznie, mokre powierzchnie	symptomy alergii
Zapach chemiczny	formaldehyd, pestycydy, chemikalia	podrażnienia oczu, nosa i gardła
Zapach rozpuszczalnika	LZO – lotne związki organiczne (ang. <i>voc</i>)	skargi na smród, symptomy alergii, bóle i zawroty głowy
Mokry cement, kurz, zapach kredy	zapylenie, wadliwy system nawilżania	suche oczy, problemy oddechowe, podrażnienia nosa i gardła, podrażnienia skóry, kaszel, kichanie
Zapach gazów ściekowych	woda w studzienkach kanalizacyjnych, w umywalniach lub piwnicach	skargi na zgniły zapach



Rys. 1.5. Spadek wyczuwanej przez probantów intensywności zapachu wzorców *n*-butanolowych, w kolejnych dniach prowadzonego eksperymentu (wyniki, które uzyskali Takemura i in. [10] podano za ich uprzejmą zgodą)

- – wartości średnie „teoretyczne”, zmierzone sensorycznie przez zespół 6 oceniających;
- Δ – wartości średnie eksperymentalne zmierzone sensorycznie przez zespół 6 oceniających pierwszego dnia testowego;
- – wartości średnie zmierzone sensorycznie przez zespół 6 oceniających piątego dnia testowego, po 15 wdechach

W przypadku zanieczyszczeń powietrza przez rozmaite substancje obserwuje się spadek wrażliwości odczuć ludzi na ich zapachy wraz z czasem ekspozycji, podczas gdy w przypadku zanieczyszczeń powietrza związkami drażniącymi jest obserwowany wzrost wrażliwości sensorycznej. Gunnarssen i Fanger [20] zaobserwowali znaczącą adaptację, gdy źródło zanieczyszczeń stanowiły pochodzące od ludzi biozanieczyszczenia, umiarkowaną adaptację, gdy źródłem zanieczyszczeń był dym tytoniowy i niemal brak adaptacji, gdy powietrze było zanieczyszczone przez związki wydzielane z materiałów budowlanych. Dwa ostatnie źródła prawdopodobnie zawierały także wiele związków drażniących. Zaobserwowano, że adaptacja następowała po pierwszych 6 minutach ekspozycji, podczas gdy w badaniach Jørgensena i Vestergaarda [19], w przypadku zanieczyszczeń związkami pochodzącymi z materiałów budowlanych, zaobserwowano znaczną adaptację już w ciągu pierwszych 7 wdechów, co odpowiada czasowi ekspozycji około 24 s (rys. 1.6).



Rys. 1.6. Ocena jakości powietrza, wyrażona jako akceptowalność (patrz rozdz. 4), w zależności od liczby wdechów; znaczники wskazują odchylenia standardowe (wyniki, które uzyskali Jørgensen i Vestergaard [19], podano za ich uprzejmą zgodą)

Pomiary, w których uczestnicy dokonują oceny jakości po jednym wdechu powietrza, są trudne do prowadzenia, zwłaszcza w warunkach poligonowych. Oznacza to, że pewna adaptacja odczuć zawsze będzie obecna w trakcie pomiarów odczuwanej jakości powietrza. Dlatego też, aby umożliwić porównanie wyników różnych pomiarów jakości powietrza wewnętrznego, czas ekspozycji powinien być ujednolicony. W przypadku pomiarów w warunkach laboratoryjnych ocena jakości powietrza może być dokonana po tej samej liczbie wdechów (jednym lub dwóch), w przypadku pomiarów poligonowych czas ekspozycji może być ujednolicony poprzez nakazanie uczestnikom badań przejścia podobnej odległości przed dokonaniem oceny jakości powietrza.

Bibliografia do rozdziału 1

- [1] Leffingwell J.C.: Olfaction – Update 5. *Leffingwell Reports* 2002, Vol. 2, No. 1
- [2] Odour Measurement and Characterization. National Physical Laboratory. NPL Report COAM No. 12. Teddington UK, 2002
- [3] Amoore J.E.: The stereochemical specificities of human olfactory receptors. *Perfumery and Essential Oil Record* 1952, Vol. 43, p. 321
- [4] Kośmider J., Mazur-Chrzanowska B., Wyszynski B.: *Odory*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002
- [5] Buck L., Axel R.: A novel multigene family may encode odorant receptors a molecular basis of odor recognition, *Cell* 1991, Vol. 65, p. 175
- [6] http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2004/press.html
- [7] Abe H., Kanaya S., Komukai T., Takahashi Y., Sasaki S.: Systematization of semantic descriptions of odors, *Anal. Chim. Acta* 1990, Vol. 239, pp. 73–85
- [8] Nicolai R.E., Clanton C.J., Goodrich P.R., Jacobson L.E., Janni K.A., Johnson V.J., Lees E., Schmidt R.: Development of the Dynamic Olfactometer Laboratory, AESAE 2000
- [9] Indoor Air Quality in Office Buildings: A Technical Guide, Health Canada; <http://www.hc-sc.gc.ca/>
- [10] Takemura A., Sagara K., Yamanaka T., Kotani H., Fujimoto T.: Necessary number of subject in olfactometry measurement using flask method. Int. Conference Indoor Air 2008, Paper ID-872, Denmark, Copenhagen, August 2008
- [11] Zhou H., Homer M.L., Shevade A.V., Ryan M.A.: Nonlinear Least-Squares Based Method for Identifying Single and Mixed Contaminants in Air with an Electronic Nose. *Sensors* 2006, No. 6
- [12] Gralapp A.K. Powers W.J., Bundy D.S.: Comparison of Olfactometry, Gas Chromatography and Electronic Nose Technology for Measurement of Indoor Air from Swine Facilities, *Project No. ASL-R683*, Dept. of Agriculture and Bio-Systems Engineering, Iowa State University 2000
- [13] PN-EN 15251:2007 Kryteria środowiska wewnętrznego obejmujące warunki cieplne, jakość powietrza wewnętrznego, oświetlenie i hałas
- [14] PN-EN 13725:2007 Jakość powietrza. Oznaczanie stężenia zapachowego metodą olfaktometrii dynamicznej
- [15] Olofsson J.K.: Odor identification in Aging and Dementia: Influences of Cognition and the ApoE Gene. *Doctoral Dissertation*. Department of Psychology, Umeå University, Sweden 2008
- [16] Chu U., Downes J.: Odor-evoked autobiographical memories: physiological investigations of the Proustian Phenomena. *Chemical Senses* 2000, Vol. 25, pp. 111–116

- [17] Ache B.W., Young J.M.: Olfaction Diverse – Species, Review Conserved Principles. *Neuron* 2005, Vol. 48, November 3
- [18] Tim Jacob: Smell (Olfaction), Cardiff University, UK
<http://www.cf.ac.uk/biosi/staffinfo/jacob/teaching/sensory/olfact1.html>
- [19] Jørgensen M., Vestergaard L.: *Sensorisk karakterisering af afgasning fra byggematerialer. Udvælgelse af lavemitterende materialer og evaluering af metode* (Sensory characterization of emission from building materials. Selection of low-emitting materials and evaluation of the method), Lyngby, Laboratory of Indoor Environment and Energy, Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark (in Danish with English summary) 1998
- [20] Gunnarsen L., Fanger P.O.: Adaptation to indoor air pollution, *Energy and Buildings*, 1992, Vol. 18, pp. 43–54
- [21] The Scents of life. European Molecular Biology Organization, *EMBO reports* 2007, Vol. 8, No. 7