

文章编号: 1000-0887(1999) 12-1245-07

研究鼻道的分流作用对嗅觉反应的影响^{*}

谭文长, 吴望一, 严宗毅, 温功碧

(北京大学 力学与工程科学系, 北京 100871)

摘要: 考虑了中、下鼻道的分流作用, 把总鼻道内气流的截面平均速度描述为轴向位置的函数, 建立了不定常的二维嗅觉模型, 并得到了该模型的精确解, 精确解揭示了各生理参数之间的内在联系。计算结果表明理论结果与实验结果是一致的, 这对进一步研究嗅觉机理具有一定的参考价值。

关键词: 鼻腔; 嗅觉; 数学模型; 精确解

中图分类号: O29; TB11 **文献标识码:** A

引 言

近年来, 随着组织工程和生物力学的迅速发展, 人工嗅觉在公安、国防、缉毒等方面展现了广阔的应用前景, 对嗅觉机理的研究也引起了人们的关注^[1]。

嗅觉是机体感受化学气体引起的感觉, 在其感官内有特殊分化了的感受器, 人体嗅觉感受器是埋藏于鼻腔上端的嗅粘膜层内的嗅细胞, 嗅区在鼻腔内的位置如图 1、图 2 和图 3 所示^[2]。周围环境中的有味气体并不能迅速直接地刺激嗅细胞产生嗅觉, 它至少要经过以下四个连续的主要过程: 1. 空气中的气味分子通过鼻腔的吸气作用到达嗅区; 2. 气味分子被嗅区粘膜表面的粘液所吸附、溶解; 3. 气味分子向粘膜层内部扩散; 4. 气味分子与嗅细胞相互作用, 刺激嗅细胞放电, 产生嗅觉。早期的嗅觉模型过分强调了某一单独的中间过程, 缺少对全过程的系统刻画。Stuiver^[3]强调了气味分子在鼻腔气流中的传输过程, 首次提出了嗅觉的理论模型。虽然, 这个模型相当成功地解释了一些总的生理现象, 但是不能够用来解释嗅觉粘膜的局部生理现象。Mozell^[4]等人把鼻腔刻画为空心圆柱, 利用层析原理, 成功解释了气味分子在粘膜层内的空间分布特性。Getchel^[5]等人则详细地讨论了气味分子在粘膜层内的扩散问题。这些模型存在着一个共同的缺点, 就是把连续的嗅觉反应过程孤立开来了。近来, 徐明瑜和谭文长^[6]提出了刻画以上嗅觉反应全过程的嗅觉模型, 由于模型为一维模型, 没有考虑鼻腔结构的影响, 而把吸气流速假设为常数。Hahn 等人^[7]采用现代电子技术测量了不同吸气流率时的鼻腔内气流速度, 结果表明中、下鼻道的分流作用对总鼻道内气流速度的影响是很明显的, 当吸气入口流速为 15.4 m/s 时, 大约 30% 的吸入气流通过下鼻道流出, 40% 的气流经中鼻道流出, 只有 30% 的吸入气流流经嗅区, 可见, 通往嗅区的总鼻道内的气流流速并非常数, 而是由外向里逐段减小的。本文考虑了中、下鼻道的分流作用, 把总鼻道内气流的截面平

* 收稿日期: 1998_08_03; 修订日期: 1999_03_31

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(中博基(1997) 11 号)

作者简介: 谭文长(1966-), 男, 博士, 副教授, 已发表论文 10 余篇。

均速度描述为轴向位置的函数,把通往嗅区的总鼻道刻画为一端开口的空心圆管,建立了新的非定常流速的不定常的二维嗅觉传质模型,并通过理论分析得到了模型的精确解,并根据 Hahn 等人测得的鼻腔内的速度分布,把总鼻道内气流的截面平均速度拟合为分段减小的阶梯函数,进行了数值模拟,计算结果表明理论结果与实验结果^[8,9]是一致的,精确解定量揭示了嗅觉生理参数之间的内在关系,为进一步研究嗅觉机理提供了理论依据。

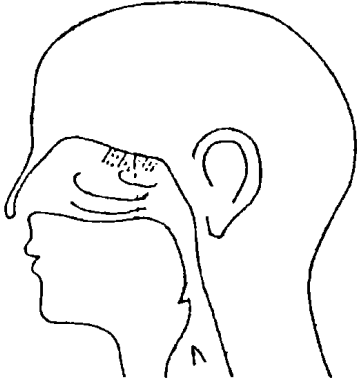


图 1 嗅区在鼻腔内的位置

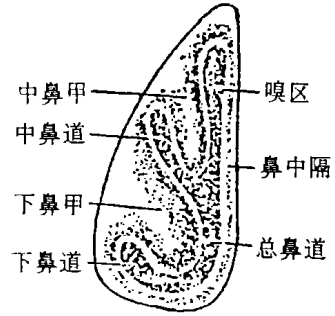


图 2 右鼻腔结构

1 建立嗅觉模型

鼻腔为一狭长腔隙,前起前鼻孔,后止后鼻孔直通鼻咽部。鼻腔的壁面为鼻腔粘膜,鼻腔粘膜分为呼吸区粘膜和嗅区粘膜。嗅区粘膜位于总鼻道的上端,上鼻甲内侧面以及相对的鼻中隔部,面积较小,距前鼻孔约 7cm 处。嗅区粘膜内含有嗅细胞,具有嗅觉功能。鼻腔总鼻道是一于前鼻孔开口、沿鼻中隔一直向上的腔隙通道,把它刻画为一端开口的空心圆管是合理的^[4]。根据上述生理特点,建立二维圆柱坐标系下的嗅觉传质模型,如图 4 所示:

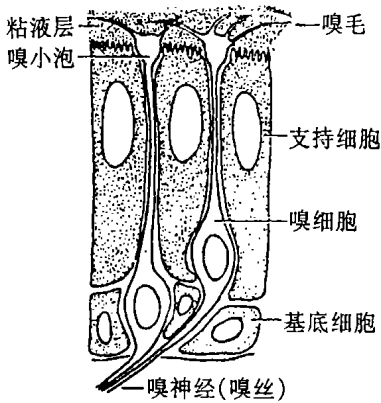


图 3 嗅粘膜层结构

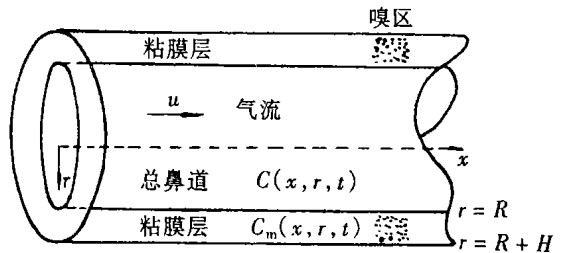


图 4 二维嗅觉模型简图

当人们用鼻吸气时,空气中的气味分子主要随携带气流沿鼻道向里传输,其轴向扩散作用与此相比是可以忽略的,同时,气流内的气味分子径向扩散,被鼻腔粘膜表面的粘液所吸附、溶解,进而向粘膜层内部扩散。根据质量守恒定律,气味分子在总鼻道内的控制方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u(x) \frac{\partial C}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$C = C_0, \quad x = 0, \quad (2)$$

$$C = 0, \quad t = 0, \quad (3)$$

这里, 设 $C(x, t)$ 表示总鼻道内气流中含有气味分子的浓度; x 代表鼻腔总鼻道的轴向坐标, 由外向里为正向; $x = 0$ 表示气流入口处, 即外鼻孔; r 为径向坐标; t 为时间. $u(x)$ 为总鼻道内的气流流速, 由于下鼻道、中鼻道的分流作用, 其值并非常数, 是轴向位置的函数; D 为气味分子在空气中的扩散系数; C_0 为气味分子在周围环境中的浓度. 在气味分子沿鼻腔向里输运的过程中, 一部分气味分子径向扩散到达鼻腔粘膜表面, 随后被鼻腔表面的粘液所吸附、溶解, 由于这层粘液非常薄, 很快达到平衡状态. 实验给出了气味分子在粘液中的浓度与在鼻腔粘膜表面气体项中的浓度的关系式^[10]:

$$C = \beta C_m^0 \quad r = R, \quad (4)$$

这里, C_m^0 为气味分子在粘液中的浓度; R 为鼻腔总鼻道的等效半径; β 为均衡分布系数, 其大小与气味分子在水中的溶解性有关.

气味分子被粘液吸附溶解后, 开始向粘膜层内部扩散. 显然, 气味分子在粘膜层中的径向浓度梯度要比轴向浓度梯度大得多, 因而气味分子在粘膜层中的轴向扩散与径向扩散相比是可以忽略的. 由于鼻腔粘膜层很薄, 气味分子在粘膜层内向下扩散的过程很快, 这个过程仅需 H^2/D_m s, 约 0.2 s, 比典型的吸气持续时间 $T = 2.5$ s 小得多. 这里, H 为粘膜层的厚度, D_m 为味分子在粘膜层中的扩散系数, 因此, 这个过程可近似为准稳态的. 粘膜层的底部有丰富的血管组织, 可把这里的气味分子迅速移去. 这样, 上述过程可用稳态扩散方程来描述:

$$\frac{\partial^2 C_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_m}{\partial r} = 0, \quad (5)$$

$$C_m = C_m^0 \quad r = R, \quad (6)$$

$$C_m = 0 \quad r = R + H, \quad (7)$$

这里, $C_m(x, r, t)$ 为气味分子在粘膜层中的浓度. 在粘膜表面处, 气味分子的径向流量相等:

$$D \frac{\partial C}{\partial r} = D_m \frac{\partial C_m}{\partial r} \quad r = R. \quad (8)$$

求解(1)~(8), 可以得到气味分子在粘膜层内的表达式 $C_m(x, r, t)$, 假设嗅区距前鼻孔的距离为 L , 嗅区的长度为 $L \leq x \leq L + d$, 嗅觉粘膜层中的厚度为 H , 典型的吸气时间为 T , 令:

$$S = \int_L^{L+d} \int_R^{R+H} \int_0^T 2\pi r C_m(x, r, t) dx dr dt, \quad (9)$$

则, S 表示了一个典型的吸气过程中进入嗅觉粘膜层内的气味分子的总数, 在生理上称为刺激. 设 R_{re} 代表嗅觉反应强度, 刺激与反应的生理方程为^[11]:

$$R_{re} = PS^m, \quad (10)$$

这里 m 为量纲为一的参数, P 为比例因子, 对同一感受器, m 和 P 的值是由气味分子的特性所决定的, 可通过实验测定. 公式(1)~(10)就是本文描述嗅觉反应主要机理的二维不定常模型.

2 求解嗅觉模型

方程(5)~(7)很容易求出:

$$C_m = \frac{C_m^0}{\ln[1 + (H/R)]} (\ln(R+H) - \ln r) \cdot \quad (11)$$

把(11)代入(4)、(8)得到:

$$C + K \frac{\partial C}{\partial r} = 0 \quad r = R, \quad (12)$$

这里, $K = [D\beta R \ln[1 + (H/R)]] / D_m$. 设 $J_0(\beta_n r)$ 为第一类零阶贝塞尔函数, β_n 为如下方程的正根:

$$J_0(\beta_n R) - K\beta_n J_1(\beta_n R) = 0, \quad (13)$$

则, 集合 $\{J_0(\beta_n r), n = 1, 2, 3, \dots\}$ 构成完备的正交系, $C(x, r, t)$ 可关于该正交系付立叶展开:

$$C(x, r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(x, t) J_0(\beta_n r), \quad (14)$$

这里, $A_n(x, t) = C_n / N(\beta_n)$, 其中:

$$C_n = \int_0^R r C J_0(\beta_n r) dr, \quad (15)$$

$$N(\beta_n) = \int_0^R r J_0^2(\beta_n r) dr. \quad (16)$$

对方程(1)、(2)、(3)两边同乘 $r J_0(\beta_n r)$, 再对 r 从 0 到 R 积分, 利用(13)得到:

$$\frac{\partial C_n}{\partial t} + u(x) \frac{\partial C_n}{\partial x} + \beta_n^2 C_n = 0, \quad (17)$$

$$C_n = C_0 b_n = C_0 \int_0^R r J_0(\beta_n r) dr \quad x = 0, \quad (18)$$

$$C_n = 0 \quad t = 0. \quad (19)$$

引入拉普拉斯变换, $w_n = \int_0^{\infty} C_n e^{-st} dt$, 得到:

$$u(x) \frac{\partial w_n}{\partial x} + (s + \beta_n^2) w_n = 0, \quad (20)$$

$$w_n = \frac{C_0 b_n}{s} \quad x = 0. \quad (21)$$

由(20)、(21)可以求得:

$$w_n = C_0 \frac{b_n}{s} \exp\left[-s \int_0^x \frac{dx}{u(x)}\right] \exp\left[-\int_0^x \frac{\beta_n^2 dx}{u(x)}\right]. \quad (22)$$

由拉普拉斯逆变换, 可得:

$$C_n = C_0 b_n \exp\left[-\int_0^x \frac{\beta_n^2 dx}{u(x)}\right] U\left[t - \int_0^x \frac{dx}{u(x)}\right], \quad (23)$$

$$C(x, r, t) = C_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n J_0(\beta_n r)}{N(\beta_n)} \exp\left[-\int_0^x \frac{\beta_n^2 dx}{u(x)}\right] U\left[t - \int_0^x \frac{dx}{u(x)}\right], \quad (24)$$

$$C_m(x, r, t) = \frac{C_0}{\beta \ln[1 + (H/R)]} \ln \frac{R+H}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n J_0(\beta_n R)}{N(\beta_n)} \times \exp\left[-\int_0^x \frac{\beta_n^2 dx}{u(x)}\right] U\left[t - \int_0^x \frac{dx}{u(x)}\right]. \quad (25)$$

3 计算结果与分析

考虑了鼻道和中鼻道的分流作用对总鼻道内气流流速的影响, Hahn^[7] 等人利用现代电

子技术,测量了入口速度 u_0 为 15.4 m/s 时鼻腔内气流的速度分布,结果如图 5 所示。

图中的曲线代表了总鼻道内不同断层截面沿直径的速度剖面;其中上面一族曲线是由下鼻道到中鼻道之间不同位置的断层截面上测得的,即经下鼻道分流作用后的速度;下面一族曲线是由中鼻道向上不同位置的断层截面上测得的,即经中鼻道分流作用后的速度;可见下鼻道和中鼻道的分流作用是明显的。为了便于分析,结合实验结果,我们可以把吸入气流在总鼻道内的截面平均速度用分段函数来表示,设 x_1 、 x_2 分别表示下鼻道和中鼻道在总鼻道壁面的开口位置,则:

$$u(x) = \begin{cases} u_0 & 0 < x \leq x_1, \\ 0.7u_0 & x_1 < x \leq x_2, \\ 0.3u_0 & x_2 < x, \end{cases} \quad (26)$$

这里, u_0 为吸入气流在鼻孔处的入口速度。把(26)、(25)代入(9)、(10),得到嗅觉反应强度与刺激之间的关系式:

$$R_{re} = p \left\{ \frac{\pi C_0 (T - t_0)}{\beta \ln(1 - H/R)} \left[RH + \frac{H^2}{2} - R^2 \ln(R + H) + R^2 \ln R \right] \sum_{n=1}^{\infty} \frac{21 b_n u_0 J_0(\beta_n R)}{70 \beta_n^2 N(\beta_n)} \times \left[1 - \exp\left[-\frac{70 d \beta_n^2}{21 u_0}\right] \exp[-t_0 \beta_n^2] \right]^m \right\}^m \quad u_0 > u_1, \quad (27)$$

这里 $t_0 = \frac{70L - 9x_1 - 40x_2}{21u_0}$, $u_1 = \frac{70L - 9x_1 - 40x_2}{21T}$ 。

当 $u_0 \leq u_1$ 时,携带气味分子的吸入气流在一次吸气过程中不能到达嗅觉区,故不能产生嗅觉, $R_{re} = 0$ 。

由(27)可以看出,对同一个体来讲,在一次吸气过程中,影响嗅觉反应的外界刺激主要有两个,即气味分子在周围环境中的浓度 C_0 和吸气速度 u_0 ,显然,嗅觉反应强度与 $(C_0)^m$ 成正比。下面主要讨论吸气速度对嗅觉反应强度的影响。设鼻孔到嗅区的距离 L 为 7 cm,嗅区的长度 d 为 1.5 cm,鼻腔粘膜层的厚度 H 为 $0.0035 \text{ cm}^{[12]}$,下鼻道到鼻孔的距离 x_1 为 2.5 cm,中鼻道到鼻孔的距离 x_2 为 5 cm,典型的吸气时间 T 为 2.5 s,总鼻道的等效半径 R 为 $0.5 \text{ cm}^{[13]}$ 。为了便于与实验结果对照,与 Rehm^[8] 一样,以吡啶为例,研究吸气流速对嗅觉反应的影响。吡啶的物性参数可由文献[11]、[12]得到, $D = 0.087 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $D_m = 7.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 5.7 \times 10^{-4}$, $P = 0.69$, $m = 0.25$ 。根据等式(27)计算了吡啶的嗅觉反应强度随入口速度的变化趋势,结果如图 6 所示。图 6 中的实线为本文的理论结果,散点为 Rehm 的实验结果,可见二者吻合得较好。为了进一步验证我们的理论结果,又与 Teghtsoonian 等人以丁烷为对象的实验结果进行了对照^[9]。丁烷的物性参数^[12]为: $D = 0.09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $D_m = 9.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 3.4 \times 10^{-4}$, $P = 1.86$, $m = 0.25$ 。根据等式(27)计算的理论与 Teghtsoonian 等人的实验结果如图 7 所示,可见二者也是一致的。观察图 6 和图 7 可以发现,在一次吸气过程中要产生嗅觉,存在一个最小吸气速度 u_1 ,当吸气速度小于这个最小吸气速度时,不能产生嗅觉,只有吸气速度大于这个最小吸气速度时,才能产生嗅觉,并随着吸气流速的增加,嗅觉反应强度

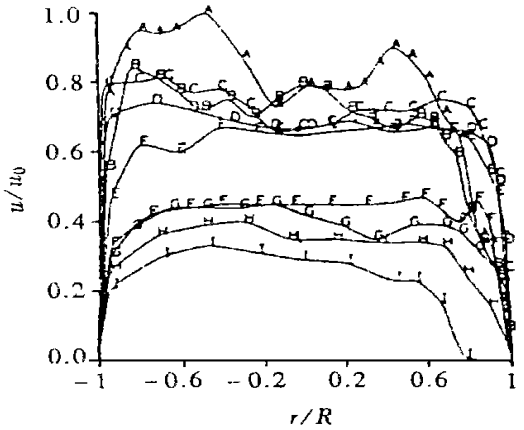


图 5 总鼻道内断层截面的径向速度分布

增大。实际上,这个最小吸气速度就是气味分子在一次吸气过程中能够到达嗅区的速度,如若不考虑下鼻道、中鼻道的分流作用,这个最小吸气速度值是较小的,但是,考虑了下鼻道、中鼻道的分流作用后,这个最小吸气速度值与平静呼吸时的入口速度相比,是不应忽略的。实际上,人们嗅味时,一般要用鼻急促地吸气,增大气流速度,可见,本文的理论结果与实际生理现象是一致的。同时,由图6和图7可以看出,要增加嗅觉反应强度,也必须增加吸气流速,可见吸气流速在嗅觉反应过程中起着重要的作用。另外,总鼻道内气味分子的携带气流,经下鼻道、中鼻道的分流作用后,传输速度大大减弱了,从而增大了气味分子从鼻孔到嗅区的传输时间,对反应灵敏的嗅觉来讲,这一过程是影响嗅觉反应潜伏期的重要部分。

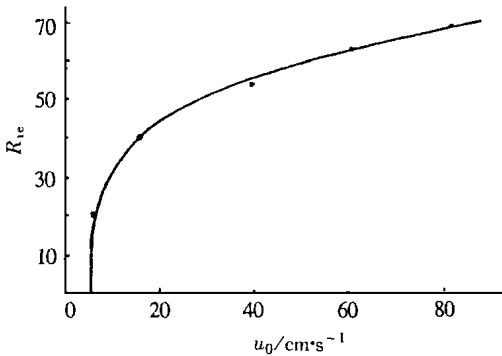


图6 吡啶的吸气流速对嗅觉反应强度的影响

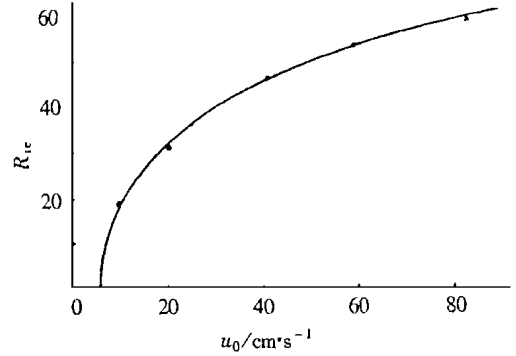


图7 丁烷的吸气流速对嗅觉反应强度的影响

总之,本文考虑了下鼻道、中鼻道的分流作用,建立了刻画嗅觉反应主要过程的二维不定常嗅觉模型,并给出了该模型的精确解。计算结果表明这一理论结果与实际生理现象是一致的,但是,精确解加深了对嗅觉传质机理的理解,同时也揭示了各生理参数之间的相互联系,为进一步研究嗅觉机理提供了有力的解析分析工具。

[参 考 文 献]

- [1] 谭文长. 嗅觉模型研究的进展[J]. 国外医学生物医学工程分册, 1996, 19(5): 256~ 263.
- [2] 黄选兆. 耳鼻咽喉科学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1997.
- [3] Stuijver M. Biophysics of the sense of smell[D]. Ph D Thesis. Groningen, The Netherlands: Rijks University, 1958, 1~ 50.
- [4] Mozell M M. Evidence for a chromatographic model of olfaction[J]. J Gen Physiol, 1970, 56(1): 46~ 58.
- [5] Getchell T V, Margolis F L, Getchell M L. Perireceptor and receptor events in vertebrate olfaction [J]. Prog Neurobiol, 1984, 23(2): 317~ 345.
- [6] 谭文长, 徐明瑜. 不定常嗅觉模型及其解[J]. 中国生物医学工程学报, 1997, 16(1): 55~ 63.
- [7] Hahn I, Scherer P W, Mozell M M. Velocity profiles measured for airflow through a large scale model of the human nasal cavity[J]. J Appl Physiol, 1993, 75(5): 2273~ 2287.
- [8] Rehn T. Perceived odor intensity as a function of air flow through the nose[J]. Sens Process, 1978, 2(2): 198~ 205.
- [9] Teghtsoonian R, Teghtsoonian M. Testing a perceptual constancy model for odor strength the effects of sniff pressure and resistance to sniffing[J]. Perception, 1984, 13(6): 743~ 752.
- [10] Hornum D E, Youngentob S L, Mezell M M. Olfactory mucosa air partitioning of odorant[J]. Brain Res, 1987, 413(1): 147~ 154.

- [11] Hahn I, Scherer P W, Mozell M M. A mass transport model of olfaction[J]. J Theoret Biol, 1994, **167**(1): 115~ 128.
- [12] Keyhani K, Scherer P W, Mozell M M. A numerical model of nasal odorant transport for the analysis of human olfaction[J]. J Theoret Biol, 1997, **186**(2): 279~ 301.
- [13] Elad D V, Liebenthal R, Wenig B L, et al. Analysis of air flow patterns in the human nose[J]. Med Biol Eng Comput, 1993, **31**(3): 585~ 592.

Effect of the Distributary of Nasal Meatuses on Olfaction

Tan Wenchang, Wu Wangyi, Yan Zongyi, Wen Gongbi

(Department of Mechanics and Engineering Science,
Peking University, Beijing 100871, P R China)

Abstract: Considering the effect of distributary of the interior meatus and middle meatus on olfaction, an unsteady two-dimensional model of olfaction has been developed with describing the mean cross-sectional velocity of odorant flow in the common meatus as a function of axis coordinate. The analytical solution is obtained, and it reveals the relation among the physiological parameters of the model. The obtained results are in agreement with those of experiments. This investigation is valuable for a research for the mechanism of olfaction.

Key words: nasal cavity; olfaction; mathematical model; analytical solution