

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА НОСОВОЙ ПОЛОСТИ ЛАБОРАТОРНОЙ МЫШИ

**В.М. Фомин\***, **А.Е. Акулов\*\***, **В.Л. Ганимедов\***, **М.П. Мошкин\*\***, **А.С.Садовский\***

\* Институт Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия  
fomin@itam.nsc.ru, ganim@itam.nsc.ru, as\_s6@mail.ru

\*\*Институт Цитологии и Генетики СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия  
akulov\_ae@ngs.ru, mmp@bionet.nsc.ru

### **Аннотация**

На основе томографических данных с помощью пакета “Fluent” создана математическая модель носа лабораторной мыши. Проведена серия расчетов и представлена визуализация течения воздуха в носовых полостях мыши. Получено, что в носовой полости исследованной мыши поток воздуха при вдохе разветвляется на две части. Получено, что при выдохе линии тока расположены так же, как и при вдохе, меняется только направление движения потока. Сделаны предположения о пространственном распределении в обонятельном эпителии различных типов рецепторов.

### **Введение.**

В последние годы активно изучаются течение воздуха в носовых полостях человека и дыхательного тракта в целом. Рассматриваемой теме было посвящено несколько отечественных работ [1, 2] и ряд зарубежных, например, [3, 4]. Исследование течения воздуха в носовой полости представляет большой интерес для современной медицины, так как сейчас активно развиваются новые методы введения лекарственных препаратов через нос ингаляционными способами в легкие или введение препаратов непосредственно на слизистую оболочку носовой полости. Названные методы могут послужить альтернативой для уже существующих способов введения лекарственных препаратов, так как они не инвазивны, более быстродействующие и проще в применении.

Данная работа посвящена изучению течения воздуха в носу лабораторной мыши. Как объект исследования лабораторные мыши были выбраны потому, что они служат первым этапом в экспериментальной проверке новых лекарств и способов их доставки. Для полного и всестороннего изучения процесса дыхания и структуры течения в носовой полости эффективно применение математического моделирования. В данной работе получены поля течений в носовых полостях при различных респираторных усилиях и приведена их визуализация.

### **Построение геометрической модели и постановка задачи.**

В данной работе течение воздуха в полости носовой лабораторной мыши изучается на основе математической модели. Поверхность носовой полости мыши восстанавливалась по серии томографических снимков, выполненных на магниторезонансном томографе (МРТ). Сканирование носовой полости мыши было проведено в Институте Цитологии и Генетики СО РАН на мощном магниторезонансном томографе (11.7 Тл), обладающем большой разрешающей способностью, в коронарных сечениях с шагом 0.5 мм, что позволило получить снимки высокого качества. На рис. 1 представлены несколько характерных

снимков. Оцифровка томограмм проводилась в пакете "Grapher". Так как при МРТ на томограммах пустоты и кости выделяются одним цветом, то перед оцифровкой приходилось проводить дополнительную обработку снимков, которая заключалась в определении места положения носовых полостей и костей, которая была выполнена согласно атласу [5]. Далее при помощи геометрического препроцессора "Gambit" коммерческого пакета "Fluent" производится построение реальной геометрии модели носовой полости, где сначала последовательно восстанавливались контуры всех коронарных сечений, которые в результате образовывали каркасную модель носовой полости, на которой потом последовательно создавались поверхности. На рис. 2 представлен общий вид геометрической модели носовых ходов лабораторной мыши. В пакете "Gambit" также производилась дискретизация области решения. Для данной модели была использована сетка Tet/Hybrid, при этом количество объемных элементов составило примерно  $3.7 \cdot 10^6$ . Один из фрагментов сетки демонстрируется на рис. 3. Следует отметить, что носовая полость мыши имеет очень сложное строение и малые линейные размеры (для рассмотренной модели: длина - 10.5 мм, максимальная ширина - 4 мм и максимальная высота - 4.6 мм). Общий объем носовой полости равен  $17.4 \cdot 10^{-3}$  мл.

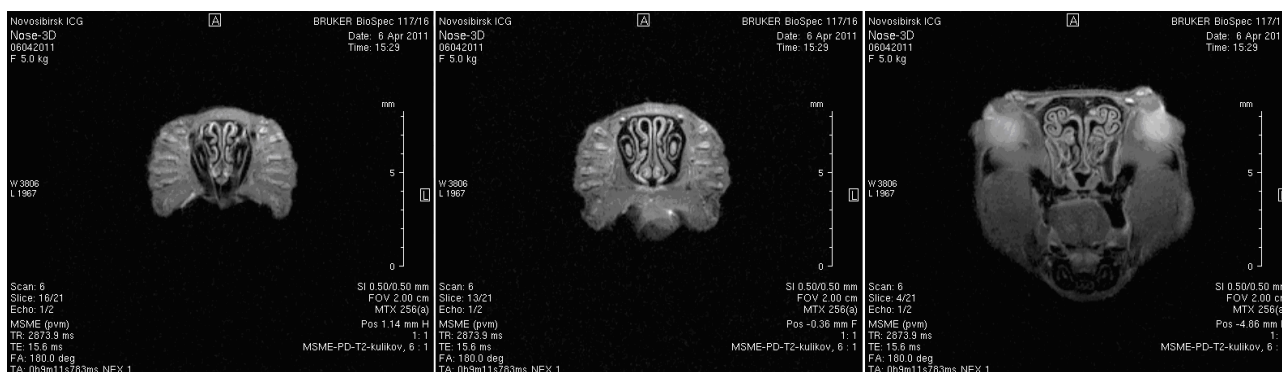


Рис. 1.

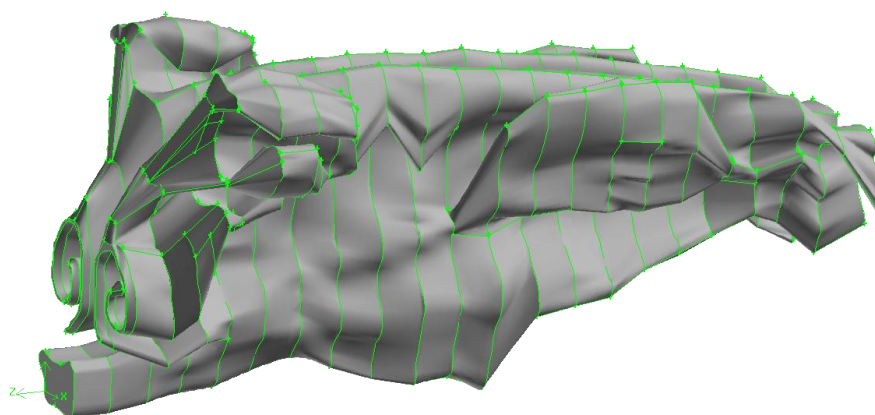


Рис. 2.

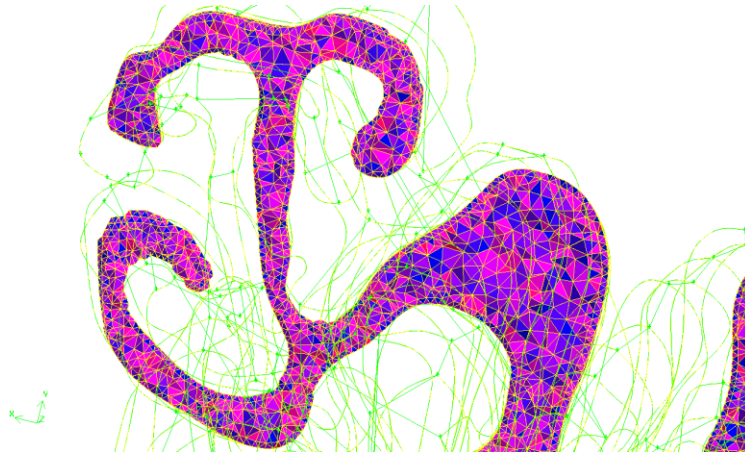


Рис. 3.

Стационарное течение воздуха в носовых полостях лабораторной мыши на режимах вдоха и выдоха рассчитано с помощью газодинамического пакета "Fluent". В расчетах использовалась левая прямоугольная система координат, в которой ось  $Z$  направлена от входа перпендикулярно коронарным сечениям, а ось  $Y$  – вертикально вверх. Задача о течении воздуха в носовой полости мыши численно решалась на основе уравнений Навье – Стокса для несжимаемого газа, при этом постулировался ламинарный режим течения.

На стенках канала ставились условия прилипания. В выходном сечении задавался перепад давления между входом и выходом: отрицательный – в случае вдоха, положительный – в случае выдоха. Расчеты проведены для перепадов давления от 1 до 20 Па. Решение получено методом установления, константа установления для всех искомых компонент выбрана одинаковой и равной  $10^{-4}$ .

### **Результаты расчетов.**

На основании численных исследований была проведена визуализация течения воздуха в носовой полости лабораторной мыши. На рис. 4 показано распределение модуля скорости при создаваемом респираторном усилии, равном 10 Па. Оно представлено в виде набора последовательных коронарных сечений с шагом 0.5 мм,

По результатам расчётов установлено, что в носовой полости мыши во время вдоха формируются два основных потока воздуха. Также следует отметить, что распределения скорости потока воздуха в различных частях носовой полости значительно неравномерно. Основной поток воздуха идет по нижней и средней частям носовой полости по кратчайшему направлению к трахее, здесь воздух движется с максимальными скоростями. Но значительная часть воздуха поступает по верхней части носовой полости в обонятельную область, где значения скорости намного меньше. На рис. 5, изображающем линии тока во время вдоха, хорошо видно, как основной поток воздуха идёт по средней и нижней частям носовой полости по направлению к трахее, а второй - движется по верхней части носовой полости и проходит через замкнутую область в затылочной части, где полностью разворачивается, а затем, достигнув входа в трахею, вновь разворачивается и уходит в неё.

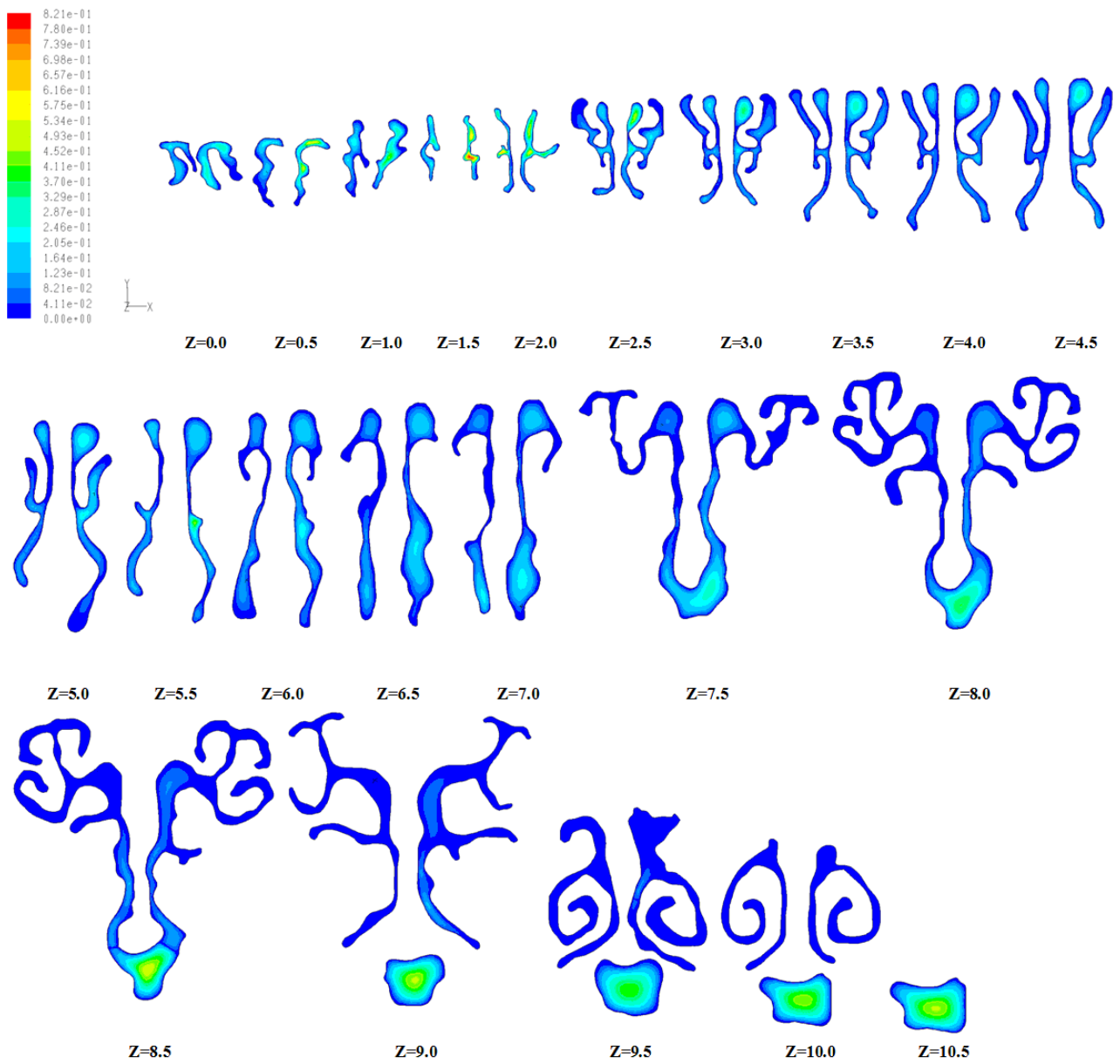


Рис. 4.

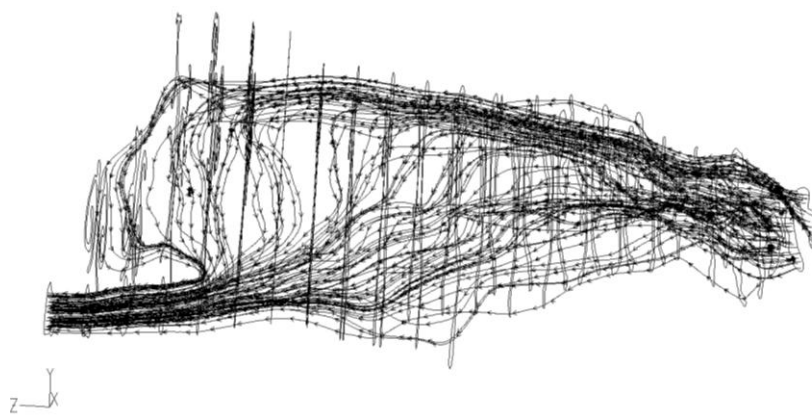


Рис. 5. Линии тока во время вдоха.

Интересно, что линии тока для режима выдоха близки по траекториям к линиям тока на вдохе с той разницей, что воздух движется в обратном направлении - см. рис. 6.

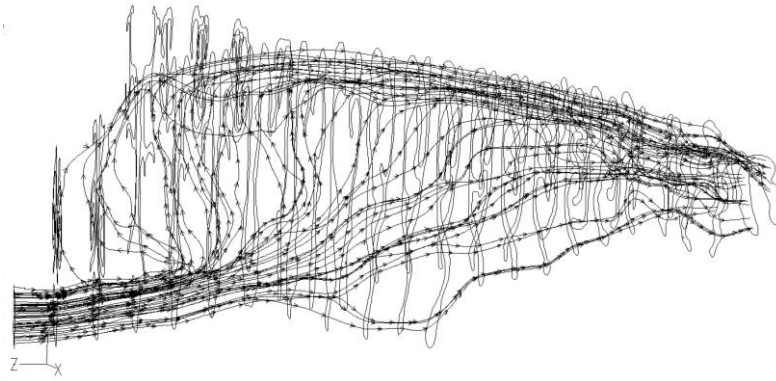


Рис. 6. Линии тока во время выдоха.

Благодаря тому, что достаточно большая часть вдыхаемого воздуха попадает в замкнутую затылочную область, где расположена основная часть обонятельных рецепторов - мышцы обладают очень хорошим обонянием. Также следует отметить, что в затылочной области практически не происходит застоя воздуха, хотя в этой области поток движется со скоростями намного меньше чем в основной части носовой полости, что показано на рис. 7. На рис. 7 изображено распределение  $V_z$  - компоненты (продольной компоненты) скорости, которая отражает основную транспортную функцию носовой полости. Распределения скорости показаны в в двух коронарных сечениях, находящихся на расстоянии 9.0 мм (слева) и 9.5 мм (справа) от начала координат, которое соответствует началу носа. Из представленного рисунка также видно, что в затылочной части носовой полости мышцы медленнее всего поток воздуха движется в боковых лабиринтах, но там также не наблюдается интенсивных застойных зон. Необходимо отметить, что у рассматриваемой особи отсутствует симметрия носовых ходов: по правой части носовой полости поток воздуха движется гораздо быстрее, чем по левой.

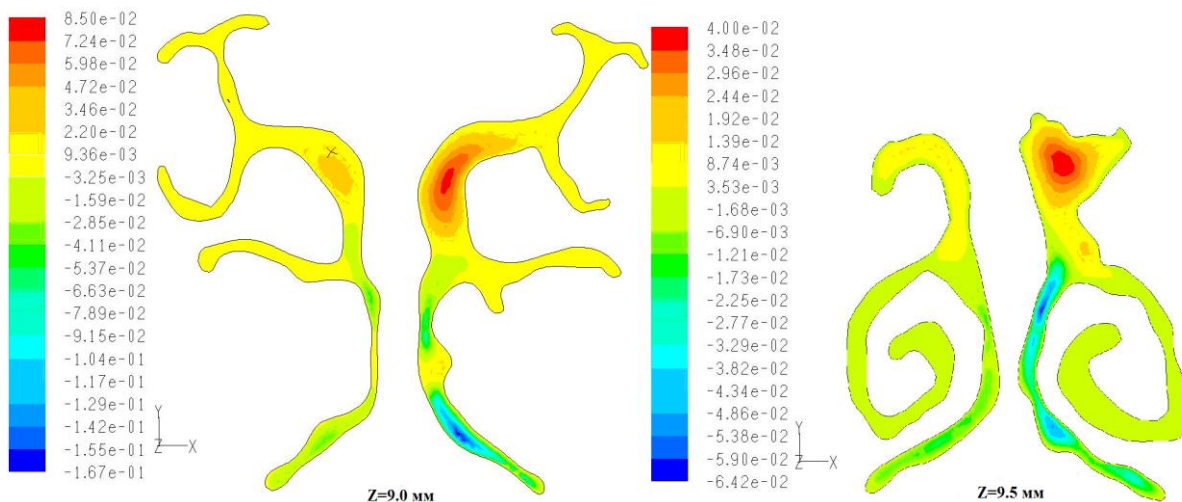


Рис. 7.

При входе вместе с движущимся потоком воздуха в замкнутую затылочную область попадают различные запахи, которые воспринимаются обонятельными рецепторами, а при выдохе эти запахи удаляются из этой области вместе с потоком выдыхаемого воздуха. Следовательно, можно заключить, что в замкнутой затылочной области происходит смена

воздуха в каждом дыхательном цикле, что в результате приводит к тому, что мышь получает обновленную информацию об окружающих её запахах при каждом вдохе. Исходя из данных о неравномерности потока воздуха в затылочной части носовой полости мыши можно сделать выводы о распределении в обонятельном эпителии рецепторов различных типов, так в боковых лабиринтах этой области находятся по видимому медленные рецепторы, так как там небольшие скорости, а в центральной части более быстрые рецепторы.

Рис. 8, на котором представлены распределения модуля скорости для вдоха (а) и выдоха (б) при перепаде давления  $\Delta P=20$  Па, демонстрирует "обратимость" движения воздуха. Разница визуально не просматривается. Только в первом случае поток движется справа налево, а во втором - в обратную сторону.

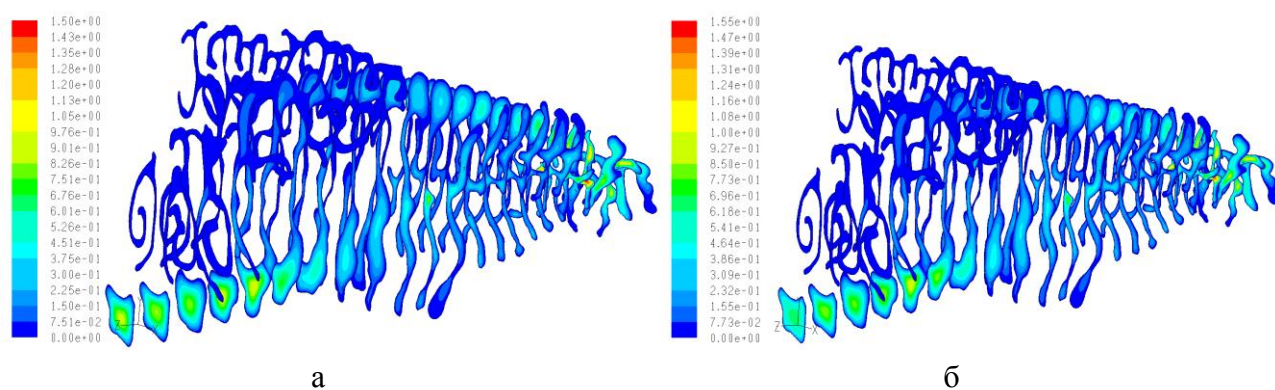


Рис. 8. Модуль скорости на вдохе (а) и выдохе (б).  $\Delta P=20$  Па.

Чтобы подтвердить, что это разные варианты, для наглядности на рис. 9 для них приведено распределение статического давления.

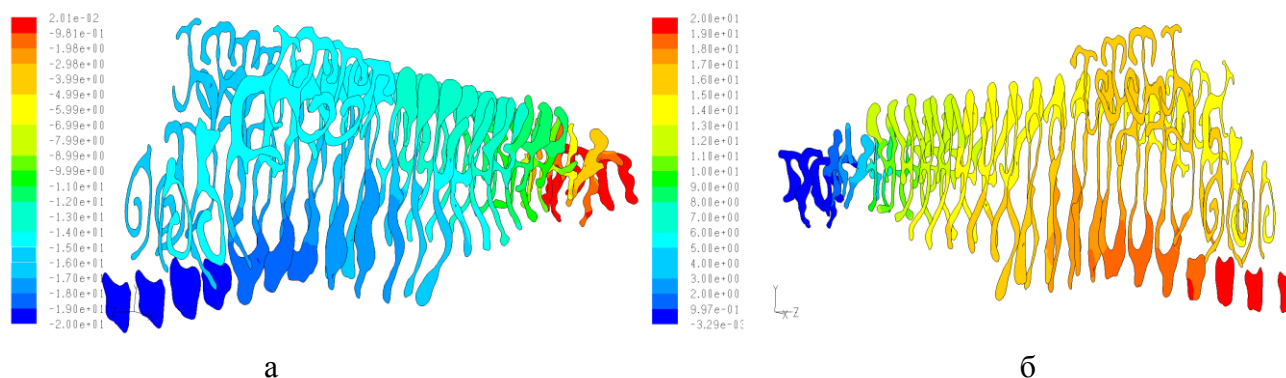


Рис. 9. Распределение статического давления на вдохе (а) и выдохе (б).  $\Delta P =20$  Па.

На рис. 10 представлены результаты расчета удельного расхода воздуха от создаваемого респираторного усилия  $\Delta P$  как отдельно для левой (L) и правой (R) носовых полостей, так и для всей носовой полости. Из рис. 10. видно, что расход воздуха через носовую полость во время вдоха и во время выдоха остается постоянным. Но при этом расход через левую носовую полость во время дыхания меньше, чем через правую примерно на 52 %, что, вероятно, вызвано анатомическими особенностями в строении носовых полостей мыши.

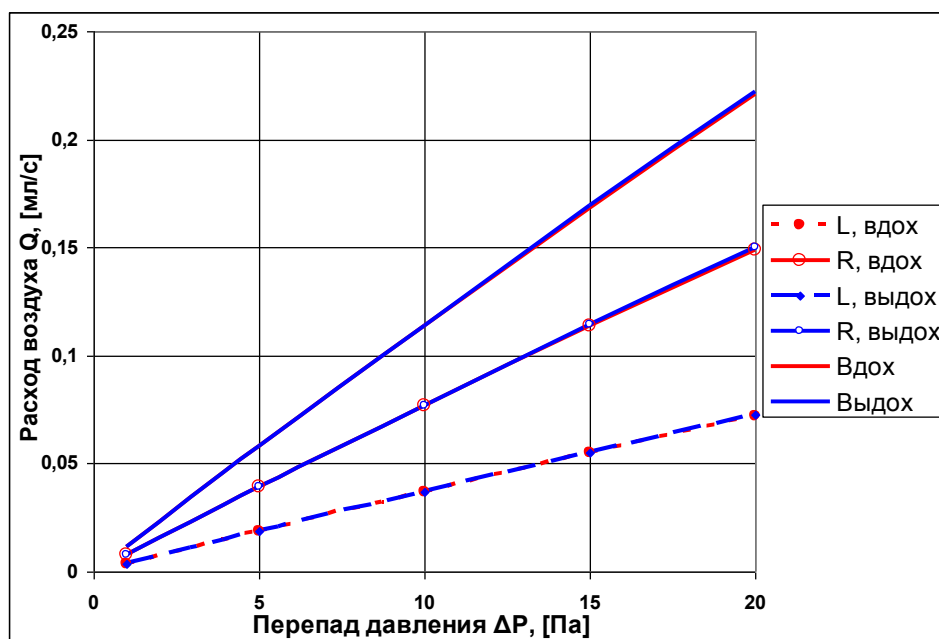


Рис. 10.

Графики на рис. 10 подтверждают обратимость течения на вдохе и выдохе. Возможно, здесь сказывается горизонтальное, в отличие от человека, расположение входа в носовую полость и выхода из нее. Возможно, это - особенность исследованного нами единственного экземпляра. Если будет продолжение исследований, можно будет ответить на вопрос, насколько это характерно для носовой полости мышей. Возможно, что такая "обратимость" при дыхании создает для мыши оптимальные условия для восприятия обонятельными рецепторами окружающих запахов и является нормой.

Выявленные неоднородности в скорости обмена воздуха в различных отделах носовой полости, наряду с прикладным использованием при оптимизации ингаляционной терапии, ставят вопрос функциональной значимости пространственного распределения в обонятельном эпителии разных типов рецепторов для хемосигналов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Фомин В.М., Ветлущкий В.Н., Ганимедов В.Л., Мучная М.И., Шепеленко В.Н., Мельников М.Н., Савина А.А. Исследование течения воздуха в носовой полости человека // ПМТФ, 2010, т. 51, № 2, с. 107-115.
- [2]. Ганимедов В.Л., Мучная М.И., Шепеленко В.Н., Садовский А.С. Численное исследование течения воздуха в дыхательном тракте человека // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2011, №4, Часть 2, с. 410-412.
- [3]. D. Wexler, R. Segal, J. Kimbell. Aerodynamic Effects of Inferior Turbinate Reduction. Computational Fluid Dynamics Simulation // Arch Otolaryngol Head Neck Surg, 2005, v. 131, No. 12, pp. 1102-1107.
- [4]. D. J. Doorly, D. J. Taylor, A. M. Gambaruto, R. C. Schroter and N. Tolley. Nasal architecture: form and flow // Phil. Trans. R. Soc. A, 2008, v. 366, pp. 3225-3246.
- [5]. I. Bab, C. Hajbi-Yonissi, Y. Gabet, R. Müller. Micro-Tomographic Atlas of the Mouse Skeleton. 2007.