

ФОРМА НОСОВОЙ ПОЛОСТИ И СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В НОСУ ЧЕЛОВЕКА. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.М. Фомин, В.Л. Ганимедов, М.И. Мучная, А.С. Садовский, В.Н. Шепеленко

*Институт Теоретической и Прикладной Механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
630090 Новосибирск, Россия*

Аннотация

В рамках уравнений Навье - Стокса с помощью пакета прикладных программ "FLUENT" проведены расчеты течения воздуха в носовой полости человека при различных перепадах давления на режимах вдоха и выдоха. Получены поля скорости, давления, температуры, величина расхода воздуха. Проведен анализ полученных результатов в плане влияния строения носовой полости на структуру течения. Отмечено чрезвычайное разнообразие форм и структур. Предпринята попытка некоторого обобщения.

Нос находится в начале дыхательного тракта человека и играет важную роль в транспортировке воздуха в легкие, в очищении воздуха от вредных примесей, в доставке лекарственных веществ в организм. Физические недостатки и болезни носовой полости затрудняют выполнение этих функций. Для адекватного лечения и хирургического вмешательства, чтобы избежать нежелательных осложнений, необходимо хорошо знать строение носовой полости и картину движения в ней вдыхаемого газа. Сложное анатомическое строение носа является препятствием для детального изучения картины течения воздуха с помощью традиционных методов визуализации и диагностики потоков. Альтернативой им является математическое моделирование, с помощью которого можно построить геометрическую копию носовой полости и подробнейшим образом исследовать течение в ней при различных условиях, можно провести виртуальную операцию и оценить ее последствия.

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования течения в носовой полости человека с помощью пакета прикладных программ "FLUENT". На его основе с привлечением стандартного пакета "GRAPHER" построены геометрические модели носовых полостей, восстановленные по сериям томографических снимков носа в коронарных сечениях для 15 конкретных людей. Детали построения и постановку задачи и можно найти в работе [1]. Но в отличие от [1], где рассматривались отдельно правая и левая носовые полости, в данной работе обсуждаются результаты расчетов, выполненных для объединенной носовой полости от ноздрей до хоаны (место, где соединяются правая и левая половины) с переходом в носоглотку. На рис. 1 показаны построенные геометрические модели для двух вариантов носовых полостей. Они наглядно демонстрируют сложность геометрии носовой полости человека. Для обеспечения точности расчетов в подобной области строилась расчетная сетка, содержащая до $3,5 \times 10^6$ объемных ячеек.

В расчетах использовалась левая прямоугольная система координат, в которой ось Y направлена вертикально вверх, ось Z направлена от входа к носоглотке вдоль основного направления потока. Сечения носовой полости, перпендикулярные оси Z , называются коронарными, а параллельные плоскости YZ - сагиттальными сечениями.

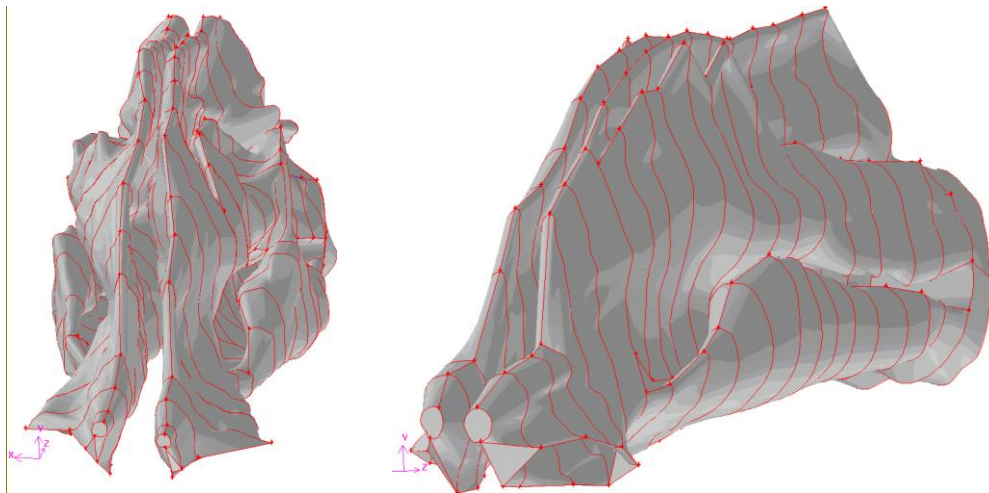


Рис. 1

Задача о течении воздуха в носовой полости численно решалась на основе уравнений Навье – Стокса для несжимаемого газа, при этом постулировался турбулентный режим течения. На стенках канала ставились условия прилипания для скорости и изотермичности для температуры. В выходном сечении задавался перепад давления между входом и выходом: отрицательный – в случае вдоха, положительный – в случае выдоха. Расчеты проводились для перепадов давления от 10 до 150 Па. Решение находится методом установления, константа установления для всех компонент равна 10^{-4} .

На рис. 2 показано полученное в расчетах распределение модуля скорости для одного из вариантов на режиме вдоха при перепаде давления $\Delta p = 150$ Па. На рис. 3 для другого варианта приведено распределение Z-компоненты скорости V_z на режиме вдоха при перепаде давления $\Delta p = 50$ Па. Картина течения представлена в различных ракурсах с помощью ряда равноотстоящих друг от друга коронарных сечений. Эти иллюстрации дают общее представление о распределении скорости, о застойных зонах, об областях, где скорость имеет максимальное значение. Также видно, что из-за отличия в геометрии правой и левой половин носовой полости течение в них существенно различается.

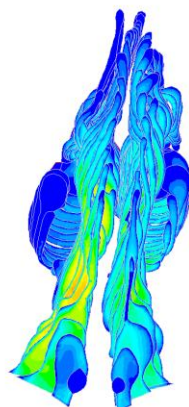
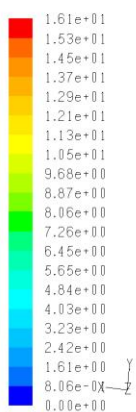


Рис. 2

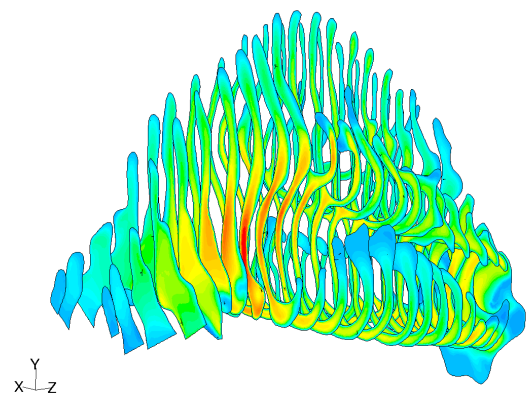
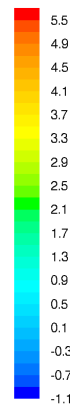


Рис. 3

Более наглядно различия между правой и левой половинами носовой полости, а также различия носовых полостей разных людей демонстрирует рис. 4, где приведены распределения Z-компоненты скорости при $\Delta p = 50$ Па в ряде последовательных коронарных сечений для пяти различных носов. Для демонстрации были выбраны наиболее характерные случаи.

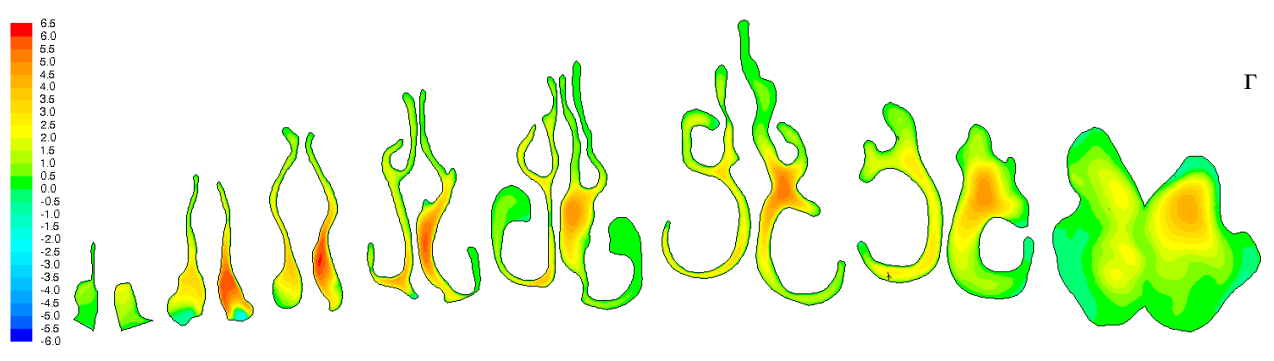
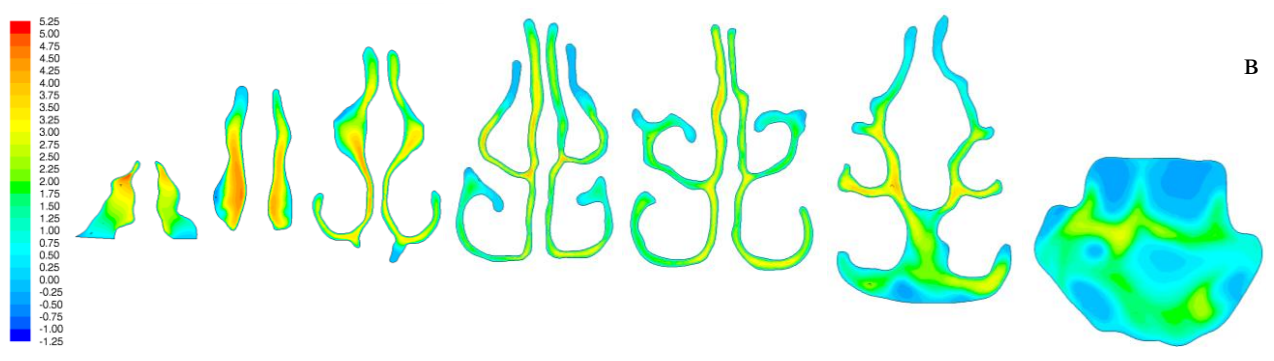
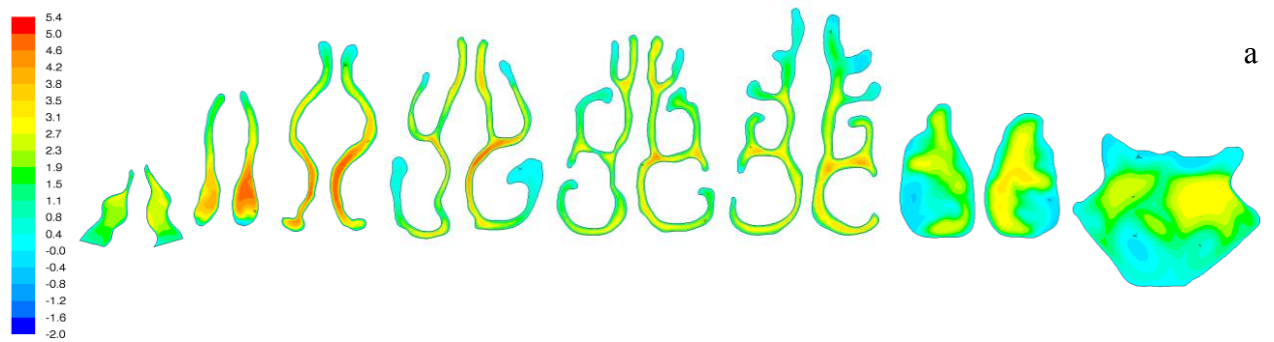


Рис. 4

Можно видеть, что носовая полость может быть расположена почти горизонтально (случай "а"), а также с наклоном от ноздрей до хоаны: отрицательным ("б" и "в") или положительным ("г" и "д"), причем в последнем случае наклон сильно выражен.

Для последующего сравнения геометрии носовых полостей и течения в них понадобятся ринологические термины, для этого воспользуемся цитатой из работы [1]. "Полость носа разделена перегородкой на две половины – правую и левую. На противоположных перегородке стенках полости носа имеются практически горизонтальные, идущие почти параллельно костные выступы, покрытые слизистой оболочкой – носовые раковины (верхняя, средняя и нижняя, причем верхняя раковина имеется не всегда). Пространства, ограниченные боковой стенкой носа и этими раковинами, называются носовыми ходами (соответственно верхний, средний и нижний носовые ходы). Пространство между перегородкой носа и боковой поверхностью носовых раковин называется общим носовым ходом." Добавим здесь, что наиболее узкое место в начале носовой полости называется носовым клапаном. Отметим также, что на рис. 4 линейные срезы в первых сечениях соответствуют ноздрям.

В рассмотренных нами 15 случаях верхние носовые ходы встретились трижды, в том числе, в случае "а". Носовая перегородка, как правило, в первой половине носовой полости толще, а по мере продвижения вдоль носового хода становится тоньше. В половине рассмотренных случаев перегородка была заметно искривлена (см. "б" и "г"). Правая и левая половины носовой полости могут существенно отличаться по ширине (см. "б" и "г"), но это необязательно связано с искривлением перегородки, как в приведенных примерах. Длина носовой полости от кончика носа до хоаны, в основном, варьировалась от 7 см (например, "б") до 8 см ("а", "в", "д"), но достигала и 10 см ("г"). Объем носовой полости V составлял от $1,9 \times 10^{-5}$ до $2,9 \times 10^{-5}$ м³. Например, $V=2,0 \times 10^{-5}$ м³ для случая "д", $V=2,5 \times 10^{-5}$ м³ для случая "а". При этом объем правой и левой половин может быть практически одинаков, но может и заметно различаться. Для демонстрируемых случаев "а"- "д" различие составляет, соответственно, 16%, 34%, 16%, 24% и 8%. Площадь поверхности носовой полости варьируется от 0,015 м² ("б") до 0,22 м² ("г"). Максимальное различие в площадях правой и левой половин составляло 8% ("б").

Картина течения во всех носовых полостях имеет схожие черты. Поток воздуха распространяется, в основном, по общему носовому ходу и по прилегающим к нему областям нижнего и среднего боковых ходов. Среднее значение продольной скорости здесь при $\Delta p = 50$ Па составляет $2 \div 4$ м/с. На кончике носа с внутренней стороны, в оконечностях боковых ходов и в узких верхушках общего хода имеются застойные зоны со скоростями, близкими к нулю, имеющими как положительное, так и отрицательное значения. Максимальная продольная скорость наблюдается в области носового клапана, за исключением случая "д", где поток разгоняется до максимальной скорости в середине носовой полости. Можно предположить, что это исключение обусловлено исключительным строением данной носовой полости с большим отклонением от горизонтального положения. Значение максимальной продольной скорости при $\Delta p = 50$ Па в рассмотренных вариантах составляет от 5 до 9 м/с.

В трех вариантах отмечено обширное возвратное течение в нижнем боковом ходу. Эти варианты отличались от других вариантов тем, что общий носовой ход был очень широк. Для варианта "б" при $\Delta p = 50$ Па на рис. 5 в коронарных сечениях приведено распределение компоненты скорости V_z только в диапазоне отрицательных значений. Видно, что только в

левой половине носовой полости с широким общим ходом (см. рис. 4) воздух при входе в нижнем боковом ходу движется в обратном направлении со скоростью $0,2 \div 0,3$ м/с.

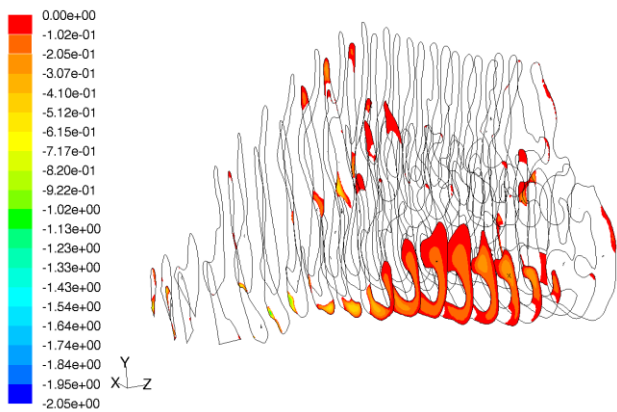


Рис. 5

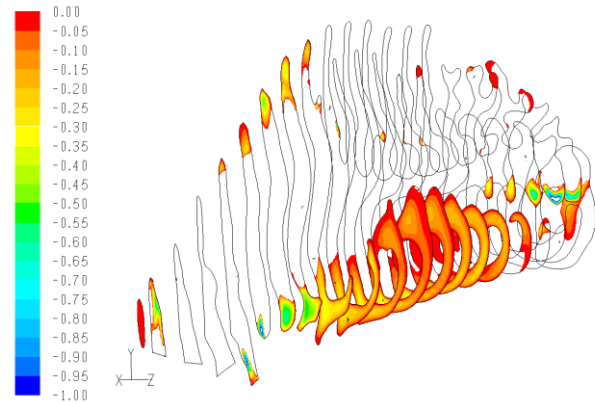


Рис. 6

На рис. 6 распределение для V_z более отчетливо видно, где оно приведено для одной левой половины носовой полости другого варианта, не фигурирующего на рис. 4. Анализ расчетов показал, что такое распределение скорости тесно связано с распределением температуры. Чем шире основной ход, тем медленнее происходит теплообмен между вдыхаемым воздухом и стенками носовой полости и тем вероятнее, что холодный воздух может поступить в носоглотку. Но природой, видимо, предусмотрена защита в виде возвратного течения по нижнему боковому ходу, где воздух прогревается, внося свой вклад в общий нагрев носовой полости.

В зонах возвратного течения значение продольной скорости при $\Delta p = 50$ Па во всех рассмотренных вариантах варьируется от -1 до -6 м/с. На рис. 4 минимальное значение V_z , зафиксированное на шкале, на самих изображениях коронарных сечений не просматривается. Оказалось, что области с минимальным значением V_z располагаются внутри кончика носа или сразу за ноздрей и очень малы по размеру, так что, как правило, не попадают на опорные коронарные сечения, выбранные для иллюстрации. На рис. 4 часть этой области можно заметить на втором коронарном сечении варианта "д". Рис. 7 - 11 дают представление о поведении течения в этих областях, для вариантов "а"-"д" на них представлены поля скорости в характерных сагиттальных сечениях.

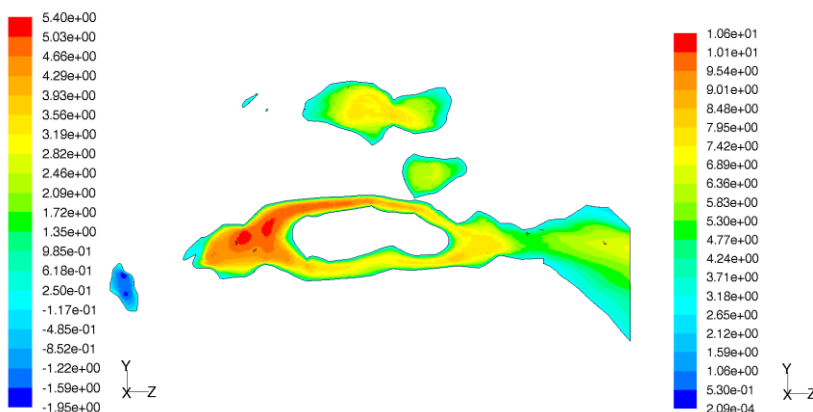


Рис. 7

В варианте "а" минимальное значение скорости зафиксировано внутри кончика носа, его фрагмент виден слева на рис. 7, изображающем распределение V_z в одном из

сагиттальных сечений носовой полости. Справа на рис. 7 этот фрагмент дан в увеличенном виде с распределением вектора скорости. Видно, что при вдохе образуется вихрь внутри кончика носа, в котором воздух нагревается и, по-видимому, частично очищается.

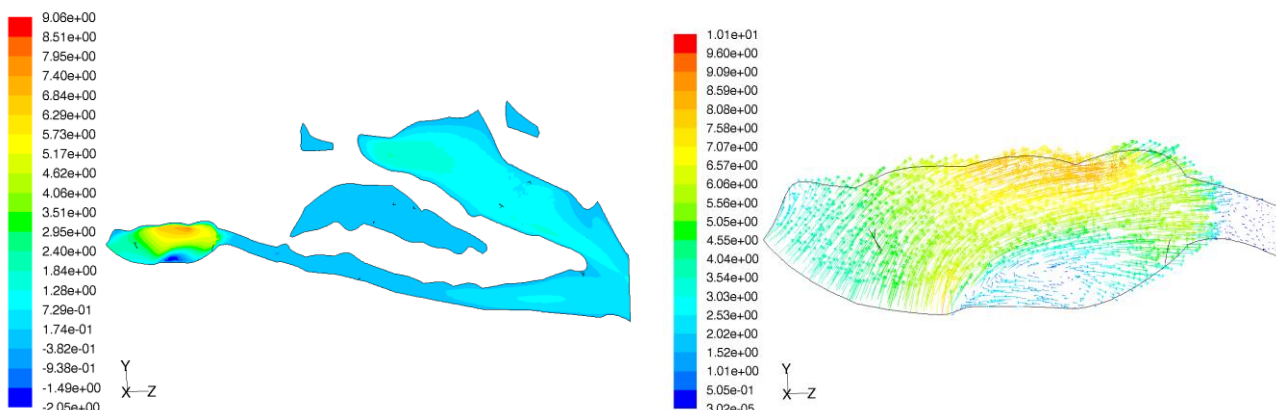


Рис. 8

На рис. 8 приведены аналогичные картины течения для варианта "б", левая половина. Здесь минимальная скорость достигается в конце вестибюля носа, здесь также образуется вихрь, выполняя роль прогрева и очищения. На рис. 9 и 10 приведены фрагменты сагиттального сечения в районе ноздри левой половины носовой полости, соответственно, для вариантов "в" и "г", на которых видны возвратные течения внутри кончика носа и сразу за ноздрей.

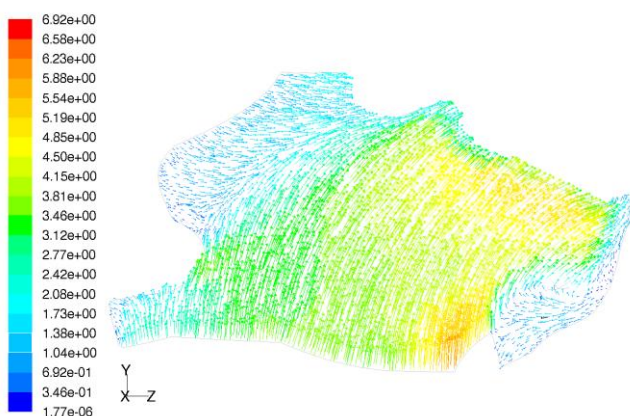


Рис. 9

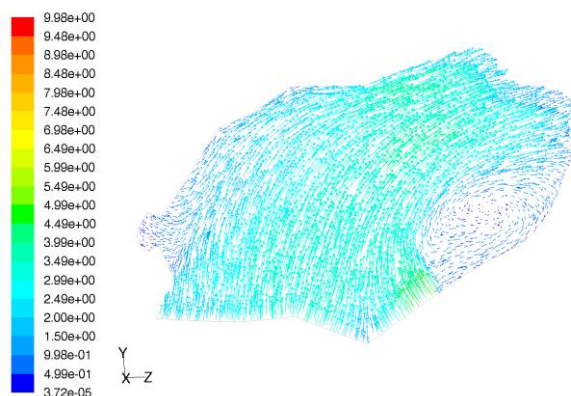


Рис. 10

Вход в правую половину носовой полости варианта "г" имеет такое строение, что образуемый за ноздрей вихрь оттесняет вдыхаемый воздух от кратчайшего пути попадания в носовую полость, играя, по-видимому, также предохраняющую роль. Это продемонстрировано на рис. 11. Аналогичная картина течения наблюдается в левой половине носовой полости варианта "д" - см. рис. 12, где приведены векторные поля скорости в сагиттальных сечениях, отстоящих друг от друга на 1 мм. Для полноты картины на рис. 13 показано поле течения в районе входа в правую половину варианта "д". Приведенные примеры, на наш взгляд, показывают защитную функцию геометрического строения входного участка носа.

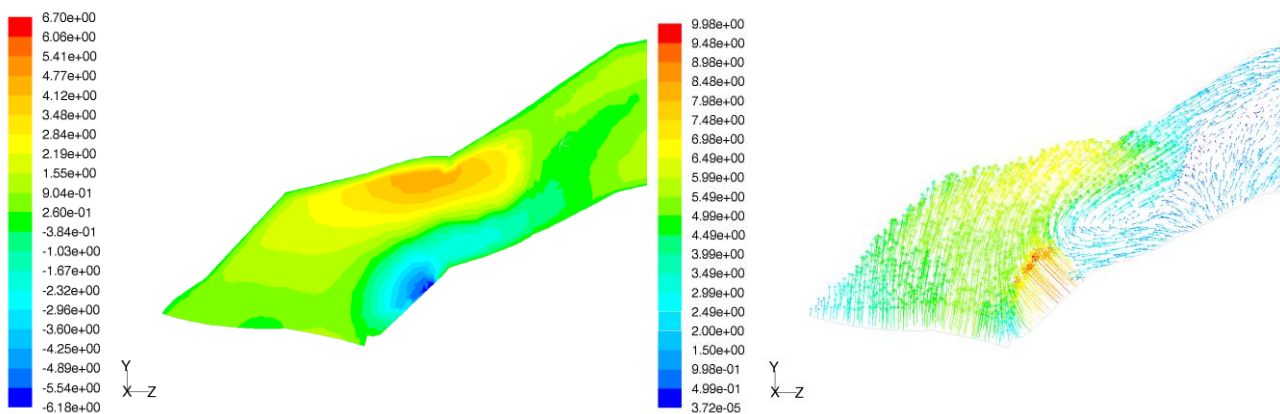


Рис. 11

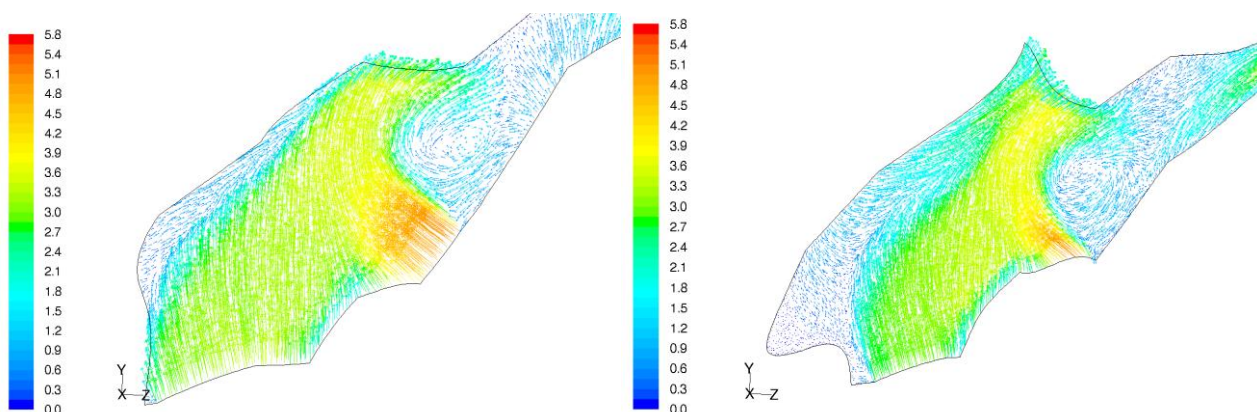


Рис. 12

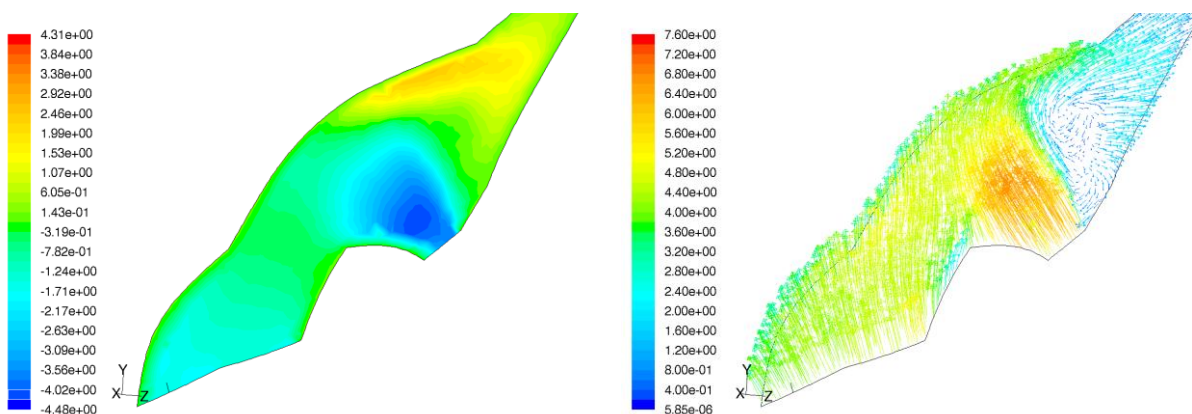


Рис. 13

В поисках общих закономерностей течения в носовых полостях различных людей проведено сравнение интегральных характеристик - зависимостей объемного расхода воздуха от перепада давления в носовой полости. На рис. 14 приведены эти зависимости для 13 человек, где синим цветом обозначены левые половины полости, красным - правые. Кривые на графике занумерованы в порядке увеличения объема полости. Видно, что хотя тенденция к увеличению расхода при увеличении объема наблюдается, строгой зависимости нет. Разброс в величине расхода относительно осредненного значения показан на рис. 15 при двух значениях перепада давления $\Delta p = 10$ Па и $\Delta p = 50$ Па.

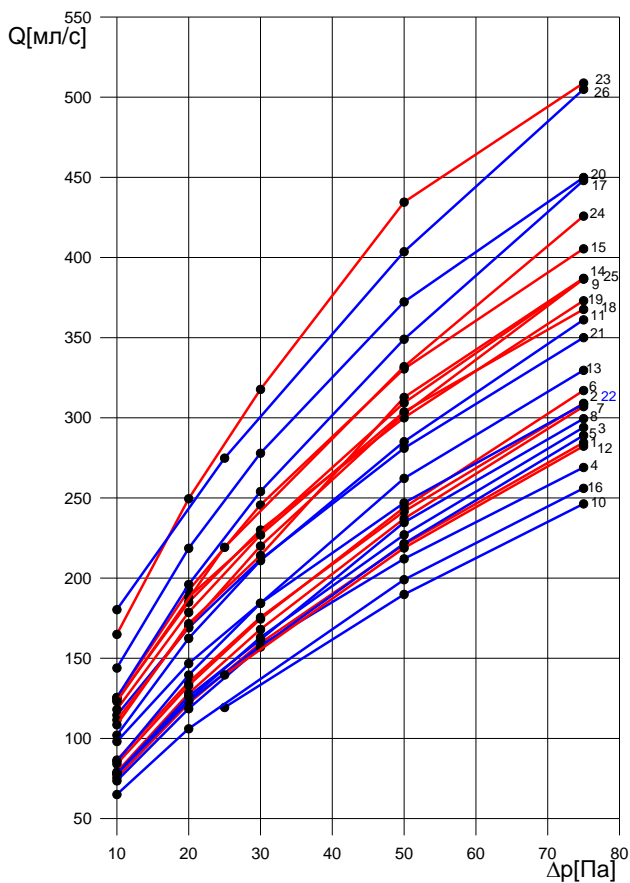


Рис. 14

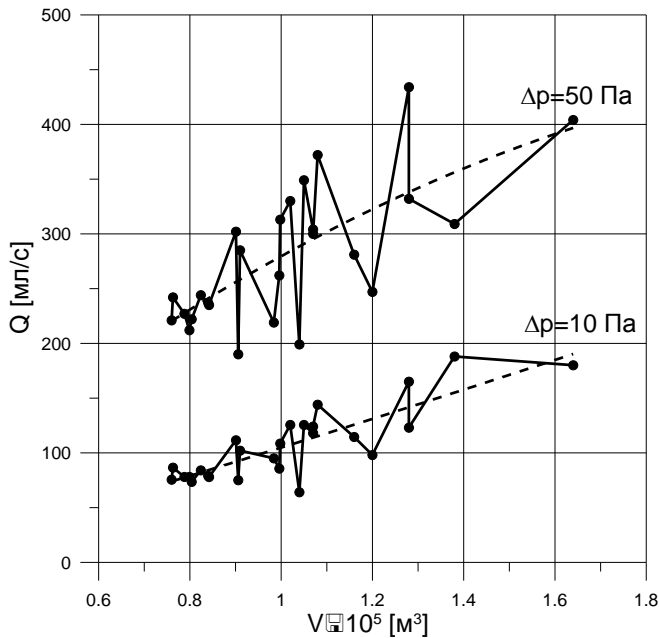


Рис. 15

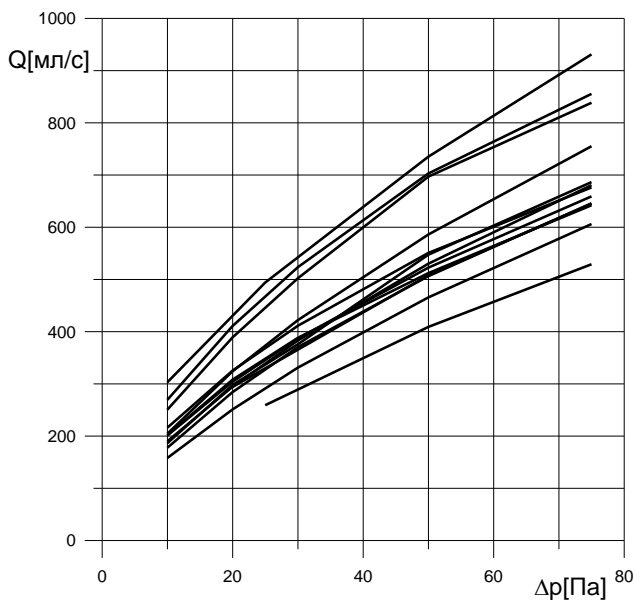


Рис. 16

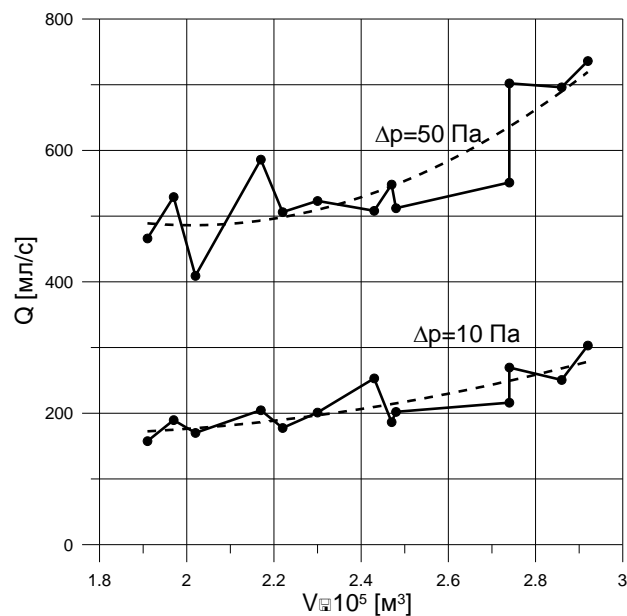


Рис. 17

Аналогичные характеристики для суммарного значения расхода в объединенных носовых полостях этих 13 людей приведены на рис. 16 и 17. Видно, что в суммарных характеристиках разброс заметно меньше. Попытки связать значение величины расхода с площадью внутренней поверхности носа или с комбинацией объем/площадь не привели к более упорядоченным распределениям.

Приведем еще несколько графиков зависимости объемного расхода от перепада давления для сравнения пропускной способности правой и левой половин носовой полости при вдохе и выдохе. В графиках на рис. 18 используются следующие обозначения: красный цвет обозначает правую половину, синий - левую, сплошная линия обозначает вдох, штриховая - выдох.

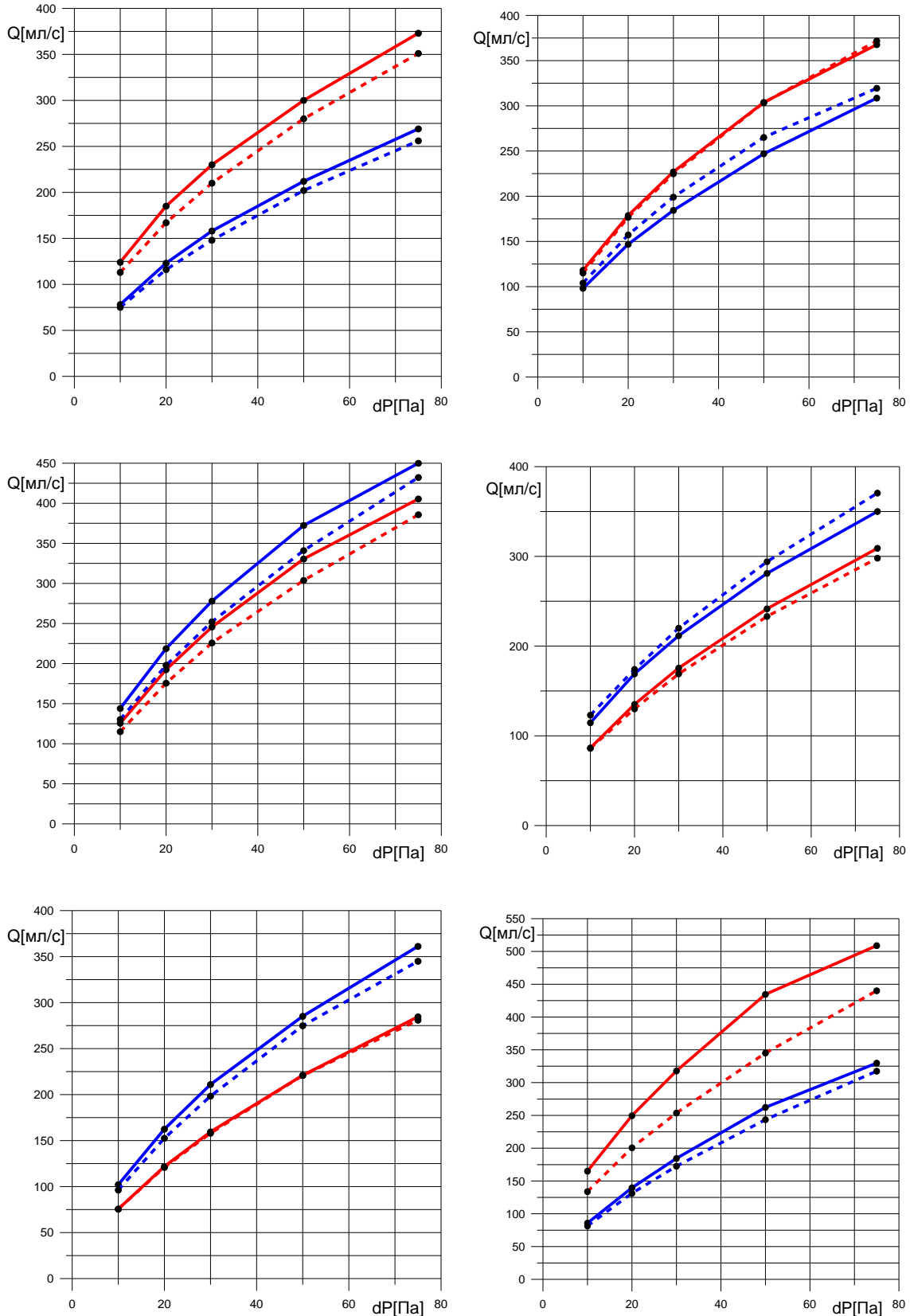


Рис. 18

Шесть наугад выбранных персоналий дают представление о разнообразии вариантов. Расход, как правило, имеет бóльшую величину при вдохе, чем при выдохе, но бывает и наоборот. Зависимости для вдоха и выдоха, как правило, лежат близко к друг к другу, иногда практически совпадают, но встречается и большое различие, как например, в последнем варианте для правой половины носовой полости. Правый график во втором ряду соответствует варианту "б".

ЛИТЕРАТУРА

1. Фомин В.М., Ветлуцкий 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.