

Вычислительная аэродинамика воздушных потоков в полости носа при перфорации перегородки носа

© Д.М.Н. Д.А. ШЕРБАКОВ¹, В.В. КОКАРЕВА¹, Н.И. ЧЕРЕМНЫХ², Т.А. АЛЕКСАНИАН³

¹ФГБУ «Всероссийский центр глазной и пластической хирургии» Минздрава России, Уфа, Россия, 450075;

²ФГБОУ ВО «Омский государственный медицинский университет» Минздрава России, Омск, Россия, 644099;

³ГБУЗ города Москвы «Научно-исследовательский клинический институт оториноларингологии имени Л.И. Свержевского» Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия, 117152

РЕЗЮМЕ

Перфорация перегородки носа является актуальной медико-социальной проблемой. Успешность хирургического закрытия перфорации перегородки носа зависит не только от мастерства оперирующего хирурга, но и от степени нарушений физиологии носовой полости. Традиционно исследования по данной тематике посвящены анализу изменений скоростных показателей в зависимости от размера и локализации перфорации носовой перегородки. Изучению нарушений функции согревания и увлажнения вдыхаемого воздуха уделяется мало внимания. Данные исследования являются актуальными не только для изучения патофизиологии перфорации перегородки носа, но и для обоснования оперативного вмешательства.

Ключевые слова: перфорация перегородки носа, вычислительная аэродинамика.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шербаков Д.А. — e-mail: dmst@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4334-3789>

Кокарева В.В. — e-mail: kokareva_val@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1930-3653>

Черемных Н.И. — e-mail: nikita_cheremnyh@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0010-6959>

Алексаниан Т.А. — e-mail: doctigran@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9164-6282>

Автор, ответственный за переписку: Шербаков Д. А. — e-mail: dmst@bk.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Шербаков Д.А., Кокарева В.В., Черемных Н.И., Алексаниан Т.А. Вычислительная аэродинамика воздушных потоков в полости носа при перфорации перегородки носа. *Вестник оториноларингологии*. 2020;85(1):64-67. <https://doi.org/10.17116/otorino20208501164>

CFD simulation study of aerodynamics in nasal cavity in a case of septal perforation

© D.A. SHCHERBAKOV¹, V.V. KOKAREVA¹, N.I. CHEREMNYKH², T.A. ALEKSANYAN³

¹Federal State Institution Russian Eye and Plastic Surgery Center, Ufa, Russia, 450075;

²Omsk State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Omsk, Russia, 644099;

³Sverzhovsky Research Clinical Institute of Otorhinolaryngology of the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia, 117152

ABSTRACT

Perforation of the nasal septum remains an actual problem. The success of surgical closure of perforation of the nasal septum depends not only on the surgeon's skill, but also on the degree of disturbance of the nasal cavity physiology. Traditionally, CFD studies of nasal septal perforations are dedicated to the analysis of changes in speed value of the inhaled air depending on the size and localization of perforation of the nasal septum. But there is a lack of studies about warming and moistening of the inhaled air in a case of nasal septal perforation. These studies are necessary not only for studying the pathophysiology of perforation of the nasal septum, but also for planning surgery.

Keywords: perforation of the nasal septum, computational fluid dynamics.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Shcherbakov D.A. — e-mail: dmst@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4334-3789>

Kokareva V.V. — e-mail: kokareva_val@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1930-3653>

Cheremnykh N.I. — e-mail: nikita_cheremnyh@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0010-6959>

Aleksanyan T.A. — e-mail: doctigran@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9164-6282>

Corresponding author: Shcherbakov D.A. — e-mail: dmst@bk.ru

TO CITE THIS ARTICLE:

Shcherbakov DA, Kokareva VV, Cheremnykh NI, Aleksanyan TA. CFD simulation study of aerodynamics in nasal cavity in a case of septal perforation. *Vestnik otorinolaringologii*. 2020;85(1):64-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/otorino20208501164>

Введение

Перфорации перегородки носа являются актуальной медико-социальной проблемой. Ключевым раздражающим фактором при сквозном дефекте перегородки носа является воздушная струя, при этом представление перфорации всего лишь как дефекта в носовой перегородке не отвечает компетенциям современного ринолога. Лечение перфораций представляется непростой задачей, что в первую очередь связано с техническими сложностями хирургического закрытия и неоднородностью клинических проявлений данной группы. Метод вычислительной аэродинамики является современным способом изучения воздушных потоков в носовой полости [1–4]. Проведенные ранее исследования в данной области были в основном направлены на изучение скоростных показателей в зависимости от размера и локализации перфорации [5]. При этом при анализе жалоб пациентов ключевым является не столько наличие свиста, сколько рецидивирующие спонтанные носовые кровотечения и образование корок, то есть значимый дискомфорт приносит не нарушение потока воздушной струи, а нарушение функции согревания и увлажнения вдыхаемого воздуха. Все это обуславливает актуальность изучения перфораций перегородки носа с позиции нарушенных функций полости носа.

Цель: с помощью метода CFD-моделирования изучить степень нарушения согревания и увлажнения вдыхаемого воздуха при перфорации перегородки носа различных размеров и локализации.

Материал и методы

Базой для настоящего исследования послужило оториноларингологическое отделение АО «МСЧ «Нефтяник», г. Тюмень. В качестве объекта исследования были выбраны 30 условно здоровых пациентов (19 женщин и 11 мужчин, средний возраст $34 \pm 16,7$ года). В качестве критериев исключения учитывались хронические заболевания носовой полости и околоносовых пазух, аномалии строения носовой полости, эпизоды острого риносинусита в последние 3 мес. Предметом исследования послужили CFD-модели. Для этого на основании КТ-снимков высокой точности в виде файлов с расширением .dicom каждого пациента были созданы геометрические модели носовой полости, которые далее с помощью специализированного программного обеспечения проходили этапы сегментизации (использовалось программное обеспечение Slicer, Geomagic studio). Полученные CAD-модели импортировались в Ansys Meshing, где происходило генерирование расчетной сетки, и далее в программе Ansys Fluent производились необходимые расчеты и моделирование воздушных потоков в носовой полости. Важным этапом CFD-моделирования, влияющим на точность и достоверность результатов, является построение расчетной сетки носовой полости. Необходимо достаточное количество ячеек, обеспечивающих независимость расчетного результата от размерности сетки. На основании результатов анализа независимости была сгенерирована структурированная сетка, состоящая из 2 500 000 ячеек. На основании каждого КТ-снимка были созданы 4 рабочие модели (общее количество — 120):

1) перфорация в переднем отделе носовой перегородки на уровне переднего конца нижней носовой раковины размерами 10 мм;

2) перфорация в переднем отделе перегородки носа на том же уровне размерами 20 мм;

3) перфорация в костном отделе носовой перегородки на уровне прикрепления нижней носовой раковины размерами 10 мм;

4) перфорация в костном отделе носовой перегородки на том же уровне размерами 20 мм (рис. 1 на цв. вклейке).

Процесс численного моделирования основан на приближенном решении системы уравнений Навье—Стокса для каждой ячейки. С учетом специфики физиологии носовой полости воздушный поток представляется преимущественно ламинарным при выбранной расчетной объемной скорости 300 мл/с и давлении 0 Па у начала ноздрей и –50 Па в области глотки, что потребовало применения статистической теории турбулентности, основанной на работах Рейнольдса (метод URANS). Также предполагается, что жидкость на твердой границе (слизь на стенках носовой полости) имеет нулевую скорость (no-slip condition), а гравитационные силы не учитываются. Данное допущение не влияет на результаты исследования и используется многими учеными для простоты вычислений [6].

Вычисление значений температуры и влажности воздушного потока потребовало применения специальных уравнений.

Относительная влажность воздуха в носоглотке рассчитывалась по формуле:

$$F_s = \frac{\frac{D_{memb}}{\delta_{memb}} F_0 + \frac{D_{bl}}{\delta_{bl}} F}{\frac{D_{memb}}{\delta_{memb}} + \frac{D_{bl}}{\delta_{bl}}}$$

Исходя из того, что δ_{memb} — это толщина слизистой оболочки, речь идет об упрощенной модели слизистой оболочки без учета желез и ресничек мерцательного эпителия; F_0 — массовая доля воды на внутренней поверхности слизистой оболочки полости носа, принятая за константу, которую обеспечивает капиллярная сеть; F_s — массовая доля воды на наружной поверхности слизистой оболочки полости носа.

W_{memb} — означает поток воды, проходящий от внутренней поверхности слизистой оболочки полости носа к наружной, который рассчитывался по формуле:

$$W_{memb} = D_{memb} \frac{\delta F}{\delta n} = D_{memb} \frac{F_0 - F_s}{\delta_{memb}},$$

где D_{memb} и n представляют коэффициент диффузии массы воды слизистой оболочки полости носа. Если $F_0 > F_s$, то W_{memb} направлен в сторону наружной поверхности слизистой оболочки полости носа от внутренней ее поверхности и вдыхаемый воздух увлажняется этой водой.

Учитывая, что в норме слизистая оболочка полости носа покрыта двойным слоем слизи, мы также рассчитывали поток воды, проходящий через двойной слой слизи, W_{bl} :

$$W_{bl} = D_{bl} \frac{\delta F}{\delta n} = D_{bl} \frac{F_0 - F_s}{\delta_{bl}},$$

где D_{bl} — коэффициент диффузии массы воды двойного слоя слизи на поверхности слизистой оболочки полости носа. Абсолютная влажность рассчитывалась, исходя из значений температуры воздушного потока в носоглотке.

Температура воздушного потока в носоглотке рассчитывалась по формуле:

$$Q_{\text{memb}} = K_{\text{memb}} \frac{\delta T}{\delta n} = K_{\text{memb}} \frac{T_0 - T_s}{\delta_{\text{memb}}},$$

где Q_{memb} — поток тепла, проходящий через слизистую оболочку от ее внутренней поверхности к наружной; δ_{memb} — толщина слизистой оболочки; T_0 — температура на внутренней поверхности слизистой оболочки, которая является постоянной и поддерживается капиллярной сетью; T_s — температура на поверхности слизистой оболочки. K_{memb} и n отражают теплопроводность слизистой оболочки полости носа.

Температура воздушного потока в области крыльев носа была принята за 24°C, что соответствует диапазону нормальных температурных значений комнатных помещений и схоже с измерениями *in vivo* [7].

Далее производилось численное моделирование следующих параметров: скорость и направление вдыхаемого воздуха, температура и влажность входящего воздушного потока в области носоглотки. Полученные значения температуры и влажности вдыхаемого воздуха на уровне носоглотки сравнивали с нормальными значениями (скорость воздушного потока 12±1,5 м/с, температура и влажность в области носоглотки 35,9°C и 100% соответственно). Статистический анализ полученных показателей проводился с использованием t-критерия Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Перфорация перегородки носа нарушает одну из главных функций перегородки носа — обеспечение раздельного дыхания, что делает невозможным попеременную работу двух половин носа, иначе — существование носового цикла. Дефект в перегородке носа приводит к патологическому воздушному обмену. Для наглядности патологического воздухообмена представлены аэродинамические модели в виде срезов на уровне центральной части перфорации (рис. 2 на цв. вклейке).

Представляется, что чем больше площадь дефекта, тем больше объем воздушного шунта между двумя половинами носа. Так, наибольший патологический воздухообмен между двумя сторонами носовой полости регистрировался при размере перфорации 20 мм, он составил 46,5±8,3% против 15,56±5,3% при размере дефекта 10 мм. Данная закономерность характерна для перфораций перегородки носа с локализацией в переднем отделе. Стоит отметить, что объем и направление шунта (слева направо или справа налево) зависят от анатомических особенностей носовой полости, к примеру от наличия искривления носовой перегородки. Так, воздушный поток проходит через перфорацию носовой перегородки в сторону искривленной половины носа при локализации деформации перед перфорацией и наоборот [8]. Напротив, при локализации перфорации перегородки носа в костном отделе воздухообмен был минимальным (5,7±3,1%, $p < 0,05$) и воздушный поток преимущественно проходил по своей половине носовой полости.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Шербаков Д.А., Крюков А.И., Попов И.Б., Кротова А.С., Мадаев Т.С., Кокарева В.В. Роль вычислительной аэродинамики

Перфорации в переднем отделе носовой перегородки существенно влияли на аэродинамику, вызывая увеличение скорости и турбулентность воздушного потока. Так, скорость входящего потока воздуха при перфорации размером 10 мм составила 17±3,5 м/с, что на 40% превышает скорость в нормальной носовой полости. Увеличение размеров дефекта в передней части приводило к возрастанию скорости входящего потока. Данное обстоятельство объясняется значительным воздухообменом. Достоверным также является тот факт, что перфорации в заднем отделе перегородки носа не приводили к существенному увеличению скорости потока (см. рис. 2), что согласуется с данными других авторов [9, 10].

Тем не менее основная цель нашего исследования состоит в изучении таких характеристик, как температура и влажность вдыхаемого воздуха. Увеличение скорости воздушного потока негативно влияет на основные функции НП — согревание и увлажнение вдыхаемого воздуха, что наиболее ярко проявляется при увеличении размера дефекта: температура 33,1±0,3°C и 30,5±0,9°C и влажность 97±0,34% (34,26±1,16 г/м³) и 93±0,7% (28,75±2,01 г/м³) при дефектах размерами 10 мм и 20 мм соответственно (рис. 3 на цв. вклейке).

Ряд авторов считают, что данная особенность объясняется значительным массообменом [10]. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что чем больше размер перфорации в переднем отделе, тем более холодный воздух проходит через нее. Возможно, данный факт объясняется отсутствием не просто структуры, разделяющей два потока, а функционально значимой слизистой оболочкой. Тем не менее данная тенденция определялась только при перфорациях в передних отделах. При локализации дефекта в костной части перегородки носа значения температуры и влажности воздушного потока в пределах нормы.

Выводы

Перфорации перегородки носа в переднем отделе вызывают существенное нарушение аэродинамики, которое проявляется в увеличении скорости, снижении температуры и влажности входящего воздушного потока. Именно нарушением функции согревания и увлажнения можно объяснить образование корок. Таким образом, хирургическое закрытие перфорации перегородки носа имеет цель не только обеспечить раздельный воздушный поток, но и восстановить функции согревания и увлажнения. При выполнении данных условий лечение можно считать успешным. Перфорации в заднем отделе незначительно влияют на аэродинамику и протекают бессимптомно. Тем не менее понимание патофизиологии перфорации перегородки носа еще находится на начальном этапе и требует пристального внимания со стороны научных деятелей и практикующих врачей.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.**

полости носа в диагностике искривления носовой перегородки. *Российская оториноларингология*. 2019;18;4(101):82-88.

- Shcherbakov DA, Kryukov AI, Popov IB, Krotova AS, Ma-dayev TS, Kokareva VV. The role of computational aerodynamics of the nasal cavity in the diagnosis of curvature of the nasal septum. *Rossiyskaya otorinolaringologiya*. 2019;18;4(101):82-88. (In Russ.)
https://doi.org/10.18692/1810-4800-2019-4-82-88
2. Щербаков Д.А., Крюков А.И., Красножен В.Н., Гарскова Ю.А., Саушин И.И. CFD-моделирование воздушных потоков в верхнечелюстной пазухе. *Вестник оториноларингологии*. 2017;82(4):32-34.
Shcherbakov DA, Kryukov AI, Krasnozhen VN, Garskova YuA, Saushin II. CFD-modeling of maxillary sinus air flow. *Vestnik otorinolaringologii*. 2017;82(4):32-34. (In Russ.)
 3. Красножен В.Н., Щербаков Д.А., Саушин И.И. Гарскова Ю.А., Хукуматшоев А.И. Вычислительная аэродинамика полости носа и верхнечелюстной пазухи. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2017; 23(3):73-79.
Krasnozhen VN, Shcherbakov DA, Saushin II, Garskova YuA, Khukumatshoev AI. Computational aerodynamics of the nasal cavity and maxillary sinus. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2017;23(3):73-79. (In Russ.)
 4. Щербаков Д.А. Вычислительная аэродинамика при риносинусхирургии. *Российская ринология*. 2018;3:21-25.
Shcherbakov DA. Computational aerodynamics in rhinosinus surgery. *Rossiyskaya rinologiya*. 2018;3:21-25. (In Russ.)
https://doi.org/10.17116/rosrino20182603121
 5. Grant O, Bailie N, Watterson J. Numerical model of a nasal septal perforation. *Stud Health Technol Inform*. 2004;107:1352-1356.
 6. Farzal Z, Signore AG, Zanation A, Ebert C, Ito D, Kimbell J, Brent A. A computational fluid dynamics analysis of the effects of size and shape of anterior nasal septal perforation. *Rhinology*. 2019;57:1-7.
https://doi.org/10.4193/Rhin18.111
 7. Lindemann J, Leickner R, Rettinger G, Keck T. Nasal mucosal temperature during respiration. *Clin Otolaryngol*. 2002;27:135-139.
 8. Grützmacher S, Mlynski R, Lang C, Scholz S, Saadi R, Mlynski G. The Nasal Airflow in Noses with Septal Perforation: A Model Study. *ORL*. 2005;67:142-147.
https://doi.org/10.1159/000085958
 9. Pless D, Keck T, Wiesmiller KM. Numerical simulation of airflow patterns and air temperature distribution during inspiration in a nose model with septal perforation. *Am J Rhinol*. 2004;18:357-362.
 10. Cannon D, Dennis O, Kimbell J, Poetker D, Rhee J. Modeling nasal physiology changes due to septal perforations. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2013;148(3):1-13.
https://doi.org/10.1177/0194599812472881

Поступила 25.10.19

Received 25.10.19

Принята к печати 09.12.19

Accepted 09.12.19