

УДК 687.03

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПРЕССИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ПОЛУМАСКИ НА МЯГКИЕ ТКАНИ ЧЕЛОВЕКА**

**NUMERICAL SIMULATION OF THE COMPRESSION INFLUENCE OF THE FIL-
TERING HALF MASK ON THE SOFT HUMAN TISSUES**

*И.Н. ТЮРИН, А.М. ЯКОВЛЕВ, Е.Г. АНДРЕЕВА,
С.Ш. ТАШПУЛАТОВ, В.С. БЕЛГОРОДСКИЙ*

*I.N. TYURIN, A.M. YAKOVLEV, E.G. ANDREEVA,
S.SH. TASHPULATOV, V.S. BELGORODSKY*

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия
Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Республика Узбекистан)

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art),
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia
Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Republic of Uzbekistan)

E-mail: ssht61@mail.ru

Работа посвящена численному моделированию компрессионного воздействия фильтрующей полумаски на мягкие ткани лица человека. Математические модели биологических тканей основаны на комбинировании свойств гиперэластичности и вязкоупругости. По результатам численного моделирования установлено значительное влияние физико-механических свойств фильтрующей полумаски на деформацию мягких тканей при дли-

тельной эксплуатации. Результаты исследования предназначены для разработки моделей фильтрующих полумасок медицинского назначения, обладающих свойствами равномерного распределения давления по поверхности лица человека, а также снижением уровней оказываемого давления.

The work is devoted to numerical simulation of the compression effect of the filtering half mask on the human's face soft tissues. Mathematical models of biological tissues are based on a combination of the properties of hyperelasticity and viscoelasticity. According to the results of numerical modeling, a significant effect of the physico-mechanical properties of the filtering half mask on the deformation of soft tissues during long-term operation was established. The results of the study are intended for the development of models of filtering half masks for medical purposes that have the properties of a uniform distribution of pressure on the surface of a person's face, as well as a decrease in the level of pressure applied.

Ключевые слова: компрессионное воздействие, фильтрующая полумаска, мягкие ткани лица человека, численное моделирование.

Keywords: compression effect, filtering half mask, soft tissues of the human face, numerical modeling.

Главное – человек, и все, что его окружает [1]. Поскольку инфекция коронавируса COVID-19 продолжает распространяться по всему миру, средства индивидуальной защиты органов дыхания стали необходимостью для каждого человека. Медицинский персонал, особенно при работе в "красных зонах", граждане, работающие длительное время в закрытых помещениях, а также государственные служащие, род деятельности которых связан с работой с населением, нуждаются в гораздо большей защите по причине повышенной вирусной нагрузки, превосходящей полученную в местах общественного доступа людей.

Здоровые люди носят респираторы в течение коротких периодов времени, в то время как медицинские работники носят их в течение 10...16 часов, потому что они постоянно находятся в контакте с теми людьми, которые заражены каким-либо заболеванием, которое может быть вызвано вирусом или частицами аэрозоля. Существует вероятность передачи этих частиц от зараженного человека медицинскому работнику, поэтому использование респираторов является элементом комплексного пакета средств защиты и мер, которые мо-

гут ограничивать распространение некоторых респираторных заболеваний. Есть некоторые побочные эффекты ношения респиратора в течение длительного периода времени, при котором на мягкие ткани лица оказывается компрессионное воздействие, в результате чего на лице формируются лицевые раны: язвы, прыщи, волдыри и струпа и т.д.

Компрессионное воздействие, оказываемое респираторами на лицо медицинского работника, отрицательно сказывается на его психофизиологическом, физиологическом, психическом состояниях, окружающей среде его работы. Для нивелирования этого эффекта необходимо исследовать механизм компрессионного воздействия фильтрующей полумаски на лицо человека и разработать методы эргономического проектирования фильтрующих полумасок (ФПМ) [2] с целью использования их медицинским персоналом.

Процесс численного моделирования компрессионного воздействия мягких тканей на лицо человека нуждается в математических моделях, описывающих поведение взаимодействующих материалов: биологических тканей лица человека и пакета материалов фильтрующей полумаски.

Деформации биологических тканей лица человека имеют нелинейный характер. В частности, мышечные ткани демонстрируют ортотропное и вязкоупругое механическое поведение [3]. Очень часто мягкие ткани рассматриваются как гиперэластичные материалы [4]. Основное определяющее уравнение, описывающее механический отклик изотропного гиперэластичного материала, в процессе компрессионного воздействия представляет собой функцию плотности энергии деформации (ФПЭД) эластомерного образца (модель Муни-Ривлина) [4], [5]:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + 1/D_1(J_{el} - 1)^2, \quad (1)$$

где \bar{W} – функция плотности энергии деформации; C_{10} и C_{01} – параметры материала; J_{el} – коэффициент упругого объема; D_1 – это константа, определяющая сжимаемость материала, которая может быть оценена из объемного теста; I_1 и I_2 – первый и второй инварианты.

Первый и второй инварианты могут быть определены как:

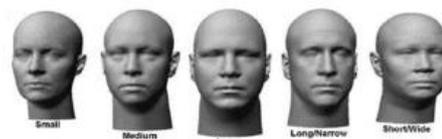
$$I_1 = (\lambda_1)^2 + (\lambda_2)^2 + (\lambda_3)^2, \quad (2)$$

$$I_2 = (\lambda_1\lambda_2)^2 + (\lambda_2\lambda_3)^2 + (\lambda_3\lambda_1)^2. \quad (3)$$

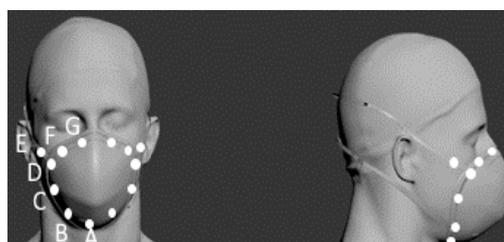
Проведение численного моделирования возможно с использованием программных средств с встроенными решателями дифференциальных уравнений и средствами 3D-моделирования [3], [6]. В результате компьютерного моделирования трехмерных моделей разработана модель маски по стандартам N95 и предлагаемая модель-аналог с использованием LRMF-полиуретана (пеноматериал на основе полиуретана с памятью формы и низкой скоростью восстановления исходной формы).

По итогам проведенного 3D-сканирования получены трехмерные модели для 5 типов форм головы человека. Стоит отметить выбор испытуемых для проведения 3D-сканирования. По итогам массовых антропометрических исследований (3997 человек рабочих специальностей), проведенных Национальным институтом безопасности и гигиены труда США (NIOSH) получены 5

цифровых трехмерных моделей головы: маленькая, средняя, большая, длинная/узкая и короткая/широкая (рис. 1-а) [7]. В связи с этим для получения трехмерных моделей лица человека произведено сканирование 5 испытуемых, имеющих 5 различных форм головы. На рис. 1-б представлена 3D-модель, относящаяся к среднему типу формы головы человека, определенному согласно исследованиям NIOSH.



а)



б)

Рис. 1

Моделирование содержит три вида нагрузок.

1. Сила тяжести в направлении Y.

2. Нагрузки, заданные в виде точек давления, прикладываемые в 13 топографических зонах лица (6 антропометрических точек, исключая точку А, заданы симметрично второй половине лица):

А – маркер: в подбородочной зоне соприкосновения поверхности маски с поверхностью тела;

В – маркер: по краю маски между маркерами А и С;

С – маркер: по краю маски в зоне крепления нижней резинки с ФПМ;

Д – маркер: по краю маски между маркерами С и Е;

Е – маркер: по краю маски в зоне крепления верхней резинки с ФПМ;

Ф – маркер: в области соприкосновения маски с боковой поверхностью носа;

Г – маркер: точка в области скуловой кости.

3. Силы трения. Контактный решатель LS_DYNA используется с входными пара-

метрами, включая коэффициент трения кожи. Коэффициент трения кожи выбран равным 0,25 согласно [8].

Физико-механические свойства биологических тканей, определенные [9], [10], представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Слой	Плотность, г/м ³	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
Кожа	1,3	0,65	0,48
Мышцы	1,8	0,80	0,45

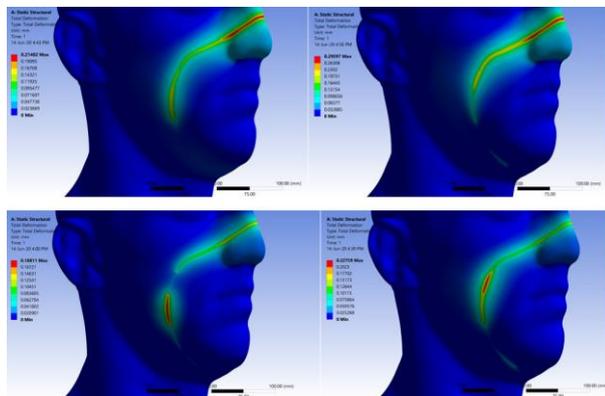


Рис. 2

По результатам проведенного моделирования установлено снижение пиковых значений деформаций на 20...30% (с 0,234 до 0,188 мм при $t=0$ с; с 0,296 до 0,203 мм при $t=18000$ с), а также более равномерное распределение компрессионного давления в передней области лица по сравнению с моделями-аналогами из полиуретанов, традиционно используемых в качестве назальной прокладки во внутренней области респиратора.

Среди преимуществ использования вкладышей из LRMF-полиуретана можно выделить высокую адгезию с поверхностью тела человека, способность к абсорбции и рассеиванию энергии, а также способность принимать форму поверхности контакта маски с лицом человека.

ВЫВОДЫ

Проведено исследование компрессионного давления фильтрующих полумасок с использованием методов численного моделирования (конечно-элементный анализ). Имитационные модели созданы на основе трехмерных моделей фильтрующей полумаски и моделей головы. В качестве объек-

тов сравнительного анализа выступили модель маски N95 и разработанная по стандартам N95 модель-аналог, с использованием вкладышей из LRMF-полиуретана. Нагрузки и граничные условия заданы постоянными для двух моделей. Установлено снижение пиковых значений деформаций на 20...30% в зависимости от длительности приложения нагрузки.

Использование численного моделирования является эффективным методом высокоточного математического моделирования различных физических процессов, в том числе процессов эксплуатации средств индивидуальной защиты органов дыхания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путин В.В. Послание Федеральному Собранию Российской Федерации // Вестник Российской Федерации. – 2018, № 2 (60). С.11...18.
2. Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Andreev, E.G. Analysis of innovative technologies of thermoregulating textile materials // Fibre Chemistry. – №1 (50), 2018. P. 1...9.
3. Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Andreeva E.G. The finite-element modeling of compression sportswear // In proceedings: AUTEX 2019. Proceedings of the 19th World Textile Conference. – 2019. С. 0366.
4. Mooney M. A Theory of Large Elastic Deformation // Journal of Applied Physics. – Vol.11, 1940. P.583...592.
5. Rivlin. Large Deformation of Isotropic Materials // Phil. Transactions. – Vol.240, 1960. P.459...508.
6. Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Andreeva E.G. Van der Pauw method for measuring the electrical conductivity of smart textiles // Fibre Chemistry. –Т. 51, №2, 2019. P. 139...146.
7. Zhuang Z., Benson S., and Viscusi D. Digital 3D headforms with facial features representative of the current US workforce // Ergonomics. – 53(5), 2010. P.661...671.
8. Zhang M.; Mak A. F. In vivo friction properties of human skin, Prosthet. Orthot. Int. – 23, 1999, 135...41.
9. Fung Y.C. Elasticity of Soft Tissues in Simple Elongation // American Journal of Physiology. – Vol.213, 1967, P.1532...1544.

10. Duck F. Physical properties of tissues: a comprehensive reference book. – Academic Press, London, 1991.

REFERENCES

1. Putin V.V. Poslanie Federal'nomu Sobraniyu Rossiyskoy Federatsii // Vestnik Rossiyskoy natsii. – 2018, № 2 (60). S.11...18.

2. Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Andreev, E.G. Analysis of innovative technologies of thermoregulating textile materials // Fibre Chemistry. – №1 (50), 2018. P. 1...9.

3. Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Andreeva E.G. The finite-element modeling of compression sports-wear // In proceedings: AUTEX 2019. Proceedings of the 19th World Textile Conference. – 2019. S. 0366.

4. Mooney M. A Theory of Large Elastic Deformation // Journal of Applied Physics. – Vol.11, 1940. P.583...592.

5. Rivlin. Large Deformation of Isotropic Materials // Phil. Transactions. – Vol.240, 1960. P.459...508.

6. Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Andreeva E.G. Van der Pauw method for measuring the electrical conductivity of smart textiles // Fibre Chemistry. –Т. 51, №2, 2019. P. 139...146.

7. Zhuang Z., Benson S., and Viscusi D. Digital 3D headforms with facial features representative of the current US workforce // Ergonomics. – 53(5)? 2010. P.661...671.

8. Zhang M.; Mak A. F. In vivo friction properties of human skin, Prosthet. Orthot. Int. – 23, 1999, 135...41.

9. Fung Y.C. Elasticity of Soft Tissues in Simple Elongation // American Journal of Physiology. – Vol.213, 1967, P.1532...1544.

10. Duck F. Physical properties of tissues: a comprehensive reference book. – Academic Press, London, 1991.

Рекомендована кафедрой художественного моделирования, конструирования и технологии швейных изделий РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 23.06.20.