

Биомеханика профессиональных заболеваний позвоночника операторов инспекционно-досмотровых комплексов

Д. Н. Афонин

Санкт-Петербургский филиал Российской таможенной академии
e-mail: dnafonin@gmail.com

П. Н. Афонин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
pnafonin@etu.ru

УДК 612.76, 616-092.12

Аннотация. В статье рассмотрены биомеханические аспекты развития профессиональной патологии позвоночника у операторов анализа изображений инспекционно-досмотровых комплексов. Большое внимание уделяется влиянию профессиональной деятельности данной категории работников на формирование у них межпозвоночных грыж и остеохондроза позвоночника.

Ключевые слова: биомеханика, позвоночник, конечно-элементное моделирование, профессиональная патология, операторы инспекционно-досмотровых комплексов

Профессиональная деятельность операторов анализа изображений инспекционно-досмотровых комплексов (далее – ИДК) не только требует глубоких профессиональных знаний, но и сопряжена с большой психологической нагрузкой [1, 2]. Кроме того, выполнение профессиональных обязанностей данной категории работников приводит к физиологическим, а при отсутствии должной профилактики и патологическим нарушениям различных органов и систем организма.

Длительная напряженная работа в нефизиологическом положении за компьютером, основной задачей которой является выявление запрещенных или ограниченных к перемещению через таможенную границу предметов приводит к целому ряду физиологических последствий, которые при несвоевременной коррекции могут привести к патологическим процессам. Так, жалобы на проблемы с органами зрения через 4 часа работы предъявляют 100 % операторов анализа изображений, через 6 часов работы у 78% опрошенных появляются жалобы на дискомфорт в позвоночнике и дистальных отделах конечностей.

В период с 2016 по 2022 год нами был проведен опрос 128 операторов анализа изображений ИДК в возрасте от 28 до 53 лет. Жалобы на различные проявления патологии позвоночника, развившиеся в процессе профессиональной деятельности предъявляли 23 человека (17.9 % опрошенных). Так, периодические боли в поясничном отделе позвоночника и по ходу бедренного и седалищного нерва беспокоили 19 (14.8 %) операторов, различные нарушения чувствительности и моторики периферических отделов конечностей наблюдались у 8 (6.3 %), нейрогенная перемежающаяся хромота – у 6 (4.7 %) опрошенных.

Исследование биомеханики развития профессиональных заболеваний позвоночника операторов анализа изображений нами производилось с использованием двух конечно-элементных моделей: модели всего позвоночника (рис. 1) и модели позвоночно-двигательного сегмента (рис. 2). Введение в модель элементов и их параметров (форма и размеры) определялись в соответствии с данными, полученными нами ранее при рентгенологическом исследовании [3, 4]. Геометрическая модель позвоночного столба была разбита на 12185 конечных элементов. Расчет напряжений и деформаций в позвоночном столбе производился по Мизесу. Исследование проводилось в программе SolidWorks Simulation.

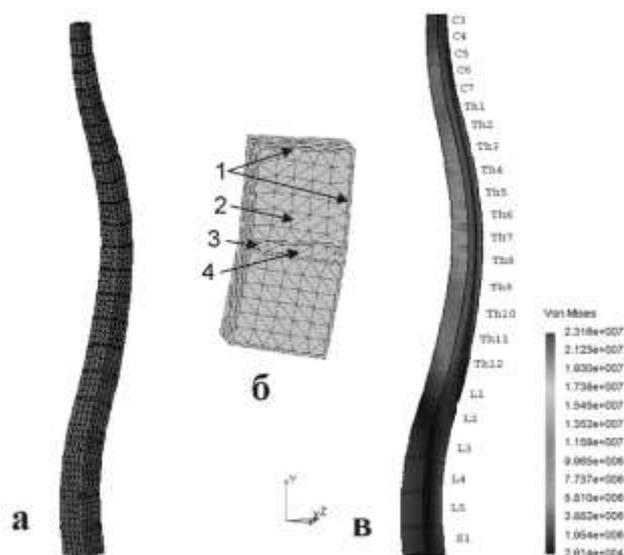


Рис. 1. Конечно-элементное моделирование позвоночного столба: а – конечно-элементная модель, б – фрагмент конечно-элементной модели (позвоночно-двигательный сегмент Th₇-Th₈), в – расчет напряжений и деформаций в позвоночном столбе по Мизесу; 1 – компактная костная ткань, 2 – спонгиозная костная ткань, 3 – anulus fibrosus, 4 – nucleus pulposus

Каждый позвонок состоял из губчатой и компактной кости. Толщина компактной кости считалась равной 0.1 мм. Материал компактной и губчатой кости считался изотропным. Модуль Юнга для компактной кости считали равным $E_k=1.61 \times 10^8$ Па, для губчатой – $E_r=0.76 \times 10^6$ Па. Соответственно, коэффициент Пуассона

считали равным для компактной кости $\nu_k=0.25$, для губчатой – $\nu_r=0.40$.



Рис. 2. Конечно-элементное моделирование позвоночно-двигательного L_{2-3} сегмента: 1 – тела позвонков, 2 – межпозвоночный диск

Межпозвоночные диски состояли из annulus fibrosus и nucleus pulposus. Форма дисков выбиралась в соответствии с угловыми взаимоотношениями смежных позвонков. Модуль Юнга для annulus fibrosus считали равным $E_{af_{пр}}=8.0 \times 10^7 \text{ Па}$ в продольном направлении и $E_{af_{поп}}=2.0 \times 10^7 \text{ Па}$ – а поперечном направлении, для nucleus pulposus – $E_{np}=1 \times 10^9 \text{ Па}$.

Нижняя поверхность S_1 позвонка считалась закрепленной. К верхней поверхности S_3 позвонка была приложена сила 100 Н, направленная вертикально вниз. К вентральной и дорсальной поверхностям каждого позвонка были приложены силы в 10 Н, направленные по касательной вниз, моделирующие сжимающие силы, действующие на позвонок.

Особенности и преимущества построенной модели заключаются в следующем:

1. Возможность получения наглядной трехмерной реконструкции исследуемого сегмента позвоночника.
2. Возможность выполнения любого среза исследуемых позвонков и практически моментального получения интересующих размеров.
3. Возможность исследования биомеханических аспектов деформации позвоночника и компрессии спинного мозга при различных патологических процессах путем конечно-элементного моделирования.

Результаты исследования напряжений в передних отделах тел моделируемых позвонков (с S_3 по S_1) свидетельствуют о неравномерности распределения напряжений в позвоночном столбе у здорового человека. Максимальные напряжения наблюдаются в передних отделах $Th_7 - Th_8$ позвонков – на высоте грудного кифоза.

При моделировании позвоночного столба оператора анализа изображений ИДК, сидящего на своем рабочем месте (форма позвоночного столба при этом была определена на основании анализа 34 фотографий рабочего положения тел операторов, выполненных в сагитальной проекции), выявлено резкое возрастание напряжений и деформаций в передних отделах фиброзного кольца поясничного и шейного отделов позвоночника. При этом происходит уменьшение высоты межпозвоночных отверстий.

Проведенные исследования напряжений и деформаций в позвоночно-двигательных сегментах шейного, грудного и поясничного отделов позвоночника показали, что в процессе профессиональной деятельности оператора анализа изображений ИДК его позвоночник деформируется. Если реберный каркас еще удерживает грудной отдел позвоночника от выраженной деформации, то передние отделы позвонков в позвоночно-двигательных сегментах шейного и поясничного отделов позвоночника сближаются, а задние, соответственно, расходятся. При этом происходит уплотнение передних отделов фиброзного кольца (annulus fibrosus) межпозвоночного диска и, напротив, расширение с последующим уменьшением плотности задних и заднебоковых отделов. Длительная сидячая работа в свою очередь приводит к увеличению массы тела работника, что приводит к увеличению нагрузки на позвоночно-двигательный сегмент и росту давления в пульпозном ядре (nucleus pulposus) межпозвоночного диска особенно поясничного сегмента.

Таким образом, можно рассмотреть два механизма развития патологических процессов в позвоночно-двигательном сегменте:

Во-первых, увеличение давления в пульпозном ядре может привести к образованию межпозвоночных грыж. В ряде случаев, при наличии остеопороза, часть содержимого пульпозного ядра может прорваться через замыкательную пластинку тел позвонков в тело выше или ниже лежащего позвонка (грыжа Шморля). Как правило, подобные грыжи не дают клинических проявлений и являются рентгенологической находкой. Выход содержимого пульпозного ядра через расширенную и разволокненную заднюю часть фиброзного кольца в просвет позвоночного канала возможен, но в силу его достаточно большого диаметра не приведет к серьезным клиническим последствиям. А выход части содержимого пульпозного ядра в заднебоковых отделах в область межпозвоночных отверстий, через которые проходят корешки спинного мозга практически всегда приводит к корешковым синдромам (боли, нарушения чувствительности и двигательной активности). Кроме того, часто может наблюдаться нейрогенная перемежающаяся хромота (боли в икроножных мышцах, появляющиеся при ходьбе до 250 метров) [5, 6].

Во-вторых, статическое сближение передних отделов тел позвонков в позвоночно-двигательном сегменте (а речь идет именно о статической нагрузке в процессе профессиональной деятельности операторов анализа изображений ИДК, в течение 8–12 часов, а иногда и более, находящихся в относительно неподвижном состоянии) ускоряет развитие остеофитов, которые распространяясь обычно спереди назад, образуются в

том числе и по краям межпозвонковых отверстий, травмируя выходящие через них корешки спинного мозга. Что приводит опять же к развитию неврологических «корешковых» синдромов. При этом помимо классических болевых, двигательных и чувствительных проявлений может иметь место и спазм периферических артерий в зависимости от уровня поражения позвоночника. Так, при поражении шейного отдела позвоночника возможен спазм периферических артерий верхних конечностей (иммитирующий синдром Рейно с характерной зябкостью и т. п.) или коронарных артерий, что может проявляться ишемическими болями за грудиной и даже иногда характерной картиной на электрокардиограмме. При поражении поясничного отдела позвоночника мы можем наблюдать спазм периферических артерий нижних конечностей с характерным сохранением пульса вплоть до артерий стоп, но проявляющийся зябкостью дистальных отделов конечностей.

Усиление кифотической деформации позвоночника особенно в грудном отделе вследствие нефизиологического положения тела оператора анализа изображений ИДК приводит к нарушению функции внешнего дыхания, проявляющейся в уменьшении дыхательного объема и неучастия в дыхательном процессе нижних отделов легких, что влечет за собой частые простудные заболевания и учащения обострений хронического бронхита при его наличии.

Проведенные исследования качества жизни 128 операторов анализа изображений ИДК с использованием Oswestry Index Questionare выявило снижение качества жизни из-за проблем с позвоночником на 10 и более процентов у 14 (10.9%) опрошенных. Оценивались следующие показатели: выраженность болевого синдрома и купируемость его анальгетиками, способность обслуживать себя, поднимать тяжести, сидеть, стоять, ходить, длительность сна, возможность и длительность прогулок, социальная и половая жизнь, работоспособность. Наиболее часто опрошенные предъявляли жалобы на расстройства сна, невозможность пройти без остановки более 500 метров, дискомфорт в спине при длительном стоянии и сидении (более 1 часа), проблемы в половой жизни. Разработанный специально для обследования пациентов с вертебральной патологией, данный опросник позволяет достаточно точно идентифицировать начальные признаки заболеваний позвоночника и может быть рекомендован для своевременного выявления патологических процессов.

Проведенные исследования позволили выявить выраженную корреляционную связь ($0.88, p < 0.05$) между наличием неврологических проявлений и стажем работы оператора анализа изображений. Причем, надо отметить, что выявленная корреляционная связь была более выраженной чем между наличием неврологических проявлений и возрастом опрошенных ($0.64, p < 0.5$). У лиц, имеющих стаж работы по данной специальности от 5 лет и более наличие неврологических проявлений наблюдалось в 45.0% случаев.

Анализ биомеханических моделей позвоночного столба, результатов тестирования и исследования качества жизни (с использованием Oswestry Index Questionare) операторов анализа изображений ИДК

позволил выявить наиболее значимые прогностические критерии, определяющие риск развития патологических процессов в позвоночнике. Для прогнозирования развития заболеваний в позвоночнике использованы искусственные нейронные сети. По своей структуре построенные нейронные сети представляли многослойный персептрон. Точность предсказаний нейросетевых моделей, по данным обучающей выборки составила – 90.3 %.

Одним из направлений по профилактике развития патологических процессов в позвоночнике, может быть, ротация должностных лиц, работающих на ИДК в течение смены с интервалом в 2 часа, когда должностное лицо последовательно выполняет функции оператора анализа изображений, оператора движения, участвует в осмотре и досмотре перемещаемых товаров и транспортных средств. Такой подход позволит помимо предупреждения развития патологических процессов повысить эффективность контроля, поскольку длительное выполнение однородных функций приводит к усталости, эмоциональному выгоранию и, в итоге, к снижению работоспособности и бдительности. Реализация такого подхода возможна только при наличии у всех членов экипажа ИДК достаточных компетенций по выполнению указанных задач.

Своевременное выявление физиологических отклонений у операторов анализа изображений ИДК позволит значительно снизить риск развития патологических процессов. Здесь можно рассмотреть несколько вариантов:

1. Своевременное выявление ранних симптомов при плановых профилактических осмотрах операторов анализа изображений. Целенаправленное обследование у невролога, выполнение при необходимости компьютерной томографии наиболее критичных шейного и поясничного отделов позвоночника с последующим назначением профилактических мероприятий позволит значительно снизить риск заболеваний позвоночника.
2. Обеспечение операторов анализа изображений эргономичными креслами и столами.
3. Поскольку одним из частых проявлений поражения позвоночника является спазм периферических артерий, целесообразно рекомендовать операторам анализа изображений ИДК использовать фитнес-браслеты с регистрацией электрокардиограммы и датчиками напряжения кислорода в дистальных отделах конечностей. Применение таких устройств позволит производить мониторинг физиологического состояния операторов и при появлении отклонений сигнализировать о необходимости отдыха или смены деятельности. Реализация подобного оповещения возможна через сеть bluetooth на смартфон оператора или сервер ИДК. В последнем случае администрация в автоматическом режиме сможет своевременно выявлять среди операторов анализа изображений, лиц с начальными признаками патологических процессов, переводить их на другие участки работы с меньшей профессиональной

вредностью и, при необходимости, направлять на углубленное медицинское обследование.

4. Включение в программы дополнительной профессиональной подготовки операторов анализа изображений ИДК разделов, касающихся медицинских и психологических аспектов их профессиональной деятельности, в которых необходимо доводить до слушателей ранние признаки заболеваний позвоночника для самодиагностики и своевременного обращения к специалистам.
5. Разработка комплекса лечебно-профилактических упражнений и периодичности его проведения для профилактики заболеваний позвоночника у операторов анализа изображений ИДК.

Таким образом, проведенное исследование показало, что профессиональная деятельность операторов анализа изображений может привести как к образованию межпозвонковых грыж, так и к развитию остеохондроза позвоночника с характерными неврологическими синдромами, что требует как организационных, так и профилактических мероприятий со стороны работодателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Афонин Д.Н., Куроптев Н.Б., Брысковская П.А. Влияние свойств высшей нервной деятельности на эффективность работы операторов анализа изображений таможенных органов // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 3-2 (57). С. 63-65.
- [2] Афонин Д.Н., Афонин П.Н. Исследование психофизиологических факторов, определяющих эффективность деятельности операторов анализа изображений // Bulletin of the International Scientific Surgical Association. 2017. Т. 6. № 1. С. 26-28.
- [3] Афонин Д.Н., Афонин П.Н. Вычислительные алгоритмы оценки компрессии спинного мозга // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 5.
- [4] Афонин Д.Н., Афонин П.Н. Конечно-элементное моделирование напряжений в позвоночнике при спондилитах // Вестник новых медицинских технологий. 2002. Т. 9. № 4. С. 87-89.
- [5] Афонин П.Н., Афонин Д.Н., Немых В.В. Применение искусственных нейронных сетей для дифференциальной диагностики нейрогенной и васкулогенной ишемии нижних конечностей // Вестник новых медицинских технологий. 2005. Т. 12. № 3-4. С. 110-111.
- [6] Фурсова Л.А. Нейрогенная перемежающаяся хромота: диагностика и консервативная терапия // Неврология и нейрохирургия. Восточная Европа. 2021. Т. 11. № 1. С. 95-106.