

Миокардиальный стресс левого желудочка при действии производственной вибрации

Третьяков С.В., Попова А.А.

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный медицинский университет» Минздрава России

Myocardial stress of the left ventricle during occupational vibration

Tretyakov S.V., Popova A.A.

Novosibirsk State Medical University

АННОТАЦИЯ

Цель. Изучение внутримиекардиального стресса левого желудочка (ЛЖ) у лиц, подвергающихся воздействию производственной вибрации и больных вибрационной болезнью (ВБ).

Материалы и методы. Обследовано 15 чел., контактирующих с вибрацией, 44 чел. с ВБ 1-й степени (ст.), 10 чел. с ВБ 2-й ст. Группу контроля составили 20 лиц без сердечно-сосудистой патологии, не подвергавшиеся воздействию профессионально-вредных факторов. Основными производственными неблагоприятными факторами у лиц с ВБ являлись вибрация, шум, физическое напряжение.

Проводилось ультразвуковое исследование сердца с определением общего объема ЛЖ ($V_{\text{общ}}$); объема его миокарда (V_m); массы миокарда (ММЛЖ); индекса массы миокарда (ИММЛЖ); систолического внутрижелудочкового давления; интенсивности функционирования структур ЛЖ; внутримиекардиального циркулярного (кольцевого) и меридионального диастолического и систолического стрессов ($\sigma_{\text{кд}}$, $\sigma_{\text{кс}}$ и $\sigma_{\text{мд}}$, $\sigma_{\text{мс}}$ соответственно); внутримиекардиального напряжения в кольцевом и меридиональном направлении в систолу и диастолу ($T_{\text{кс}}$, $T_{\text{мс}}$ и $T_{\text{кд}}$, $T_{\text{мд}}$ соответственно).

Результаты. У лиц, имеющих контакт с вибрацией, по сравнению с лицами, не имевшими контакта с производственно-вредными факторами, отмечается возрастание $\sigma_{\text{мд}}$ в 2.5 раза ($p < 0.05$) и $\sigma_{\text{кд}}$ в 2.8 раза ($p < 0.05$). Напряжение повышается в систолу и диастолу как в кольцевом ($T_{\text{кс}}$ на 17.35 %, $p < 0.05$; $T_{\text{кд}}$ в 2.74 раза, $p < 0.05$), так и в меридиональном ($T_{\text{мс}}$ на 14.59 %, $p < 0.05$; $T_{\text{мд}}$ в 2.76 раза, $p < 0.05$) направлениях. У лиц с ВБ 1-й ст. наблюдается увеличение в диастолу как $\sigma_{\text{мд}}$ в 2.2 раза ($p < 0.05$), $\sigma_{\text{кд}}$ в 2.4 раза ($p < 0.05$), так и $T_{\text{мс}}$ ($p < 0.05$) и $T_{\text{кд}}$ в 2.5 раза ($p < 0.05$).

У больных ВБ 2-й ст., в отличие от больных ВБ 1-й ст. и лиц, контактирующих с вибрацией, происходит изменение условий работы ЛЖ. При таких же значениях $V_{\text{общ}}$, V_m , ММЛЖ и ИММЛЖ, как в описываемых группах, у больных ВБ 2-й ст. отмечается снижение систолического внутрижелудочкового давления на 12.3 % ($p < 0.05$) на фоне возрастания $\sigma_{\text{мд}}$ на 14.7 % ($p < 0.05$), $T_{\text{мд}}$ на 13.6 % ($p < 0.05$), а также $\sigma_{\text{мс}}$ в 2.25 раза ($p < 0.05$) и $T_{\text{мс}}$ в 1.97 раза ($p < 0.05$).

Выводы. В группе контактирующих с вибрацией и больных ВБ 1-й ст., в отличие от лиц, не подвергающихся воздействию производственно-вредных факторов, происходит возрастание стресса и напряжения прежде всего в кольцевом направлении в диастолу, что говорит об активации гетерометрического типа авторегуляции сердечной деятельности. У больных ВБ 2-й ст. стресс и напряжение повышаются в меридиональном направлении в систолу, что свидетельствует о нивелировании гиперфункции ЛЖ по изотоническому типу.

Ключевые слова: внутримиекардиальный стресс, внутримиекардиальное напряжение, вибрация, вибрационная болезнь, гемодинамика.

Поступила 26.01.2021
Принята 20.02.2021

Автор, ответственный за переписку
Третьяков Сергей Владиславович: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный медицинский университет» Минздрава России. 630091, г. Новосибирск, Красный просп., 52.
E-mail: ser53953824@yandex.ru

Received 26.01.2021
Accepted 20.02.2021

Corresponding author
Tretyakov Sergey Vladislavovich: Novosibirsk State Medical University, 52, Krasny Prospekt, Novosibirsk, 630091, Russia.
E-mail: ser53953824@yandex.ru

ABSTRACT

Aim. Study of intramyocardial stress of the left ventricle (LV) in persons exposed to occupational vibration and patients with hand-arm vibration syndrome (HAVS).

Materials and methods. We examined 15 individuals exposed to vibration, 44 individuals with grade 1 HAVS, 10 individuals with grade 2. The control group consisted of 20 persons without cardiovascular pathology, who had not been exposed to hazardous occupational factors. The main occupational hazards in persons with HAVS were vibration, noise, physical exertion.

Echocardiography was carried out to determine the total volume of LV (V_{total}); the volume of myocardium (V_m); myocardial mass (LVMM); myocardial mass index (LVMMI); systolic intraventricular pressure; the intensity of the functioning of the LV structures; LV circumferential and meridional diastolic and systolic stresses (σ_{cd} , σ_{cs} and σ_{md} , σ_{ms} respectively); LV tension in the circumferential and meridional direction during systole and diastole (T_{cs} , T_{cd} and T_{ms} , T_{md} respectively).

Results. In persons exposed to vibration, in comparison with those who have not been exposed to occupational hazards, there is an increase in σ_{md} by 2.5 times ($p < 0.05$) and σ_{cd} by 2.8 times ($p < 0.05$). The tension increases during systole and diastole both in the circumferential (T_{cs} by 17.35%, $p < 0.05$; T_{ms} by 2.74 times, $p < 0.05$) and in the meridional (T_{cd} by 14.59%, $p < 0.05$; T_{md} by 2.76 times, $p < 0.05$) directions. In persons with grade 1 HAVS, there is an increase during diastole σ_{md} by 2.2 times ($p < 0.05$), σ_{cd} by 2.4 times ($p < 0.05$), and T_{md} ($p < 0.05$) and T_{ms} by 2.5 times ($p < 0.05$).

In patients with grade 2 HAVS, in contrast to those with grade 1 and persons exposed to vibration, there is a change in the working conditions of LV. With the same values of V_{total} , V_m , LVMM and LVMMI, as in the described groups, in patients with grade 2 HAVS, there is a decrease by 12.3% ($p < 0.05$) in systolic intraventricular pressure against the background of an increase in σ_{md} by 14.7% ($p < 0.05$), T_{md} by 13.6% ($p < 0.05$), as well as σ_{ms} by 2.25 times ($p < 0.05$) and T_{cd} by 1.97 times ($p < 0.05$).

Conclusion. In the group of persons exposed to vibration and patients with grade 1 HAVS, in contrast to those who are not exposed to occupational hazards, there is an increase in stress and tension, primarily in the circumferential direction during diastole, which indicates the activation of the heterometric type of autoregulation of activity of the heart. In patients with grade 2 HAVS, stress and tension increase in the meridional direction during systole, which indicates the levelling of LV hyperfunction by isotonic type.

Keywords: intramyocardial stress, intramyocardial tension, vibration, hand-arm vibration syndrome, hemodynamics.

ВВЕДЕНИЕ

Миокардиальный стресс (МС) характеризует силу натяжения волокон миокарда на единицу поперечного сечения стенки левого желудочка (ЛЖ) и является количественным отражением величины пред- и постнагрузки ЛЖ. В конце диастолы он выражает преднагрузку, в конце систолы — постнагрузку [1]. По мнению ряда авторов повышение МС может расцениваться как прогностический фактор гипертрофии ЛЖ, которая, в свою очередь, является важным звеном в процессе ремоделирования сердца [2]. Показано, что ключевую роль в регулировании миокардиального ответа на биомеханическую перегрузку в фибробластах и кардиомиоцитах играет белок ST2, который является членом семейства рецепторов интерлейкина-1 и участвует в функционировании кардиопротективной сигнальной системы в миокарде, контролируя гипертрофию и фиброз [3–5]. Несмотря на различия в этиологии и патогенезе кардиальных заболеваний, некоторые молекулярные, биохимические и механические процессы, приводящие к выраженным нарушениям структуры и функции сердца, во многом схожи [6]. В клинике профессиональных болезней существует насущная необходимость вы-

INTRODUCTION

Myocardial stress (MS) characterizes the tension force of the myocardial fibers per unit cross-section of the left ventricle (LV) wall and is a quantitative reflection of the magnitude of LV pre- and afterload. At the end of diastole, it expresses preload, at the end of systole — afterload [1]. According to several authors, an increase in MS can be regarded as a predictor of LV hypertrophy, which, in turn, is an important link in the process of remodelling of the heart [2]. It has been shown that the key role in regulating the myocardial response to biomechanical overload in fibroblasts and cardiomyocytes is played by the ST2 protein which is a member of the interleukin-1 receptor family and is involved in the functioning of the cardioprotective signalling system in the myocardium, controlling hypertrophy and fibrosis [3–5]. Despite the differences in the etiology and pathogenesis of cardiac diseases, some molecular, biochemical, and mechanical processes that lead to pronounced structural and functional heart disorders are largely similar [6]. For management patients with occupational diseases, there is an urgent need to identify predictors of possible unfavourable cardiovascular developments under the action of occupational hazards, in particular, vibration [7].

явления предикторов возможного неблагоприятного развития событий, в том числе со стороны сердечно-сосудистой системы, при действии производственно-вредных факторов, в частности, вибрации [7].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение миокардиального стресса левого желудочка у лиц, подвергающихся воздействию производственной вибрации, и больных вибрационной болезнью (ВБ).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследовано 15 чел., контактирующих с вибрацией (средний возраст 50.4 ± 3.6 года, средний стаж работы с вибрацией 25.4 ± 2.8 года), 54 больных вибрационной болезнью (средний возраст 66.6 ± 2.3 года, средний общий стаж 36 лет, стаж во вредных условиях труда 17.8 года, длительность послеконтактного периода 11.3 года). В зависимости от степени тяжести ВБ группа разделена на две подгруппы. Первую составили больные ВБ 1-й степени (ст.) (44 чел., средний возраст 51.4 ± 3.1 года, средний стаж работы с вибрацией 23.8 ± 4.4 года); вторую — больные ВБ 2-й ст. (10 чел., средний возраст 54.0 ± 3.5 года, средний стаж работы с вибрацией 24.3 ± 2.6 года). Группу контроля составили лица без сердечно-сосудистой патологии, не подвергавшиеся воздействию профессионально-вредных факторов (20 чел., средний возраст 43.4 ± 3.2 года).

Основными производственными неблагоприятными факторами у лиц с вибрационной болезнью являлись вибрация, шум, физическое напряжение.

Вибрационные параметры основных пневмоинструментов характеризуются превышением санитарных норм на 2–15 дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 16, 63, 125 и 250 Гц. Наиболее высокие уровни виброскорости, превышающие предельно допустимые значения до 14 дБ, отмечены при выполнении технологических операций по «зачистке сварочных швов». Дополнительными неблагоприятными факторами у рабочих были шум, превышающий предельно допустимые уровни при работе пневмоинструментов на 5–20 дБ в зависимости от характера операций, места их выполнения и физическое перенапряжение мышечно-суставного аппарата верхних конечностей.

Верификация диагноза вибрационной болезни осуществлялась на основе капилляроскопии лимба, ногтевого ложа, реовазографии, допле-

AIM OF THE RESEARCH

Study of myocardial stress of the left ventricle in persons exposed to occupational vibration and in patients with hand-arm vibration syndrome (HAVS).

MATERIALS AND METHODS

We examined 15 individuals exposed to vibration (average age was 50.4 ± 3.6 years, average work experience with vibration was 25.4 ± 2.8 years), 54 patients with HAVS (average age was 66.6 ± 2.3 years, the average total experience was 36 years, experience in hazardous working conditions was 17.8 years, the duration of the post-exposure period was 11.3 years). Depending on the severity of HAVS, the group is divided into two subgroups. The first subgroup consisted of patients with grade 1 HAVS (44 individuals, average age was 51.4 ± 3.1 years, average work experience with vibration was 23.8 ± 4.4 years); the second subgroup included patients with grade 2 HAVS (10 individuals, average age was 54.0 ± 3.5 years, average work experience with vibration was 24.3 ± 2.6 years). The control group consisted of persons without cardiovascular pathology, who were not exposed to hazardous occupational factors (20 individuals, average age 43.4 ± 3.2 years).

The main occupational hazards in persons with HAVS were vibration, noise, physical exertion.

The vibration parameters of the main pneumatic tools are characterized by an excess of sanitary standards by 2–15 dB in octave bands with geometric mean frequencies of 16, 63, 125 and 250 Hz. The highest level of vibration velocity, exceeding the maximum permissible values of up to 14 dB, was noted when performing technological operations for “cleaning welded seams”. Additional unfavourable factors among workers were noise exceeding the maximum permissible levels during the operation of pneumatic tools by 5–20 dB, depending on the nature of operations, the place of their performance, and physical overexertion of the muscles and joints of the upper extremities.

The diagnosis of hand-arm vibration syndrome was verified based on capillaroscopy of the limbus, nail bed, rheovasography, Doppler ultrasonography and electromyography of the upper and lower extremities, assessment of pain and vibration sensitivity, dynamometry, and thermometry of the upper extremities. In the clinical picture of the disease, peripheral angiodystonic syndrome and vegetative-sensory polyneuropathy syndrome of the upper extremities were noted.

рангиографии и электромиографии верхних и нижних конечностей, исследования болевой и вибрационной чувствительности, динамометрии и термометрии верхних конечностей. В клинической картине заболевания отмечались периферический ангиодистонический синдром и синдром вегетативно-сенсорной полинейропатии верхних конечностей.

В исследование не включались лица с гипертонической болезнью, вторичной артериальной гипертензией, с врожденными и приобретенными пороками сердца, ишемической болезнью сердца, поражением гепатобилиарной системы, эндокринологическими заболеваниями.

Проводилось ультразвуковое исследование сердца. Определялись конечно-систолический (КСО, мл), конечно-диастолический (КДО, мл) и ударный (УО, мл) объемы левого желудочка. Используя методику Трой в модификации Ю.Н. Беленкова [8], определяли общий объем левого желудочка ($V_{\text{общ}}$, мл), объем его миокарда (V_m , мл), массу миокарда (ММЛЖ, г), индекс массы миокарда (ИММЛЖ, г/м²). Систолическое внутрижелудочковое давление (СВЖД, дин/см²) рассчитывали по М. Quinones et al. [9]. Этот показатель использовался для расчета интенсивности функционирования структур (ИФС) левого желудочка. Внутримиекардиальный циркулярный (кольцевой) диастолический (σ_{cd}) и систолический (σ_{cs}) стрессы рассчитывали по методу Н. Sandler [10] и Н. Dodge [11] в модификации R.A. Ratshin et al. [12]. Расчет внутримиекардиального меридионального систолического (σ_{ms}) и диастолического (σ_{md}) стрессов производили по формуле G. Marsh et al. [13]. Определялось внутримиекардиальное напряжение в экваториальном (кольцевом) и меридиональном направлениях в систолу ($T_{\text{кс}}$ и $T_{\text{мс}}$) и диастолу (T_{kd} и T_{md}) по методу Н. Sandler [10] и Н. Dodge [11]. При этом в качестве показателя преднагрузки левого желудочка использовали конечно-диастолическое экваториальное стеночное напряжение. Для определения постнагрузки, согласно К.М. Borow et al. [14], применяли максимальное систолическое стеночное напряжение в конце фазы изометрического сокращения [12].

Полученный цифровой материал был обработан с помощью вариационно-статистических методов путем расчета средней арифметической (M), среднеквадратичного отклонения (σ). Различия показателей рассчитывалось методом разностной статистики по критерию Стьюдента и считалось статистически значимым при $p < 0.05$ (при 5% уровне значимости).

The study did not include persons with hypertension, secondary arterial hypertension, congenital and acquired heart defects, coronary heart disease, damage of the hepatobiliary system, endocrinological diseases.

Echocardiography was performed. The end-systolic (ESV, ml), end-diastolic (EDV, ml) and stroke (SV, ml) volumes of the left ventricle were determined. Using the Troy technique modified by Yu.N. Belenkov [8], the total volume of the left ventricle (V_{total} , ml), the volume of its myocardium (V_m , ml), myocardial mass (LVMM, g), and myocardial mass index (LVMMI, g/m²) were determined. Systolic intraventricular pressure (SIVP, dyne/cm²) was calculated according to M. Quinones et al. [9]. This indicator was used to calculate the intensity of functioning of structures (IFS) of the left ventricle. Intramyocardial circumferential diastolic (σ_{cd}) and systolic (σ_{cs}) stresses were calculated using the method of H. Sandler [10] and H. Dodge [11] modified by R.A. Ratshin et al. [12]. To calculate intramyocardial meridional systolic (σ_{ms}) and diastolic (σ_{md}) stresses, we used the formula of G. Marsh et al. [13]. The intramyocardial tension was determined in the circumferential and meridional directions during systole (T_{cs} и T_{ms}) and diastole (T_{cd} и T_{md}) by the method of H. Sandler [10] and H. Dodge [11]. In this case, end-diastolic circumferential wall tension was used as an indicator of left ventricular preload. To determine the afterload, according to K.M. Borow et al. [14] maximum systolic wall tension at the end of isometric contraction was applied [12].

The qualitative data obtained were processed using variational statistical methods by calculating the arithmetic mean (M), standard deviation (σ). The difference in indicators was calculated by the method of difference statistics according to the Student's test and was considered statistically significant at $p < 0.05$ (at 5% significance level).

RESULTS AND DISCUSSION

In persons exposed to vibration, there is a moderate increase in the total volume of the left ventricle by 1.23 times ($p < 0.05$), which is associated with an increase in the volume of the left ventricular myocardium (by 17.75%, $p < 0.05$), as well as an increase in both the mass of the left ventricular myocardium by 17.70% ($p < 0.05$) and its index by 11.57% ($p < 0.05$). A high correlation ($r = +0.9$) between the values of the total volume of the left ventricle and the mass of its myocardium was revealed. An increase in σ_{md} by 2.5 times ($p < 0.05$) and σ_{cd} by 2.8 times ($p < 0.05$) is noted. In this case, there is an increase in the tension

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

У лиц, имеющих контакт с вибрацией, отмечается умеренное увеличение общего объема левого желудочка в 1.23 раза ($p < 0.05$), что связано с ростом объема миокарда левого желудочка (на 17.75 %, $p < 0.05$), а также повышением как массы миокарда левого желудочка на 17.70 % ($p < 0.05$), так и его индекса на 11.57 % ($p < 0.05$). Выявлена высокая корреляционная взаимосвязь ($r = +0.9$) значений общего объема левого желудочка и массы его миокарда. Отмечается возрастание $\sigma_{\text{мд}}$ в 2.5 раза ($p < 0.05$) и $\sigma_{\text{кд}}$ в 2.8 раза ($p < 0.05$). При этом наблюдается увеличение напряжения стенки левого желудочка, которое представляет собой силу, действующую на единицу длины и связанную с применением стресса [11]. Напряжение повышается в систолу и диастолу как в кольцевом ($T_{\text{кс}}$ на 17.35 %, $p < 0.05$; $T_{\text{кд}}$ в 2.74 раза, $p < 0.05$), так и в меридиональном ($T_{\text{мс}}$ на 14.59 %, $p < 0.05$; $T_{\text{мд}}$ в 2.76 раза, $p < 0.05$) направлениях, т.е. укорочение циркулярных мышечных волокон происходит хотя и практически с той же скоростью, но при больших напряжениях (табл. 1).

of the left ventricular wall, which is a force acting per unit length and associated with the application of stress [11]. The tension increases during systole and diastole both in the circumferential (T_{cs} by 17.35%, $p < 0.05$; T_{cd} by 2.74 times, $p < 0.05$) and in the meridional (T_{ms} by 14.59%, $p < 0.05$; T_{md} by 2.76 times, $p < 0.05$) directions, i.e., contraction of circular muscle fibres occurs, although at practically the same rate, but at high stresses (Table 1).

In the studied individuals, the observed increase in the mass of the myocardium is aimed at reducing the tension of its wall, which leads to a decrease in the intensity functioning of the heart structures in comparison with the control group by 1.2 times ($p < 0.05$) due to the removal of a part of the load per unit of heart mass and, accordingly, to a decrease in oxygen consumption per unit mass of the myocardium. In this case, the stroke volume of the left ventricle increases due to an increase in its end-diastolic volume (see Table 1), which indicates Frank-Starling mechanism triggering. The Frank-Starling phenomenon is based on a molecular mechanism, the essence of which is that the degree of overlap of thick myosin

Таблица 1. Внутримыокардиальный стресс, напряжение и некоторые показатели сократительной функции левого желудочка у лиц, контактирующих с вибрацией ($M \pm \sigma$)

Table 1. Intramyocardial stress, tension and some indicators of the contractile function of the left ventricle in persons exposed to vibration ($M \pm \sigma$)

Показатель Parameter	Лица без сердечно-сосудистой патологии, не подвергавшиеся воздействию профессионально-вредных факторов Persons without cardiovascular pathology who have not been exposed to occupational hazards ($n = 20$)	Контакт с вибрацией Exposure to vibration ($n = 15$)	p
УО, мл / SV, ml	67.65 $\pm$ 19.66	88.50 $\pm$ 21.95	<0.05
КДО, мл / EDV, ml	97.05 $\pm$ 22.17	118.00 $\pm$ 23.61	<0.05
КСО, мл / ESV, ml	30.40 $\pm$ 6.52	30.50 $\pm$ 6.04	>0.05
$V_{\text{общ}}$, мл / V_{total} , ml	207.08 $\pm$ 30.07	254.67 $\pm$ 31.09	<0.05
$V_{\text{м}}$, мл / V_{m} , ml	102.48 $\pm$ 15.91	124.59 $\pm$ 17.37	<0.05
ММЛЖ, г / LVMM, g	107.66 $\pm$ 16.63	130.82 $\pm$ 18.24	<0.05
ИММЛЖ, г/м ² LVMMI, g/m ²	67.61 $\pm$ 10.86	76.46 $\pm$ 8.87	<0.05
СВЖД, дин/см ² SIVP, dyn/cm ²	109.15 $\pm$ 14.39	113.01 $\pm$ 19.28	>0.05
$\sigma_{\text{мд}}$, дин/см ² $\sigma_{\text{мд}}$, dyn/cm ²	47.16 $\pm$ 5.37	118.61 $\pm$ 23.07	<0.05
$\sigma_{\text{кд}}$, дин/см ² $\sigma_{\text{кд}}$, dyn/cm ²	91.24 $\pm$ 11.98	253.59 $\pm$ 41.78	<0.05
$\sigma_{\text{мс}}$, дин/см ² $\sigma_{\text{мс}}$, dyn/cm ²	38.76 $\pm$ 4.47	40.17 $\pm$ 5.37	>0.05
$\sigma_{\text{кс}}$, дин/см ² $\sigma_{\text{кс}}$, dyn/cm ²	105.15 $\pm$ 8.72	108.06 $\pm$ 9.03	>0.05
$T_{\text{кс}}$, дин/см ² $T_{\text{кс}}$, dyn/cm ²	139.83 $\pm$ 18.16	169.19 $\pm$ 38.70	<0.05
$T_{\text{кд}}$, дин/см ² $T_{\text{кд}}$, dyn/cm ²	90.25 $\pm$ 9.71	247.11 $\pm$ 21.79	<0.05
$T_{\text{мс}}$, дин/см ² $T_{\text{мс}}$, dyn/cm ²	51.28 $\pm$ 5.54	60.04 $\pm$ 0.25	>0.05
$T_{\text{мд}}$, дин/см ² $T_{\text{мд}}$, dyn/cm ²	41.81 $\pm$ 4.66	115.23 $\pm$ 11.95	<0.05
ИФС / IFS	69.55 $\pm$ 14.01	59.47 $\pm$ 7.64	>0.05

У изучаемых лиц наблюдаемое повышение массы миокарда направлено на уменьшение напряжения его стенки, что приводит к снижению интенсивности функционирования структур сердца по сравнению с группой контроля в 1.2 раза ($p < 0.05$) за счет снятия части нагрузки на единицу массы сердца и соответственно к уменьшению потребления кислорода на единицу массы миокарда. При этом ударный объем левого желудочка увеличивается в связи с ростом его конечно-диастолического объема (см. табл. 1), что свидетельствует о включении механизма Франка — Старлинга. В основе феномена Франка — Старлинга лежит молекулярный механизм, суть которого состоит в том, что от начальной длины мышцы зависит степень перекрытия толстых миозиновых и тонких актиновых нитей. Эта степень перекрытия определяет потенциально возможное (при данной концентрации кальция в саркоплазме) число замкнутых поперечных мостиков [15]. Увеличение конечно-диастолического объема желудочка ведет к более мощному его сокращению, а нарастание размера его полости позволяет выбрасывать больший объем крови [16]. Формируется изотоническая гиперфункция. Известно, что преимущественно изотоническая гиперфункция характеризуется увеличением ударного и минутного объемов сердца при неизменном давлении в желудочке [17]. Длина миокардиального волокна может увеличиваться при повышении венозного возврата крови к сердцу [18], т.е. преднагрузки. При этом возрастает конечно-диастолическое экваториальное стеночное напряжение ($\sigma_{\text{кд}}$). Таким образом, в группе лиц, контактирующих с вибрацией, наблюдаются адаптационно-приспособительные реакции, затрагивающие всю гемодинамическую систему. Очевидно, изменения, развивающиеся при долговременной адаптации, не могут быть ограничены рамками даже самой широкой функциональной системы, они в той или иной мере охватывают весь организм. Развитие адаптации происходит как процесс формирования системного структурного следа, а адаптационная перестройка сердца — необходимое звено этой системы [19]. Полученные данные свидетельствуют о формировании гетерометрического механизма авторегуляции сердечной деятельности.

Результаты изучения функционального состояния сердца у группы лиц с ВБ 1-й ст. также демонстрируют активацию гетерометрического

and thin actin filaments depends on the initial length of the muscle. This degree of overlap determines the potentially possible (at a given calcium concentration in the sarcoplasm) number of closed transverse bridges [15]. An increase in the end-diastolic volume of the ventricle leads to a more powerful contraction, and an increase in the size of its cavity allows a larger volume of blood to be ejected [16]. Isotonic hyperfunction is formed. It is known that predominantly isotonic hyperfunction is characterized by an increase in stroke and cardiac output at a constant pressure in the ventricle [17]. The length of the myocardial fiber can increase with an increase in venous return of blood to the heart [18], i.e., preload. In this case, the end-diastolic circumferential wall tension (σ_{cd}) increases. Thus, in the group exposed to vibration, adaptive reactions affect the entire hemodynamic system. Obviously, the changes that develop during long-term adaptation cannot be limited by the framework of even the broadest functional system, they in one way or another cover the entire body. The adaptations occur as a process of forming a systemic structural trace, and the adaptive restructuring of the heart is a necessary link in this system [19]. The data obtained indicate the formation of a heterometric mechanism of autoregulation of cardiac activity.

The results of the study of the heart functional state in persons with grade 1 HAVS also demonstrate activation of the heterometric mechanism of autoregulation of cardiac activity, expressed in an increase during diastole as σ_{md} by 2.2 times ($p < 0.05$), σ_{cd} 2.4 times ($p < 0.05$), and T_{md} ($p < 0.05$) and T_{cd} by 2.5 times ($p < 0.05$). This resulted in an increase in EDV by 10.2% ($p < 0.05$), which contributed to an increase in SV by 7.2%. An increase in V_{total} by 13.4% ($p < 0.05$) is associated not only with an increase in EDV but also V_{m} by 18.3% ($p < 0.05$). This was reflected in an increase in LVMM by 17.2% ($p < 0.05$), LVMMI by 11.8% ($p < 0.05$) and SIVP by 12.99% ($p < 0.05$), and a decrease in IFC by 13.8% ($p < 0.05$) (Table 2).

In patients with grade 2 HAVS, in contrast to patients with grade 1 and persons exposed to vibration, there is a change in the working conditions of the left ventricle. With the same values of V_{total} , V_{m} , LVMM and LVMMI, as in the described groups, in patients with 2 grade HAVS there is a 12.3% decrease in SIVP ($p < 0.05$) against the background of an increase in σ_{md} by 14.7% ($p < 0.05$), T_{md} by 13.6% ($p < 0.05$), as well as σ_{ms} by 2.25 times ($p < 0.05$) and T_{ms} by 1.97 times ($p < 0.05$). The latter indicates an increase in afterload for the left ventricle, which led to an increase in ESV by 14.5% ($p < 0.05$). This indicates more pro-

механизма авторегуляции сердечной деятельности, выражающуюся в увеличении в диастолу как $\sigma_{\text{мд}}$ в 2.2 раза ($p < 0.05$), $\sigma_{\text{кд}}$ в 2.4 раза ($p < 0.05$), так и $T_{\text{мд}}$ ($p < 0.05$) и $T_{\text{кд}}$ в 2.5 раза ($p < 0.05$). Это повлекло повышение КДО на 10.2 % ($p < 0.05$), что способствовало росту УО ЛЖ на 7.2 %. Увеличение $V_{\text{общ}}$ на 13.4 % ($p < 0.05$) связано не только с увеличением КДО, но и $V_{\text{м}}$ на 18.3 % ($p < 0.05$). Это нашло свое отражение в возрастании ММЛЖ на 17.2 % ($p < 0.05$), ИММЛЖ на 11.8% ($p < 0.05$) и СВЖД на 12.99 % ($p < 0.05$) и снижении ИФС на 13.8 % ($p < 0.05$) (табл. 2).

У больных ВБ 2-й ст., в отличие от больных ВБ 1-й ст. и лиц, контактирующих с вибрацией, происходит изменение условий работы левого желудочка. При таких же значениях $V_{\text{общ}}$, $V_{\text{м}}$, ММЛЖ и ИММЛЖ, как в описываемых группах, у больных ВБ 2-й ст. отмечается снижение СВЖД на 12.3 % ($p < 0.05$) на фоне возрастания $\sigma_{\text{мд}}$ на 14.7 % ($p < 0.05$), $T_{\text{мд}}$ на 13.6 % ($p < 0.05$), а также $\sigma_{\text{мс}}$ в 2.25 раза ($p < 0.05$) и $T_{\text{мс}}$ в 1.97 раза ($p < 0.05$). Последнее свидетельствует об увеличении постна-

nounced changes in the geometry of the left ventricle (Table 3) when the process of transition to a more spherical shape is stimulated. A limitation of the implementation of the Frank-Starling mechanism occurs and the heterometric mechanism of autoregulation of cardiac activity is limited.

CONCLUSION

The study of intramyocardial stresses and left ventricular stresses in the circumferential and meridional directions in persons exposed to occupational vibration showed that in the group of individuals that had been exposed to vibration and patients with grade 1 HAVS, in contrast to those who had not been exposed to occupational hazards, there is an increase in stress and tension, primarily in the circumferential direction during diastole, which indicates an increase in blood flow to the left sections, the start of the Frank-Starling mechanism, i.e., about the activation of the heterometric type of autoregulation of cardiac activity. In patients with grade 2 HAVS, there is an increase in stress and ten-

Таблица 2. Внутримиекардиальный стресс, напряжение и некоторые показатели сократительной функции левого желудочка у больных с ВБ 1-й степени ($M \pm \sigma$)

Table 2. Intramyocardial stress, tension and some indicators of the contractile function of the left ventricle in patients with grade 1 HAVS ($M \pm \sigma$)

Показатель Parameter	Лица без сердечно-сосудистой патологии, не подвергавшиеся воздействию профессионально-вредных факторов Persons without cardiovascular pathology who have not been exposed occupational hazards ($n = 20$)	Больные с ВБ 1-й степени Patients with grade 1 HAVS ($n = 44$)	p
УО, мл / SV, ml	67.65 ± 19.66	73.67 ± 16.67	>0.05
КДО, мл / EDV, ml	97.05 ± 22.17	108.00 ± 25.10	<0.05
КСО, мл / ESV, ml	30.40 ± 6.52	35.20 ± 13.17	<0.05
$V_{\text{общ}}$, мл / V_{total} , ml	207.08 ± 30.07	238.86 ± 31.94	<0.05
$V_{\text{м}}$, мл / $V_{\text{м}}$, ml	102.48 ± 15.91	125.33 ± 14.94	<0.05
ММЛЖ, г / LVMM, g	107.66 ± 16.63	131.59 ± 15.69	<0.05
ИММЛЖ, г/м ² LVMMI, g/m ²	67.61 ± 10.86	76.59 ± 7.97	<0.05
СВЖД, дин/см ² SIVP, dyn/cm ²	109.15 ± 14.39	125.45 ± 23.06	<0.05
$\sigma_{\text{мд}}$, дин/см ² $\sigma_{\text{мд}}$, dyn/cm ²	47.16 ± 5.37	103.04 ± 15.47	<0.05
$\sigma_{\text{кд}}$, дин/см ² $\sigma_{\text{кд}}$, dyn/cm ²	91.24 ± 11.98	217.92 ± 44.79	<0.05
$\sigma_{\text{мс}}$, дин/см ² $\sigma_{\text{мс}}$, dyn/cm ²	38.76 ± 4.47	37.64 ± 6.93	>0.05
$\sigma_{\text{кс}}$, дин/см ² $\sigma_{\text{кс}}$, dyn/cm ²	105.15 ± 8.72	106.63 ± 11.95	>0.05
$T_{\text{кс}}$, дин/см ² $T_{\text{кс}}$, dyn/cm ²	139.83 ± 18.16	172.10 ± 17.11	<0.05
$T_{\text{кд}}$, дин/см ² $T_{\text{кд}}$, dyn/cm ²	90.25 ± 9.71	221.15 ± 46.87	<0.05
$T_{\text{мс}}$, дин/см ² $T_{\text{мс}}$, dyn/cm ²	51.28 ± 5.54	60.18 ± 7.67	>0.05
$T_{\text{мд}}$, дин/см ² $T_{\text{мд}}$, dyn/cm ²	41.81 ± 4.66	104.19 ± 14.39	<0.05
ИФС / IFS	69.55 ± 14.01	59.98 ± 12.60	>0.05

Таблица 3. Внутримиекардиальный стресс, напряжение и некоторые показатели сократительной функции левого желудочка у больных ВБ 2-й степени ($M \pm \sigma$)**Table 3.** Intramyocardial stress, tension and some indicators of the contractile function of the left ventricle in patients with grade 2 HAVS ($M \pm \sigma$)

Показатель Parameter	Больные с ВБ 1-й степени Patients with grade 1 HAVS (n = 44)	Больные с ВБ 2-й степени Patients with grade 2 HAVS (n = 10)	p
УО, мл / SV, ml	73.67 ± 16.67	67.83 ± 17.74	>0.05
КДО, мл / EDV, ml	108.00 ± 25.10	108.00 ± 17.52	>0.05
КСО, мл / ESV, ml	35.20 ± 13.17	41.16 ± 7.25	<0.05
$V_{\text{общ}}, \text{мл} / V_{\text{total}}, \text{мл}$	238.86 ± 31.94	237.94 ± 18.14	<0.05
$V_{\text{м}}, \text{мл} / V_{\text{м}}, \text{мл}$	125.33 ± 14.94	123.61 ± 8.45	<0.05
ММЛЖ, г / LVMM, g	131.59 ± 15.69	129.79 ± 8.88	<0.05
ИММЛЖ, г/м ² LVMMI, g/m ²	76.59 ± 7.97	78.69 ± 6.41	<0.05
СВЖД, дин/см ² SIVP, dyn/cm ²	125.45 ± 23.06	110.06 ± 4.20	>0.05
$\sigma_{\text{мд}}, \text{дин/см}^2 \sigma_{\text{мд}}, \text{дин/см}^2$	103.04 ± 15.47	120.74 ± 26.68	<0.05
$\sigma_{\text{кд}}, \text{дин/см}^2 \sigma_{\text{кд}}, \text{дин/см}^2$	217.92 ± 44.79	230.41 ± 35.57	<0.05
$\sigma_{\text{мс}}, \text{дин/см}^2 \sigma_{\text{мс}}, \text{дин/см}^2$	37.64 ± 6.93	84.85 ± 5.89	<0.05
$\sigma_{\text{кс}}, \text{дин/см}^2 \sigma_{\text{кс}}, \text{дин/см}^2$	106.63 ± 11.95	113.82 ± 13.08	<0.05
$T_{\text{кс}}, \text{дин/см}^2 T_{\text{кс}}, \text{дин/см}^2$	172.10 ± 17.11	162.39 ± 11.79	<0.05
$T_{\text{кд}}, \text{дин/см}^2 T_{\text{кд}}, \text{дин/см}^2$	221.15 ± 46.87	227.80 ± 24.64	<0.05
$T_{\text{мс}}, \text{дин/см}^2 T_{\text{мс}}, \text{дин/см}^2$	60.18 ± 7.67	118.69 ± 7.03	<0.05
$T_{\text{мд}}, \text{дин/см}^2 T_{\text{мд}}, \text{дин/см}^2$	104.19 ± 14.39	120.59 ± 31.71	<0.05
ИФС / IFS	59.98 ± 12.60	60.53 ± 11.48	>0.05

грузки для левого желудочка, что привело к росту КСО ЛЖ на 14.5 % ($p < 0.05$). Это говорит о более выраженных изменениях в геометрии левого желудочка (табл. 3), когда стимулируется процесс перехода к более сферической его форме. Происходит ограничение реализации механизма Франка — Старлинга, гетерометрический механизм авторегуляции сердечной деятельности ограничивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение внутримиекардиальных стрессов и напряжений левого желудочка в кольцевом и меридиональном направлениях у лиц, подвергающихся воздействию производственной вибрации, показало, что в группе контактирующих с вибрацией и больных ВБ 1-й ст., в отличие от лиц, не подвергающихся воздействию производственно-вредных факторов, происходит возрастание стресса и напряжения прежде всего в кольцевом направлении в диастолу, что говорит об увеличении притока крови к левым отделам, запуске механизма Франка — Старлинга, т.е. об активации гетерометрического типа авторегуляции сердечной деятельности. У больных ВБ 2-й ст.

сходит в меридиональном направлении во время систолы, что указывает на увеличение нагрузки для левого желудочка и, в контексте других гемодинамических параметров этой камеры сердца, о нивелировании гиперфункции левого желудочка по изотоническому типу, что связано, в частности, с более продолжительным постконтактным периодом у лиц этой группы.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

происходит возрастание стресса и напряжения в меридиональном направлении в систолу, что свидетельствует о росте постнагрузки для левого желудочка и, в контексте других гемодинамических параметров этой камеры сердца, о нивелировании гиперфункции левого желудочка по изотоническому типу, что связано, в частности, с более продолжительным постконтактным периодом у лиц этой группы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губарева И.В., Крюков Н.Н. Изучение взаимосвязи миокардиального стресса и натрийуретических пептидов у больных с различными типами диастолической дисфункции левого желудочка // Вестн. Волгоград. гос. мед. ун-та. 2014. № 1 (49). С. 108–110.
2. Нечесова Т.А., Коробко И.Ю., Кузнецова Н.И. Ремоделирование левого желудочка: патогенез и методы оценки // Мед. новости. 2008. № 11. С. 7–13.
3. Pascual-Figal D.A., Januzzi J.L. The biology of ST2: the International ST2 Consensus Panel // Am. J. Cardiol. 2015. Vol. 115 (7). P. 3B–7B.
4. Шиляева Н.В., Щукин Ю.В., Лимарева Л.В., Данильченко О.П. Биомаркеры миокардиального стресса и фиброза в определении клинических исходов у пациентов с сердечной недостаточностью, перенесших инфаркт миокарда // Рос. кардиол. журн. 2018. Т. 23, № 1. С. 32–36.
5. Каретникова В.Н., Кашталап В.В., Косарева С.Н., Барабаш О.Л. Фиброз миокарда: современные аспекты проблемы // Терапевт. арх. 2017. Т. 89, № 1. С. 88–93.
6. Воробьев А.С., Коваленко Л.В., Николаев К.Ю. и др. Роль миокардиального стресса и воспалительного ответа в формировании постинфарктного ремоделирования миокарда // Вестн. СурГУ. Медицина. 2020. № 1 (43). С. 66–74.
7. Третьяков С.В. Сердечно-сосудистая система при действии вибрации (гемодинамические и психокardiологические аспекты). М.: Русайнс, 2020. 160 с.
8. Беленков Ю.Н. Роль нарушений систолы и диастолы в развитии сердечной недостаточности // Терапевт. арх. 1994. № 9. С. 3–5.
9. Quinones M.A., Mokotoft D.M., Nouri S., Winters jr W.L., Miller R.R. Noninvasive quantification of left ventricular wall stress. Validation of method and application to assessment of chronic pressure overload // Am. J. Cardiol. 1980. Vol. 45 (4). P. 782–790.
10. Sandler H., Dodge H.T. Left ventricular tension and stress in man // Circ. Res. 1963. Vol. 13 (2). P. 91–104.
11. Dodge H.T., Hay R.E., Sandler H. An angiocardigraphic method for directly determining left ventricular stroke volume in man // Circ. Res. 1962. Vol. 11 (4). P. 739–745.
12. Ratshin R.A., Rackley C.E., Russell jr R.O. Determination of left ventricular preload and afterload by quantitative echocardiography in man // Circ. Res. 1974. Vol. 34 (5). P. 711–718.
13. Marsh G., Green L., Wynne J., Cohn P., Grossman W. Left ventricular end-systolic pressure-dimension and stress-length relations in normal human subject // Am. J. Cardiol. 1979. Vol. 44 (7). P. 1311–1317.
14. Borrow K.M., Green L.H., Grossman W., Braunwald E. Left ventricular end-systolic stress-shortening and stress-length relations in humans: Normal values and sensitivity to inotropic state // Am. J. Cardiol. 1982. Vol. 50 (6). P. 1301–1308.
15. Мархасин В.С., Изаков В.Я., Шумаков В.И. Физиологические основы нарушения сократительной функции миокарда. СПб.: Наука, 1994. 256 с.

REFERENCES

1. Gubareva I.V., Kryucov N.N. (2014). Studying the relationship between myocardial stress and natriuretic peptides in patients with various types of left ventricular diastolic dysfunction. *Journal of Volgograd State Medical University*, 1 (49), 108–110.
2. Nechesova T.A., Korobko I.Yu., Kuznetsova N.I. (2008). Left ventricular remodelling: pathogenesis and assessment methods. *Med. News*, 11, 7–13. In Russ.
3. Pascual-Figal D.A., Januzzi J.L. (2015). The biology of ST2: the International ST2 Consensus Panel. *Am. J. Cardiol.*, 115 (7), 3B–7B.
4. Shilyaeva N.V., Shchukin Yu.V., Limareva L.V., Danilchenko O.P. (2018). Biomarkers of myocardial stress and fibrosis for clinical outcomes assessment in post myocardial infarction heart failure patients. *Russ. Journal of Cardiology*, 23 (1), 32–36.
5. Karetnikova V.N., Kashtalap V.V., Kosareva S.N., Barabash O.L. (2017). Myocardial fibrosis: current aspects of the problem. *Therapeutic Archive*, 89 (1), 88–93.
6. Vorobyov A.S., Kovalenko L.V., Nikolaev K.Yu. et al. (2020). Myocardial stress and inflammatory response in the formation of post-infarction myocardial remodelling. *Vestnik SurGU. Medicina*, 1 (43), 66–74.
7. Tretyakov S.V. (2020). *The Cardiovascular System under the Influence of Vibration (Hemodynamic and Psychocardiological Aspects)*. M.: Ruscience, 2020, 160 p. In Russ.
8. Belenkov Yu.N. (1994). The role of systole and diastole disorders in the development of heart failure. *Therapeutic Archive*, 9, 3–5. In Russ.
9. Quinones M.A., Mokotoft D.M., Nouri S., Winters jr W.L., Miller R.R. (1980). Noninvasive quantification of left ventricular wall stress. Validation of method and application to assessment of chronic pressure overload. *Am. J. Cardiol.*, 45 (4), 782–790.
10. Sandler H., Dodge H.T. (1963). Left ventricular tension and stress in man. *Circ. Res.*, 13 (2), 91–104.
11. Dodge H.T., Hay R.E., Sandler H. (1962). An angiocardigraphic method for directly determining left ventricular stroke volume in man. *Circ. Res.*, 11 (4), 739–745.
12. Ratshin R.A., Rackley C.E., Russell jr R.O. (1974). Determination of left ventricular preload and afterload by quantitative echocardiography in man. *Circ. Res.*, 34 (5), 711–718.
13. Marsh G., Green L., Wynne J., Cohn P., Grossman W. (1979). Left ventricular end-systolic pressure-dimension and stress-length relations in normal human subject. *Am. J. Cardiol.*, 44 (7), 1311–1317.
14. Borrow K.M., Green L.H., Grossman W., Braunwald E. (1982). Left ventricular end-systolic stress-shortening and stress-length relations in humans: Normal values and sensitivity to inotropic state. *Am. J. Cardiol.*, 50 (6), 1301–1308.
15. Markhasin V.S., Izakov V.Ya., Shumakov V.I. (1994). *Physiological Bases of Myocardial Contractile Dysfunction*. Saint Petersburg: Nauka, 256 p. In Russ.
16. Mukharlyamov N.M. (1978). *Early Stages of Circulatory Failure and Mechanisms of its Compensation*. Moscow: Medicine, 248 p. In Russ.

16. Мухарлямов Н.М. Ранние стадии недостаточности кровообращения и механизмы ее компенсации. М.: Медицина, 1978. 248 с.
17. Меерсон Ф.З. Гиперфункция. Гипертрофия. Недостаточность сердца. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Медицина; Берлин: Народ и здоровье (ГДР), 1968. 388 с.
18. Меерсон Ф.З., Малышев И.Ю. Феномен адаптационной стабилизации структур и защита сердца. М.: Наука, 1993. 157 с.
19. Меерсон Ф.З. Адаптация, деадаптация и недостаточность сердца. М.: Медицина, 1978. 343 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Третьяков Сергей Владиславович — д-р мед. наук, профессор кафедры поликлинической терапии и общей врачебной практики (семейной медицины) ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный медицинский университет» Минздрава России.

Попова Анна Александровна — д-р мед. наук, доцент, заведующий кафедрой поликлинической терапии и общей врачебной практики (семейной медицины) ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный медицинский университет» Минздрава России.

Образец цитирования: Третьяков С.В., Попова А.А. Миокардиальный стресс левого желудочка при действии производственной вибрации // Journal of Siberian Medical Sciences. 2021. № 3. С. 4–13.

17. Meerson F.Z. (1968). *Hyperfunction. Hypertrophy. Heart Failure*. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Medicine; Berlin: People and Health (GDR), 388 p. In Russ.
18. Meerson F.Z., Malyshev I.Yu. (1993). *The Phenomenon of Adaptive Stabilization of Structures and Protection of the Heart*. Moscow: Nauka, 157 p. In Russ.
19. Meerson F.Z. (1978). *Adaptation, Deadaptation, and Heart Failure*. Moscow: Medicine, 343 p. In Russ.

ABOUT THE AUTHORS

Tretyakov Sergey Vladislavovich — Dr. Sci. (Med.), Professor, Department of Outpatient Therapy and General Medical Practice (Family Medicine), Novosibirsk State Medical University.

Popova Anna Aleksandrovna — Dr. Sci. (Med.), Associate Professor, Head, Department of Outpatient Therapy and General Medical Practice (Family Medicine), Novosibirsk State Medical University.

Citation example: Tretyakov S.V., Popova A.A. (2021). Myocardial stress of the left ventricle during occupational vibration. *Journal of Siberian Medical Sciences*, 3, 4–13.