УДК 69.002.5; 608.3

Обеспечение безопасности строительно-монтажных работ при возведении зданий и сооружений

Л.А.ГОЛДОБИНА[✉], П.А.ДЕМЕНКОВ, О.В.ТРУШКО

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

При возведении зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения важным является обеспечение безопасных условий труда оператору башенного крана и исполнителям строительно-монтажных работ на строительной площадке, поскольку эти условия во многом определяют производительность башенного крана и темпы строительства в целом.

Аварии, связанные с использованием грузоподъемной техники в строительстве, зачастую приводят не только к травматизму и гибели участников самого строительного производства, но и сторонних прохожих, оказавшихся в опасной зоне в силу несоответствия проекта организации строительства требованиям действующих сводов правил, содержащих требования по обеспечению охраны труда и промышленной безопасности в строительстве.

Статья посвящена анализу причин аварийности в строительстве, вызванных эксплуатацией башенных кранов, и путей обеспечения их надежной и безопасной эксплуатации.

Предложены теоретическое обоснование и инженерно-технические решения обеспечения безопасности при выполнении строительно-монтажных работ по возведению строительных объектов за счет совершенствования конструкции кабины башенного крана и ее оснастки. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований сенсомоторной деятельности оператора строительной машины, заложенные в основу разработанных на уровне изобретений инженерно-технических решений кабин башенных кранов повышенной обзорности и их оснастки.

Ключевые слова: система «оператор – строительная машина – среда»; башенный кран; обзорные качества кабин; энтропия; информация

Как цитировать эту статью: Голдобина Л.А. Обеспечение безопасности строительно-монтажных работ при возведении зданий и сооружений / Л.А.Голдобина, П.А.Деменков, О.В.Трушко // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 583-595. DOI 10.31897/PMI.2019.5.583

Анализ причин аварийности и травматизма при эксплуатации подъемно-транспортных машин в строительстве. Строительство высотных объектов требует внедрения новых технологий с широким использованием подъемно-транспортных машин. Однако известно, что сегодня по-прежнему при возведении строительных объектов широко используются башенные краны различных размерных групп, которые являются объектами повышенной опасности.

Строительная отрасль нуждается в создании отечественных строительных машин, обеспечивающих не только высокую производительность строительно-монтажных работ, но и безопасную их эксплуатацию. При этом новые машины должны обеспечить безопасность самого оператора строительной машины и работников строительных бригад, находящихся в зоне действия машины.

Современные отечественные и зарубежные технологии возведения высотных зданий и сооружений имеют различия. Например, в США возведение высотных объектов выполняется с помощью рабочих платформ, которые устанавливаются на металлические конструкции зданий или в их лифтовых шахтах. В России при возведении объектов повышенной этажности применяются башенные краны различных размерных групп в зависимости от высоты сооружения. За последние годы организационно-технологические схемы и модели по возведению зданий и сооружений существенно изменились, однако башенные краны высоких размерных групп остаются основными грузоподъемными машинами, посредством которых осуществляются грузоподъемные работы при монтаже строительных конструкций [6].

По данным Ростехнадзора, аварии и несчастные случаи при эксплуатации грузоподъемных кранов становятся причиной смертельного травматизма. Так, например, при эксплуатации подъемных сооружений в период с 2005 по 2016 год на поднадзорных объектах произошло 476 аварий и 826 несчастных случаев со смертельным исходом (рис.1) [2]. Наибольшее количество аварий отмечается при эксплуатации башенных кранов: 13 аварий (31 %) из 42 аварий. Остальные аварии распределились следующим образом: при эксплуатации гусеничных кранов – 11 (26 %);

Рис.1. Диаграмма аварий при эксплуатации подъемных сооружений (а) и несчастных случаев со смертельным исходом на подъемных сооружениях (б) в РФ (2005-2016 гг.)

Рис.2. Распределение аварий (а) и несчастных случаев со смертельным травматизмом (б) по видам техники

Таблица 1

Анализ смертельного травматизма при эксплуатации грузоподъемной техники (2016 г.)

Вид техники	Количество зарегистрированной техники	Количество погибших	Коэффициент смертельного травматизма
Башенные краны	17 403	10	0,57
Автомобильные краны	61 875	6	0,10
Мостовые краны	71 648	7	0,10
Козловые краны	13 254	3	0,23
Гусеничные краны	9 294	0	0
Краны-манипуляторы	12 413	1	0,08

автомобильных кранов – 7 (17 %); кранов-манипуляторов – 4 (9 %); козловых кранов – 3 (7 %); мостовых кранов – 2 (4 %); порталных и железнодорожных кранов – 2 (4 %) (рис.2) [2, 11].

Применяемый в рамках анализа статистики и причин смертельного травматизма на опасных производственных объектах показатель учитывает количество погибших и число зарегистрированной в Ростехнадзоре и эксплуатируемой под надзорными организациями техники соответствующего вида, т.е. коэффициент смертельного травматизма на 1000 единиц техники. Применение такого показателя позволяет сделать выводы об уровне относительной угрозы аварии или несчастного случая на строительном объекте в зависимости от эксплуатируемых на нем видов техники (табл.1).

Среди причин аварийности подъемных сооружений преобладают следующие: отсутствие контроля за соблюдением требований безопасности со стороны организации, осуществляющей строительство здания или сооружения, а также лиц, ответственных за содержание грузоподъемной техники; отсутствие контроля за безопасным проведением строительно-монтажных и грузоподъемных работ с применением подъемно-транспортной техники; привлечение к работе лиц, не имеющих должной квалификации; низкий уровень трудовой дисциплины; нарушение технологии выполнения строительно-монтажных работ; нарушение графиков проведения технических осмотров, ремонтов и освидетельствований подъемных сооружений; физический и моральный износ подъемно-транспортной техники; низкий уровень внедрения новой техники и технологий [2].

Среди основных причин аварийности и травматизма при эксплуатации подъемных сооружений

являются отказы отдельных элементов и подсистем системы «оператор – строительная машина – среда» (ОСМС), что в очередной раз подтверждает давно назревшую необходимость комплексного подхода к изучению системы ОСМС с разработкой и внедрением организационно-технологических и инженерно-технических мероприятий, направленных на обеспечение ее безопасности.

Основными направлениями в развитии современной грузоподъемной техники являются: разработка новых и модернизация существующих машин с целью обеспечения безопасности производства строительно-монтажных работ, безопасности и улучшения условий труда оператора подъемного сооружения (машины) и других работников, участвующих в возведении строительного объекта [6].

Теоретическое обоснование концепции анализа и оценки безопасности системы «оператор – строительная машина – среда». Уровень условий и охраны труда оператора строительного крана, в частности башенного крана, во многом определяется оптимальным выбором и использованием материальных, финансовых и человеческих ресурсов. Поэтому необходим методологический подход изучения состояния безопасности этой человеко-машинной системы в целом, позволяющий выполнить анализ условий труда и предложить систему мероприятий, предупреждающих потенциальные опасности [5]. Система ОСМС является сложным многофакторным объектом, а, следовательно, показатель ее надежности должен не просто констатировать состояние системы, а служить инструментом для регулирования ее безопасной работы.

Анализ научных публикаций отечественных ученых и специалистов, а также научно-исследовательских коллективов, занимающихся вопросами трудовой деятельности, свидетельствует, что в настоящее время существует немало комплексных методик и рассчитанных по ним интегральных показателей, отражающих уровень безопасности и надежности сложных человеко-машинных систем.

В статье в качестве критерия комплексной оценки безопасности системы ОСМС представляется к обсуждению обобщенный показатель устойчивости, разработанный на основе энергоэнтропийной теории [5, 10, 14-16], основанной на методах теории информации К.Шеннона – американского инженера и математика, основателя теории информации. Основанием для этих методов является заимствованная у статистической физики вероятностная функция энтропии. Методы, которые использовал К. Шеннон для чисто прикладных задач техники связи, оказались универсальными: с их помощью можно выполнять анализ процессов самоорганизации как отдельных физических тел, так и сложнейших интеллектуальных и социальных систем.

Кроме этого, была взята за основу и теория, позволяющая изучать состояние и развитие сложных технических и социальных систем на основании информационно-энтропийных свойств, которая была предложена проф. Е.А.Седовым и показана в его известных трудах «Эволюция и информация» и «Информационно-энтропийные свойства социальных систем», отраженных в выступлении на заседании по изучению цивилизационных кризисов 28 января 1993 г. [14].

Динамическая система ОСМС находится в постоянном движении в пространстве и во времени под действием как непрерывных, так и случайных возмущающих внутренних и внешних факторов по отношению к системе, что может вызвать в ней постепенное и скачкообразное изменение (т.е. «катастрофу»). Это означает, что интегральные свойства системы ОСМС: безопасность, надежность, эффективность, определяющие цель работы системы, – меняются или «вибрируют». Для обеспечения стабильности этих свойств важно сохранять устойчивость системы к этим возмущающим факторам. К таким факторам следует отнести материальные (вещественные, энергетические) и структурные (информационные) воздействия.

Для обеспечения безопасной работы системы ОСМС необходимо постоянное и своевременное получение крановщиком информации о состоянии «строительной машины» (башенного крана) и о «среде». Под «средой» предлагается понимать «микросреду» и «макросреду», соответственно внутреннюю и внешнюю по отношению к системе ОСМС.

«Микросреда» включает подсистемы: «оператор – строительная машина» и «производственная среда», которые оказывают влияние на состояние системы ОСМС, уровень безопасности которой можно совершенствовать за счет новых техники, технологий, методов организации труда.

Влияние «макросреды», представляющей совокупность климатических, экономических, социальных и прочих факторов, формирующих неопределенность в системе ОСМС, велико, но управлять такими макрофункционалами сложно, поэтому при обосновании критерия устойчивости системы ОСМС эти факторы не учитывались.

Как известно, энергия проявляет себя в различных формах, а поэтому может являться мерой интенсивности движения системы ОСМС, информация же может характеризовать меру упорядоченности этого движения [5, 10, 16]. Избыток, как и недостаток информации, могут стать причиной аварии или несчастного случая при эксплуатации строительной машины (башенного крана).

В качестве критерия устойчивости системы ОСМС и ее подсистем к «катастрофическим скачкам» предлагается показатель устойчивости [5]:

$$K_{уст} = i/a, \quad (1)$$

учитывающий влияние информационного и энергетического воздействий.

Степень тяжести несчастного случая зависит от энергозатрат a оператора на выполнение производственной деятельности, а вероятность возникновения несчастного случая – от количества принимаемой и перерабатываемой им информации i .

Исследование динамических систем на устойчивость к катастрофическим скачкам с учетом материальных и структурных характеристик, т.е. опять-таки с использованием энергоэнтропийной теории, обосновывает в своей научной работе проф. В.К.Чертыковцев и предлагает оценивать сложные многофакторные системы посредством обобщенного показателя [4, 5, 7, 10, 14-16]:

$$K = S(W)P(H), \quad (2)$$

где $S(W)$ – степень тяжести несчастного случая; $P(H)$ – вероятность его возникновения.

Влияние объема информации на неопределенность системы очевидно: неопределенность системы ОСМС уменьшается при получении необходимых сведений о ее работе, поэтому количество информации измеряется уменьшением энтропии системы [4, 5, 7, 10, 14-16]:

$$i = \Delta H(X). \quad (3)$$

Когда в результате полученных сведений состояние системы становится полностью определенным, количество полученной информации равно энтропии системы, т.е. $i = H(X)$.

Поскольку сенсомоторная деятельность является основной в производственной деятельности оператора строительной машины (башенного крана), то важно определить энтропию визуальной деятельности и работы опорно-двигательного аппарата, в частности верхних конечностей (рук), в процессе выполнения крановщиком производственных операций. Это позволит при известных данных об энергетических затратах оператора на выполнение этой деятельности рассчитать коэффициент устойчивости системы ОСМС. Если фактическое значение коэффициента устойчивости системы ОСМС меньше нормируемого, то система находится в устойчивом состоянии, и можно утверждать, что она безопасна. Если этот показатель превышает нормируемое значение, то существует вероятность создания аварийной ситуации («катастрофического скачка»).

Обобщенный показатель устойчивости системы ОСМС при выполнении визуальной задачи определяется по формуле [5, 7]:

$$K_{уст(виз)} = i_{виз(общ)}/a_{виз}, \quad (4)$$

где $a_{виз}$ – энергозатраты оператора на выполнение визуальной деятельности и самообслуживание организма; $i_{виз(общ)}$ – энтропия системы при выполнении визуальной задачи.

Энергозатраты оператора на выполнение сенсомоторной деятельности можно определить с помощью известных методик, а также с помощью математических моделей, полученных программированием пространственного движения человека-оператора строительной машины при выполнении визуальной и двигательной задач, в частности с использованием метода проектирования рабочего места человека-оператора, предложенного Н.В.Адамовичем [1], и теории программирования целенаправленной деятельности оператора, разработанной специалистом по механике и управлению, преподавателем кафедры теоретической механики МФТИ Г.В.Корневым.

Обоснование для определения энтропии системы строилось на гипотетическом предположении о существовании аналогии между законами термодинамики, регулирующими тепловые процессы, и положениями теории информации, регулирующими информационные процессы [5, 7].

Согласно теории статистической физики, энтропия как функция состояния, зависит от параметров, определяющих состояние системы. Для определения посредством энтропии степени упорядоченности системы необходимо установить ее связь с характером движения элементов системы [4, 5, 8 -11].

Американский физик – создатель современной термодинамики и статистической механики – Дж. Гиббс в своей монографии «Термодинамика. Статистическая механика» объясняет связь между энтропией системы и ее упорядоченности [17].

Известно, что состояние идеального газа по Дж. Гиббсу является функцией его давления, температуры и объема: $S(p, T, V)$. При передаче объему газа тепла увеличивается тепловое движение молекул, и как следствие, возрастает неопределенность в системе. Энтропия при этом зависит от абсолютных значений скоростей, направления движения и пространственной ориентации движущихся частиц и растет по мере увеличения беспорядка движения ее элементов. Растущий при этом диапазон возможных значений координат и импульсов, а значит и объем фазового пространства, определяется по формуле

$$d\omega = dv_q dv_p, \quad (5)$$

где $dv_q = dv_{q1} dv_{q2} dv_{q3} \dots dv_{qN}$; $dv_p = dv_{p1} dv_{p2} dv_{p3} \dots dv_{pN}$; q – геометрические координаты молекул; p – динамические координаты молекул (импульсы); k – постоянная Больцмана.

Количество информационного воздействия на оператора башенного крана в процессе выполнения им визуальной задачи при наблюдении за «участниками производственного процесса» (перемещаемый груз – строительная конструкция, члены бригады, стрела крана, грузовой подвес, объекты на строительной площадке и пр.) определяется по формуле

$$i_{\text{виз1}} = H_{\text{виз1}} = \frac{(-\ln \int d\omega)}{k_1} = \frac{(-\log_2 \int d\omega)}{k_1}, \quad (6)$$

где $d\omega$ – элементарный объем фазового пространства, определяемый выражением (5); q – геометрические координаты объектов наблюдения на строительной площадке; p – динамические координаты объектов наблюдения; k_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий, например, от физического, психофизиологического состояния и профессионального уровня членов бригады, от технического состояния машин и механизмов [5].

Однако этого выражения недостаточно, чтобы учесть не только сами объекты, но и их размеры и различимость на фоне, а также погрешность в измерительной процедуре человека-оператора.

Следовательно, с целью упорядоченности системы ОСМС важен больший объем визуальной информации, перерабатываемой оператором информации:

$$i_{\text{виз2}} = H_{\text{виз2}} = \sum_j^N \log_2 \frac{2L_j}{D_j} + \delta H_{\text{изм}}, \quad (7)$$

где L – удаленность j -го объекта от оператора; D – размер j -го объекта наблюдения; $\delta H_{\text{изм}}$ – погрешность в измерительной процедуре человека-оператора.

Оператору в процессе выполнения производственных задач необходимо следить за средствами отображения информации (СОИ), размещенными на панели управления краном, поэтому энтропия визуальной задачи возрастает:

$$i_{\text{при}} = H_{\text{при}} = \log_2 \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{2\delta}, \quad (8)$$

где x_{max} , x_{min} – показания приборов; δ – абсолютная погрешность считывания показаний с прибора. Энтропия n от приборов [5]

$$i_{\text{пр(общ)}} = H_{\text{пр(общ)}} = \sum_{i=1}^n H_{\text{при}} \quad (9)$$

Таким образом, для подсчета энтропии визуальной задачи предлагается следующее выражение [5]:

$$i_{\text{виз(общ)}} = H_{\text{виз(общ)}} = \frac{(-\log_2 \int d\omega)}{k} + \sum_j^N \log_2 \frac{2L_j}{D_j} + \delta H_{\text{изм}} + \sum_{i=1}^n H_{\text{при}} \quad (10)$$

Устойчивость подсистемы «оператор – строительная машина» при выполнении двигательных функций (работа по управлению строительным краном посредством рычагов управления) определяется по формуле [5]

$$K_{\text{уст(дв)}} = \frac{i_{\text{дв}}}{a_{\text{дв}}} \quad (11)$$

где $a_{\text{дв}}$ – энергозатраты оператора при работе с рычагами управления и самообслуживания организма; $i_{\text{дв}}$ – энтропия системы при выполнении двигательной задачи, определяемая согласно [1],

$$i_{\text{дв}} = H_{\text{дв}} = \log_2 \frac{2A}{W} \quad (12)$$

где A – амплитуда движения руки; W – ширина цели (ширина органа управления).

Такая модель учитывает факт того, что энтропия тем больше, чем дальше оператор находится от органов управления.

Таким образом, показатель устойчивости для оценки безопасности системы ОСМС, определяемый выражением (1), является комплексным, поскольку определяется количеством перерабатываемой оператором информации и его энергозатратами при использовании различных средств стыковки «оператора» с «машиной» (средства воздействия, контроля, связи) и может характеризовать степень управляемости и уровень совершенства «машины».

Обоснование доступности получения визуальной информации оператором башенного крана. С целью проектирования кабин башенного крана и любой другой грузоподъемной или подъемно-транспортной машины, используемых при возведении строительных объектов и обеспечивающих необходимую обзорность с рабочего места оператора, существуют известные способы получения плоской круговой картины обзора (визуальный, светотеневой, фотографический, графический). Эти способы позволяют не только определить коэффициент обзорности кабин, но и выявить недостатки в существующей геометрической форме кабины и ее остекления и дать рекомендации по их изменению [5, 8, 9].

В статье предлагается для рассмотрения имитационная модель зрительного аппарата оператора, которая позволяет уже на стадии проектирования кабин башенных кранов вносить рекомендации по изменению формы и площади остекления кабины, положения сиденья в кабине относительно лобовых стекол и пола кабины с целью максимальной доступности визуальной информации [5, 8, 9].

Для устойчивой работы оператора башенного крана при выполнении им визуальной задачи необходимо создать условия, позволяющие ему из физиологически возможной позы фиксировать зрительным аппаратом объект наблюдения, находящийся в покое идвигающийся в любом направлении в радиусе действия стрелы.

Для моделирования зрительного аппарата оператора башенного крана были использованы известные математические аппараты целенаправленной механики человека, предложенные Г.В.Корневым в работе «Введение в механику управляемого тела», а также в диссертациях З.И.Шукиса «Разработка и исследование измерительных преобразователей координат положения головы наблюдателя относительно объекта наблюдения» и С.А.Медведкина «Проектирование поста управления на основе геометрического анализа обзорности при бинокулярном зрении» [12].

Рис.3. Базисная модель зрительного анализатора

Модель зрительного аппарата оператора строительной машины, частично представленная в данной статье, позволяет исследовать обзорные качества кабины и дать оценку степени доступности визуальной информации с рабочего места и уровня соответствия получения этой информации физиологическим возможностям человека. С помощью этой модели можно показать, каким образом осуществляется наблюдение за объектами, как угодно расположенными в пространстве в пределах возможных поворотов глаз и головы [8, 9, 12].

Зрительный аппарат моделируется тремя твердыми телами, имитирующими глаза и голову, соединенными шарнирно (рис.3): оси угловых и поступательных координат совмещены; в точках Ц₂, Ц₃ находятся центры движения глаз, через которые проходят зрительные оси, при этом они неподвижны относительно головы (Ц₁ – центр головы); точка фиксации взгляда A – наблюдаемый человеком-оператором объект, относительно которого осуществляется ориентация всего поля зрения; прямая, соединяющая точки Ц₂ и Ц₃, – базовая линия [5, 8], а точка B, лежащая на ее середине, – циклопический глаз [5, 8, 9, 12].

Направление взора оператора определяется вектором, начало которого совпадает с циклопическим глазом, а конец – с точкой фиксации взгляда. Прямые Ц₂A и Ц₃A – зрительные оси левого и правого глаз, пересекаются в точке фиксации взора. Положение зрительных осей определяется углами между зрительной осью и прямой, параллельной вектору направления взора и проходящей через центр движения глаза: θ_{2z} , θ_{3z} – углы поворота соответственно левого и правого глаза в горизонтальной плоскости; θ_{2x} , θ_{3x} – углы поворота глаз в сагиттальной плоскости (табл.2).

Таблица 2

Опорные координаты центров инерции головы и глаз

Звено	Центр инерции	Опорные координаты
Голова	Ц ₁	$x_1, y_1, z_1, \theta_{1x}, \theta_{1y}, \theta_{1z}$
Левый глаз	Ц ₂	$x_2, y_2, z_2, \theta_{2x}, \theta_{2z}$
Правый глаз	Ц ₃	$x_3, y_3, z_3, \theta_{3x}, \theta_{3z}$

Точка Ц₁ может оставаться неподвижной, и тогда ее координаты будут представлены как постоянные величины, а может двигаться, и в этом случае они будут заданы как функции времени. На движение точки Ц₁ наложены три связи. Движение точек Ц₂ и Ц₃ связано с движением головы, что дает дополнительно шесть связей, и тогда все девять связей могут быть представлены системой уравнений:

$$\begin{aligned}x_1 &= x_1(t)[b_1 = \text{const}]; & y_1 &= y_1(t)[b_2 = \text{const}]; & z_1 &= z_1(t)[b_3 = \text{const}]; \\x_2 &= x_1 + l_2 \sin(\theta_{1z} - \alpha); & y_2 &= y_1 + l_2 \cos(\theta_{1z} - \alpha); & z_2 &= z_1; \\x_3 &= x_1 + l_2 \sin(\theta_{1z} + \alpha); & y_3 &= y_1 + l_2 \cos(\theta_{1z} + \alpha); & z_3 &= z_1.\end{aligned}\quad (13)$$

Приведем программу пространственного движения зрительного аппарата при выполнении оператором строительной машины визуальной деятельности, в частности, при фиксации зрительным аппаратом наблюдаемого объекта *A* (рис.3).

При условии плавного слежения программа может быть представлена следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\text{tg}(\theta_{2z}) &= -\frac{x_A - x_2}{y_A - y_2}; & \text{tg}(\theta_{3z}) &= -\frac{x_A - x_3}{y_A - y_3}; \\ \text{tg}(\theta_{2x}) &= -\frac{z_A - z_2}{\sqrt{(x_A - x_2)^2 + (y_A - y_2)^2}}; & \text{tg}(\theta_{3x}) &= -\frac{z_A - z_3}{\sqrt{(x_A - x_3)^2 + (y_A - y_3)^2}}\end{aligned}\quad (14)$$

или

$$\begin{aligned}(x_A - x_2) \cos(\theta_{2z}) + (y_A - y_2) \sin(\theta_{2z}) &= 0; & (x_A - x_3) \cos(\theta_{3z}) + (y_A - y_3) \sin(\theta_{3z}) &= 0; \\ (x_A - x_2) \cos(\theta_{2x}) + r_2 \sin(\theta_{2x}) &= 0; & (x_A - x_3) \cos(\theta_{3x}) + r_3 \sin(\theta_{3x}) &= 0,\end{aligned}\quad (15)$$

где $r_2 = \sqrt{(x_A - x_2)^2 + (y_A - y_2)^2}$; $r_3 = \sqrt{(x_A - x_3)^2 + (y_A - y_3)^2}$ – расстояния от центра глазных яблок до наблюдаемого объекта.

Программа движения зрительного аппарата при наблюдении за грузом на крюке каната строительного крана может быть дополнена системой уравнений:

$$\begin{aligned}x_A &= [R + \alpha_R(t)L] \sin \varphi(t) + \alpha_T(t)L \cos \varphi(t); \\ y_A &= [R + \alpha_R(t)L] \cos \varphi(t) + \alpha_T(t)L \sin \varphi(t); \\ z_A &= -L \cos \alpha_R(t) \cos \alpha_T(t),\end{aligned}\quad (16)$$

где R – длина стрелы крана, м; L – длина троса, м; φ – угол поворота крана, рад; α_T , α_R – углы отклонения груза в радиальном и тангенциальном направлениях, рад. Углы отклонения груза и поворота крана могут быть заданы некоторыми постоянными значениями или как функции времени.

При известных границах зоны наблюдения можно предложить программу слежения за объектами всей зоны, аналогичную программе слежения за объектом [5, 8, 9].

Анализ обзорных качеств кабин башенных кранов с использованием данной программы позволил сделать следующие выводы: получить визуальную информацию при любом расположении объектов в области передней полусферы можно за счет вращения глазных яблок в пределах физиологически возможных углов в горизонтальной плоскости; для получения визуальной информации в сагиттальной плоскости физиологически возможных значений углов вращения глазных яблок недостаточно; при переносе уровня расположения глаз по вертикали (вверх или вниз), т.е. при работе «стоя» или «согнувшись вниз» объекты становятся визуально более доступными; необходимо совершенствовать обзорные качества кабин за счет разработки изменения формы кабин и их остекления, а также за счет совершенствования сиденья оператора, позволяющего регулировать уровень расположения точки зора оператора.

Инженерно-технические решения конструкций кабин повышенной обзорности башенных кранов и их оснастки. В настоящее время кабины как отечественных, так и зарубежных

Рис.4. Сферическая кабина башенного крана: а – вид сбоку с защитной полусферой; б – разрез кабины

1 – полусфера жестко закрепленная; 2 – основание; 3 – рама; 4 – опоры выносные; 5 – каркас металлический; 6 – шарниры; 7 – ось вертикальная; 8 – полусфера прозрачная поворотная; 9 – ось горизонтальная; 10 – шарниры; 11 – полусфера защитная (защитный экран); 12 – пол кабины; 13 – отверстие смотровое; 14 – сиденье оператора

образцов подъемно-транспортной техники в целом имеют одинаковую геометрию – в виде условного параллелепипеда. В некоторых из них лобовое остекление имеет криволинейную поверхность, что улучшает отражательную способность последней (в частности, отражение волнового солнечного, теплового и звукового воздействия) и повышает обзорные качества передней зоны.

Выполненный по результатам патентного поиска анализ существующих конструкций кабин строительных и дорожных машин позволил предложить несколько вариантов кабины повышенной обзорности (патент № 2175946 РФ; патент № 2230021 РФ; патент № 2272779 РФ).

Кабина башенного крана состоит из двух полусфер, одна из которых (непрозрачная) жестко закреплена на основании, а другая (прозрачная), шарнирно связанная с ней, может осуществлять поворот относительно вертикальной оси кабины. Прозрачная полусфера имеет защитный экран в виде полусферы, который может поворачиваться относительно горизонтальной оси кабины (рис.4) (патент № 2230021 РФ). Подобный защитный экран позволяет снизить воздействие слепящего света на зрительный аппарат крановщика, тем самым уменьшить его утомляемость при длительном наблюдении за ходом строительно-монтажных работ, и, как следствие, исключить вероятность ошибочных действий последнего.

Кроме того, такая конструкция позволяет повысить теплоустойчивость кабины за счет наличия защитной полусферы и воздушного зазора между передней прозрачной и выдвигаемой защитной полусферами. Нижняя часть прозрачной полусферы остается открытой, что обеспечивает беспрепятственный обзор оператору за наблюдаемыми объектами.

Поскольку технология изготовления конструкции кабины сферической формы и ее монтажа на башню крана сложна и экономически не всегда целесообразна, нами была разработана другая кабина башенного крана (патент № 2272779 РФ) (рис.5) цилиндрической формы.

Разработке новой конструкции предшествовали теоретические и экспериментальные исследования, выполненные на основании построенных математических моделей кабин, а также с использованием лабораторных образцов кабин сферической и цилиндрической формы. Исследования показали, что обзорные качества кабины цилиндрической формы за счет имеющейся в ней прозрачной передней цилиндрической поверхности, служащей лобовым остеклением, существенно не снижаются по сравнению с кабиной сферической формы.

Кроме того, известно, что микроклимат в кабине является важным фактором, характеризующим условия производственной среды оператора башенного крана, от него зависит комфортность и работоспособность оператора в процессе трудовой деятельности.

Рис.5. Цилиндрическая кабина башенного крана: а – вид сбоку, б – вид спереди, в – кабина повышенного обзора Panoramic XL (компания «Raimondi», Милан, Италия)

1 – кабина; 2 – основание; 3 – рама; 4 – металлический каркас; 5 – вертикальный шарнир; 6 – вертикальная ось; 7 – задняя непрозрачная часть кабины; 8 – торцевая стенка; 9 – боковая стенка; 10 – шарнир; 11 – горизонтальная ось; 12 – передняя прозрачная часть кабины; 13 – защитный чехол; 14 – стеклоочиститель; 15 – защитное ограждение; 16 – кнопочные органы управления

Эффективность сопротивления теплопередаче зависит от геометрической формы кабины: увеличивается в 2,6 раза у кабины цилиндрической формы и в 4,5 раза у кабины сферической формы по сравнению с кабиной традиционной формы в виде параллелепипеда [3].

Учитывая результаты выполненных исследований, разработанная нами цилиндрическая конструкция кабины башенного крана (патент № 2272779 РФ) является наиболее оптимальной с точки зрения обеспечения обзорных качеств кабины, параметров микроклимата в ней и технико-экономической эффективности изготовления, монтажа и демонтажа кабины.

Цилиндрическая кабина нашей разработки состоит из двух частей. Первая жестко закреплена на основании, а другая, прозрачная, шарнирно с ней связана и является поворотной. Передняя поворотная прозрачная и задняя неподвижная непрозрачная части кабины выполнены в виде полуцилиндров, а их боковые стенки – в виде полукругов.

Кабина имеет защитный чехол из материала с высокими отражательными свойствами, шарнирно связанный с жестко закрепленной на основании задней кабины непрозрачной частью для

Рис.6. Сиденье оператора строительной машины

1 – подушка; 2 – спинка; 3 – рама; 4 – набивка; 5 и 6 – опорные элементы; 7, 8, 9 – детали опорного элемента; 10 – стержень; 11 – стяжка; 12 – пружина; 13 – отверстие; 14 – уширенный торец; 15 – фланец; 16 – отверстие; 17, 18 – составляющие элемента 6; 19 – шарнир; 20 – пружина; 21 и 22 – верхняя и горизонтальная направляющие рамы 3; 23 – планка; 24, 25 – верхние концы верхнего опорного элемента 6; 26 – ремни безопасности; 27 – трубчатые вертикальные стойки; 28 – стержни; 29 – опорный элемент криволинейной формы для фиксации шейного отдела; 30 – подголовник; 31 – рукоятка; 32 – кулачок; 33 – возвратная пружина; 34 – подпружиненный ролик

поворота относительно горизонтальной оси кабины. Такое устройство позволяет снизить влияние основной доли электромагнитного излучения на верхнюю и лобовую часть кабины башенного крана, что, в свою очередь, уменьшит утомляемость крановщика при длительном наблюдении за ходом строительно-монтажных работ и также снизит вероятность ошибочных действий. Управление движением передней прозрачной части кабины и защитного чехла осуществляется посредством кнопочных органов пульта управления, вмонтированного в боковые поручни сиденья оператора.

В 2016 г. один из старейших производителей грузоподъемного оборудования в мире итальянская компания «Raimondi», основанная в 1863 г., представила на выставке в Германии новый башенный кран с панорамной цилиндрической кабиной повышенного обзора Panoramic XL (рис.5, в), что подтверждает нашу идею и целесообразность использования такой конструкции [13].

С целью повышения комфортности и безопасности оператора строительной машины при выполнении визуальной и двигательной задач в процессе производственной деятельности нами были разработаны на уровне изобретений сиденья оператора строительной машины (патент № 2137624 РФ; патент № 2180623 РФ; патент № 2210510 РФ).

Основной задачей изобретений является улучшение обзора за объектами наблюдения путем увеличения диапазона регулирования сиденья по углу наклона, по высоте и горизонтали.

В сиденье, разработанном на уровне изобретения (патент № 2137624 РФ), поставленная задача достигается наличием плоскорычажного механизма в виде двух параллельно расположенных четырехзвенных параллелограммов, позволяющих расширить эксплуатационные возможности конструкции путем регулирования положения сиденья по высоте и глубине кабины на величину, равную удвоенной длине боковых звеньев параллелограмма, сохраняя при этом параллельность сиденья по отношению к основанию.

Сиденье снабжено рычагом, с помощью которого оно может занимать три положения по углу наклона: «работа с наклоном»; «работа без наклона»; «отдых», что позволяет улучшить условия труда оператора и увеличить обзорность с рабочего места.

Регулирование положения сиденья по углу наклона осуществляется за счет работы червячной пары.

Усовершенствованная конструкция представленного выше сиденья позволяет оператору за счет имеющегося на сиденье пневможилета зафиксировать положение корпуса на сиденье, тем

Рис. 7. Кресло-пульт ООО «БРИЗ»: а – кресло-пульт АН1 (AR1);
б – компактное кресло-пульт АН2 (AR2)

самым защитить грудную клетку и предупредить возможные малейшие соскальзывания оператора с сиденья при работе в положении «работа с наклоном», когда угол наклона сиденья становится больше предельно допустимого (более 15-17°) (патент № 2180623 РФ).

Еще одним предложением является сиденье, которое может быть использовано преимущественно в кабинах грузоподъемных кранов и землеройной техники (патент № 2210510 РФ)

(рис.6). Комфортность сиденья достигается благодаря особой конструкции спинки сиденья, рама которой имеет в верхней части волнообразно выпуклые, а в нижней части волнообразно вогнутые вертикальные направляющие. Для обеспечения плотной фиксации плечевого отдела в верхней волнообразно выпуклой части рамы упруго установлен опорный элемент. На плечевых и боковых концах нижнего и верхнего опорных элементов жестко закреплены ремни безопасности, необходимые для фиксации оператора строительной машины при выполнении работ в положении наклона, а также при резких толчках или раскачивании кабины. Известно, что резкие толчки, которые возможны в силу разных причин при эксплуатации машины, могут вызвать смещение позвонков шейного отдела позвоночника или привести к ушибам головы о твердые поверхности оснастки кабины. С целью предупреждения подобных ситуаций в верхней части спинки сиденья для фиксации шейного отдела предусмотрен регулируемый по высоте криволинейный опорный элемент, с которым жестко связан дугообразный подголовник.

Аналогичное нашему предложению сиденье представлено разработчиками ООО «БРИЗ». Разработка кресел-пультов различной модификации специалистов ООО «БРИЗ» нашла широкое применение на мостовых и башенных кранах (рис.7).

Пульт представляет собой цельную металлоконструкцию с несъемными консолями (тумбами) и установленным на нее сиденьем оператора. Стандартные габариты поверхности тумбы позволяют разместить органы управления и индикации практически для любых применений, при необходимости ширина может быть увеличена до 400 мм. В нижних отсеках тумб предусмотрены ниши для установки двух тепловентиляторов, которые обеспечивают обогрев кабины крана, а также выполняют функцию быстрого оттаивания остекления кабины в зимнее время (кресло-пульта могут быть изготовлены без ниш). Сиденье оператора имеет анатомическую форму, регулировку угла наклона спинки, механизм продольного перемещения, регулировку по высоте, механическую систему подпрессоривания, регулируемые подлокотники, подголовник, тканевую или виниловую обивку. В исполнении AR1 изделие оборудовано шарикоподшипниковой системой вращения (поворотным устройством) с ограничением угла поворота 180-350°. Подвод кабелей управления в кресло-пульта реализован снизу через основание (в исполнении AR1 – через середину поворотного устройства).

Выводы

1. Анализ условий и охраны труда операторов башенных кранов, используемых при возведении высотных объектов, свидетельствует о высоком уровне профессиональной заболеваемости и травматизма, что вызвано низкой эргономичностью кабин и недостаточной их обзорностью.

2. Энергоэнтропийный подход к оценке устойчивости системы ОСМС позволяет установить корреляционную связь между степенью тяжести несчастного случая и энергоемкостью машины, что дает возможность выполнять оценку степени опасности как эксплуатируемой, так и вновь проектируемой строительной машины.

3. Программа пространственного движения модели зрительного аппарата позволяет выполнять анализ доступности получения оператором визуальной информации при условии физиологически допустимых координат ориентации, в результате чего можно оптимизировать форму и площадь остекления кабины, технические характеристики поста управления оператора и его ориентации в пространстве кабины для обеспечения максимальной доступности визуальной информации.

4. Аварийность и травматизм, связанные с эксплуатацией башенных кранов, можно снизить за счет разработки и внедрения новых моделей кабин строительных кранов и их оснастки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамович Н.В. Управляемость машин. Эргонометрические основы оптимизации рабочего места человека-оператора. М.: Машиностроение, 1977. 280 с.
2. Анализ и смертельный травматизм при эксплуатации подъемных сооружений: Состояние аварийности и травматизма при эксплуатации опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения. URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/equipment/Analysis/> (дата обращения 15.01.2019).
3. Власов А.В. Улучшение условий труда операторов подъемно-транспортных машин при строительстве объектов АПК совершенствованием конструктивных особенностей кабин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Санкт-Петербургский аграрный университет. СПб, 2007. 18 с.
4. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. М.: Наука, 2006. 237 с.
5. Голдобина Л.А. Совершенствование условий и охраны труда в сельскохозяйственном строительстве за счет разработки и внедрения инженерно-технических методов и средств, обеспечивающих устойчивость системы «оператор – строительная машина – среда»: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Санкт-Петербургский аграрный университет. СПб, 2003. 41 с.
6. Голдобина Л.А. Пути обеспечения надежности, безопасности и эффективности строительно-монтажных работ при возведении зданий и сооружений путем стабилизации процесса раскачивания грузового подвеса / Л.А.Голдобина, П.С.Орлов // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 166-174.
7. Голдобина Л.А. Энергетический и энтропийный подход к анализу устойчивости системы «оператор – строительная машина – среда» // Методы и средства профилактики травматизма и пожаров в АПК: Сборник научных трудов / СПбГАУ. СПб, 2001. С. 251-255.
8. Голдобина Л.А. Графический подход к решению проблемы доступности получения визуальной информации оператором из кабины подъемно-транспортной машины / Л.А.Голдобина, А.Л.Бочков // Научно-технический журнал НИИТТС «Технико-технологические проблемы сервиса». 2011. № 3 (17). С. 56-65.
9. Голдобина Л.А. Программирование движения модели зрительного аппарата оператора строительного крана при фиксации или сопровождении объекта наблюдения / Л.А.Голдобина, А.М.Юрков // Актуальные проблемы инженерного обеспечения АПК: Сборник научных трудов / Ярославская сельскохозяйственная академия. Ярославль, 2001. С. 40-46.
10. Мартин Н. Математическая теория энтропии: Пер. с англ. / Н.Мартин, Дж.Ингленд. М.: Мир, 1988. 350 с.
11. Масленников А.А. Система мониторинга опасных факторов при эксплуатации опасных производственных объектов на предприятиях машиностроения с использованием средств радиочастотной идентификации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Донской государственный технический университет. Ростов-на-Дону, 2016. 20 с.
12. Медведкин С.А. Проектирование поста управления на основе геометрического анализа обзорности при бинокулярном зрении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Киевский инженерно-строительный институт. Киев, 1990. 17 с.
13. Основные средства. Обзор рынка башенных кранов. URL: <https://os1.ru/article/8787-obzor-rynka-bashennyh-kranov-vysota> (дата обращения 20.01.2019).
14. Седов Е.А. Информационно-энтропийные свойства социальных систем. <https://alterozoom.com/ru/documents/36151.html> (дата обращения: 15.01.2019); http://ecsocman.hse.ru/data/149/386/1217/009_SEDOV.pdf (дата обращения 15.01.2019).
15. Чертыковцев В.К. Многоуровневое целевое имитационное моделирование сложных многофакторных систем для решения организационных задач охраны труда: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук / Научно-исследовательский институт охраны труда. М., 1991. 33 с.
16. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 2002. 832 с.
17. Wheeler Lynde Phelps. Josiah Willard Gibbs: the History of a Great Mind. Woodbridge, CT: Ox Bow Press, 1998. 230 p.

Авторы: Л.А. Голдобина, д-р техн. наук, профессор, goldobina_la@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), П.А.Деменков, д-р техн. наук, профессор, kaf-sgr@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), О.В.Трушко, канд. техн. наук, доцент, kaf-sgr@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 29.01.2019.

Статья принята к публикации 08.03.2019.