

УДК 629.12: 041

К.М. Гржебин,

В.Г. Зиньковский-Горбатенко, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

root@sevgtu.sebastopol.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА КРЕПЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН ПРИ ИХ ПЕРЕВОЗКЕ НА МОРСКИХ ПАРОМАХ

Оцениваются эксплуатационные нагрузки на железнодорожные цистерны и их крепления при перевозке морем. разработана методика расчета нагрузок на крепления цистерн.

Общая постановка задачи и её практическое значение.

Задача надежного крепления тяжеловесных и крупногабаритных грузов на судах в настоящее время не может считаться решенной. В определенной мере это относится и к креплению вагонов и цистерн на железнодорожных паромов. Об этом свидетельствует ряд случаев гибели паромов в штормовых условиях.

Обзор исследований по данной теме

Излишние запасы прочности креплений удорожают сами крепления и замедляют грузовые работы. Применение нетиповых элементов креплений усложняет их установку. С другой стороны, применение типовых элементов, удобных в работе, относительно недорогих и считающихся надежными в обычных условиях морских перевозок, не гарантирует безопасности перевозки грузов, поскольку за "время жизни" судна (20 –25 лет) изменяются: районы эксплуатации судна; статистические характеристики внешних воздействий (в первую очередь, ветра и волнения); несущая способность элементов конструкции судов (вследствие накопления усталости материала, коррозии, механических повреждений и повреждений от перегрузок).

Безопасность морских перевозок должна быть не только обеспечена при проектировании и строительстве судна, но должна переоцениваться при изменении условий эксплуатации и по мере износа судна.

Фактическая степень безопасности сооружений проверяется в экстремальных ситуациях, как редких явлений. Следовательно, расчетная оценка безопасности всегда является условной. Тем не менее, безопасность плавучих сооружений, в отличие от безопасности стационарных сооружений, может быть обеспечена при условии своевременного использования информации о появления опасных явлений, а для судов ограниченного района плавания, к которым обычно относятся морские железнодорожные паромы, при создании портов-убежищ и обеспечении жесткого контроля за соблюдением ограничений по погоде.

Имеющиеся в настоящее время нормативные материалы по оценке инерционных нагрузок на грузы и их крепления [1, 2] и соответствующие рекомендации либо не распространяются на суда ограниченных районов плавания, либо только формально гарантируют безопасность. Так, Кодекс ИМО разработан Det Norske Veritas только применительно к условиям Северной Атлантики. Формальное применение требований [1] к судам, плавающим в других районах Мирового океана, означает неопределенную достоверность оценок ускорений и нагрузок, так как требованиями [1] не учитываются местные погодные условия. Кроме того, происходящая в последние десятилетия явная дестабилизация глобальных гидрометеорологических процессов делает заложенные в расчет значения параметров внешних воздействий и построенные на их основании прогнозы нереальными.

Распространение требований [1] на суда ограниченного I района плавания, введенное Регистром, не может считаться обоснованным. Нормативные материалы [1, 2] оставляют простор для манипулирования данными и методиками расчета, что может привести к неоднозначным результатам при оценке безопасности морской перевозки тяжеловесных и крупногабаритных грузов.

Указанные обстоятельства и аварийная статистика заставляют более тщательно подходить к проблеме безопасной перевозки морем крупногабаритных и тяжеловесных грузов, в том числе железнодорожных вагонов и цистерн.

Новые задачи исследований.

Ускорения и нагрузки, вызываемые качкой судна, являются случайными процессами, поэтому расчеты прочности элементов креплений грузов должны выполняться с учетом случайного характера получаемых оценок.

Изучение нормативных и проектных материалов, посвященных обеспечению безопасности эксплуатации паромов, а также опыта практических расчетов нагрузок на крепления позволяет отметить следующие характерные особенности методик расчетов. Параметры расчетного волнения либо не оговариваются [1], либо задаются без обоснований [2]. Расчетные значения случайной части нагрузок назначаются условно, обычно кратными стандарту соответствующего случайного процесса. В качестве расчетных используются нагрузки, значения которых варьируются в интервале от двух до четырех стандартов. Этим предельным значениям расчетных нагрузок соответствует (по закону Релея, в краткосрочном распределении) обеспеченность амплитуд процессов от 13% до 0,033%, т.е., вероятность превышения расчетных нагрузок, принимаемых в практических расчетах, может различаться почти в 400 раз!

В практических расчетах ускорений и нагрузок, в силу современного состояния науки о качке судов, часто используются (во многих случаях, без

оговорки) различные упрощающие допущения, делающие результаты расчета условными и неопределенными. Так, угловые ускорения от бортовой качки, действующие на груз, и соответствующие нагрузки на крепления в расчетах обычно не учитываются. Ускорения, а также нагрузки на крепления вычисляются без учета корреляции между компонентами ускорений (от вертикальной, поперечно-горизонтальной и бортовой качки). Не учитывается влияние крена судна от расчетного ветра, действующего на надводную часть судна и палубный груз и создающего стационарный крен. Не приводится обоснований для выбора расчетного спектра волнения. При расчете нагрузок на крепления инерционные особенности жидкого груза в цистернах не учитываются.

Отмеченные особенности расчетов иллюстрируют современное состояние вопроса и позволяют считать целесообразной разработку специализированной методики расчета ускорений и нагрузок на крепления вагонов и цистерн. Реализация такой методики требует создания соответствующего программного обеспечения.

Настоящая статья посвящена описанию специализированной методики расчета нагрузок на крепления железнодорожных цистерн и вагонов при их перевозке морем.

Из выполненного выше обзора, а также изучения других, относящихся к рассматриваемому вопросу, материалов, следует, что для оценки наиболее тяжелых условий работы креплений вагонов и цистерн при морских переходах парома, должны быть выполнены разработки в следующих направлениях:

- выбор типа расчетного спектра ординат волнения с учетом особенностей его формирования для условий района эксплуатации;
- выбор значений расчетных параметров волнения и силы ветра;
- разработка методики расчета вероятностных характеристик ускорений, действующих на вагоны и цистерны при бортовой качке судна с учетом корреляции процессов боковой, поперечно-горизонтальной и вертикальной качки;
- разработка методики расчета вероятностных характеристик нагрузок (в проекциях на связанные с судном оси), передаваемых при качке судна опорным контуром кузова вагона (цистерны) на тележки, домкраты и стяжки;
- разработка программного обеспечения, реализующего выполнение соответствующих расчетов;
- выполнение конкретных расчетов для морских железнодорожных паромов в объеме, позволяющем вынести суждение о возможных в эксплуатации парома нагрузках на

крепления, а также идентифицировать наиболее опасное сочетание параметров внешних условий и вариантов загрузки судна;

- выработка рекомендаций по дальнейшему совершенствованию методики и программного обеспечения расчетов нагрузок на крепления вагонов и цистерн.

Методика расчета ускорений и нагрузок на крепления тяжеловесных и крупногабаритных грузов при бортовой качке.

Ограниченность допустимых амплитуд качки железнодорожных паромов существенно упрощает задачу расчета качки и нагрузок от качки на крепления вагонов, поскольку позволяет ограничиться рассмотрением случаев качки с умеренными амплитудами, допускающими применение методов линеаризации при расчете качки на морском волнении. В линейной постановке задачи становятся применимыми хорошо разработанные спектральные методы теории случайных процессов. Результаты расчетов зависят от применяемого метода линеаризации и достоверности данных по демпфированию качки.

Процедура расчета качки, ускорений и нагрузок включает: расчет амплитудно- и фазово-частотных характеристик (передаточных функций) трех видов качки - вертикальной, поперечно-горизонтальной и бортовой; расчет соответствующих характеристик ускорений в фиксированных точках судна; расчет соответствующих характеристик нагрузок в опорах грузов; расчет дисперсий и вероятностных характеристик всех упомянутых величин (качки, ускорений, нагрузок).

Качка.

Задача расчета качки судна в общей постановке в настоящее время не может считаться решенной. Известно, однако, что большинство судов испытывает тяжелую бортовую качку в положении лагом к волне без хода, а продольную – в положении носом на волну. К настоящему времени создан ряд методик и соответствующих компьютерных программ расчета качки в этих ситуациях.

Целевая задача настоящего расчета - расчет ускорений в фиксированных точках (в проекциях на связанные оси) и соответствующих нагрузок на опоры. Известные компьютерные программы, предназначенные для расчета качки, обычно не обеспечивают достижение указанной цели, так как в этих программах не предусмотрено вычисление корреляционных моментов соответствующих процессов, требуемых для расчета ускорений и нагрузок. В настоящей работе вызванные качкой ускорения и нагрузки на опоры рассматриваются с учетом корреляции соответствующих процессов. Принятые системы координат, используемые

обозначения и схема крепления вагона (цистерны) представлены на рисунке 1.

Амплитудно- и фазово-частотные характеристики качки вычисляются в предположении, что качка судна на регулярном волнении с полувысокой Γ_0 и круговой частотой ω описывается известной линеаризованной системой уравнений [3,4]:

$$\begin{aligned}(\Delta + \lambda_{33})\ddot{\zeta}_G + \mu_{33}\dot{\zeta}_G + \rho g S_0 \zeta_G &= r_o Q_c \cos \omega t + r_o Q_s \sin \omega t; \\(\Delta + \lambda_{22})\ddot{\eta}_G + \mu_{22}\dot{\eta}_G - \mu_{42}\dot{\theta} - \lambda_{42}\ddot{\theta} &= r_o F_c \cos \omega t + r_o F_s \sin \omega t; \\(J_{XG} + \lambda_{44})\ddot{\theta} + \lambda_{44}\dot{\theta} + g \Delta h_0 \theta - \mu_{24}\dot{\eta}_G - \lambda_{24}\ddot{\eta}_G &= r_o M_c \cos \omega t + r_o M_s \sin \omega t.\end{aligned}$$

где ζ_G, η_G, θ - ординаты вертикальной, поперечно-горизонтальной и бортовой качки; ρ, g - плотность морской воды и ускорение силы тяжести; Δ, J_{XG}, S_0, h_0 - водоизмещение (масса) судна, момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси, площадь исходной ватерлинии и начальная поперечная метацентрическая высота; μ_{IJ}, λ_{IJ} - коэффициенты демпфирования и обобщенные присоединенные массы; $Q_{C,S}, F_{C,S}, M_{C,S}$ - коэффициенты косинусной и синусной части возмущающих сил.

Соответствующие законы движения представляются выражениями

$$\zeta_G = r_o \Phi_{3C} \cos \omega t + r_o \Phi_{3S} \sin \omega t;$$

Входящие в эти выражения компоненты передаточных функций Φ_{IC}, Φ_{IS} определяются зависимостями, приведенными в [3,4]; Φ_{IC}, Φ_{IS} имеют вид:

$$\Phi_{IC}, \Phi_{IS} = f(\rho, \nu, \Delta, J_{XG}, \lambda_{IJ}, \mu_{IJ}, Q_{C,S}, F_{C,S}, M_{CS}, \omega),$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости воды.

Коэффициенты гидродинамических сил $\lambda_{IJ}, \mu_{IJ}, Q_{CS}, F_{CS}, M_{CS}$ определяются формой и размерами корпуса судна, частотой набегающих волн и, возможно, амплитудами колебаний.

Функции Φ_{IC}, Φ_{IS} используются далее как в расчете качки на морском волнении, так и в расчетах ускорений в заданных точках и инерционных нагрузок на крепления.

В принятой методике расчета качки коэффициенты $\lambda_{IJ}, \mu_{IJ}, Q_{C,S}, F_{C,S}, M_{CS}$ определяются в предположении, что они представимы в виде суммы двух компонентов - инерционно-волнового и вязкостного. Инерционно-волновые компоненты определяются по материалам А.З. Салькаева [5]. Вязкостные компоненты коэффициентов инерционно-

демпфирующих сил λ_{IJ}, μ_{IJ} определяются теоретико-экспериментальными методами. В разработанной компьютерной программе ROLLING предусматривается возможность использования различных способов учета вязкостных поправок.

Вероятностные характеристики процессов.

Считается, что спектральная плотность ординат волнения $S_r(\omega)$ определяется двумя параметрами - высотой волн 3%-ой обеспеченности $h_{3\%}$ и частотой максимума спектра волновых ординат ω_m . Программой ROLLING вычисляются дисперсии и стандарты всех рассматриваемых процессов. Вероятностные характеристики процессов определяются в предположении, что амплитуды волнения, качки и инерционных нагрузок распределены по закону Релея. Расчетные амплитуды процессов определяются принятой расчетной обеспеченностью. Вычисляются соответствующие периоды крупных колебаний рассматриваемых процессов.

Далее в практических расчетах используется математическая модель судна, имеющего ту же длину, водоизмещение, остойчивость формы и остойчивость веса, что и реальное судно. В результате вероятностные характеристики качки на волнении (амплитуды качки $K\%$ обеспеченности и средние периоды колебаний) могут быть фактически вычислены.

Инерционные и суммарные нагрузки на грузы.

Уравнения движения груза (вагона, цистерны) m , которое он совершает при поперечной качке вместе с судном под воздействием удерживающих связей (упоров, стяжек, колесных тележек), имеют вид:

$$m\ddot{\xi}_m = P_{\xi C} - mg; \quad m\ddot{\eta}_m = P_{\eta C}; \quad i_{Xm}\ddot{\theta} = M_{XC}.$$

Искомые значения усилий, действующих на груз со стороны связей, следовательно, равны: $P_{\xi C} = m\left(\ddot{\xi}_m + g\right); \quad P_{\eta C} = m\ddot{\eta}_m; \quad M_{XC} = i_{Xm}\ddot{\theta}.$

Выразив ускорения $\ddot{\xi}_m, \ddot{\eta}_m$ через линейные ускорения центра массы судна $\ddot{\xi}_G, \ddot{\eta}_G$ и учтя компоненты ускорений от вращения груза вместе с судном с угловой скоростью $\dot{\theta}$ и угловым ускорением $\ddot{\theta}$ для груза, центр тяжести которого имеет координаты y_P, z_P в связанной с судном системе координат, получим выражения для $P_{\xi C}, P_{\eta C}$ и M_{XC} . Спроектировав $P_{\xi C}, P_{\eta C}$ на связанные оси и разделив, для перехода к безразмерной форме, выражения для сил на mg и выражение для момента – на произведение веса груза на радиус инерции его массы mgr_I , получим расчетные уравнения для сил, действующих со стороны связей на груз при качке:

$$\begin{aligned}\frac{P_{Zcc}}{mg} &= \left(\frac{\ddot{\zeta}_G}{g} + 1 \right) \cos \theta + \frac{\ddot{\eta}_G}{g} \sin \theta - \frac{(z_P - z_G)}{g} \left(\dot{\theta} \right)^2 - \frac{y_P}{g} \ddot{\theta} ; \\ \frac{P_{Ycc}}{mg} &= - \left(\frac{\ddot{\zeta}_G}{g} + 1 \right) \sin \theta + \frac{\ddot{\eta}_G}{g} \cos \theta + \frac{(z_P - z_G)}{g} \ddot{\theta} - \frac{y_P}{g} \left(\dot{\theta} \right)^2 ; \\ \frac{M_{Xcc}}{mgr_I} &= \frac{r_I}{g} \ddot{\theta} .\end{aligned}$$

Эти выражения отличаются от используемых в различных руководствах [1, 2, 6, 7] тем, что при их выводе не делалось никаких упрощений, кроме допущения о пренебрежимо малой податливости опор.

Ограничиваясь линейным приближением и учитывая, что угол крена θ может иметь постоянную (стационарную) составляющую $\bar{\theta}$ (например, крен от ветра), заменим $\theta \rightarrow \bar{\theta} + \theta$. Получим:

$$\begin{aligned}\frac{P_{Zcc}}{mg} - \cos \bar{\theta} &= \frac{\ddot{\zeta}_G}{g} \cos \bar{\theta} - \sin \bar{\theta} \cdot \theta + \frac{\ddot{\eta}_G}{g} \sin \bar{\theta} - \frac{y_P}{g} \ddot{\theta} ; \\ \frac{P_{Ycc}}{mg} + \sin \bar{\theta} &= - \frac{\ddot{\zeta}_G}{g} \sin \bar{\theta} - \cos \bar{\theta} \cdot \theta + \frac{\ddot{\eta}_G}{g} \cos \bar{\theta} + \frac{(z_P - z_G)}{g} \ddot{\theta} ; \\ \frac{M_{Xcc}}{mgr_I} &= \frac{r_I}{g} \ddot{\theta} .\end{aligned}$$

В этих выражениях справа от знака равенства оставлены члены, являющиеся колебательной (случайной) частью соответствующих сил. Вероятностные характеристики случайной части P_{Zcc} , P_{Ycc} и M_{Xcc} , а также стационарные силы вычисляются программно для каждого заданного груза.

Инерционные и суммарные нагрузки на опоры.

Действующие Правила Регистра не оговаривают способа расчета грузов на опоры. Указано лишь, что при определении нагрузок следует принимать, что ускорения по трем осям действуют независимо друг от друга, т.е. корреляция ускорений не учитывается. Поскольку рассматриваемые процессы заведомо коррелированы, то вероятностные характеристики действительных ускорений, определяемых разработанной методикой, принципиально отличаются от расчетных, определенных по Правилам.

Вычисленные, как указано выше, инерционные и суммарные нагрузки на связи, удерживающие массу m и вовлекающие её в общее движение со всем судном, перераспределяются между элементами креплений. Это пере-

Поскольку несущими элементами конструкции вагонов и цистерн являются рама вагона или подшкворновые балки, то в качестве расчетной схемы опорного устройства принимается жесткая панель, соответствующая раме вагона. Нагрузки на эту панель со стороны кузова с грузом при бортовой качке судна передаются на опоры в двух рядах точек по бортам вагона. Указанные точки совпадают со штатными местами расположения опорных платиков для установки домкратов или местами крепления стяжек к вагону.

Точки расположены на расстоянии друг от друга $2b$ поперек вагона и на расстоянии a ниже центра массы вагона. Принято, что точечный контур, образуемый системой указанных точек, создает условный опорный контур.

Нагрузки, действующие на опоры в поперечной плоскости, при принятой схеме могут быть представлены в виде трех сил - силы, параллельной основной плоскости судна F_Y , и двух сил, перпендикулярных ей: F_{ZL} - по левому ряду точек крепления (по левому борту вагона) и F_{ZR} - по правому ряду, соответственно. Указанные силы определяются формулами

$$F_Y = P_{Ycc}; \quad F_{ZL} = [P_{Zcc}b + (P_{Ycc}a + M_{cs})]/2b;$$

$$F_{ZR} = [P_{Zcc}b - (P_{Ycc}a + M_{cs})]/2b,$$

полученными исходя из равенства действующих на массу вагона инерционных сил, веса груза и их моментов сумме соответствующих усилий от опор левого и правого бортов опорного контура и их моментов. В этих выражениях: F_Y - нагрузка в направлении оси oy на уровне опорного контура; F_{ZL} - нагрузка в направлении оси oz на точки опорного контура левого борта вагона; F_{ZR} - нагрузка в направлении оси oz на точки опорного контура правого борта вагона (правый и левый борт вагона соответствует левому и правому борту судна; в расчетах для определенности принято, что волнение набегают со стороны левого борта судна). Обратно направленные силы действуют на опоры со стороны опорного контура.

Вероятностные характеристики случайной части F_{ZL} , F_{ZR} и F_Y , а также соответствующие стационарные нагрузки вычисляются для каждого заданного груза.

Разработанная методика реализована программно и протестирована.

Выводы и перспектива работ по данному направлению. Разработанная методика позволяет выполнить оценки вероятностных характеристик (с учетом корреляции) процессов качки, ускорений и нагрузок, действующих на тяжелые и крупногабаритные грузы при их перевозке морем, в том числе - на морских железнодорожных паромках.

В разработанной методике расчета ускорений и нагрузок учтены многие особенности рассматриваемой задачи. Однако в ней остаются некоторые неточности, которые обусловлены современным уровнем гидродинамической теории качки, возможностями доступных компьютеров и технических средств эксперимента. Кроме того, разработанную методику следует распространить на случай движения судна под произвольным углом к набегающему волнению. Корректировка методики и соответствующее уточнение результатов расчетов потребует сравнения результатов расчетов

и результатов натурных мореходных испытаний судов-паромов. Предполагается организация соответствующих испытаний.¹

Библиографический список

1 ИМО. Кодекс безопасной практики размещения и крепления грузов. Резолюция А714(17), 1991 (с поправками).

2 ЮжНИИМФ. КНД 31.1006-96 Правила морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов.

3 Ремез Ю.В. Качка корабля / Ю.В.Ремез. — Л.: Судостроение, 1983. — 328 с.

4 Бородай И.К. Качка судов на морском волнении / И.К.Бородай, Ю.А. Нецветаев. — Л.: Судостроение, 1969. — 432 с.

5 Салькаев А.З. Определение гидродинамических характеристик бортовой и вертикальной качки: Сб. науч. тр. НТО Судпрома / А.З. Салькаев. — Л., 1969. — Вып. 126. — С. 155 – 165.

6 Шмаков М.Г. Специальные судовые устройства / М.Г. Шмаков. — Л.: Судостроение, 1975. — 344 с.

7 Снопков В.И. Перевозка грузов морем / В.И. Шмаков. — М.: Транспорт, 1986. — 312 с.

Поступила в редакцию 14.09.2004 г.

¹ Подготовлена к печати статья авторов, содержащая результаты расчетов по предлагаемой методике и их анализ для железнодорожного паром ПЕТРОВСК, переоборудованного в г. Севастополе.