



УДК 629.12

**Е.П. Роннов**, д.т.н., проф., зав. кафедрой ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
**С.В. Преснов**, к.т.н., директор московского филиала РРР  
125195, г. Москва, Ленинградское шоссе, 59  
**Ю.А. Кочнев**, к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

### ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УСИЛИЙ НА АВТОСЦЕП ТОЛКАЕМОГО СОСТАВА

*Ключевые слова:* толкаемый состав, автосцеп, регулярная качка, дифференциальные уравнения качки

*Представлены результаты расчёта по разработанной математической модели усилий, возникающих в автосцепе толкаемого состава, состоящего из двух секций и толкача.*

Перемещение несамоходных судов методом толкания уже более пятидесяти лет применяется в нашей стране при перевозке массовых грузов на внутренних водных путях. Его эффективность доказана в работах отечественных ученых и специалистов и неоспоримо подтверждена эксплуатационной практикой освоения грузопотоков.

Несмотря на отработанные и проверенные временем конструкции судового автосцепа, реализованные в одно- и двухзамковых автосцепах, например типа О-200 и УДР соответственно, для повышения надёжности в эксплуатации необходимо дальнейшее совершенствование их конструкции, а также наличие нормативных требований классификационных обществ к их проектированию.

Одним из основных направлений решения этой проблемы является всесторонний аналитический анализ усилий, возникающих в соответствующих конструктивных элементах автосцепа в различных ситуациях при эксплуатации состава. Такие критические усилия, с точки зрения максимальных значений, могут возникать при отклонении рулей толкача и одновременной качке судов состава при его ходе на волнении.

Каждое судно состава имеет шесть степеней свободы и, соответственно, совершает шесть видов колебательных движений относительно трёх координатных осей.

Нахождение усилий в элементах счала толкаемого состава связано с составлением и решением уравнений движения состава, для чего используется система уравнений Эйлера-Лагранжа

$$\frac{dv}{dt} \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_s} + \sum_{\gamma=1}^n \sum_{t=1}^n \gamma_{ts}^y \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_y} \cdot \omega_t + \sum_{y=1}^n \varepsilon_s^y \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_y} - \frac{\partial T}{\partial n_s} = P_s, \quad (1)$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы;

$n$  – число степеней свободы;

$\omega_s$  – квазискорости системы;

$\gamma_{ts}^y$  – трёхиндексные символы Больцмана;

$\varepsilon_s^y$  – двухиндексные символы Больцмана;

$n_s$  – квазикоординаты;

$P_s$  – обобщённая сила, отнесённая к координате.

Кинетическая энергия системы в этом случае находится как сумма кинетической энергии толкача, каждой секции состава и кинетической энергии потока жидкости, вызванного движением судов состава.

Находя частные производные от кинетической энергии по обобщённым координатам и скоростям для каждого судна состава, можно записать систему уравнений движения, которую удобно представить в матричном виде.

$$A_i \times B_i = C_i, \quad (2)$$

где  $A$  – матрица коэффициентов уравнений;

$B$  – матрица перемещений;

$C$  – матрица внешних сил, действующих на судно.

Матрица коэффициентов уравнений состава судов и матрица перемещений определяются по известным методам теории качки одиночного судна на регулярном волнении [1].

Матрица внешних сил, действующих на судно включает в себя следующие элементы

$$C_{i,j} = \left( R_\xi \quad R_\eta \quad R_\zeta \quad M_\xi \quad M_\eta \quad M_\zeta \right)^T,$$

где  $R_\xi$  – продольная составляющая внешних сил;  $R_\eta$  – поперечная составляющая внешних сил;  $R_\zeta$  – вертикальная составляющая внешних сил;  $M_\xi$  – момент внешних сил относительно продольной оси;  $M_\eta$  – момент внешних сил относительно поперечной оси;  $M_\zeta$  – момент внешних сил относительно вертикальной оси.

Внешние силы, действующие на суда состава, сведены к следующим категориям:

1 силы и моменты, приложенные к корпусам судов со стороны жидкости и обусловленные её вязкостью и наличием свободной поверхности;

2 возмущённые силы, обусловленные набегающим волнением;

3 демпфирующие и восстанавливающие силы;

4 силы, действующие на движителях;

5 рулевые силы и моменты;

6 силы реакций конструкций сцепного замка.

Таким образом, общая внешняя сила, действующая на каждое судно и создающая три её проекции и три момента, может быть записана в виде

$$R = R_B + R_D + \sum_{i=1}^n R_i$$

где  $R_B$  – силы, действующие на судно со стороны жидкости (пункты 1,2,3);

$R_D$  – силы, действующие на судно со стороны движителя и рулевого устройства (пункты 4,5)

$R_i$  – реакции конструкций.

В общем виде реакции зависят от перемещения сцепляемых судов состава и имеют вид

$$R_i = \alpha_i \times f(\xi_i, \eta_i, \zeta_i, \theta_i, \varphi_i, \psi_i),$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала, размеров и других конструктивных характеристик сцепного замка.

Для определения усилий в элементах сцепного устройства необходимо проинтегрировать систему уравнений, составленную для состава, вид которой будет зависеть от выбранного автосцепа.

Такая система была составлена и решена численным методом Рунге-Кутты четвёртого порядка для кильватерного состава проекта P156, состоящего из двух барж и толкача проекта 428, соединённого сцепным замком и вожжевыми. По результатам расчёта получены значения усилий, действующие на сцепной замок автосцепа: продольные усилия ( $Xz1$  – для сцепа толкач – концевая баржа,  $Xz2$  – для сцепа концевая – носовая баржи) и поперечные усилия ( $Yz1$  – для сцепа толкач – концевая баржа,  $Yz2$  – для сцепа концевая – носовая баржи) (см. рисунок 2), а также на реакции в тросах вожжевых связей:  $R11$  – для левых вожжевых сцепа толкач – концевая баржа,  $R12$  – для левых вожжевых сцепа концевая – носовая баржи;  $Rp1$  – для правых вожжевых сцепа толкач – концевая баржа,  $Rp2$  – для правых вожжевых сцепа концевая – носовая баржи (рисунок 3).

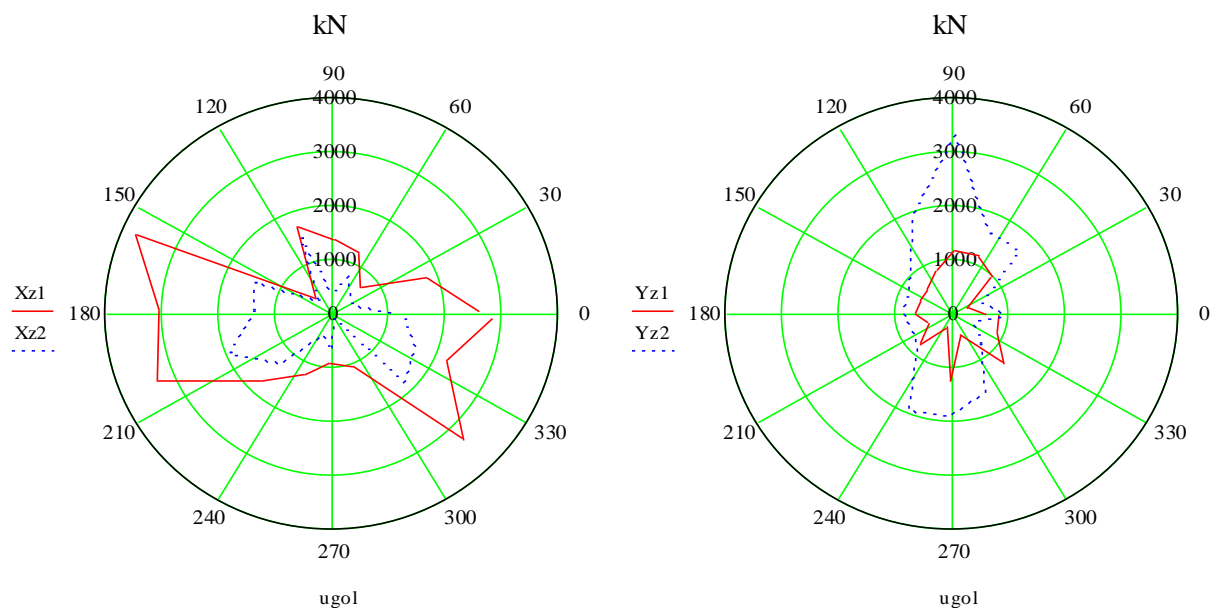


Рисунок 2 – Зависимость продольных и поперечных усилий в замке автосцепов состава от курсового угла

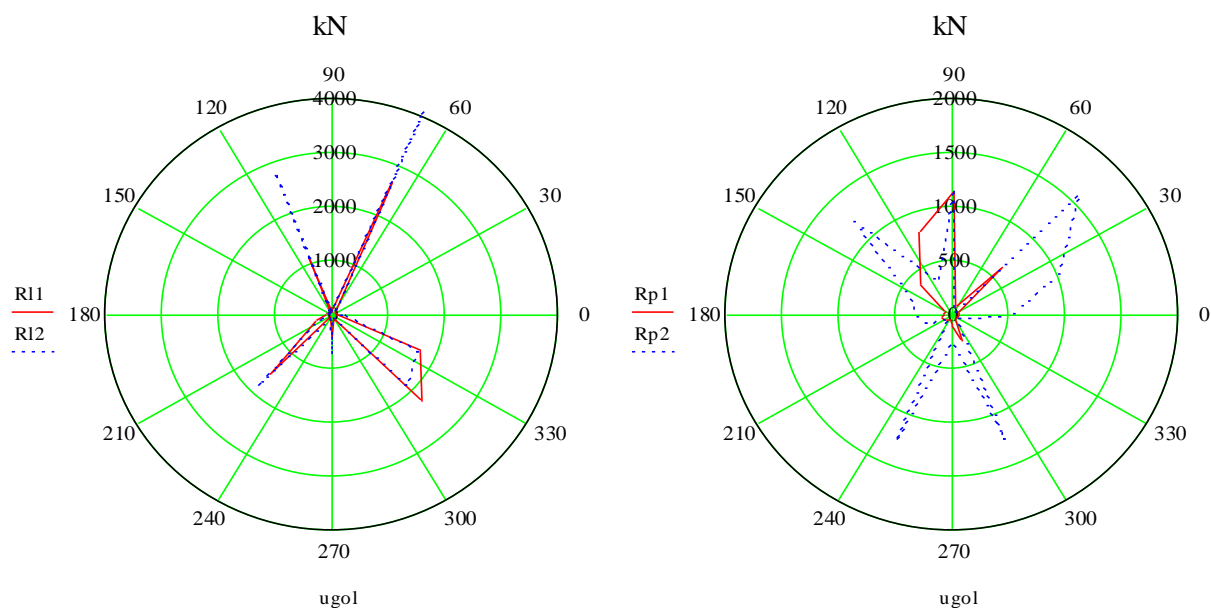


Рисунок 3 – Зависимость усилий в вожжевых состава от курсового угла

Приведённые графики показывают значение усилий, возникающих в связях при различных курсовых углах движения судна по отношению направления набегания волны. Так видно, что наибольшие продольные нагрузки на замок возникают при курсовом угле близком к встречному волнению. Аналогично, наибольшие поперечные нагрузки на сцепной замок возникают при поперечном волнении. Вожжевые включаются в работу при промежуточных положениях судна, когда замок не воспринимает все усилия из-за своей конструкции (наличии амортизаторов и зазоров).

Полученные результаты могут быть использованы при разработке рекомендаций судоводителю для избегания опасных курсовых углов, с точки зрения целостности сцепного устройства.

Для получения более точных результатов предложенная методика должна быть пересмотрена на методы нелинейной теории качки с учётом нерегулярности волнения. Такой подход позволит более точно прогнозировать действующие усилия на элементы автосцепов, а также создать нормативную базу для нормирования нагрузок при проектировании новых и модернизации существующих сцепных замков.

#### **Список литературы:**

- [1] Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2-е перераб. и доп. Том 2. Динамика (качка) корабля. // С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин / Л. Судостроение – 1975 – 176 с.
- [2] Сторожев Н.Ф. Судовые сцепные устройства. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1978. – 272 с.
- [3] Корректировка требований РРР к сцепным устройствам толкаемых составов внутреннего плавания (разделы 5.7, 5.8 ч III Устройства). Научно-технический отчёт. Н. Новгород – 2000 г – 135 с.
- [4] Преснов С.В. Метод определения усилий в счалах толкаемых составов смешанного (река-море) плавания / С.В. Преснов. М.: ООО ИПК «Корабел» – 2006 – 89с.

## **NUMERICAL ANALYSIS OF FORCES ON THE COUPLER OF A PUSHED CONVOY**

E.P. Ronnov, S.V. Presnov, Y.A. Kochnev

*Keywords: pushed convoy, coupler, regular motion, differential equation of rolling*

*The results of the calculation of the developed mathematical model of the forces arising in the circuit pushed composition consisting of two sections and a pusher.*