

# ОЦЕНКА СИЛ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА БОКОВУЮ СТЕНКУ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ ПРИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ КУЗОВА



М.С. Громаков



С.В. Беспалько

В данной статье приведен метод оценки сил давления жидкости на боковую стенку котла цистерны при поперечных боковых колебаниях.

*Ключевые слова:* вагон, цистерна, колебания, жидкий груз, боковой относ, железная дорога, динамика

DOI: 10.53883/20749325\_2021\_03\_10

Колебания жидкого груза происходят при проходе вагоном кривых участков пути, а также при наезде на стыки и неровности рельса. Жидкость, набегая на боковую стенку кузова, создает давление. Это непосредственно воздействует на общую динамику вагона.

Определение силы давления жидкости на боковую стенку вагона позволит учесть ее в построении математической модели колебания вагона и при оценке его устойчивости в случае прохождения кривых участков пути. Приведенный ниже метод предполагает определение сил давления жидкостей исходя из значений гидростатического давления жидкости в направлении, заданном ускорением кузова вагона. В таком случае давление будет определено следующим образом [4]:

$$P = \rho a h, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости;  $a$  — заданное ускорение жидкости;  $h$  — высота столбика жидкости в плоскости действия силы давления.

Определенное давление жидкости в каждый момент времени определяет силу давления  $R_x$ , которая будет определена как интеграл по поверхности боковой стенки котла цистерны:

$$R_x = L \int_0^s \rho a h dy, \quad (2)$$

где  $L$  — длина котла цистерны.

К отысканию значения данной силы и сводится поставленная задача. На рис. 1 изображена искомая сила давления жидкости на стенку котла цистерны.

**Громаков Максим Сергеевич**, аспирант кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика цистерны с учетом колебаний жидкого груза. Автор одной научной работы.

**Беспалько Сергей Валерьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: строительная механика вагона, динамика вагона, вопросы безопасности перевозки опасных грузов. Автор 60 научных работ.

**Мироненко Олег Игоревич**, старший преподаватель кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика систем, организация вагонной отрасли, ДОТ. Автор 12 научных работ.

**Зяблов Александр Вячеславович**, аспирант кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)), дежурный по железнодорожной станции Бирюлево-Товарная (ОАО «РЖД»). Область научных интересов: оптимизация методов ремонта вагонов, динамика вагонов. Автор двух научных работ.

Ниже будет рассмотрена и приведена методика отыскания силы  $R_x$ .

Вследствие боковых колебаний кузова жидкость в котле движется под действием возмущающей силы и занимает смещенное положение, а при движении по кривой вагон находится под углом к горизонтальной поверхности (рис. 2).

Таким образом, вследствие вышеперечисленных факторов гидростатическое давление создает силу  $R_x$  под некоторым углом  $\alpha$  к горизонтальной поверхности (см. рис.2).

Ускорение  $a$ , определяющее силу  $R_x$ , состоит из горизонтального и вертикального ускорений жидкости  $a_x$  и  $a_y$  и является их векторной суммой. Таким образом величина этих ускорений и будет определять угол  $\alpha$ , который можно будет вычислить по следующей формуле:

$$\alpha = \arctg \frac{a_y + g}{a_x}, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Высота столбика жидкости, определяется, как расстояние по линии действия силы  $R_x$  до поверхности жидкости. Точка пересечения линии действия силы  $R_x$  с линией поверхности жидкости имеет параметр уровня свободной поверхности  $h_i$ , который определяется динамическими параметрами жидкости [2]. Схема определения параметра  $h$  показана на рис. 3.

Чтобы вычислить значение силы  $R_x$  необходимо определить все значения  $h$  по уровню жидкости. Для этого разделим все поле жидкости на множество точек на расстоянии  $dy$  друг от друга по вертикали и  $dx$  по

горизонтали. Двигаясь по оси  $y$  в диапазоне от 0 до  $h$  с шагом  $dy$  определим значения всех столбиков  $h$  и выведем формулу:

$$h = \frac{h_x - y_i}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

где  $y_i$  – высота по оси  $y$  на каждом шаге расчета.

На рис. 4 показано изображение определения параметров  $h$ , необходимых для дальнейшего расчета.

Высоту уровня  $h_x$ , соответствующую точке на оси  $y$  необходимо определять для каждого шага расчета исходя из следующего условия:

$$h_x = h_i, \text{ при } (y - \alpha x) = h_i, \quad (5)$$

где  $x$  – точка на оси абсцисс, относительно которой ведется расчет каждого шага.

Данное условие справедливо для расчета силы давления на правую стенку котла цистерны, когда для левой стенки данное условие примет вид:

$$h_x = h_i, \text{ при } (y + \alpha x) = h_i. \quad (6)$$

Далее силу давления жидкости на стенку котла цистерны можно определить, проинтегрировав уравнение (1) методом прямоугольников, тогда вышеприведенное уравнение примет вид:

$$R_x = \sum \rho L a h d y. \quad (7)$$

Ускорение  $a$ , определяющее силу  $R_x$  вычисляется, как векторная сумма ускорений  $a_x$  и  $a_y$ :

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}. \quad (8)$$

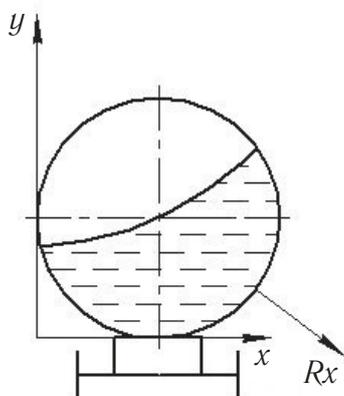


Рис. 1. Сила давления жидкости на стенку котла цистерны

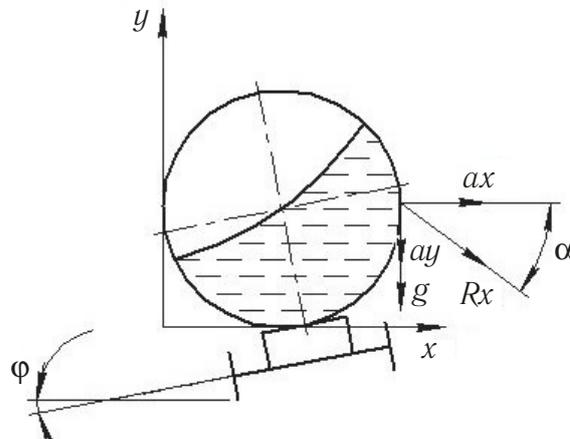
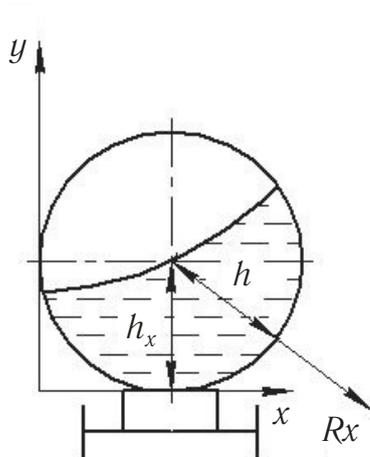
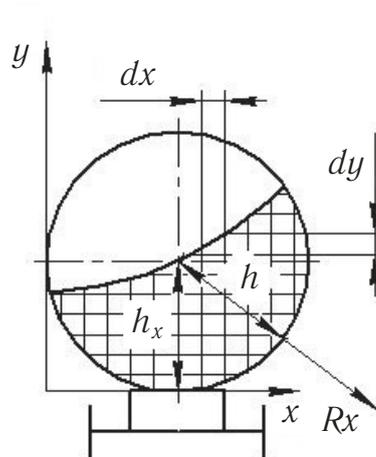


Рис. 2. Положение вагона при движении в кривом участке пути

Рис. 3. Параметры определения столбика  $h$ Рис. 4. Определения высоты столбика  $h$ 

Данный расчет можно реализовать в виде компьютерной программы. Результатом расчета будет график зависимости от времени силы давления жидкости на правую и левую стенки котла цистерны в зависимости от направления ускорения  $a_x - Rx(t)$ .

На рис. 5 показан алгоритм программы расчета силы давления на правую стенку котла цистерны. 

## Литература

1. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган; Под ред. М.Ф. Вериго. — Москва: Транспорт, 1986. — 559 с. — Текст: непосредственный.
2. Громаков, М.С. Математическая модель колебаний жидкого груза в котле цистерны при боковом отношении / М.С. Громаков. — Текст: электронный // Современные проблемы железнодорожного транспорта: сборник трудов по результатам международной интернет-конференции 21–22 марта 2019 г. — Москва: Российский университет транспорта, 2019. — С. 268–273. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37601-584> (дата обращения: 05.08.2021).
3. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Текст: непосредственный // Теоретическая физика: т. VI. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 736 с.
4. Чугаев, Р.Р. Гидравлика: учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. — 4-е изд., доп. и перераб. — Л.: Энергоиздат: Ленингр. отд.-ние, 1982. — 672 с. — С. 72–74. — Текст: непосредственный
5. Райков, Г.В. Моделирование технологических процессов в повышении эффективности работы вагоноремонтных предприятий / Г.В. Райков, К.А. Сергеев, О.Ю. Кривич, А.П. Бомбардиров. — Текст: непосредственный // Транспортное дело России. — 2019. — №3. — С. 143–144.
6. Лапшин, В.Ф. Методика построения моделей техпроцессов ремонта кузовов, ходовых частей, автотормозов и автосцепных устройств вагонов / В.Ф. Лапшин, К.А. Сергеев, О.Ю. Кривич, А.А. Петров. — Текст: непосредственный // Инновации и инвестиции. — 2019. — №6. — С. 211–213.
7. Сергеев, К.А. Комплексная оценка технического состояния электрооборудования пассажирских вагонов при деповском ремонте / К.А. Сергеев, О.Ю. Кривич, А.С. Антоновский. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2016. — №4. — С. 8–11.
8. Назаров, О.Н. Нормативное регулирование процессов создания нового подвижного состава железных дорог / О.Н. Назаров, К.А. Сергеев. — Текст: непосредственный // Железнодорожный транспорт. — 2014. — №10. — С. 34–42.
9. Сергеев, К.А. Информационное и программное обеспечение технолога вагоноремонтного предприятия / К.А. Сергеев, И.В. Гундаев, Е.С. Сидоров. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2011. — №2. — С. 97–101.

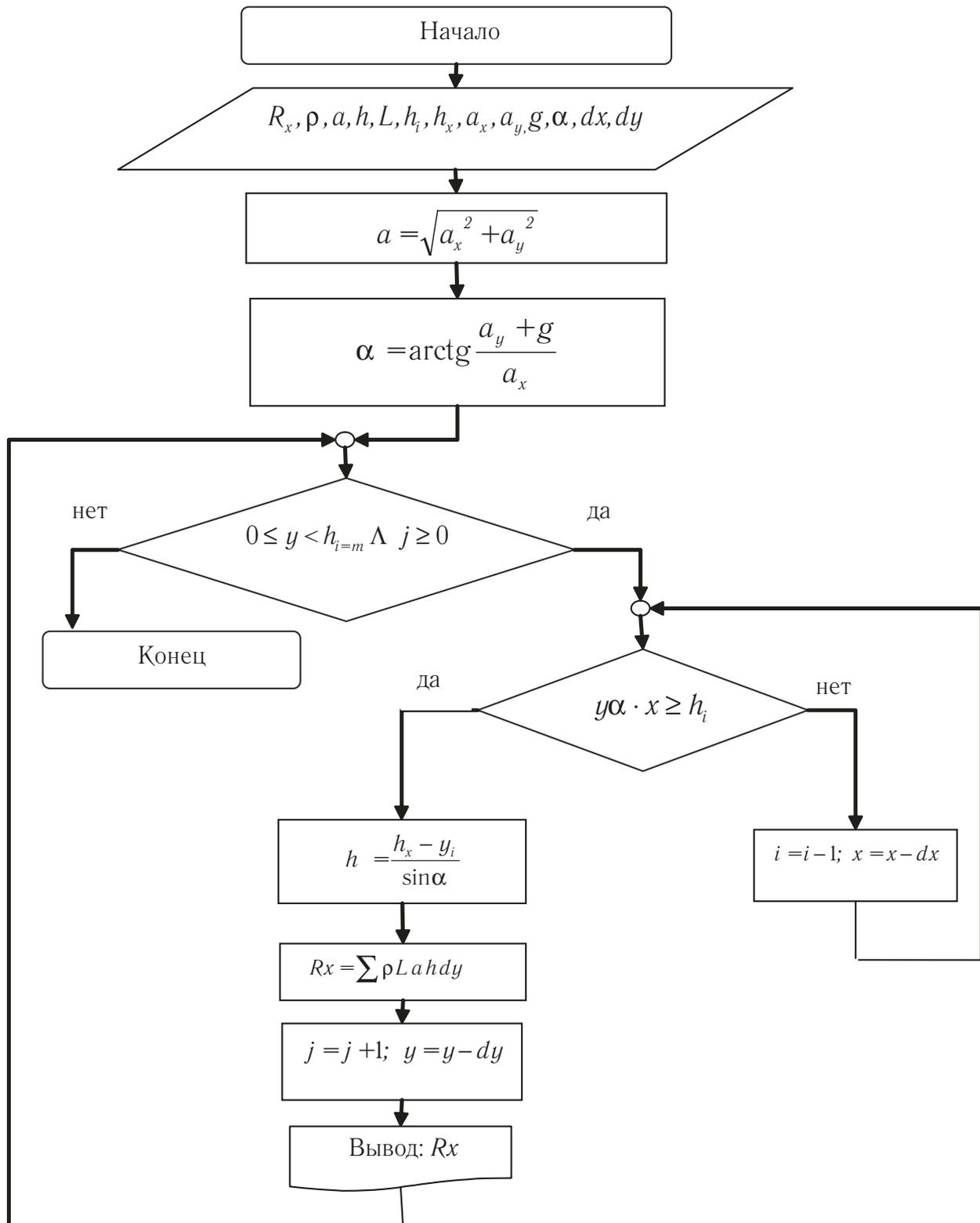


Рис. 5. Алгоритм программы расчета