

УДК 614.846.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОЦИСТЕРН ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ТРАЕКТОРИИ «ПЕРЕСТАВКА»

Кулаковский Б.Л., к.т.н., доцент, Томчук С.Л.

*Исследовано поведение жидкого груза при движении автоцистерны по траектории «Переставка». Определены величины моментов ударного взаимодействия жидкости с емкостью на участках траектории.*

Для изучения процессов, связанных с перемещением жидкости в цистерне при движении автомобиля по дорогам, была разработана и изготовлена специальная установка (Рис. 1). Состоит она из цистерны, закрепленной на монтажной раме и измерительно-регистрирующей аппаратуры. Для определения сил взаимодействия жидкости со стенками цистерны во время движения автомобиля применялись балочные тензоэлементы, позволяющие измерять моменты, возникающие в продольном и поперечном направлениях. Установка опорой крепиться к грузовой площадке автомобиля УАЗ-452Д.

На этой опоре закреплены две тензобалочки для измерения момента взаимодействия жидкости со стенками цистерны в продольном направлении. Поверх тензобалочек закреплена рама, на которой установлены тензобалочки для определения бокового опрокидывающего момента  $M_b$ . Цистерна закреплена на монтажной раме стяжными хомутами. Для регистрации боковых и продольных ускорений при маневрировании автомобиля установлены тензометрические акселерометры АТ-1. Угол  $\Omega$  и скорость поворота рулевого колеса  $\dot{\Omega}$  определяется с помощью потенциометрического датчика, ось которого посредством резиновой трубки, соединена с валом сошки руля. В ходе эксперимента исследуемые параметры регистрировались с помощью тензоусилителя «ТОПАЗ-1» и светолучевого осциллографа «НОЧ ИУ4-2». Для удобства работы и обслуживания осциллографа усилитель и другие приборы размещались в кабине водителя. На каждой тензобалочке клеем «Циакрин Э.О.» были прикреплены тензорезисторы типа 2 ФКПА-20-200 × В с последующей герметизацией эпоксидным клеем.

Для измерения бокового момента  $M_b$  тензорезисторы размещались на двух консольных балках и включались в один полный тензомост, что позволяло в ходе эксперимента регистрировать сигналы, соответствующие усредненному значению сил, действующих на обе балки.

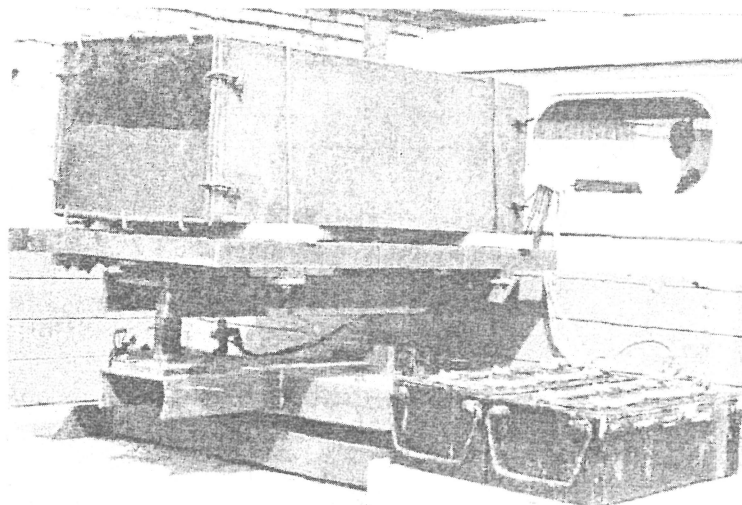


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

Точно таким же образом измерялся продольный момент  $M_l$ . Для измерения угла и скорости поворота рулевого колеса была собрана мостовая схема, составленная из двух переменных резисторов, один из которых выполнял роль датчика, а другой служил одновременно в качестве вспомогательных плеч моста и балансировочного устройства. Регулировка чувствительности мостовой схемы производилась с помощью реостата. Блок-схема измерительной установки показана на рис. 2.

$TM M_b$ ;  $TM M_l$ ;  $TM P_n$  – тензомосты для измерения боковых и продольных моментов сил;

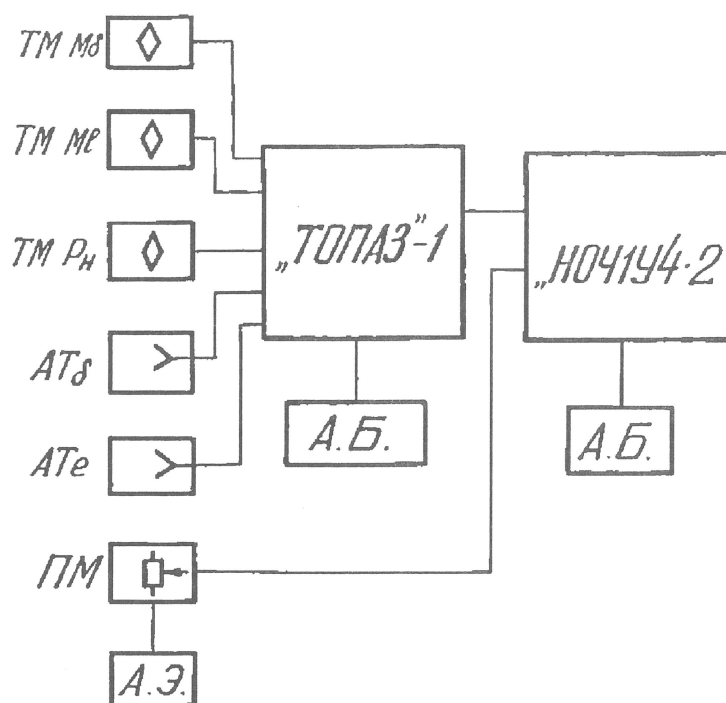
$AT_b$ ,  $AT_l$  – акселерометры для измерения боковых и продольных ускорений;

$ПМ$  – потенциометрический мост;

$АЭ$  – аккумуляторный элемент;

$АБ$  – аккумуляторная батарея.

Движение осуществлялось по траектории, включающей прямолинейный участок, переходные кривые, участок кругового движения. При испытаниях левое переднее колесо направлялось по отмеченной на поверхности дороги траектории. Параллельно с осциллографированием исследуемых процессов проводилась киносъемка поведения жидкости в цистерне при движении автомобиля по заданной траектории. Съёмочная камера была установлена в кабине водителя с таким расчетом, чтобы через заднее окно была видна прозрачная стенка цистерны.



$TM M_b$ ;  $TM M_e$ ;  $TM P_n$  – тензомосты для измерения боковых, продольных моментов и вертикальных сил.

$AT_b$ ;  $AT_e$  – акселерометры для измерения боковых и продольных ускорений.

$ПМ$  – потенциометрический мост.

$АЭ$  – аккумуляторный элемент.

$АБ$  – аккумуляторная батарея.

Рис. 2. Блок-схема измерительной установки

Перед троганием автомобиля с места одновременно включались в работу кинокамера и осциллограф. Киносъемка и осциллографирование велись на протяжении всего отрезка времени, в течение которого совершался испытательный цикл движения автомобиля по заранее разработанной схеме: движение автомобиля по прямой с разгоном до необходимой скорости – движение по заданной траектории – выход на прямую. Аппаратура выключалась по завершению испытательного цикла (выход на прямую). Исследование устойчивости автомобильной цистерны в дорожных условиях осуществлялось при движении автомобиля по траектории «переставка» по схеме: движение по прямой – поворот – обратный поворот – выход на прямую (рис. 3). Выбор указанной траектории не случаен. Так, практика эксплуатации пожарных автоцистерн показывает, что преобладающее число случаев их опрокидывания происходит при движении на

большой скорости при повороте и обратном повороте. Испытания по траектории «переставка» позволяют произвести сравнительную оценку сил взаимодействия жидкости со стенками цистерны в процессе поворота и обратного поворота с выходом на прямую. Киносъемка наглядно показывает, что при повороте не полностью заполненной цистерны жидкость занимает наклонное положение, центр ее тяжести смещается, а при обратном повороте происходит накат с ударным взаимодействием жидкости в противоположную стенку цистерны.

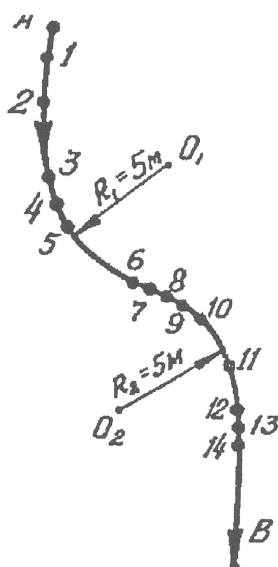


Рис. 3. Схема траектории движения автомобильной цистерны

Траектория «переставка» имеет следующие участки:

- равноускоренное движение по прямой,  $R_\alpha = \infty$
- движение по кривой переменного радиуса,  $R_\alpha \neq const$ ,  $\Omega_k = const$ ; где  $\Omega_k$  - скорость поворота рулевого колеса.
- круговое движение в повороте,  $R_\alpha = const$ ,  $\Omega_k = 0$
- переход в обратный поворот,  $R_\alpha \neq const$ ,  $\Omega_k = const$
- круговое движение обратного поворота,  $R_\alpha = const$ ,  $\Omega_k = 0$
- выход на прямую,  $R_\alpha \neq const$ ,  $\Omega_k = const$
- движение по прямой,  $R_\alpha = \infty$ .

Кадры киносъемки и осциллограмм привязаны к соответствующим точкам траектории. Материалы исследования (осциллограммы, киноплёнка) показали поведение жидкости и величины моментов взаимодействия жидкости с внутренней полостью цистерны на отдельных участках траектории. В точке А на ровном горизонтальном участке дороги цистерна находится в состоянии покоя, зеркало жидкости горизонтально. На первом кадре осциллограммы (Рис. 4) видны нулевые линии регистрируемых про-

цессов: продольного момента  $M_e$ , бокового ускорения  $J_b$ ; продольного ускорения  $J_e$ ; бокового момента  $M_b$ , положение рулевого колеса (Руль).

На участке 2-5 (автомобиль входит в поворот) жидкость перемещается в противоположную сторону от поворота и вперед (рис. 5).

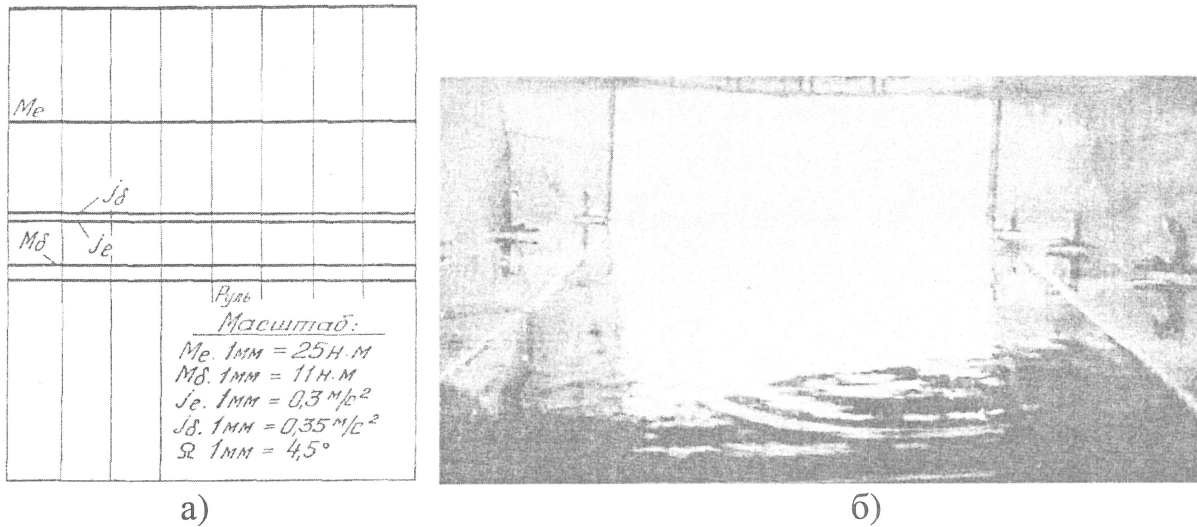


Рис. 4. Осциллограмма и положение жидкости в цистерне при стоянке автомобиля в точке А траектории.

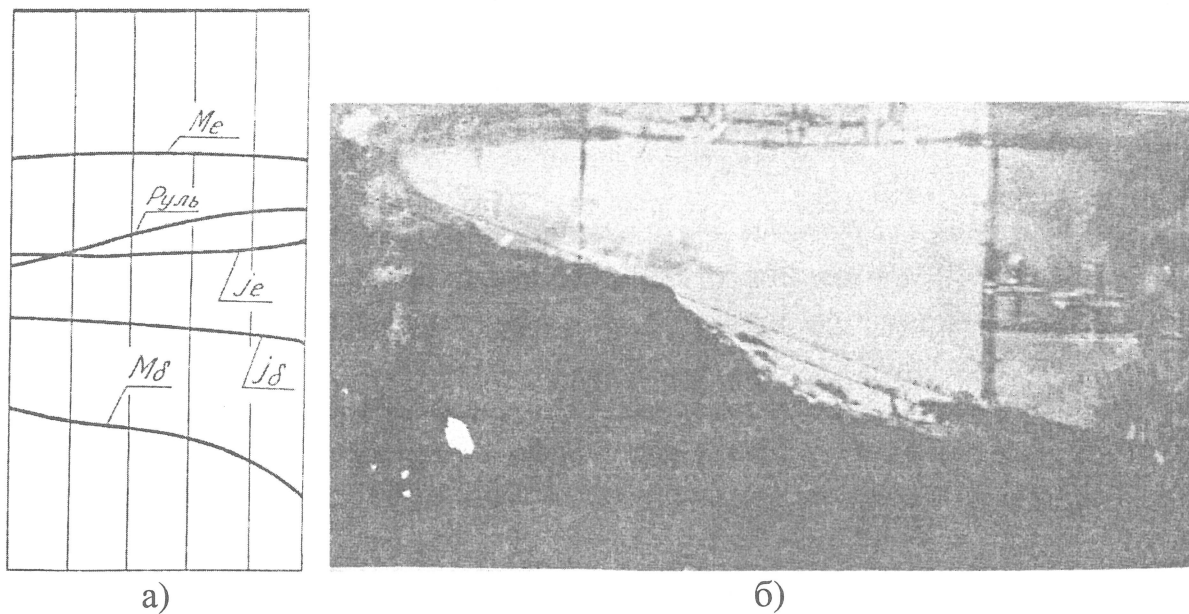


Рис. 5. а) – шестой кадр осциллограммы, б) – кинокадр положения поверхности жидкости при переходе к круговому движению на участке 2-5.

На кадрах осциллограмм величина  $M_e$  меняется вместе с  $J_b$ , что свидетельствует о появлении силы, направленной вдоль оси автомобиля, вызванной изменением кривизны траектории. Величина момента  $M_b$  начинает возрастать вместе с  $J_b$ , что объясняется движением жидкости к боковой стенке цистерны. При просмотре кинокадров этого участка видно неуста-

новившееся движение жидкости вперед и к боковой стенке. При входе автомобильной цистерны в поворот, кроме момента взаимодействия жидкости с боковой стенкой цистерны, действуют инерционные силы, возникающие из-за непрерывного изменения центра поворота, уменьшения радиуса поворота и, как следствие, увеличения угловой скорости поворота автомобильной цистерны. Таким образом, при повороте управляемых колес во время движения автомобиля жидкость перемещается в цистерне во взаимно перпендикулярных направлениях. Действие бокового ускорения  $J_b$  вызывает движение волны к боковой стенке, а действие продольного ускорения  $J_e$  – движение жидкости к передней торцевой стенке цистерны. Экспериментальные исследования поведения жидкости на участке 2-5 проводились с изменением расстояния между центром тяжести цистерны и серединой заднего моста автомобиля. Полученные результаты показали, что с увеличением этого расстояния при входе автомобиля в поворот происходит рост значений продольного ускорения  $J_e$  и продольного момента  $M_e$ . Скорость движения волны в продольном направлении также возрастает. На участке траектории с постоянным радиусом (участок 5-6) величины  $M_b$  и  $J_b$  в течение всего времени поворота остаются практически неизменными. Величины  $M_e$  и  $J_e$  также не меняются. При большой продолжительности кругового движения колебания жидкости прекращаются.

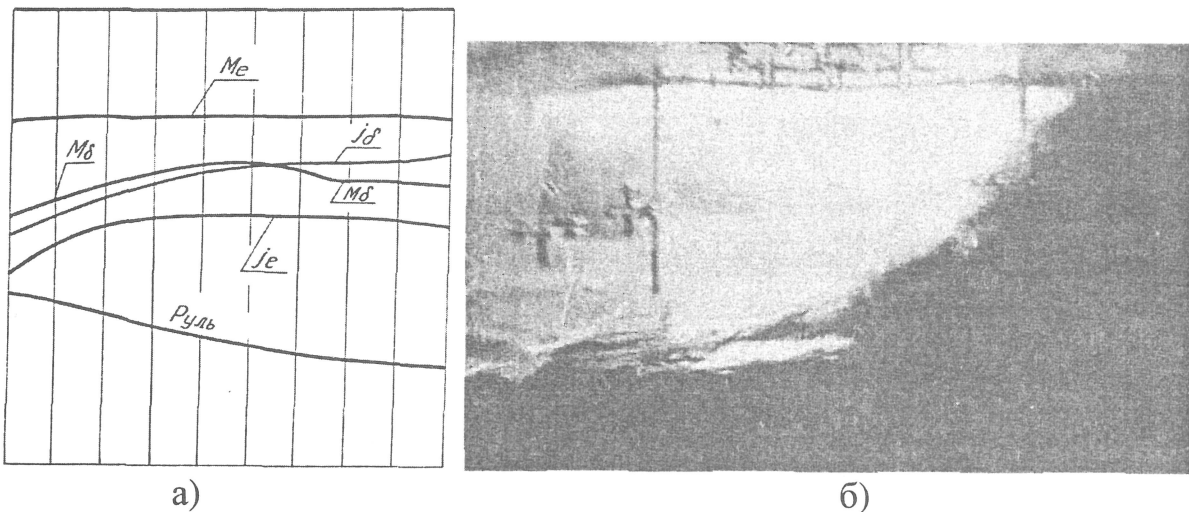


Рис. 6. а) – девятый кадр осциллограммы, б) – кинокадр положения жидкости в обратном повороте автомобиля на участке 7-8.

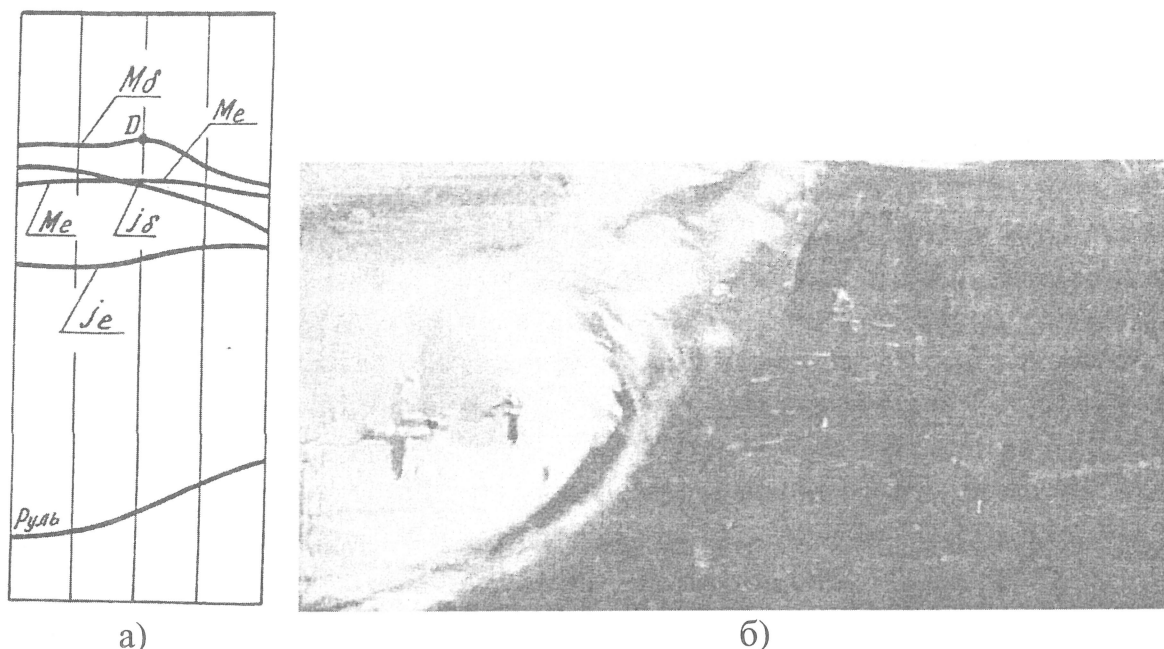


Рис. 7. а) – одиннадцатый кадр осциллограммы, б) – кинокадр процесса движения отраженной волны в обратном направлении на участке траектории 9-10.

Свободная поверхность принимает наклонное положение под определенным углом к горизонту.

На участке траектории 6 - 7 в момент начала обратного поворота автомобиля жидкость перемещается в поперечном направлении к противоположной боковой стенке цистерны. Из рис. 6. видно это движение. Происходит незначительное перемещение жидкости вперед, сопровождающееся малым ростом величин  $M_e$  и  $J_e$ . При дальнейшем повороте рулевого колеса происходит увеличение наката волны на противоположную боковую стенку цистерны. Основные массы жидкости, перемещаясь в сторону действия бокового ускорения  $J_e$  поднимаются вверх, увеличивая величину бокового момента  $M_b$ . Величина  $M_b$  увеличивается синхронно с боковым ускорением  $J_b$ . На участке 9-10 траектории в положении обратного поворота автомобильной цистерны (Рис. 7) происходит дальнейший рост значений  $M_b$  и  $J_b$ . Здесь момент  $M_b$  боковое ускорение  $J_b$  имеют максимальное значение. Волна, накатываясь вверх, отражается от стенки и крыши цистерны и движется в ее верхней части в обратном направлении. В девятом кадре осциллограммы видны резкие колебания величины  $M_b$ , что свидетельствует о наличии сильных турбулентных потоков движения. Происходит интенсивное перемешивание жидкости с воздушными массами, сопровождающееся повышением давления в верхней части внутренней полости.

Из осциллограмм видно, что величина  $M_b$  в обратном повороте больше  $M_b$  поворота в среднем на 40%. С увеличением скорости движения

автомобиля по указанной траектории величина  $M_6$  возрастает, как в процессе поворота, так и в обратном повороте. Характер изменения  $M_6$  в повороте и обратном повороте различный и показан на графике (Рис. 8). Из графика видно, что с увеличением скорости движения автомобиля крутизна возрастания величины  $M_6$  в обратном повороте больше, чем в повороте.

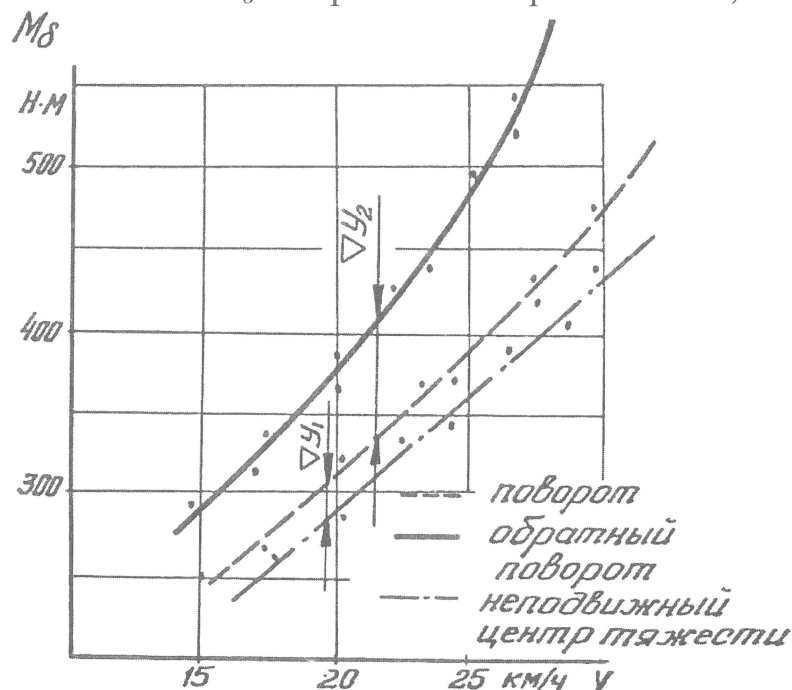


Рис. 8. Зависимость опрокидывающего момента жидкости  $M_6$  от скорости движения автомобиля  $V_a$ .

Для сравнительного анализа величины  $M_6$  поворота и обратного поворота на уровне зеркала была установлена заслонка, обеспечившая неподвижность центра тяжести. При неподвижном центре тяжести величина  $M_6$  имеет меньшие значения по сравнению со случаем, когда она имеет свободную поверхность. На рис. 8 величина  $V_y$  при различной скорости движения автомобиля в повороте показывает ту долю опрокидывающего момента  $M_6$ , которая создается за счет смещения центра тяжести жидкости в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$V_{y1} = M_{61} - M_{н.ц.} \quad (1)$$

Величина  $V_{y2}$  показывает ту долю опрокидывающего момента  $M_{62}$ , который возникает при образовании волны и ударном взаимодействии ее со стенкой цистерны в обратном повороте автомобиля:

$$V_{y2} = M_{62} - M_{61} \quad (2)$$



Значение момента  $M_{н.ц.}$  в повороте и обратном повороте при различной скорости автомобиля равны между собой. С уменьшением скорости движения автомобиля значения  $M_b$  поворота и обратного поворота приближаются друг к другу. Следовательно, с ростом скорости движения автомобильной цистерны опасность ее опрокидывания увеличивается быстрее в процессе обратного поворота, чем в повороте. Сравнительный анализ показал, что величина  $M_b$  в повороте автомобиля равна – 157 Нм, в обратном повороте – 217 Нм. Отсюда величина  $M_b$  обратного поворота по сравнению с поворотом больше чем на 38 %.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Поперечную устойчивость автоцистерны при частичном заполнении емкости жидким грузом необходимо определять при круговом движении автомобиля, когда центр тяжести жидкости смещен, создавая дополнительный опрокидывающий момент и по траектории «переставка» с участками поворота и обратного поворота, когда жидкость находится в движении и ударном взаимодействии со стенкой цистерны.

2. Наибольшая опасность опрокидывания автомобильной цистерны возникает при обратном повороте траектории «переставка», и величина опрокидывающего момента ударного взаимодействия жидкости со стенкой цистерны зависит от формы, размеров емкости и степени ее заполнения.

3. Установка в цистерне продольных вертикальных перфорированных волноломов ограничивает перемещение жидкости, что повышает устойчивость автомобиля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаковский Б.Л.. Обеспечение безопасности и безотказности пожарных автоцистерн. Мн, УП. Технопринт. 2002, 228 с.