

УДК 001.891.573; 629.1.02.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО СРЕДСТВА,  
ПЕРЕВОЗЯЩЕГО ЖИДКОСТЬ В БАКЕ

Варгасов А.С., Прядкин В.И., Колядин П.А., Артемов А.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Воронежский государственный  
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Email: Koljadinpawel@gmail.com

**Аннотация:** В статье рассматривается проблема влияния колебаний перевозимой жидкости в баке мобильного средства на плавность хода. Для решения данной проблемы разработана программа для моделирования движения мобильного средства, перевозящего жидкость в баке. Программа моделирует движение мобильного средства по случайной неровной поверхности, а также моделирует движение жидкости в баке мобильного средства с учетом взаимного влияния механической подсистемы и жидкости. Разработанная модель обладает высоким уровнем универсальности, поэтому автоматически воспроизводит разнообразные варианты состояния жидкости в баке в зависимости от условий движения мобильного средства.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, колебания жидкости, динамика частиц, компьютерный эксперимент.

MODELING THE MOTION OF A MOBILE MEAN CARRYING  
A LIQUID IN A TANK

Vargasov A.S., Pryadkin V.I., Kolyadin P.A., Artyomov A.V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
« Voronezh State University of Forestry and Technologies

Named after G.F. Morozov »

Email: Koljadinpawel@gmail.com

**Summary:** The article discusses the problem of the influence of fluctuations of the transported liquid in the tank of a mobile vehicle on smoothness. To solve this problem, a program has been developed to simulate the movement of a mobile vehicle carrying liquid in a tank. The program simulates the movement of a mobile vehicle on a random uneven surface, and also simulates the movement of liquid in the tank of a mobile vehicle, taking into account the mutual influence of the mechanical subsystem and the liquid. The developed model has a high level of versatility, therefore, it automatically reproduces various options for the state of the liquid in the tank, depending on the conditions of movement of the mobile vehicle.

**Key words:** mathematical modeling, fluid vibrations, particle dynamics, computer experiment.

Мобильные средства на шинах сверхнизкого давления в последние два десятилетия были вызваны к жизни бурным освоением природных ресурсов Арктики и Северных территорий России, а также ужесточенными требованиями к воздействию ходовых аппаратов мобильных средств на почвенно-растительный покров в аграрном и лесном комплексах страны.

Проблема повышения проходимости транспортно-технологических средств является одной из значимых для машиностроения. В решении этой проблемы наступил новый этап – этап создания экологичных средств высокой проходимости, способных эффективно работать на почвенно-грунтовых поверхностях с низкой несущей способностью.

Размер территории Российской Федерации, большая протяженность не только с запада на восток, но и с юга на север обуславливают многообразие природно-климатических и почвенно-климатических условий. При этом своевременное внесение удобрений и обработка от вредителей является особенно проблематичной в раннее весеннее (после схода снега) и в позднее осеннее время. Одним из способов улучшения проходимости технологических средств в данный период является применение широкопрофильных шин сверхнизкого давления, позволяющих применять необходимую обработку растений на почвах с низкой несущей способностью. Поэтому в сельском хозяйстве получили применение новые инновационные мобильные средства на шинах сверхнизкого давления, имеющие высокую экологическую совместимость с окружающей средой и достаточно высокую производительность (рис. 1).



*а*



*б*

*а* – УЭСМ-0,5 «Роса»; *б* – УТТС-271 «Барс»

Рисунок 1 – Мобильные средства на шинах сверхнизкого давления, оборудованные опрыскивателем:

Режим работы мобильных средств химизации при обработке полей гербицидами и пестицидами является более тяжелым, имеет повышенную динамическую нагруженность, в связи с тем, что технологический процесс осуществляется на повышенных рабочих скоростях при возросшей динамической

нагруженности и переменном объеме технологической жидкости в емкости.

При движении мобильного средства, перевозящего жидкость, движение жидкости в баке может оказывать существенное влияние на характер движения самого мобильного средства. Основное отличие эксплуатации самоходных опрыскивателей заключается в повышенной динамической нагруженности, обусловленной относительным движением технологической жидкости в емкости. Вследствие чего возникают дополнительные инерционные нагрузки на динамическую систему мобильного средства.

Для исследования влияния движения жидкости в баке на плавность хода мобильного средства целесообразно использовать математическое моделирование. Моделирование процесса перетекания технологической жидкости в цистерне разделяют на два подхода: представление жидкости как эквивалентного твердого тела и рассмотрения жидкой сплошной среды, состоящей из множества дискретных малых тел, взаимодействующих друг с другом и с твердой оболочкой цистерны. Благодаря широкому применению при исследованиях различных программных комплексов наибольшее применение получил второй способ. Однако существующие в настоящее время модели гидродинамического анализа движения жидкости в баке, – в частности грубые аналитические, конечно-элементные пружинно-демпферные, – обладают ограниченной физической адекватностью.

Высокую физическую адекватность при описании различных сред имеет метод динамики частиц [1-3]. Поэтому целью данной работы была разработка модели движения мобильного средства, движущегося по случайной неровной поверхности, перевозящего жидкость в баке, моделируемой методом динамики частиц.

Моделирование производится в двумерном вертикально-продольном пространстве. Жидкость представляется совокупностью элементов круглой формы. Характер взаимодействия элементов считается вязкоупругим. Свойства среды (объемная плотность, модуль упругости, внутреннее трение, поверхностное натяжение) были пересчитаны в свойства отдельных элементов. Движение элементов в пространстве описывается вторым законом Ньютона. Количество элементов в модели составляет от 150 до 100000, в зависимости от выбранной детализации и разумного времени компьютерных вычислений.

Движение каждого элемента в пространстве описывается вторым законом Ньютона:

$$\begin{cases} m_{\text{э}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{э}}} \left( \left( \begin{cases} c(d_{\text{э}} - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}}, & r_{ij} < d_o \\ 0, & r_{ij} \geq d_o \end{cases} + k(r_{ij} - d_o)(v_{xi} - v_{xj}) \right); \right. \\ \left. m_{\text{э}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} = -m_{\text{э}} g + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{э}}} \left( \left( \begin{cases} c(d_{\text{э}} - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}}, & r_{ij} < d_o \\ 0, & r_{ij} \geq d_o \end{cases} + k(r_{ij} - d_o)(v_{yi} - v_{yj}) \right) \right) \end{cases}$$

где  $m_{\text{Э}}$  и  $d_{\text{Э}}$  – масса и диаметр элемента;  $x_i, y_i$  – декартовы координаты элемента;  $t$  – время;  $N_{\text{Э}}$  – количество элементов;  $c$  и  $k$  – параметры вязкоупругого взаимодействия (коэффициенты жесткости и вязкости);  $r_{ij}$  – расстояние между центрами двух элементов  $i$  и  $j$ ;  $d_0$  – расстояние ограничения взаимодействия. Дополнительно к силовому взаимодействию между элементами добавляется взаимодействие со стенками бака.

Численное решение дифференциальных уравнений производилось с использованием модифицированного метода Эйлера-Коши, имеющего второй порядок точности по отношению к координате и первый порядок точности по отношению к скорости.

Для удобства моделирования разработана компьютерная программа «Программа для моделирования вибронгруженности мобильного средства на шинах сверхнизкого давления, при работе с переменным объемом технологической жидкости» на языке Object Pascal в среде программирования Borland Delphi.

Программа предназначена для проведения численных экспериментов по оценке взаимодействия на динамическую систему мобильного средства дополнительной инерционной силы от технологической жидкости. В программе предусмотрено задание основных массово-геометрических параметров мобильного средства и переменных параметров объема технологической жидкости.

Программа предназначена для моделирования движения мобильного средства по случайной неровной поверхности, а также моделирования движения жидкости в баке мобильного средства с учетом взаимного влияния механической подсистемы и жидкости.

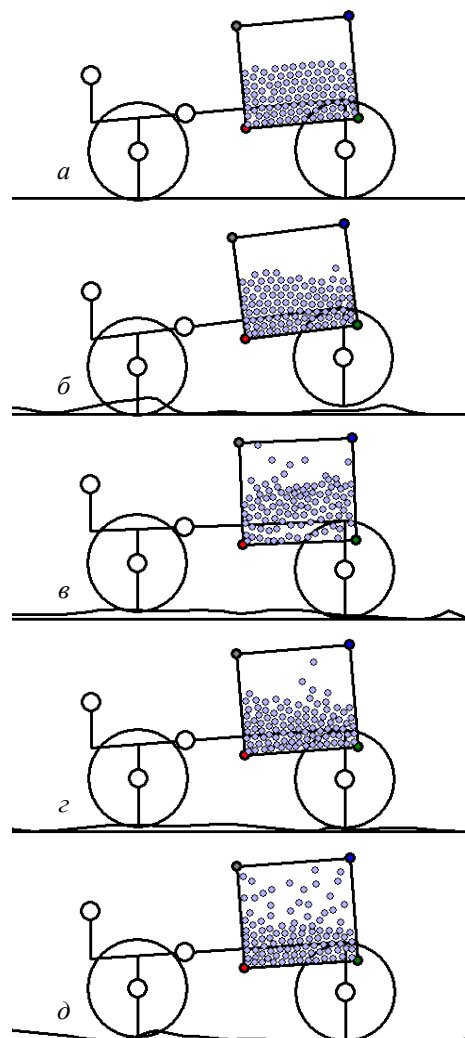
В процессе работы программа выводит на экран проекцию мобильного средства и жидкости в баке, графики зависимости от времени вертикальных координат ключевых точек мобильного средства для оценки плавности хода (рис. 2).

Программа применима для различных режимов движения мобильного средства, различных жидкостей со специфическими реологическими свойствами, различных форм и габаритных размеров бака.

Разработанная модель обладает высоким уровнем универсальности, поэтому автоматически воспроизводит разнообразные варианты состояния жидкости в баке в зависимости от условий движения мобильного средства (рис. 3). Основная ценность разработанной модели в том, что она позволяет определить динамическое воздействие жидкости на колебания мобильного средства.



Рисунок 2 – Вывод результатов моделирования в «Программе для моделирования движения мобильного средства, перевозящего жидкость в баке»



*a* – состояние покоя; *б* – волны; *в* – интенсивное движение жидкости по всему объему бака; *г* – кумулятивные выбросы жидкости с поверхности; *д* – интенсивные брызги в верхней части бака

Рисунок 3 – Различные варианты динамического состояния жидкости в баке в зависимости от условий движения.

Вывод: Разработана математическая модель и реализующая ее компьютерная программа, позволяющие исследовать плавность хода мобильного средства, перевозящего жидкость в баке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Прядкин, В. И. Моделирование взаимодействия высокоэластичных шин с неровностью дороги / В. И. Прядкин, З. А. Годжаев // Тракторы и сельхозмашины. – М. : ФГБОУ ВО МПУ. – 2014. – № 1. – С. 16-18.

2 Прядкин, В. И. Мобильные энергетические средства сельскохозяйственного назначения на шинах сверхнизкого давления / В. И. Прядкин, З. А. Годжаев // Технологии колесных и гусеничных машин. – М. : НИИ конструкции автомобилей. – 2014. – № 6. – С. 33-39.

3 Бычков, Н. И. Энергосредство для механизации работ на поймах / Н. И. Бычков, В. И. Прядкин, А. Г. Мельник // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – М. : ФГБОУ ВО МПУ. – 2004. – № 10. – С. 6-8.

4 Прядкин, В. И. Выбор рациональных режимов работы высокоэластичных шин сверхнизкого давления / В. И. Прядкин, С. Д. Зайцев, Л. С. Стреблеченко, С. В. Гончаренко // Каучук и резина. – М. : Каучук и резина. – 2010 – № 1. – С. 40-42.

5 Прядкин, В. И. Шины сверхнизкого давления для сельскохозяйственных мобильных средств / В. И. Прядкин, С. В. Гончаренко // М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2016. – 240 с.

6 Гуськов, В. В. Тракторы / В. В. Гуськов // М. : Машиностроение, 1988. – 376 с.

7 Григорьев, Ю. Н. Численное моделирование методами частиц в ячейках / Ю. Н. Григорьев, В. А. Вшивков, М. П. Федорук // Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с.

8 Прядкин, В. И. Моделирование плавности хода мобильного средства малой грузоподъемности, оборудованного шинами сверхнизкого давления / В. И. Прядкин, П. А. Колядин // Национальная научно-практическая конференция «Современные проблемы прикладных и фундаментальных исследований в лесном хозяйстве и природопользовании». – Воронеж : ВГЛТУ им. Г. Ф. Морозова. – 2018. – С. 252-256.