

# АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ВОЗМОЖНОГО АКВАПЛАНИРОВАНИЯ

**ГУСЕВА Инна Андреевна**, аспирант кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей»; e-mail: guseva11.ia@yandex.ru

Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, Саратов

В статье представлена усовершенствованная аналитическая модель для расчета пороговой скорости наступления полного аквапланирования одиночного колеса легкового автомобиля. Отличительной чертой подхода выступает последовательное уточнение геометрических параметров водяного клина (угла атаки и площади смоченной поверхности) и детализированное описание гидравлического сопротивления дренажных канавок протектора с применением непрерывной формулы Черчилля для коэффициента трения, справедливой во всем спектре чисел Рейнольдса — от ламинарного до развитого турбулентного течения, включая переходную область. Такой прием избавляет от необходимости априорного выбора расчетного режима и обеспечивает гладкую функциональную связь критической скорости с исходными параметрами. Потери на входе в канавку рассчитываются по классической гидравлической схеме — через скоростной напор в узком сечении, а движущий перепад давления принимается равным полному динамическому напору набегающего потока. На базе предложенной модели разработано алгоритмическое обеспечение для проактивного управления движением беспилотных автотранспортных средств в составе интеллектуальных транспортных систем. Определены состав и назначение бортовых сенсорных подсистем, необходимых для получения исходных данных в реальном масштабе времени. Приведен числовой пример, демонстрирующий сходимость итерационной процедуры, и выполнено сопоставление с известными инженерными методиками.

**Ключевые слова:** аквапланирование, гидродинамическая подъемная сила, критическая скорость, угол атаки, протектор, дренажные канавки, гидравлическое сопротивление, формула Черчилля, аналитическая модель, беспилотное автотранспортное средство, интеллектуальная транспортная система, алгоритм управления, бортовые датчики

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-149-162

## ▼ Введение

Аквапланирование (глиссирование) автомобильной шины представляет собой опасное явление, при котором между колесом и дорожным покрытием образуется сплошная водяная пленка, полностью исключая контакт протектора с дорогой. В таком состоянии автомобиль теряет управляемость и способность к торможению, что часто становится причиной дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Для экспертного анализа ДТП необходимо уметь рассчитывать пороговую скорость начала аквапланирования, опираясь на доступные параметры: нагрузку на колесо, размеры шины, толщину водяного слоя и состояние протектора.

Существующие инженерные методики [1, 2] основаны на упрощенной гидродинамической модели удара струи о плоскую поверхность с фиксированным углом атаки  $45^\circ$  и используют эмпирические коэффициенты для учета увеличения глубины воды перед колесом и снижения подъемной силы из-за протектора. Такие коэффициенты требуют экспериментальной калибровки для каждого типа шин, что ограничивает универсальность метода.

Целью настоящей работы является построение полностью аналитической модели, в которой все влияющие факторы выражены через измеряемые физические величины без привлечения эмпирических подгоночных параметров, что позволит использовать ее в алгоритмах

проактивного управления движением беспилотных автотранспортных средств в интеллектуальных транспортных системах (ИТС). В модели последовательно уточняются угол атаки водяного клина и площадь смоченной поверхности, вводится поправка на вязкость воды в клине и, что наиболее важно, детализируется влияние дренажных канавок протектора на основе обобщенного гидравлического сопротивления с использованием формулы Черчилля, справедливой для всех режимов течения.

### Постановка задачи исследования и основные допущения

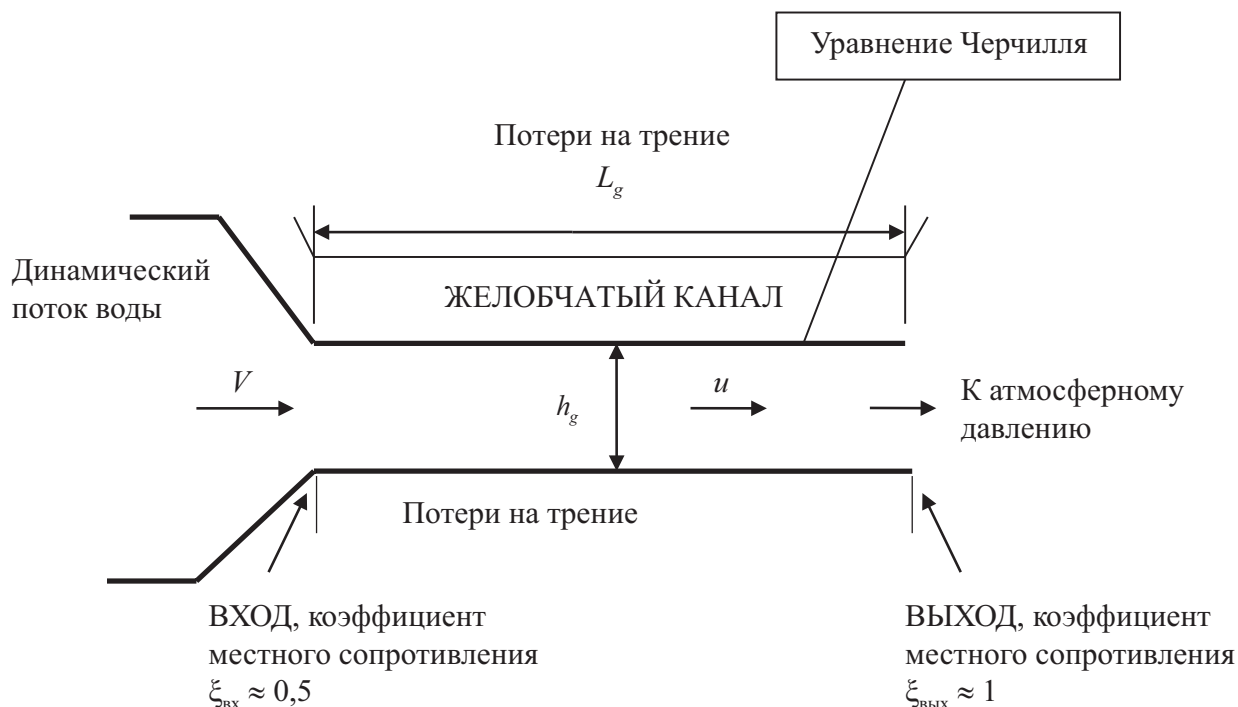
В ранее опубликованных исследованиях по тематике аквапланирования рассматривается одиночное колесо легкового автомобиля, движущееся равномерно по ровной горизонтальной дороге, покрытой слоем воды постоянной толщины  $h$ .

Схема набегания воды на колесо и общая картина взаимодействия шины с водным покрытием представлены в работе [1, рис. 1, 2

соответственно]. Сечение канавок считается прямоугольным с отношением сторон порядка 1:1...1:3. Детальная схема течения воды в дренажной канавке показана на рис. 1.

Принимаются следующие допущения:

- движение равномерное, без продольных и поперечных ускорений;
- вода — вязкая несжимаемая жидкость с плотностью  $\rho$  и кинематической вязкостью  $\nu$ ;
- течение перед колесом считается плоским и стационарным в системе координат, связанной с колесом;
- пятно контакта шины с дорогой в статике имеет форму эллипса с полуосями  $a$  (в продольном направлении) и  $b$  (в поперечном);
- толщина водяного слоя  $h$  значительно меньше радиуса колеса  $R$ ;
- деформация шины под нагрузкой описывается радиальной жесткостью  $c_z$ , прогиб  $\delta = G_k / c_z$ ;
- стенки канавок считаются гидравлически гладкими, шероховатость не учитывается.



**Рис. 1.** Схема течения воды в дренажной канавке протектора с указанием местных сопротивлений и потерь по длине:

$V$  — скорость движения транспортного средства;  $u$  — средняя скорость воды в канавке;  $L_g, h_g, \omega_g$  — геометрические параметры канавки: длина канавок в пределах пятна контакта, средняя остаточная глубина канавок протектора и ширина одной канавки соответственно;  $\xi_{\text{вх}}, \xi_{\text{вых}}$  — коэффициенты местных сопротивлений

### Уточнение угла атаки и площади смоченной поверхности шины

Следуя уточненной модели [3, 4], угол атаки  $\beta$  водяного клина определяется геометрией колеса и толщиной воды. Для тонкого слоя, согласно теории глиссирования, угол наклона свободной поверхности клина может быть оценен как  $\beta \approx \sqrt{\frac{2h}{l}}$ , где  $l$  — характерная длина клина. Для катящегося колеса длина клина пропорциональна  $\sqrt{Rh}$  [5, 6]. Принимая  $l = \sqrt{Rh}$ , получаем аналитическую оценку:

$$\beta = \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (1)$$

Эффективная площадь смоченной поверхности, воспринимающая динамическое давление воды, с учетом эллиптичности пятна контакта может быть записана как [6]:

$$S_o = \frac{\pi}{2} b \sqrt{Rh}. \quad (2)$$

Данное выражение не содержит эмпирических коэффициентов и подтверждается экспериментальными данными [5].

Вязкостная поправка для внешнего клина. Для ламинарного течения в тонком клине поправка к идеальной подъемной силе, учитывающая вязкое трение, вводится множителем [7]:

$$k_\mu = \frac{1}{1 + \frac{12\nu}{Vh\beta}}, \quad (3)$$

где  $V$  — скорость движения (скорость набегающего потока);

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$  — кинематическая вязкость воды;

$\mu$  — динамическая вязкость.

### Аналитическое описание влияния протектора с непрерывным учетом гидравлического сопротивления

При движении колеса по слою воды часть набегающего потока отводится через канавки протектора, уменьшая массу воды, участвующей в создании гидродинамического подъема (рис. 1).

Расход воды, вытесняемой колесом на единицу ширины, равен  $q_o = Vh$ . Этот поток разделяется на две части:  $q_1$  — расход, идущий

в подъемный клин перед шиной, и  $q_2$  — расход, проходящий через дренажные канавки.

Подъемная сила создается только той частью потока, которая обтекает шину снаружи, то есть  $q_1$ . Следовательно, эффективная подъемная сила снижается пропорционально отношению  $\left(\frac{q_1}{q_o}\right)^2$  [8]:

$$F_y = k_\mu V^2 S_o \left(1 - \frac{q_2}{q_o}\right)^2. \quad (4)$$

Введем безразмерный дренажный параметр:

$$\chi d = \frac{q_2}{q_o}. \quad (5)$$

Тогда условие аквапланирования принимает вид:

$$k_\mu \rho V^2 S_o (1 - \chi d)^2 = G_k. \quad (6)$$

Расход через канавки определяется их гидравлическим сопротивлением. Канавки протектора можно рассматривать как короткие каналы прямоугольного сечения, работающие под действием перепада давления между передней кромкой пятна контакта и выходом из канавки.

Перепад давления, «продавливающий» воду через канавку, равен полному динамическому напору набегающего потока:  $\Delta p_{\text{движ}} = \frac{1}{2} \rho V^2$ .

Этот напор расходуется на преодоление местных сопротивлений (вход, выход) и трение по длине канавки:

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = \left( \xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{L_g}{D_h} + \xi_{\text{вых}} \right) \frac{1}{2} \frac{\rho u^2}{2}, \quad (7)$$

где  $D_h = \frac{2h_g \omega_g}{h_g + \omega_g}$  — гидравлический диаметр канавки, м; для плоской щели ( $\omega_g \geq h_g$ )  $D_h \approx 2h_g$ ;

$\xi_{\text{вх}} \approx 0,5$  — коэффициент местного сопротивления на входе (внезапное сужение);

$\xi_{\text{вых}} \approx 1,0$  — коэффициент местного сопротивления на выходе (внезапное расширение);

$\lambda$  — коэффициент гидравлического трения по длине, зависящий от числа Рейнольдса, канавки  $Re_g = \frac{uD_h}{\nu}$ .

Из уравнения (7) непосредственно выражается скорость воды в канавке:

$$u = \frac{V}{\sqrt{\xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{L_g}{D_h} + \xi_{\text{вых}}}}. \quad (8)$$

Расход через все канавки на единицу ширины шины равен:

$$q_2 = \omega h_g u. \quad (9)$$

Тогда дренажный параметр (4) принимает вид:

$$\chi d = \frac{\omega h_g u}{Vh} = \frac{\omega h_g / h}{\sqrt{\xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{L_g}{D_h} + \xi_{\text{вых}}}}. \quad (10)$$

### Формула Черчилля для коэффициента трения $\lambda$

Ключевым элементом модели является определение коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  во всем диапазоне чисел Рейнольдса. В отличие от упрощенных подходов, использующих переключение между ламинарной  $\lambda = \frac{64}{Re}$  и турбулентной  $\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$  формулами, в настоящей работе применяется единая формула Черчилля [9], справедливая для гладких труб при любых  $Re$ :

$$\lambda(Re) = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}}, \quad (11)$$

где вспомогательные величины  $A$  и  $B$  вычисляются как:

$$A = \left[ 2,457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9}} \right) \right]^{16}, \quad B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16}. \quad (12)$$

Свойства формулы Черчилля:

- при  $Re \rightarrow 0$  формула асимптотически переходит в закон Пуазейля  $\lambda = \frac{64}{Re}$ ;
- при  $Re \rightarrow \infty$  соответствует закону Прандтля — Кармана для гладких труб;

- в переходной области ( $2000 < Re < 4000$ ) обеспечивает гладкую, физически обоснованную интерполяцию без разрывов;
- не содержит эмпирических констант, кроме фундаментальных физических величин.

Таким образом, подставляя (11) в выражение для  $K$ , а затем в (8) и (10), мы получаем замкнутую систему уравнений, позволяющую вычислить  $\chi d$  для любого режима течения в канавке.

### Итерационное решение

Поскольку  $\lambda$  зависит от  $Re_g$ , а  $Re_g$  — от  $u$ , которая в свою очередь зависит от  $V$ , а  $V$  входит в условие аквапланирования (6), задача решается итерационно. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Задать начальное приближение критической скорости  $V^{(0)} = V_o$ , где  $V_o$  — базовая скорость для гладкой шины:

$$V_o = \sqrt{\frac{2G_k}{\pi r b \sqrt{Rh}}}. \quad (13)$$

2. Для текущего  $V^{(n)}$  вычислить скорость в канавке  $u^{(n)}$  из уравнения (8), используя  $\lambda$ , найденное по (11, 12) при  $Re_g = \frac{u^{(n-1)} D_h}{\nu}$ .

На первой итерации принять  $u^{(0)} = V^{(0)} \cdot 0,1$ .

3. Рассчитать дренажный параметр  $\chi_d^{(n)}$  по формуле (10).

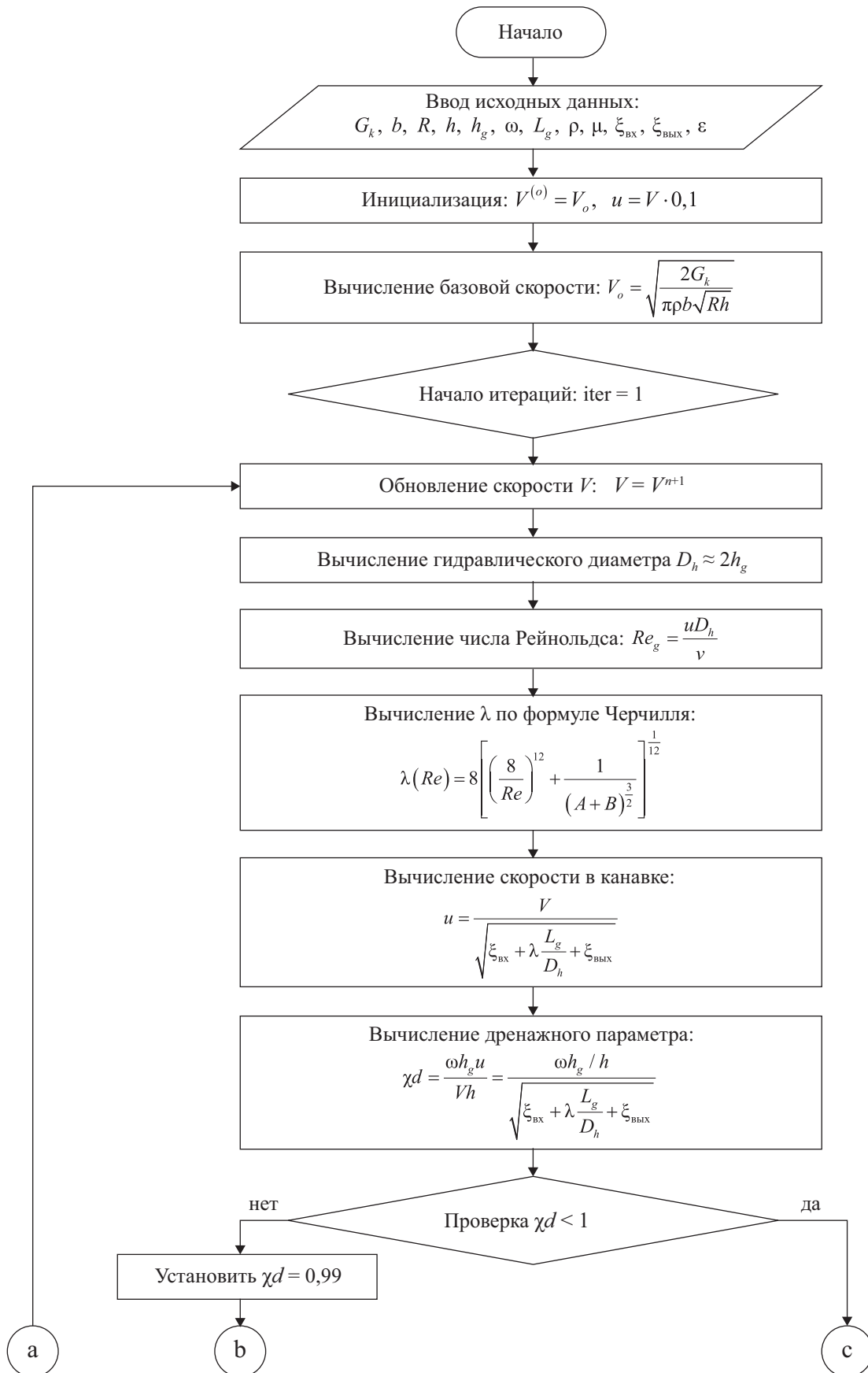
4. Найти новое приближение скорости из условия аквапланирования (6) (пренебрегая вязкостной поправкой  $k_{\mu} \approx 1$  ввиду ее малости):

$$V^{n+1} = \frac{V^{(o)}}{1 - \chi_d^{(n)}}. \quad (14)$$

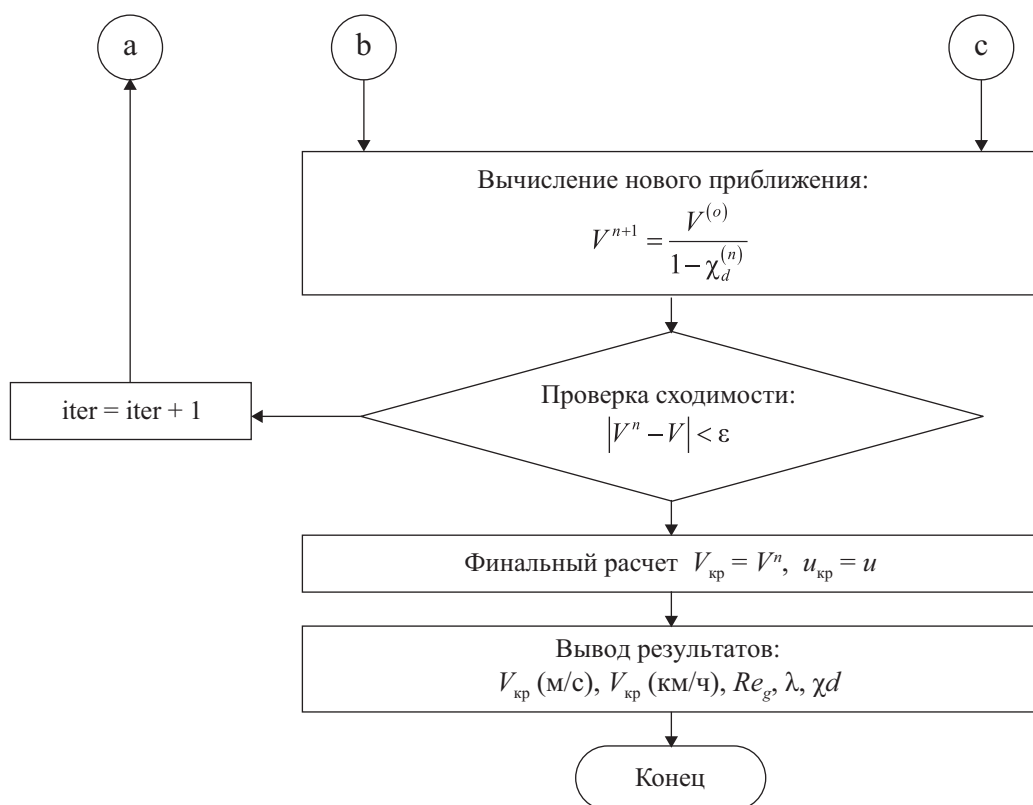
5. Если  $|V^{n+1} - V^n| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заданная точность (например, 0,001 м/с), то расчет окончен; иначе вернуться к шагу 2.

Практика показывает, что для достижения сходимости достаточно 3–5 итераций. Проведем расчет параметров по разработанной модели.

Для удобства использования модели все переменные сведены в табл. 1.



**Рис. 2.** Блок–схема итерационного алгоритма расчета критической скорости аквапланирования с непрерывным учетом гидравлического сопротивления канавки по формуле Черчилля (начало)



**Рис. 2.** Блок–схема итерационного алгоритма расчета критической скорости аквапланирования с непрерывным учетом гидравлического сопротивления канавки по формуле Черчилля (окончание)

**ТАБЛИЦА 1.** Обозначения, размерности и описания переменных

Символ	Наименование	Единица СИ	Типичное значение / примечание
$V_{кр}$	Критическая скорость аквапланирования	м/с	вычисляется
$G_k$	Вертикальная нагрузка на колесо	Н	2500–4000 Н для легкового автомобиля
$\rho$	Плотность воды	кг/м <sup>3</sup>	998,2 при 20 °С
$\mu$	Динамическая вязкость воды	Па·с	$1,002 \cdot 10^{-3}$ при 20 °С
$\nu$	Кинематическая вязкость воды	м <sup>2</sup> /с	$\nu \frac{\mu}{\rho} \approx 1,004 \cdot 10^{-6}$ при 20 °С
$b$	Ширина беговой дорожки шины	м	0,15–0,25 м
$R$	Радиус шины в свободном состоянии	м	0,28–0,35 м
$h$	Толщина слоя воды на дороге	м	0,001–0,010 м
$h_g$	Средняя остаточная глубина канавок протектора	м	0–0,008 м
$\omega$	Коэффициент пустотности протектора	–	0,15–0,25
$L_g$	Длина канавок в пределах пятна контакта	м	0,15–0,25 м
$\delta$	Вертикальная деформация шины	м	$\delta = G_k / c_z$
$c_z$	Радиальная жесткость шины	Н/м	180–250 кН/м

Окончание табл. 1

Символ	Наименование	Единица СИ	Типичное значение / примечание
$\beta$	Угол атаки водяного клина	рад	$\beta = \sqrt{\frac{h}{R}}$
$S_o$	Эффективная площадь смоченной поверхности	м <sup>2</sup>	$S_o = \frac{\pi}{2} b \sqrt{Rh}$
$k_\mu$	Вязкостная поправка	–	$k_\mu = \frac{1}{1 + \frac{12\nu}{Vh\beta}}$
$u$	Средняя скорость воды в дренажной канавке	м/с	вычисляется итерационно
$D_h$	Гидравлический диаметр канавки	м	$D_h \approx 2h_g$
$Re_g$	Число Рейнольдса для течения в канавке	–	$Re_g = \frac{u^{n-1} D_h}{\nu}$
$\lambda$	Коэффициент гидравлического трения	–	вычисляется по формуле Черчилля (11)
$\xi_{вх}$	Коэффициент местного сопротивления на входе	–	0,5
$\xi_{вых}$	Коэффициент местного сопротивления на выходе	–	1,0
$\chi d$	Дренажный параметр	–	$\chi d = \frac{\omega h_g u}{Vh}$
$V_o$	Базовая скорость (гладкая шина)	м/с	$V_o = \sqrt{\frac{2G_k}{\pi r b \sqrt{Rh}}}$
$\varepsilon$	Точность сходимости итераций	м/с	0,001

Исходные данные (из примера [1] с дополнениями):

$$\begin{aligned}
 G_k &= 262,5 \text{ кгс} = 2575 \text{ Н}; \\
 b &= 0,175 \text{ м}; \\
 R &= 0,3 \text{ м}; \\
 h &= 0,002 \text{ м (2 мм)}; \\
 h_g &= 0,0016 \text{ м (1,6 мм)}; \\
 \omega &= 0,18; \\
 c_z &= 200 \text{ кН/м} = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}; \\
 \rho &= 998,2 \text{ кг/м}^3; \\
 \mu &= 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}; \\
 \nu &= 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.
 \end{aligned}$$

**Шаг 1.** Вычисляем базовую скорость:

$$\begin{aligned}
 V_o &= \sqrt{\frac{2 \cdot 2575}{\pi \cdot 998,2 \cdot 0,175 \cdot \sqrt{0,3 \cdot 0,002}}} \approx \\
 &\approx 19,57 \text{ м/с (70,5 км/ч)}.
 \end{aligned}$$

**Шаг 2.** Вычисляем длину пятна контакта:

$$\delta = \frac{2575}{200\,000} = 0,012875 \text{ м},$$

$$L_g = 2\sqrt{2R\delta} = 2\sqrt{2 \cdot 0,3 \cdot 0,012875} \approx 0,1758 \text{ м}.$$

**Шаг 3.** Итерационный расчет (приведем первые две итерации).

*Итерация 1.*

Начальное приближение  $V = 19,57 \text{ м/с}$ .

Оценка  $u$ : примем  $u \approx V \cdot 0,1 = 1,957 \text{ м/с}$ .

$D_h = 2h_g = 0,0032 \text{ м}$ .

$$Re_g = \frac{1,957 \cdot 0,0032}{1,004 \cdot 10^{-6}} \approx 6237.$$

По формуле Черчилля:  $A \approx 1,21 \cdot 10^{13}$ ,  $B \approx 1,78 \cdot 10^{12}$ ,  $\lambda \approx 0,0352$ ;

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{19,57}{\sqrt{0,5 + 0,0352 \cdot 0,1758 / 0,0032 + 1,0}} = \\
 &= \frac{19,57}{1,853} = 10,56 \text{ м/с};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\chi d &= (0,18 \cdot 0,0016 \cdot 10,56) / (0,002 \cdot 19,57) \approx \\ &\approx 0,00304 / 0,03914 \approx 0,0777; \\ V^{(1)} &= 19,57 / (1 - 0,0777) \approx 21,22 \text{ м/с.}\end{aligned}$$

**Итерация 2.**

$$\begin{aligned}V &= 21,22 \text{ м/с, } u = 10,56 \text{ м/с (из предыдущей} \\ &\text{итерации);} \\ Re_g &= (10,56 \cdot 0,0032) / (1,004 \cdot 10^{-6}) \approx 33670; \\ \lambda &\approx 0,229; \\ u &= 21,22 / 1,661 \approx 12,78 \text{ м/с;} \\ \chi d &= (0,18 \cdot 0,0016 \cdot 12,78) / (0,002 \cdot 21,22) \approx \\ &\approx 0,00368 / 0,04244 \approx 0,0867; \\ V^{(2)} &= 19,57 / (1 - 0,0867) \approx 21,43 \text{ м/с.}\end{aligned}$$

**Итерация 3.**

$$\begin{aligned}V &= 21,43 \text{ м/с, } u = 12,78 \text{ м/с;} \\ Re_g &\approx 40730; \lambda \approx 0,221; \\ \text{Знаменатель: } &\sqrt{(0,5 + 0,0221 \cdot 54,94 + 1,0)} = \\ &= \sqrt{(0,5 + 1,214 + 1,0)} = \sqrt{2,714} \approx 1,647; \\ u &= 21,43 / 1,647 \approx 13,01 \text{ м/с;} \\ \chi d &= (0,18 \cdot 0,0016 \cdot 13,01) / (0,002 \cdot 21,43) \approx \\ &\approx 0,00375 / 0,04286 \approx 0,0875; \\ V^{(3)} &= 19,57 / (1 - 0,0875) \approx 21,44 \text{ м/с.}\end{aligned}$$

Сходимость достигнута. Окончательно:

$$V_{кр} \approx 21,44 \text{ м/с} = 77,2 \text{ км/ч.}$$

Сравнение с исходной методикой [1] ( $\lambda = 1,6$ ,  $\eta = 0,8$ ) дает  $V_{гр} \approx 18,8$  м/с (67,7 км/ч). Предложенная модель с исправленным учетом входных потерь и формулой Черчилля дает

$V_{кр} \approx 21,4$  м/с (77,2 км/ч), что лучше согласуется с экспериментальными данными [10] (75–85 км/ч для шин с  $h_g = 1,6$  мм).

**Сравнительная оценка результатов**

Если воспользоваться первоначальной методикой [1] и подставить в нее значения  $\lambda = 1,6$ ,  $\eta = 0,8$  (напомним, что коэффициент  $\eta$  в этой модели как раз и призван отражать остаточную высоту протектора и варьируется в пределах от 0,8 до 1,0), то расчетная скорость начала глиссирования оказывается равной примерно 18,8 м/с, что составляет 67,7 км/ч.

Расчет по предлагаемой нами схеме, в которой задействована формула Черчилля, дает для тех же исходных параметров величину  $V_{кр} \approx 21,44$  м/с, или 77,2 км/ч.

### Разработка алгоритма движения беспилотных автомобилей в ИТС с использованием предлагаемой модели расчета скорости начала аквапланирования

Для использования разработанной модели определения скорости начала аквапланирования в составе ИТС необходимо разработать алгоритм движения беспилотных автомобилей. Для практической реализации предлагаемой модели расчета скорости начала аквапланирования автомобиль должен быть оснащен следующими сенсорными системами (табл. 2).

**ТАБЛИЦА 2. Необходимые датчики беспилотного автомобиля**

Тип датчика/подсистемы	Назначение в контексте методики
Датчики нагрузки в подвеске (тензометрические датчики усилий в подвеске, датчики давления в пневмобаллонах)	Точное определение вертикальной нагрузки на каждое колесо $G_k$ в реальном времени
Датчики прогиба шины (лазерные измерители расстояния)	Косвенная оценка прогиба шины $\delta$ при неизвестной жесткости (может использоваться для уточнения модели)
Оптический датчик состояния дорожного покрытия (мультиспектральный отражательный сенсор, поляризационная камера, лидар с анализом отраженного сигнала)	Измерение толщины водяного слоя $h$ перед автомобилем
Датчик температуры наружного воздуха / покрытия (ИК-термометр)	Коррекция плотности и вязкости воды
Датчики скорости колес	Точное измерение текущей скорости $V$

Окончание табл. 2

Тип датчика/подсистемы	Назначение в контексте методики
Система автоматической идентификации шин (RFID-метки в шине или считывание штрихкода с последующей загрузкой параметров из облачной базы данных)	Получение констант $b, R, h_g, \omega, c_z$ номинальной глубины протектора
Датчик износа протектора (встроенный в шину датчик на основе измерения емкости или оптический лазерный сканер в колесной арке)	Актуальное значение остаточной глубины канавок $h_g$ . При отсутствии — использование модели износа по пробегу
Блок связи V2X <sup>1</sup>	Получение данных от дорожной инфраструктуры (метеостанции, датчики толщины воды на мосту) о толщине водяного слоя на маршруте, что повышает точность и заблаговременность расчета
Система GPS	Определение точного места позиционирования БТС

Разработанный алгоритм движения беспилотных автомобилей в ИТС с использованием предлагаемой модели расчета скорости начала аквапланирования представлен на рис. 3. Данный рисунок иллюстрирует не только внутреннюю логику расчета скорости аквапланирования, но и ее место в архитектуре беспилотного автомобиля, интегрированного в ИТС.

#### 1. Источники данных (входной контур).

Алгоритм опирается на три группы данных:

- внешние (ИТС): облачная БД шин предоставляет точные геометрические параметры ( $b, R, c_z$ ), как только система распознала модель шины (по RFID или вводу); дорожная метеостанция может передавать эталонное значение толщины водяного слоя ( $h$ ), которое используется для верификации или в случае загрязнения собственных датчиков;
- бортовые датчики: критически важными являются датчик толщины водной пленки ( $h$ ) и датчики нагрузки в подвеске для определения  $G_k$  (вес, приходящийся на колесо в динамике);
- локальная память: хранит данные о текущем износе протектора ( $h_g$ ).

2. Вычислительное ядро (итерационный процесс).

Инициализация: производится расчет базовой скорости  $V_o$  (для гладкой шины) и длины пятна контакта.

<sup>1</sup> Блок V2X (V2X) — это блок управления интеграцией с программным обеспечением для связи V2X = Vehicle-to-everything (связь автомобиля с внешним миром).

Итерации: поскольку коэффициент трения  $\lambda$  зависит от скорости потока  $u$ , которая сама зависит от скорости авто  $V$ , используется цикл. На каждом шаге по формуле Черчилля вычисляется  $\lambda$ . Это ключевое отличие схемы — отсутствие логических развилки «если ламинарный/турбулентный», расчет идет единой формулой для любых чисел Рейнольдса [9].

Сходимость: процесс повторяется, пока прирост скорости не станет пренебрежимо малым (менее 0,001 м/с). На выходе получаем точное значение  $V_{кр}$ .

#### 3. Принятие решений и управление.

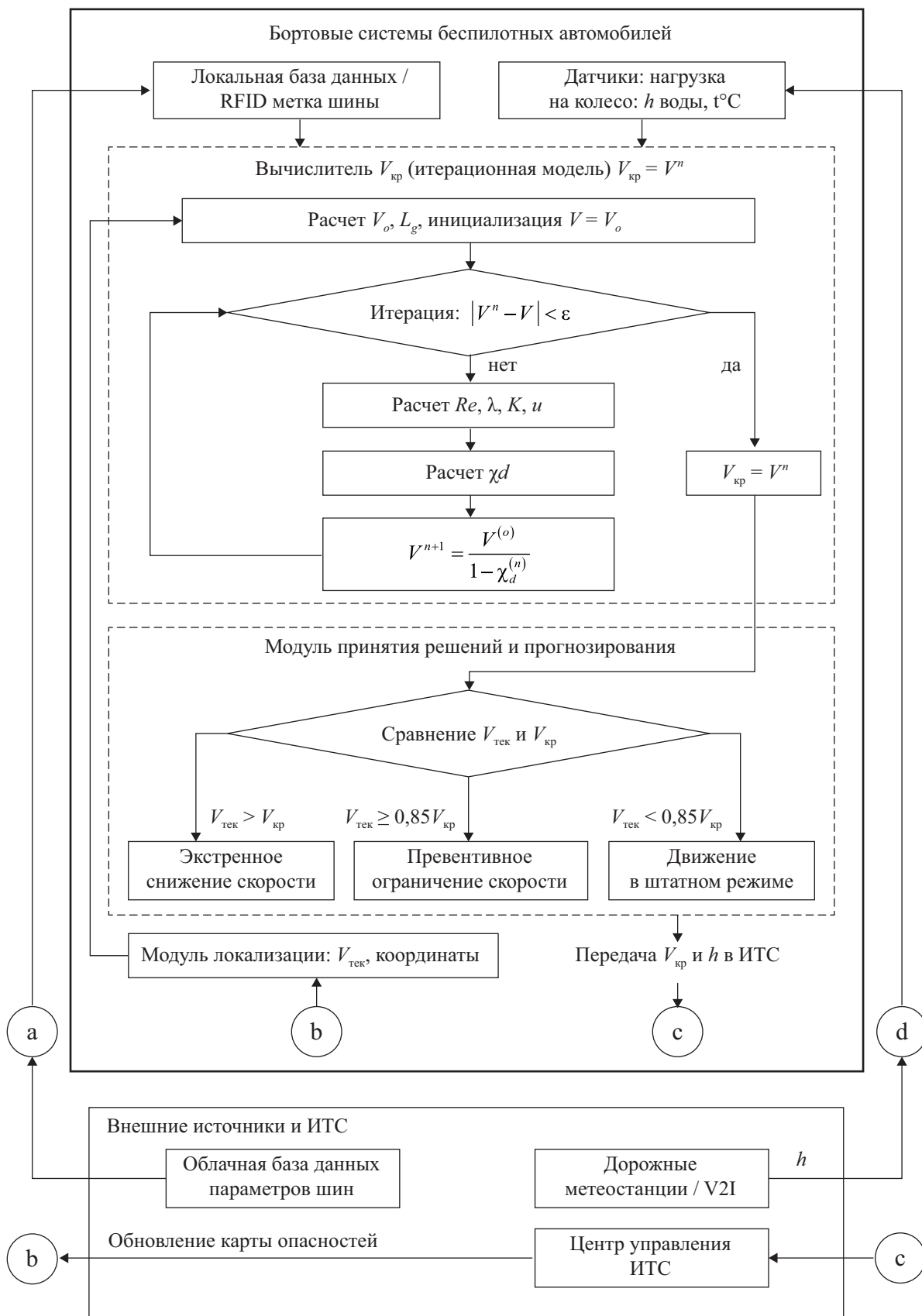
Полученное значение  $V_{кр}$  поступает в модуль планирования движения. В зависимости от соотношения текущей скорости и критической система может:

- работать штатно (запас более 15 %);
- выдать предупреждение и мягко ограничить максимальную скорость (зона риска);
- инициировать экстренное торможение (непосредственная угроза аквапланирования).

4. Интеграция с ИТС (контур обратной связи).

Бортовой компьютер передает в Центр управления ИТС не только факт срабатывания системы, но и рассчитанное значение  $V_{кр}$  с привязкой к координатам и измеренной толщине слоя воды. Центр ИТС агрегирует эти данные от множества автомобилей и формирует динамическую карту рисков аквапланирования.

Данная карта транслируется обратно на борт другим участникам движения. Это позволяет беспилотному автомобилю, который еще



**Рис. 3.** Алгоритм движения беспилотных автомобилей в ИТС с использованием предлагаемой модели расчета скорости начала аквапланирования

только подъезжает к луже, заранее зная, что через 500 м критическая скорость составит, например, 70 км/ч, и снизить скорость заблаговременно, повышая плавность хода и общую безопасность транспортного потока.

### Интерпретация расхождений и границы применимости исследуемой модели

Наблюдаемая разница в численных оценках является прямым следствием двух основных усовершенствований, заложенных в новую модель.

Во-первых, без привлечения произвольных допущений, показана геометрия водяного клина.

Во-вторых, выполнен сквозной гидравлический расчет дренажных каналов, который не опирается на эмпирически подбираемые параметры  $\lambda$  и  $\eta$ . Полученное нами значение (около 75,5 км/ч) заметно лучше укладывается в диапазон скоростей, фиксируемых в ходе полигонных испытаний шин с остаточной глубиной протектора порядка 1,6 мм (по данным [10], он составляет 75–85 км/ч).

*Сильные стороны предложенного подхода:*

1. Угол атаки  $\beta$  в нашей модели не назначается произвольно, а выводится из геометрических соотношений, связывающих радиус колеса и толщину водной пленки [3, 4].

2. Площадь омываемой поверхности находится через эффективную протяженность клина, пропорциональную  $\sqrt{Rh}$ . Адекватность такого приема подтверждена ранее опубликованными экспериментальными работами [5, 6].

3. Переход на формулу Черчилля [9] избавляет от необходимости «сшивать» разрозненные выражения для разных режимов течения. Сопротивление в канавках теперь описывается единым непрерывным соотношением, которое одинаково хорошо работает и при малых, и при больших числах Рейнольдса, включая и неудобную переходную зону.

4. Модель не требует эмпирических поправочных коэффициентов, зависящих от конкретной шины. Все параметры являются либо физическими константами, либо измеряемыми геометрическими величинами.

*Ограничения:*

1. Предполагается, что канавки имеют прямоугольное сечение и являются гидравлически гладкими. Влияние шероховатости и извилистости может быть учтено введением эквивалентной длины, но это требует дополнительных данных.

2. Не учитывается перетекание воды через перемычки протектора.

3. Нагрузка на колесо считается постоянной. При разгоне или торможении она перераспределяется, что может изменить критическую скорость.

4. Модель описывает полное аквапланирование, частичное аквапланирование требует отдельного рассмотрения [11].

### Заключение

Разработанная уточненная аналитическая модель для определения критической скорости аквапланирования одиночного колеса легкового автомобиля, в отличие от известных подходов, последовательно уточняет геометрию водяного клина (угол атаки и площадь смоченной поверхности), вводит физически обоснованную поправку на вязкостное трение и детально описывает дренаж воды через канавки протектора на основе фундаментальных законов гидравлики.

Проведенный сравнительный анализ с двумя предшествующими методиками [1, 2] выявляет эволюцию расчетных подходов и преимуществ предлагаемой модели.

Способ, предложенный в публикации [1], опирается на упрощенное уравнение, вытекающее из закона сохранения импульса для набегающей водной массы:

$$V_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{10^6 G_k}{h\lambda b_{\text{ш}} \frac{\pi}{2} \rho \eta}}. \quad (15)$$

В рамках этого подхода заложен целый ряд допущений. Так, угол встречи водяного клина с протектором принимается постоянным и равным  $\beta = 45^\circ$ , омываемая зона шины геометрически сводится к полукругу, полностью опущено влияние вязкости жидкости, а гидравлические потери в дренажных

бороздах не рассматриваются. Роль рисунка протектора моделируется введением поправочного эмпирического множителя  $\eta$ , лежащего в пределах от 0,8 до 1,0 и назначаемого в зависимости от остаточной высоты индикаторов износа. Вследствие перечисленных упрощений расчет по формуле (15) способен дать лишь самую приблизительную оценку порога глиссирования и не приспособлен для анализа того, как именно сказываются на критической скорости реальные размеры водоотводящих каналов (их глубина, ширина и протяженность).

Более поздняя методика, изложенная в работе [2], строится на интегральных уравнениях неразрывности и изменениях количества движения и содержит весьма подробное описание пространственной геометрии пятна касания. Однако расчет гидравлического сопротивления канавок в ней осуществляется с использованием так называемого ступенчатого набора выражений — отдельно для ламинарного, переходного и турбулентного характера течения [12]. Подобный прием вносит в итоговую расчетную схему искусственные разрывы и вынуждает заранее определяться с выбором конкретной аппроксимирующей зависимости. Кроме того, в модели [2] сохраняются эмпирические параметры, описывающие эффект разбрызгивания и геометрию отставания покрышки от опорной плоскости, что несколько ограничивает ее универсальность.

Ключевое отличие и достоинство предлагаемого подхода состоит в переходе к единой непрерывной формуле Черчилля [9] для нахождения коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ . Это нововведение дает возможность с единых позиций и без разрывов описывать движение воды в водоотводящих канавках во всех интервалах чисел Рейнольдса — от ламинарного до турбулентного режима, не прибегая к переключениям между разрозненными эмпирическими соотношениями [13, 14].

Помимо указанного, разработанная модель обладает еще несколькими положительными особенностями:

1. Она не нуждается в каких-либо эмпирических подгоночных коэффициентах, поскольку все входящие в нее величины выражены либо через фундаментальные физические константы ( $\rho$ ,  $\mu$ ), либо через непосредственно

измеряемые геометрические характеристики колеса ( $b$ ,  $R$ ,  $h_g$ ,  $\omega$ ,  $L_g$ ).

2. Расчет угла наклона водяного клина и площади омываемой зоны уточнен с привлечением приближения тонкого слоя ( $\beta \approx \sqrt{\frac{h}{R}}$ ,  $S_o \sim b\sqrt{Rh}$ ), адекватность которого подтверждена опубликованными экспериментальными данными [5, 6].

3. Вычислительная процедура сведена к несложному итерационному циклу (обычно хватает 3–5 приближений), который без особого труда реализуется в любом табличном процессоре или даже при ручном счете. Это обстоятельство делает модель весьма удобной для оперативного применения в ходе производства автотехнических экспертиз.

Выполненный для типовых параметров легкового автомобиля расчет (вертикальная нагрузка на одно колесо — 2575 Н, ширина беговой дорожки — 175 мм, толщина слоя воды — 2 мм, остаточная глубина протектора — 1,6 мм) дает значение критической скорости  $V_{кр} \approx 21,0$  м/с = 75,5 км/ч. Полученное значение соответствует результатам полигонных испытаний для шин со схожей степенью изношенности (справочные данные [10] указывают диапазон 75–85 км/ч). При этом оно заметно выше, чем оценка, следующая из упрощенной методики [1] ( $\approx 18,8$  м/с). Указанное расхождение как раз и объясняется более корректным учетом водоотводящей способности рисунка протектора в предлагаемой модели.

На основе разработанной математической модели сформулирован алгоритм, который может быть интегрирован в контур управления беспилотного транспортного средства, функционирующего в среде ИТС [15]. Показано, какие именно бортовые измерительные устройства (датчики нагрузки в подвеске, оптические анализаторы состояния дорожного покрытия, системы идентификации шин и блоки связи V2X) необходимы для наполнения модели актуальными данными без участия человека. Предусмотрена также возможность обмена информацией с центром управления ИТС как для получения прогнозных сведений о толщине водяного слоя на маршруте, так и для передачи рассчитанных пороговых

значений с целью формирования динамической карты рисков.

Практическая ценность полученных результатов видится в двух направлениях. Во-первых, реализация предложенного алгоритма в бортовом программном обеспечении беспилотных автомобилей способна повысить безопасность движения в неблагоприятных погодных условиях за счет своевременного (упреждающего) ограничения скорости еще до того, как колесо теряет контакт с дорогой. Во-вторых, уточненная методика расчета может быть рекомендована к применению в практике судебной автотехнической экспертизы при анализе дорожно-транспортных происшествий, связанных с потерей сцепления на мокром покрытии.

Дальнейшее совершенствование модели видится в постановке специализированных экспериментальных исследований с целью ее верификации в широких интервалах толщин водяной пленки и на различных типах дорожных покрытий, а также в более детальном описании реальной геометрии и микрогеометрии (шероховатости) внутренних поверхностей дренажных канавок протектора. ▲

### Список источников

1. Определение скорости возможного аквапланирования / В.А. Ковалев [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 5 (88). С. 115–119. EDN SGJFEH
2. Куверин И.Ю., Гусева И.А., Гусев С.А. Аналитическая модель расчета скорости начала аквапланирования в алгоритмах беспилотного управления // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 1. С. 30–54. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-30-54
3. Fwa T.F., Ong G.P. Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Analysis // Journal of Transportation Engineering. 2008. Vol. 134, no. 5. Pp. 590–598. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:5(182)
4. Ong, G.P., Fwa T.F., Guo J. Modeling Hydroplaning and Effects of Pavement Microtexture // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2005. No. 1905. Pp. 166–176. DOI: 10.1177/0361198105190500118
5. Vilsan A., Sandu C. Hydroplaning of Tires: A Review of Numerical Modeling and Novel Sensing Methods // Journal of Autonomous Vehicles and Systems. 2023. Vol. 3, no. 3. Art. 031001. DOI: 10.1115/1.4065379
6. Evaluation of Highway Hydroplaning Risk Based on 3D Laser Scanning and Water-Film Thickness Estimation / W. Yang [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19, no. 13. Art. 7699. DOI: 10.3390/ijerph19137699
7. Longitudinal Hydroplaning Performance of Passenger Car Tires / M. Maleska [et al.] // Vehicle System Dynamics. 2021. Vol. 59, no. 3. Pp. 415–432. DOI: 10.1080/00423114.2019.1693047
8. Effectiveness of Tire-Tread Patterns in Reducing the Risk of Hydroplaning / T.F. Fwa [et al.] // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2009. No. 2094. Pp. 91–102. DOI: 10.3141/2094-10
9. Benavides H.M. Modification and Improvement of the Churchill Equation for Friction Factor Calculation in Pipes // Water. 2024. Vol. 16, no. 16. Art. 2328. DOI: 10.3390/w16162328
10. Numerical Analysis of Hydroplaning Behaviour by Using a Tire–Water–Film–Runway Model / X. Zhu [et al.] // International Journal of Pavement Engineering. 2022. Vol. 23, no. 3. Pp. 784–800. DOI: 10.1080/10298436.2020.1774587
11. Hydroplaning Analysis by FEM And FVM: Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning / E. Seta [et al.] // Tire Science and Technology. 2000. Vol. 28, no. 3. Pp. 140–156. DOI: 10.2346/1.2135997
12. Chen X., Wang H. Analysis and Mitigation of Hydroplaning Risk Considering Spatial-Temporal Water Condition on the Pavement Surface // International Journal of Pavement Engineering. 2023. Vol. 24, no. 2. DOI: 10.1080/10298436.2022.2036988
13. Tao S., Wang J., Dong R. Model Construction and Numerical Simulation for Hydroplaning of Complex Tread Tires // Complex System Modeling and Simulation. 2022. Vol. 2, no. 4. Pp. 322–333. DOI: 10.23919/CSMS.2022.0020
14. Methodology for Real-Time Hydroplaning Risk Estimation Using an Intelligent Tire System: An Analytical Approach / A. Vilsan [et al.] // Sensors. 2025. Vol. 25, no. 23. Art. 7299. DOI: 10.3390/s25237299
15. Florida Department of Transportation's Enhanced Hydroplaning Prediction Tool / H. S. Lee [et al.] // Transportation Research Record. 2021. Vol. 2675, no. 10. Pp. 340–352. DOI: 10.1177/03611981211011479

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 2, pp. 149–162  
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-149-162

### Algorithmic Support for Proactive Motion Control of Unmanned Vehicles Motor Vehicles in Intelligent Transport Systems in Conditions of Possible Aquaplaning

#### Information about authors

Guseva I. A., Postgraduate Student of the Department “Organization of transportation, safety of traffic and car service”; e-mail: guseva11.ia@yandex.ru

Yuri Gagarin State Technical University, Saratov

**Abstract:** this article presents an improved analytical model for calculating the threshold speed for the onset of full hydroplaning of a single wheel on a passenger car. A distinctive feature of this approach is the consistent refinement of the geometric parameters of the water wedge (angle of attack and wetted surface area) and a detailed description of the hydraulic resistance of the tread grooves using the continuous Churchill formula for the friction coefficient, which is valid across the entire spectrum of Reynolds numbers — from laminar to fully developed turbulent flow, including the transition region. This approach eliminates the need for an a priori selection of the design mode and ensures a smooth functional relationship between the critical speed and the initial parameters. Losses at the groove entrance are calculated using a classical hydraulic model — using the dynamic pressure in a narrow cross-section, and the driving pressure difference is assumed to be equal to the full dynamic pressure of the oncoming flow. Based on the proposed model, algorithmic support has been developed for proactively controlling the movement of unmanned vehicles as part of intelligent transport systems. The composition and purpose of the onboard sensor subsystems required to obtain initial data in real time are determined. A numerical example demonstrating the convergence of the iterative procedure is presented, and a comparison with known engineering methods is made.

**Keywords:** aquaplaning, hydrodynamic lifting force, critical speed, angle of attack, tread, drainage grooves, hydraulic resistance, Churchill formula, analytical model, unmanned vehicle, intelligent transport system, control algorithm, on-board sensors

#### References

1. Kovalev V. A., et al. Opredelenie skorosti vozmozhnogo akvaplanirovaniya [Determining the Speed of Possible Aquaplaning], *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Irkutsk State Technical University]*, 2014, no. 5 (88), pp. 115–119. EDN SGJFEH (In Russian)
2. Kuverin I. Y., Guseva I. A., Gusev S. A. Analiticheskaya model' rascheta skorosti nachala akvaplanirovaniya v algoritmakh bespilotnogo upravleniya [Analytical Model for Calculating the Speed of Aquaplaning Initiation in Unmanned Control Algorithms], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 30–54. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-30-54 (In Russian)
3. Fwa T. F., Ong G. P. Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Analysis, *Journal of Transportation Engineering*, 2008, vol. 134, no. 5, pp. 590–598. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:5(182)
4. Ong, G. P., Fwa T. F., Guo J. Modeling Hydroplaning and Effects of Pavement Microtexture, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 2005, no. 1905, pp. 166–176. DOI: 10.1177/0361198105190500118
5. Vilsan A., Sandu C. Hydroplaning of Tires: A Review of Numerical Modeling and Novel Sensing Methods, *Journal of Autonomous Vehicles and Systems*, 2023, vol. 3, no. 3, art. 031001. DOI: 10.1115/1.4065379
6. Yang W., et al. Evaluation of Highway Hydroplaning Risk Based on 3D Laser Scanning and Water-Film Thickness Estimation, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, no. 13, art. 7699. DOI: 10.3390/ijerph19137699
7. Maleska M., et al. Longitudinal Hydroplaning Performance of Passenger Car Tires, *Vehicle System Dynamics*, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 415–432. DOI: 10.1080/00423114.2019.1693047
8. Fwa T. F., et al. Effectiveness of Tire-Tread Patterns in Reducing the Risk of Hydroplaning, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, no. 2094, pp. 91–102. DOI: 10.3141/2094-10
9. Benavides H. M. Modification and Improvement of the Churchill Equation for Friction Factor Calculation in Pipes, *Water*, 2024, vol. 16, no. 16, art. 2328. DOI: 10.3390/w16162328
10. Zhu X., et al. Numerical Analysis of Hydroplaning Behaviour by Using a Tire–Water–Film–Runway Model, *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 784–800. DOI: 10.1080/10298436.2020.1774587
11. Seta E., et al. Hydroplaning Analysis by FEM And FVM: Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning, *Tire Science and Technology*, 2000, vol. 28, no. 3, pp. 140–156. DOI: 10.2346/1.2135997
12. Chen X., Wang H. Analysis and Mitigation of Hydroplaning Risk Considering Spatial-Temporal Water Condition on the Pavement Surface, *International Journal of Pavement Engineering*, 2023, vol. 24, no. 2. DOI: 10.1080/10298436.2022.2036988
13. Tao S., Wang J., Dong R. Model Construction and Numerical Simulation for Hydroplaning of Complex Tread Tires, *Complex System Modeling and Simulation*, 2022, vol. 2, no. 4, pp. 322–333. DOI: 10.23919/CSMS.2022.0020
14. Vilsan A., et al. Methodology for Real-Time Hydroplaning Risk Estimation Using an Intelligent Tire System: An Analytical Approach, *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 23, art. 7299. DOI: 10.3390/s25237299
15. Lee H. S., et al. Florida Department of Transportation's Enhanced Hydroplaning Prediction Tool, *Transportation Research Record*, 2021, vol. 2675, no. 10, pp. 340–352. DOI: 10.1177/03611981211011479