

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛОХО ОБТЕКАЕМЫХ ТЕЛ

Е. В. Королев, к.т.н. доцент кафедры «Тракторы и автомобили» ГОУ ВПО «Нижегородский государственный инженерно-экономический институт»;

Р. Р. Жамалов, аспирант кафедры «Тракторы и автомобили» ГОУ ВПО «Нижегородский государственный инженерно-экономический институт»

Аннотация. Проанализированы составляющие полного аэродинамического сопротивления автомобиля. Уточнены величины этих составляющих. Представлены значения коэффициентов лобового сопротивления воздуха для различных геометрических тел. Проведен анализ аэродинамического сопротивления плохо обтекаемых тел.

Ключевые слова: коэффициент лобового сопротивления воздуха, плохо обтекаемые тела, сопротивление формы, индуктивное сопротивление, профильное сопротивление, сопротивление поверхностного трения, сопротивление внутренних потоков, интерференционное сопротивление.

Величина аэродинамического сопротивления современного легкового автомобиля постоянно уменьшается, практически приближаясь к значениям для хорошо обтекаемых тел, например, летательных аппаратов. Тем не менее, легковые автомобили нужно отнести к плохо обтекаемым телам, так как основную долю их аэродинамического сопротивления составляет не сопротивление трения, а сопротивление давления.

О величине аэродинамического сопротивления обычно имеют представление по безразмерному коэффициенту сопротивления воздуха обтекающего данное тело -

C_x . Аэродинамическое сопротивление автомобиля пропорционально величине коэффициента C_x , площади наибольшего поперечного сечения и квадрату скорости.

В городских условиях собственно на движение автомобиля расходуется 12 % мощности двигателя (3,2 % на сопротивление воздуха, 2,4 % на сопротивление дороги, 6,4 % на сопротивление разгону). Таким образом, потери составляют 88 % (42 % - система охлаждения, 22 % - отработавшие газы, 13 % - потери на трение в двигателе, 9 % - потери в трансмиссии, 2 % - привод вспомогательного оборудования).

Если сопротивление воздуха растет с квадратом скорости, то затраты мощности двигателя являются функцией куба скорости.

Если величина коэффициента C_x равна примерно 0,4, то при скорости 11,1 м/с (40 км/ч) затраты на преодоление сопротивления воздуха составляют 0,5 - 0,7 кВт (0,7 - 0,9 л.с), при скорости 22,2 м/с (80 км/ч) - 3,7-5,2 кВт (5 - 7 л.с), 33,3 м/с (120 км/ч) - 13,3-17,8 кВт (18-24 л.с), 44,4 м/с (160 км/ч) - 31,8-42,2 кВт (43 - 57 л.с).

Для легковых автомобилей 20-х годов прошлого столетия средняя величина C_x составляла примерно 0,8, для 70 - 80-х годов - 0,46. Позднее, до конца столетия, величина коэффициента C_x , по анализу авторов статьи, ежегодно уменьшалась в среднем на величину 0,006.

В настоящее время для серийных автомобилей величина коэффициента C_x равна 0,30 и не является редкостью.

Известно, что снижение величины коэффициента C_x на 10 % снижает расход топлива на 3-5%.

Представление о величинах действующих сил давления на автомобиль можно составить по следующим фактам: при скорости 28 м/с на лобовое стекло автобуса или грузового автомобиля действует давление 112 кгс. При

скорости 40 м/с на заднее стекло или на крышку багажника легкового автомобиля действует выдавливающая сила примерно 40 кгс

Воздух оказывает сопротивление движению автомобиля ГАЗ-3ПО на скорости 40 м/с (144 км/ч) с силой 990 Н. Подъемная сила, действующая на автомобиль, составляет 673 Н. На автомобиль ВАЗ-2115 при той же скорости действует сила сопротивления равная 643 Н и подъемная сила 287 Н.

Аэродинамическое сопротивление представляет сумму составляющих его сопротивлений - формы индуктивного, поверхностного (трения), интерференционного и внутренних потоков.

Сопротивление формы, вызываемое перепадом давления воздуха на поверхности кузова, составляет 50 -85 % от общего аэродинамического сопротивления.

Сопротивление поверхностного трения вызывается силами вязкости пограничного слоя, определяющих потери скорости потока. В ламинарном пограничном слое отсутствует взаимное проникновение различных слоев воздуха. Турбулентный, где он есть, более толстый и обладает большим сопротивлением. Поверхностное трение является функцией площади поверхности автомобиля, ее шероховатости. Сопротивление трения воздуха о поверхность кузова составляет 3-10 %. Оно зависит, прежде всего, от площади поверхности кузова и качества его покрытия.

Сопротивление внутренних потоков выражается в виде потерь энергии внутреннего потока. Существует связь между сопротивлениями формы и сопротивлением внутренних потоков, выражающихся в изменении линий тока. Для снижения этого сопротивления следует уменьшать площадь отверстий для входа воздушного потока в моторное отделение (при переднем расположении двигателя) и плавно изменять направление движения внутренних

потоков, что затруднительно из-за компоновочных требований. Внутреннее сопротивление, возникающее при прохождении воздуха через системы двигателя, отопления и вентиляции кузова, составляет 10-20 %. С течением времени при уменьшении величины коэффициента C_x доля внутреннего сопротивления должна возрасти в силу того, что система охлаждения требует постоянного объема воздуха, т.е. сила сопротивления внутренних потоков практически остается постоянной, но, доля увеличивается.

Под профильным сопротивлением понимают аэродинамическое сопротивление бесконечно широкого геометрического тела (например, автомобиля), т.е. оно не зависит от его ширины и является постоянной величиной для данной формы, профиля. Модель легкового автомобиля бесконечной ширины - вещь абстрактная. Величина профильного сопротивления определяет минимально возможное аэродинамическое сопротивление при конкретной постоянной геометрии формы профильного сечения модели. Величина профильного сопротивления составляет 85 % от общего аэродинамического сопротивления.

Возникновение индуктивного сопротивления у легкового автомобиля объясняют аналогией его с крылом конечного размаха. Из-за разности давлений на поверхности легкового автомобиля и под ним образуются вихри, сбегаящие с задних кромок кузова. Эти вихри индуцируют вертикальные скорости потоков. Индуцированные скорости вызывают появление скаса воздушного потока у модели, следовательно, и составляющей подъемной силы - индуктивного сопротивления. Величина индуктивного сопротивления составляет 7-10 % от общего аэродинамического сопротивления.

Использование известной теории индуктивного сопротивления применительно к легковому автомобилю, как показывает практика, неприемлемо. Вызывается это рядом

причин. Величина профильного сопротивления легкового автомобиля значительно выше индуктивного сопротивления. Влияние сбегающих вихрей для легкового автомобиля, имеющего малое соотношение ширины кузова к его длине, на эффект взаимодействия их с основными воздушными потоками имеет большее значение, чем, например, для крыла самолета.

Соотношения габаритных размеров в продольном сечении крыла и легкового автомобиля различны. Влияние близости земли также воздействует на вихреобразование в задней части автомобиля, на распределение индуцируемых скоростей по его ширине.

Интерференционное сопротивление (15-17 %) обусловлено наличием различных выступающих деталей на поверхности кузова - дверных ручек, рычагов стеклоочистителей, антенн, наружных зеркал, номерных знаков и т.п. Возмущения, вносимые этими деталями, взаимодействуют с основным воздушным потоком. Взаимодействие приводит к возрастанию сопротивления на величину, которая может значительно превышать силу сопротивления этих элементов в отдельности.

Снижению интерференционного сопротивления способствуют различные мероприятия - тщательная аэродинамическая проработка формы наружного зеркала, которое становится частью кузова; расположение рычагов стеклоочистителей в нерабочем положении под заднюю часть капота; удаление водосточных желобов; установка стекол заподлицо с поверхностью кузова с клеевым креплением и т.д. Выступающими частями являются также элементы подвески, корпуса силовых агрегатов, лонжероны кузова. Сопротивление выступающих частей днища составляет порядка 10 %.

Для плохообтекаемых тел в сопротивление формы входит донное сопротивление, вызванное наличием спут-

ного следа. Донное сопротивление возникает в результате отрицательных давлений в спутной струе, интегрированных по донной площади. Близость земли способствует увеличению донного сопротивления в отличие от индуктивного сопротивления, которое уменьшается.

Скорость воздушного потока вблизи модели выше, а за автомобилем в спутном следе - меньше. Эффект подъемной силы наиболее сильно проявляется при малых скоростях воздушного потока. Это подтверждается экспериментальным путем - весовая вертикальная нагрузка на задней части модели автомобиля выше, чем на передней. И она более чувствительна к изменениям геометрии формы кузова.

Донное сопротивление по различным источникам составляет порядка 10 %. Малый объем знаний о составляющих аэродинамического сопротивления препятствует появлению новых расчетных методов, необходимых на стадии проектирования автомобилей. Особенно это относится к донному сопротивлению, его влиянию на индуктивное и профильное сопротивления.

Представленные выше численные значения составляющих полного аэродинамического сопротивления взяты из различных научно-технических публикаций. В них не указаны методы, способы определения этих численных значений. Исключением являются профильное и индуктивное сопротивления, определенные авторами статьи методом последовательных приближений.

Предполагаем, что для некоторых составляющих аэродинамического сопротивления величины определялись анализом аэродинамических сопротивлений известных простейших геометрических тел - пластин, шара, цилиндров, параллелепипедов и др.

Проведем и мы анализ аэродинамических показателей различных геометрических тел. В табл. 1 представлены

результаты исследований в аэродинамической трубе различных тел в свободном потоке, т.е. без экрана, имитирующего земную поверхность. В табл. 2 представлены результаты исследований в аэродинамической трубе различных тел в присутствии экрана, имитирующего земную поверхность.

Наибольшим сопротивлением обладает плоская пластина. У пластины, ориентированной перпендикулярно к воздушному потоку, наблюдается разброс значения коэффициента воздушного сопротивления C_x от 1,15 до 1,25. Вероятно, это объяснимо разницей в соотношении геометрических размеров. В этом случае величину сопротивления определяет сопротивление давления - спереди повышенное, за пластиной пониженное. В воздушном потоке за пластиной коэффициент давления $C_p = - 1,2$. За круглым диском коэффициент $C_p = - 0,36$. Коэффициент давления определяется разностью между давлением на поверхности тела и статическим давлением в окружающем потоке, отнесенной к динамическому давлению невозмущенного потока. У плоской пластины более высокое донное сопротивление, что подтверждает величина коэффициента давления. Пластина, установленная вдоль воздушного потока, имеет коэффициент сопротивления, равный коэффициенту C_x для объемных тел вращения - эллипсоиду, капле. Следовательно, и для плоской пластины, расположенной вдоль воздушного потока и для хорошо обтекаемых тел, величину аэродинамического сопротивления определяет сопротивление поверхностного трения. Установка перед круглой пластиной обтекателей в форме полусферы или различных конусов дает снижение C_x до 0,34. Таким образом, можно предположить, что для круглой пластины, установленной перпендикулярно к воздушному потоку, величина донного сопротивления составляет 29 % от общего.

Для обтекаемого тела вращения в свободном потоке донное сопротивление составляет 15-30 %, что значительно выше значений этого сопротивления, указанных в печати для легкового автомобиля.

Еще большую величину (80 %) имеет донное сопротивление параллелепипеда, помещенного в свободный воздушный поток. Отличие в значениях донного сопротивления от величины для автомобиля объяснимо большей величиной площади донного среза у тела вращения, а тем более у параллелепипеда. Площадь донного среза у легкового автомобиля не превышает половины площади его наибольшего сечения.

Для объемных прямоугольных тел без обтекателей величина коэффициента C_x равна примерно единице (0,902), что по отношению к пластине является меньшей величиной. И это несмотря на дополнительные сопротивления - сопротивление поверхностного трения и кромочное сопротивление. Под кромочным сопротивлением понимается сопротивление, вызванное наличием острых граней у тела, резким переходом от одной грани к другой. Форма параллелепипеда соответствует форме автобуса, минивэна. Установка вблизи опорной поверхности практически не изменяет величину аэродинамического сопротивления. Также не приносит заметных изменений установка на параллелепипед колес. Этим подтверждается тот факт, что изменение величины дорожного просвета не влияет на величину аэродинамического сопротивления. Величина подъемной силы в большей степени зависит от этого параметра. Известно, что по мере приближения параллелепипеда к опорной поверхности критическая точка перемещается от центра передней плоскости к нижней ее кромке, что приводит к отличию обтекания верхней и нижней поверхностей и, как следствие этого, появлению подъемной силы. Также экспериментально определено отсутствие

присоединения воздушного потока, оторвавшегося с передних кромок параллелепипеда, пока его длина не превышает 1.4 длины передней поверхности. Величину аэродинамического сопротивления для подобных тел в основном определяет донное давление.

Цилиндр с осью, ориентированной вдоль потока, имеет сопротивление примерно на 25 % большее, чем цилиндр с осью, перпендикулярной набегающему воздушному потоку. Это объяснимо большим давлением на плоскую переднюю часть цилиндра и большим объемом спутного следа.

Из анализа данных табл. 2 определяется существенное влияние формы передней части объемного тела на величину аэродинамического сопротивления. Если за отправную точку брать сопротивление параллелепипеда, то с изменением геометрии передней части, возможно, уменьшение коэффициента лобового сопротивления воздуха примерно вдвое. Еще на четверть возможно уменьшение коэффициента C_x изменением задней части.

Установка на модели колес увеличивает сопротивление, но незначительно. Предполагается, что вращение колес, возможно, это изменит.

Аэродинамическое сопротивление параллелепипедов зависит от соотношений его геометрических параметров - длины, высоты и ширины. Зависимость величины коэффициента C_x от этих соотношений была экспериментально определена Р. Бартом (рис. 1 и 2).

Величина коэффициента удлинения λ для легковых автомобилей изменяется от 2,2 до 3,5. При этих значениях X величина коэффициента C_x минимальна и ее можно считать постоянной (рис.1).

Величина коэффициента ширины B для реальных автомобилей составляет 1-1,5. На этом участке (рис.2) величина коэффициента C_x изменяется менее чем на 4 % и

это дает основание для практических расчетов принимать ее постоянной для автомобиля.

Интерес вызывает распределение набегающего на автомобиль воздушного потока. Это распределение зависит от формы передней части, местоположения застойной линии и величины дорожного просвета. Для легкового автомобиля воздушный поток распределяется следующим образом:

- 30-35 % верхний поток;
- 50 % боковые потоки;
- 5-10 % нижний поток, под днищем;

Перераспределение воздушных потоков, обтекающих автомобиль, влияет на смену режимов обтекания в его задней части и это следует учитывать при расчете аэродинамических характеристик.

Проведенный анализ составляющих аэродинамического сопротивления показывает, что для рассмотренных геометрических тел сопротивление поверхностного трения составляет 20 %, т.е. вдвое превышает указанную величину, приводимую в публикациях.

В этих публикациях доля донного сопротивления составляет 10 %, но для тел вращения эта доля - 30 %, а для параллелепипедов - до 80 %. Следовательно, требуется тщательное изучение механизма сопротивления и сну гной струе.

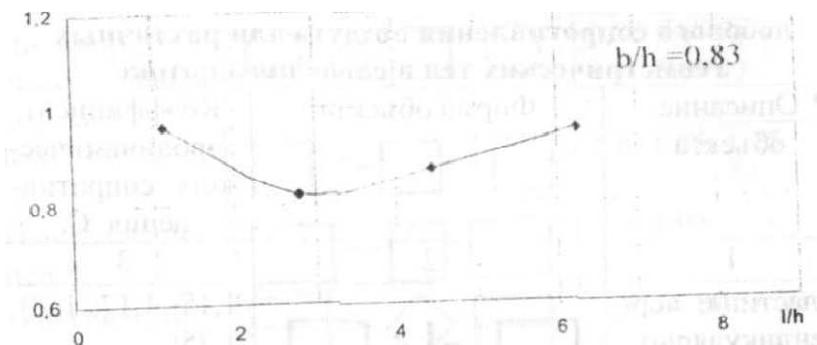


Рис. 1. Коэффициент сопротивления параллелепипеда в зависимости от удлинения:

$\lambda = l:h$ - коэффициент удлинения, где l - длина, h - высота

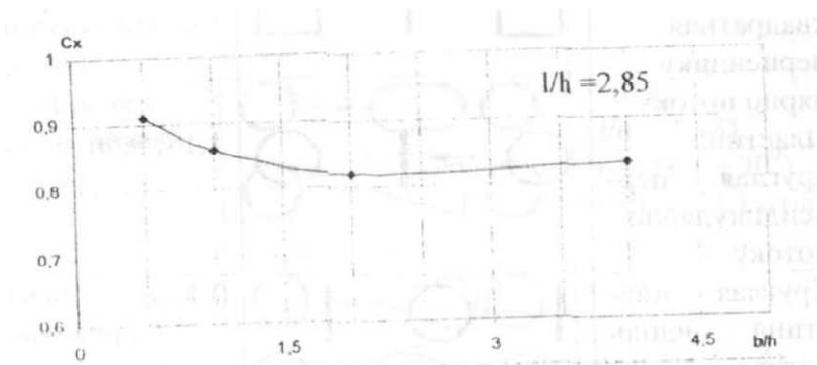
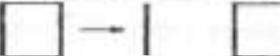
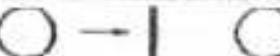


Рис. 2. Коэффициент сопротивления параллелепипеда в зависимости от коэффициента ширины:

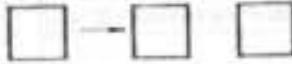
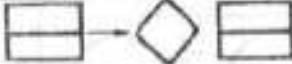
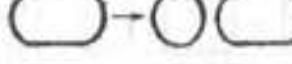
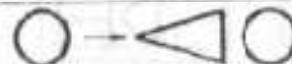
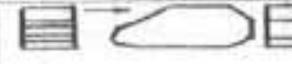
$\beta = b:h$ - коэффициент ширины, где b - ширина, h - высота.

Таблица 1

**Значения коэффициента
лобового сопротивления воздуха для различных гео-
метрических тел в свободном потоке**

Описание объекта	Форма объекта	Коэффициент аэродинамичес- кого сопротив- ления C_x
1	2	3
Пластина, перпендикулярно к потоку		1,15; 1,17; 1,20; 1,25;
Пластина вдоль потока		0,05
Пластина квадратная, перпендикулярно потоку		0,64
Пластина круглая перпендикулярно потоку		1,17; 0,56
Круглая пластина вдоль потока		0,1
Шар (сфера)		0,25; 0,47
Полусфера		0,41; 0,42
Цилиндр с осью перпендикулярно к потоку		0,60; 0,80; 0,82; 0,90

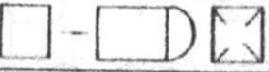
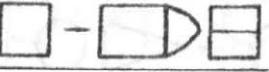
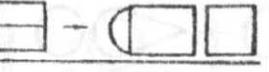
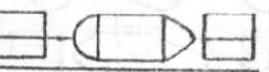
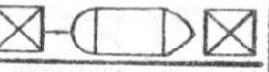
Продолжение таблицы 1

1	2	3
Цилиндр с осью вдоль потока		0,82 ($l/d > 2$) 1,15 ($l/d > 1$)
Куб		1,0; 1,05; 1,15
Параллелепипед		1,0; 1,05
Параллелепипед		0,75; 0,80
Пирамид		1,35
Эллипсоид с осью перпендикулярной к потоку		0,30 ($l/d = 1,35$)
Эллипсоид вдоль потока		0,035 ($l/d = 1,18$)
Конус		0,34 (угол 30°) 0,50, 0,51 (угол 60°)
Тело вращения (капля)		0,34
Тело вращения (капля)		0,013 ($l/c = 4$) 0,04 ($l/d = 2,5$)
Модель (М 1:5) с профилем ВАЗ - 2108		0,347 ($l/h = 2,96$) ($b/h = 1,33$)

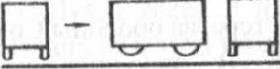
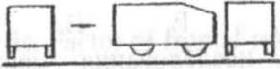
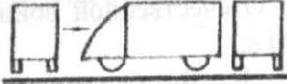
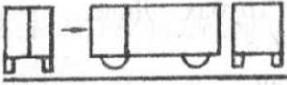
$\lambda = l:h$ - коэффициент удлинения, где l - длина, h - высота. $\beta = b:h$ - коэффициент ширины, где b ширина, d - диаметр.

Таблица 2

**Значения коэффициента лобового
сопротивления воздуха для различных
геометрических тел в присутствии экрана**

Описание объекта	Форма объекта	Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x
1	2	3
Пластина полукруглая, перпендикулярно к потоку		1,19
Параллелепипед		0,879; 0,902; 1,00 0,8-0,88 (l/h=2-5)
Параллелепипед с задним обтекателем		0,882
Параллелепипед с задним обтекателем		0,765
Параллелепипед с передним обтекателем		0,361
Параллелепипед с передним и задним обтекателями		0,255
Параллелепипед с передним и задним обтекателями		0,075

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Модель (М 1:5) с профилем ВЛЗ – 2108 (l:h = 2,96) (b:h = 1,33)		0,37– 0,38 (зазор 32,5 мм): 0,37 (с колесами) 0,40 (зазор 5 мм)
Тело вращения		0,09 (l:d = 2,5)
Параллелепипед на колесах		0,86 (l:h = 3,1); 0,88; 0,902 (l:h = 5,2 b:h = 1,94)
Параллелепипед на колесах (угол скошенной поверхности 14°)		0,801 (l:h = 5,2 b:h = 1,94)
Параллелепипед с передним обтекателем (увеличение верхнего потока)		0,441 (l:h = 5,2 b:h = 1,94)
Параллелепипед с передним обтекателем (увеличение боковых потоков)		0,616 (l:h = 5,2 b:h = 1,94)

$\lambda = l:h$ - коэффициент удлинения, где l - длина, h - высота. $\beta = b:h$ - коэффициент ширины, где b ширина, d - диаметр.

Литература

1. Барт, Р. Влияние бокового ветра на аэродинамические силы, действующие на модели автомобилей и подобные им тела. // Аэродинамика автомобиля. - М.: Машиностроение, 1984.- С. 25-55.

2. Бирман. Течение вблизи плохо обтекаемых тел. применяемые к аэродинамике автомашины. // Труды общества инженеров-механиков США. Теоретические основы инженерных расчетов. - 1980. - Т. 102. № 3 - С. 85 - 87.

3. Зймелед, I . В, Теория автомобиля. - М.: военное издательство министерства обороны Союза ССР, 1957.

4. Келли, К. В, Аэродинамика для конструктора кузова автомобиля. // Аэродинамика автомобиля. М.: Машиностроение. ЮХ-4.

5. Королев, В. В. Параметрические аэродинамические исследования масштабных моделей легковых автомобилей. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию победы в Великой Отечественной войне - г. Княгинино: НГИЭИ, 2010.-220 с.

6. Королев, Е. В. Оценка и прогнозирование аэродинамических качеств легковых автомобилей на основе испытаний их масштабных моделей в аэродинамических трубах. Дисс... канд. техн. наук. -Горький, 1988.- 176 с.

7. Людвигсен, К. Е. Исторический обзор исследований по аэродинамике автомобиля. // Аэродинамика автомобиля. М.: Машиностроение, 1984.

8. Михайловский, П. В. Аэродинамика автомобиля. - М.: Машиностроение, 1973. - 224 с.

9. Павловский, Я. Автомобильные кузова. М.: Машиностроение, 1977.

AERODYNAMIC RESISTANCE OF BADLY STREAMLINE BODIES

E. V. Korolev, the candidate of technical sciences, the professor of the chair «Tractors and cars» the Nizhniy Novgorod state engineering-economic institute;

R. R. Zhamalov, the post-graduate student of the chair «Tractors and cars» the Nizhniy Novgorod state engineering-economic institute

Annotation. Components of full aerodynamic resistance of the car are analysed. Sizes of these components are specified. Values of factors of frontal resistance of air for various geometrical bodies are presented. Is* lead the analysis of aerodynamic resistance badly flowed round bodies.

The keywords. Factor of frontal resistance of air, badly streamline bodies, resistance of the form, inductive resistance, profile resistance, resistance of superficial friction, resistance of internal streams, interferented resistance.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОШНИКОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОСЕВНЫХ АГРЕГАТОВ

В. В. Косолапов, преподаватель кафедры «Механика» ГОУ ВПО НГИЭИ;

Е. В. Косолапова, преподаватель кафедры «Технология швейных изделий» ГОУ ВПО НГИЭИ

Аннотация. В общем комплексе технологических операций посева и посадке принадлежит определяющая роль. От качества высева зависит дружность всходов, облегчение последующих операций, урожайность и, конечно же, качество конечного продукта. На сегодняшний день на