

СИНТЕЗ ПОДХОДОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КАБИН ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Харитончик С.В.

В условиях современного рынка продукция грузового автомобилестроения должна быть привлекательна для потребителя по целому ряду свойств. Каждый потребитель желает, чтобы приобретенные им автомобили имели яркие отличительные по отношению к конкурентам стилевые решения, подчеркивающие имидж компании. Ключевую роль здесь играет кабина автотранспортного средства. Поэтому очень важно ее выделение среди конкурирующих образцов при помощи средств дизайна, наделение характерными признаками, запоминающимися чертами, выгодно отличающимися от других машин.

Вместе с тем потребителю важно не только стилевое совершенство кабины, но и влияние внешних форм на аэродинамику всего автомобиля, а также на безопасность водителя и пассажиров. Решение таких разных задач в отрыве друг от друга позволяет достичь максимума показателей какого-либо одного свойства, но одновременно может ухудшить показатели других свойств. В частности, задача совершенствования аэродинамики непосредственно влияет на экономическую эффективность грузового автомобиля или автопоезда.

Большая площадь фронтальной проекции и прямоугольная плохо обтекаемая форма кузова автотранспортных средств способствуют возникновению значительного аэродинамического сопротивления (*критерии аэродинамики*) [1]. Данный факт особенно важен, если учесть, что современная перевозка грузов связана с большими скоростями, влияющими на рост сопротивления. Кроме того, аэродинамика АТС тесно связана с дизайном кабины.

Обеспечение требуемой прочности (*критерии прочности*) кабины осуществляется главным образом за счет ее силового каркаса и наружных штампованных облицовочных панелей. Однако, в связи с высокой стоимостью штампов, не всегда имеется возможность обновления внешнего вида кабины отвечающего современным требованиям технической эстетики, предъявляемым к изделиям данного класса. Кроме того, существует необходимость создания семейства кабин (вагонной, полуприцепной, капотной компоновки; с бытовым модулем и без бытового модуля) для различных условий и регионов эксплуатации автопоездов.

В связи с изложенным необходима разработка подходов к созданию перспективных грузовых автомобилей и автопоездов, в которых будут в совокупности решены вопросы создания кабин на основе совместной оптимизации стилевых, аэродинамических и прочностных свойств. Решение данной задачи, относящейся к различным областям механики, позволит в рамках заданного ограниченного пространства найти способы повышения экономичности и эффективности автотранспортных средств.

Рассмотрим особенности обеспечения указанных выше свойств.

Исходными данными для разработки внешнего строения АТС являются техническое задание, задающее основные параметры АТС, и компоновочный чертеж со схематически изображенными основными узлами и агрегатами (рис. 1). Базируясь на этих документах, дизайнеры выполняют поисковые эскизы экстерьера кабины, принимая во внимание вопросы аэродинамики, эргономики рабочего места и зоны отдыха водителя и пассажира (рис. 2).

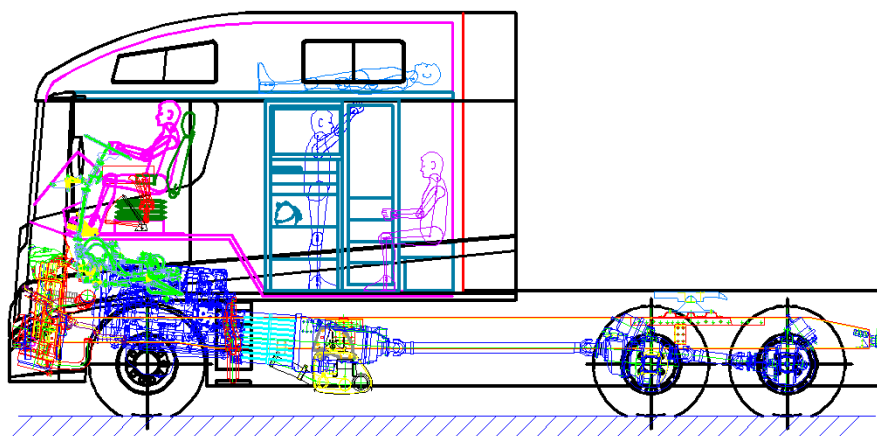


Рис. 1. Компоновочный чертеж со схематически изображенными основными узлами и агрегатами



Рис. 2. Поисковый эскиз экстерьера автопоезда

При разработке дизайна АТС необходимо опираться на следующие критерии эстетических свойств создаваемого объекта:

- информативность (наглядное выражение назначения изделия; образность формы);
- целостность композиции (выразительность объемно-пространственной структуры; тектоничность, соразмерность, колорит);
- стилевая выразительность (соответствие современным стилевым тенденциям; соответствие стилевому ансамблю среды);
- социально-утилитарная ценность (общественная оправданность; функциональное соответствие);
- экономическая эффективность (трудоемкость; материалоемкость);
- производственно-техническая ценность (технологичность; прогрессивность конструкций и материалов);
- отделка и товарный вид (качество наружной и внутренней отделки; выразительность фирменных знаков).

Итогом этапа дизайна становится уточненная трехмерная компоновка кабины. Она является основой для проведения виртуальных испытаний на прочность и аэродинамику. При необходимости осуществляется корректировка конструкции (компоновки) кабины с повторным проведением виртуальных испытаний.

Среди всех свойств кабины безопасность следует отнести к разряду наиболее важных, поскольку непосредственно связана с сохранением жизни водителя и пассажиров. Поэтому безопасность кабины в первую очередь определяется ее прочностью, а прочность кабины рассматривается как способность при авариях сохранять жизненное пространство, т.е. остаточное пространство внутри кабины, достаточное для выживания находящихся там людей.

Безопасность кабины регламентирована международными правилами ЕЭК ООН № 29, определяющими три вида испытаний: испытание кабины на удар спереди; испытание на прочность крыши кабины; испытание на прочность задней стенки кабины. После каждого из этих испытаний в кабине грузового транспортного средства должно сохраниться жизненное пространство, в котором может поместиться на сиденье манекен 75-процентильной репрезентативности, не приходя в соприкосновение с жестко закрепленными частями кабины.

Следует отметить, что стоимость и трудоемкость натурных испытаний высока, а при повреждении АТС его необходимо изготавливать заново после доработки конструкции для повторных испытаний. Современные компьютерные технологии позволяют эффективно проводить *виртуальные испытания* кабин. Их особенностью является возможность детального изучения взаимодействия всех систем и механизмов, т.е. комплексное исследование объекта. Таким образом, в процессе проведения виртуальных испытаний исследуется поведение различных частей и АТС в целом при имитации реальных нагрузок в рабочем режиме, что позволяет выбрать основные параметры АТС уже на начальных стадиях проектирования.

Для проведения виртуальных испытаний кабин АТС наилучшим образом подходят численные конечно-элементные методы динамического моделирования, реализуемые, например, в программных пакетах LS-DYNA, MSC.Marc и ANSYS. Они позволяют создавать модели поведения материалов в области упруго-пластической деформации и проводить анализ процесса испытаний во времени.

В качестве исходных данных используется трехмерная геометрическая модель кабины. Для проведения виртуального моделирования кабины на основе ее трехмерной модели средствами пакета формируется конечно-элементная модель. Конструкция кабины содержит оболочку кабины, усилители, предназначенные для повышения прочности, и подвеску (рис. 3). В соответствии с Правилами при всех видах испытаний моделируется крепление кабины к неподвижной раме автомобиля через подвеску кабины (рис. 4).

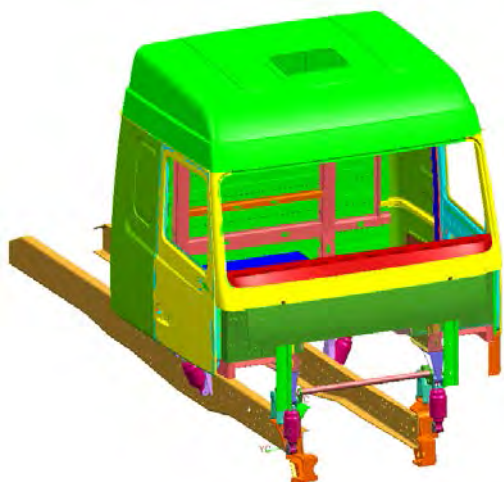


Рис. 3. Геометрическая модель кабины

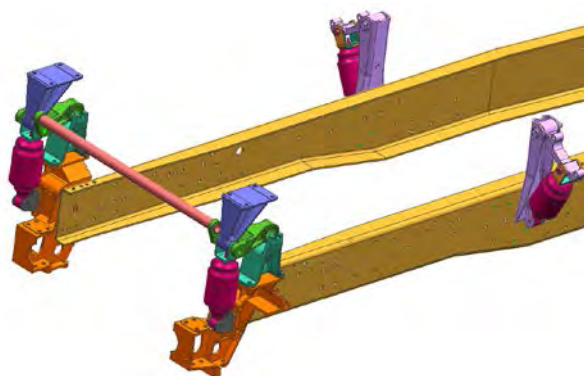


Рис. 4. Геометрическая модель подвески кабины

Для оболочки кабины можно использовать изотропную билинейную упруго-пластичную модель материала. Она с достаточной точностью описывает деформации, возникающие при испытаниях на безопасность.

В качестве ударной нагрузки для модели кабины моделируется цилиндрический маятник, выполненный из объемных конечных элементов. В ходе виртуальных испытаний маятник движется к фронтальной части кабины со скоростью 8,9 м/с. После соприкосновения с облицовкой кабины он деформирует ее, подвеску и детали кабины. Процесс соударения маятника с кабиной и ее деформация происходят достаточно быстро. Например, их длительность в ходе виртуального испытания кабины МАЗ-6430 составила 0,242 с (рис. 5). При этом в процессе испытаний происходит потеря маятником кинетической энергии от заданной изначально 40 кДж, из которых почти 16 кДж поглощается элементами кабины (рис. 6).

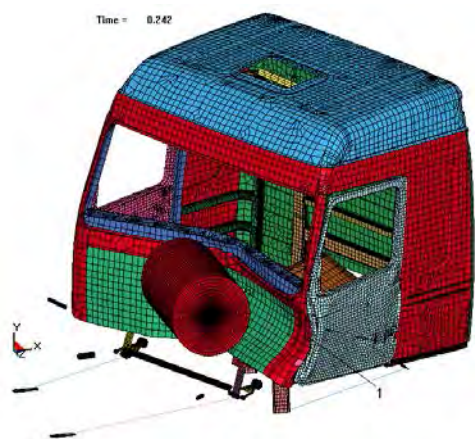


Рис. 5. Результаты виртуального испытания на удар кабины спереди

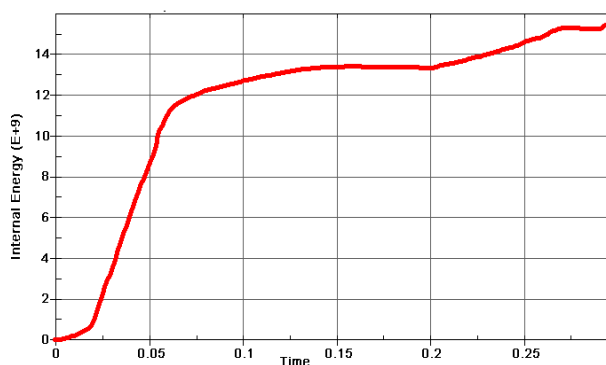


Рис. 6. График поглощения моделью кабины энергии при ее испытании на удар спереди

Продольный размер внутреннего пространства кабины в ее нижней части на стороне водителя до испытаний был равен 1,963 м, а по окончании – 1,653 м, т.е. 84,2% от начального размера или уменьшился на 0,31 м. Следует отметить, что размеры жизненного пространства кабины по высоте и ширине не изменились. Наиболее нагруженные места в кабине находятся в зоне левых нижних усилителей кабины. Область с наиболее сильной пластической деформацией для кабины находится в зоне левой двери.

Установлено, что для кабины МАЗ-6430 максимальное значение эффективного напряжения $8,6 \cdot 10^8$ Па получил элемент, находящийся на левом нижнем усилителе. Рассмотрение результатов моделирования по максимальному главному напряжению показало, что его наибольшее значение $9,1 \cdot 10^8$ Па также относится к левому нижнему усилителю. Места наиболее вероятного разрушения в кабине располагаются в зонах с наибольшими деформациями.

Анализ результатов приведенного виртуального краш-теста показывает, что создание пусть и унифицированных цельнометаллических кабин является не самым лучшим решением их конструктивного исполнения. В частности, внесение любых изменений и дополнений в конструкцию кабины непосредственно сказывается на ее прочности и соответствии Правилам ЕЭК ООН №29. Это указывает на то, что целесообразно пересмотреть подходы к их конструктивному исполнению.

Более прогрессивным на этом фоне выглядит использование каркасно-панельных конструкций. Данный подход позволяет отработать каркас кабины на соответствие Правилам, обеспечив безопасность и минимизировав при этом его массу. В дальнейшем на каркас крепятся облицовочные панели, создающие выбранное стилевое решение и обеспечивающие заданные аэродинамические характеристики.

Кроме того, установка наружной и внутренней облицовки позитивно скажется на улучшении прочности всей конструкции кабины. При этом, принимая во внимание перспективы использования композитных, стеклопластиковых и других материалов, изготовление из них облицовок не приведет к существенному увеличению общей массы кабины. Благодаря данному подходу производители смогут удешевить стоимость кабины и предложить покупателю выбор большого разнообразия вариантов дизайна экстерьера грузового автомобиля.

Результаты исследований **аэродинамического сопротивления** автопоездов различных конструктивно-компоновочных схем свидетельствуют, что среднее значение коэффициента сопротивления всех составляющих (величины расстояния между задней стенкой кабины и передней стенкой полуприцепа, длины кабины, угла бокового обтекания воздушного потока и др.) для автомобилей с кабиной над двигателем на 8% выше, чем для автомобилей с расположением кабины за двигателем. Более благоприятные характеристики у последних за счет ступенчатости формы, обеспечивает более плавное обтекание потоком воздуха. Тем не менее, наибольшее распространение получила компоновка с кабиной над двигателем в силу компактности всего автопоезда.

Данное обстоятельство указывает на зависимость значения коэффициента лобового сопротивления от геометрии лобовой поверхности этого объема и дизайна формы. Весьма существенное влияние на величину коэффициента лобового сопротивления оказывает величина пространства между задней стенкой кабины и передней плоскостью полуприцепа. Коэффициент лобового сопротивления уменьшается в значительной степени с уменьшением этого расстояния. Однако исключение этого пространства является наиболее сложной задачей в достижении высоких аэродинамических качеств седельного автопоезда, т.к. минимальные размеры этого пространства определены нормативными документами. Наиболее перспективным альтернативным решением явилось бы исключение этого «свободного» пространства в пользу аэродинамических характеристик и грузоподъемности автопоездов.

Второй составляющей проблемы «свободного» пространства в обеспечении высоких аэродинамических характеристик являются «сопрягающие» размеры и форма полуприцепа. Высокие аэродинамические характеристики, достигнутые в форме тягача не могут быть реализованы при агрегатировании его с полуприцепами различных видов и формы. Оптимальное решение возможно только при разработке формы полуприцепа в тесной взаимосвязи по всем параметрам с формой тягача, как единой композиционно-пластической структуры.

При движении АТС в окружающей воздушной среде происходит сжатие набегающего потока воздуха в передней части автопоезда. В результате здесь создается область повышенного давления. Под его влиянием струйки воздуха устремляются к задней части автопоезда. Скользя по его поверхности, они обтекают контур транспортного средства. Однако в некоторый момент начинает проявляться явление отрыва элементарных струек от обтекаемой ими поверхности и образования в этих местах завихрений. В задней части автопоезда воздушный поток окончательно срывается с кузова АТС. Это способствует образованию здесь области пониженного давления, куда постоянно осуществляется подсос воздуха из окружающего воздушного пространства. За счет различия давлений воздуха впереди и сзади автопоезда создается сила лобового сопротивления. Чем позже происходит срыв воздушного потока с обтекаемой поверхности и соответственно меньше область пониженного давления, тем меньшей будет и сила лобового сопротивления.

Оседание грязи на поверхности автопоезда следует рассматривать с учетом двух аспектов. Во-первых, загрязнение фар, сигнальных фонарей, а также стекол в значительной степени отражается на безопасности. Вторым аспектом данной про-

блемы является эстетика. Загрязнение больших площадей боковых поверхностей автопоезда, особенно в зонах входа в кабину и дверных ручек, снижает его потребительские качества.

В последние десятилетия в связи с мощным развитием компьютерной техники и компьютерных технологий существенно расширились возможности численного расчета и анализа прикладных задач отрывных течений. Для этих целей можно воспользоваться пакетами программ типа Fluent. Для повышения точности моделирования сетка на поверхности автопоезда выполняется более мелкой с использованием квадратных и треугольных ячеек. В остальной части расчетной области могут применяться сетки с тетрагексагональными и гибридными ячейками.

Исследование аэродинамики автопоезда возможно производить посредством моделирования турбулентного обтекания с помощью уравнений неразрывности и Рейнольдса [2, 3]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right]$$

где $\overline{u'_i u'_j}$ – Рейнольдсовы напряжения, которые замыкаются на основе гипотезы Буссинеска [3, 4]. Для замыкания использовалась SST- $k-\omega$ модель Ментера [3, 4]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{P}_k - \beta^* \omega k,$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\alpha}{\nu_t} P_k - \beta \omega^2 + (1 - F_1) 2 \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

Здесь член генерации энергии турбулентности определен, как $\tilde{P}_k = \min(P_k, 10\beta^* \omega k)$,

где P_k задается выражением $P_k = \left[\nu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$. Функция смешения F_1 вычисляется, как $F_1 = \tanh(\arg_1^4)$, где справедливы соотношения:

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right],$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-10} \right).$$

Турбулентная вязкость вычисляется, как

$$\nu_t = \min \left(\frac{k}{\omega}, \frac{a_1 k}{|S_{ij}| F_2} \right),$$

где $|S_{ij}| = \sqrt{2s_{ij}s_{ij}}$ – модуль тензора скоростей деформации, константа $a_1 = 0.31$, а

вторая функция смешения $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$ при $\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right)$. Константы

модели $\sigma_{k1} = 1.176$, $\sigma_{\omega 1} = 2.0$, $\alpha_1 = 0.5532$, $\beta_1 = 0.075$, $\sigma_{k2} = 1.0$, $\sigma_{\omega 2} = 1.168$, $k = 0.41$, $\alpha_2 = 0.4403$, $\beta_2 = 0.0828$, $\beta^* = 0.09$.

Размеры расчетной области принимаются в зависимости от геометрических размеров исследуемого объекта. Для реализации условий движения автопоезда в неограниченном пространстве внешние границы расчетной области выбираются достаточно далеко от зон возмущения потока. В остальной части расчетной области реко-

мендуется использование сетки с тетрагексагональными и гибридными ячейками. Общая мощность сетки порядка нескольких миллионов ячеек позволяет, с одной стороны, провести моделирование на современном компьютере за приемлемое время, а с другой – повторить геометрию реального автопоезда в необходимых деталях, достаточных для адекватного натурным испытаниям моделирования с учетом вращения колес и движения дороги относительно автопоезда.

В качестве примера рассмотрим результаты моделирования движения автопоезда на скорости 80 км/ч. При иных скоростях картина обтекания будет аналогична, за исключением величины исследуемых характеристик (давления, скорости, турбулентной вязкости).

На рис. 7 приведено распределение продольной компоненты скорости в вертикальной срединной плоскости, где отчетливо выделяются зоны торможения потока на лобовых поверхностях кабины, а также кузова автомобиля и прицепа. Здесь значения продольной компоненты скорости уменьшаются, а давление возрастает. Отрыв потока на крыше кабины происходит достаточно гладко, форма пограничного слоя монотонно растущая, без завихрений и обратных потоков, интенсивного вихреобразования не наблюдается.

В пространстве между кабиной и кузовом грузового автомобиля вихреобразование практически отсутствует, а вихревая зона организуется внизу между кабиной и кузовом грузового автомобиля. Основные проблемные зоны вихреобразования на поверхности кабины на боковой ее поверхности снизу на уровне ступенек и сверху на уровне верхнего края лобового стекла. На крыше кабины имеется система относительно мелкомасштабных катящихся вихрей.

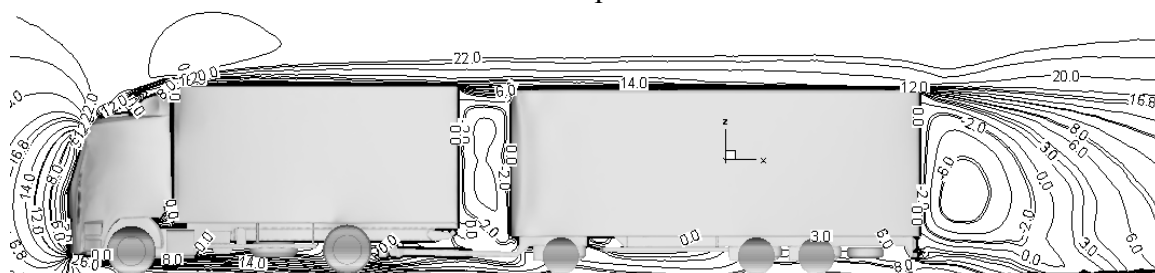


Рис. 7. Распределение продольной скорости в вертикальной срединной плоскости при движении автопоезда со скоростью 80 км/ч

Проведенное численное моделирование аэродинамики автопоезда по достаточно подробной геометрической модели с учетом рельефа днища, вращения колес и движения дороги относительно автопоезда позволило выявить основные проблемные зоны вихреобразования – на боковой поверхности кабины снизу на уровне ступенек и сверху на уровне верхнего края лобового стекла, в кормовой части прицепа и в зазоре между кузовом автомобиля и прицепа. Данный факт отражается в значениях коэффициентов давления и общего аэродинамического сопротивления. Для режимов движения при различных скоростях до 90 км/ч коэффициент общего аэродинамического сопротивления незначительно отличается от коэффициента сопротивления давления и обусловлен сопротивлением формы. Рассчитанная величина коэффициента общего аэродинамического сопротивления в диапазоне скоростей 30–90 км/ч практически постоянна и составляет 0,76.

Полученные данные могут быть использованы при проведении работ по аэродинамической оптимизации не только конструкции автопоезда в целом, но и внешних аэродинамических устройств в отдельности. Прежде всего, это относится к кабине прицепного автопоезда и зазорам между элементами автопоезда. Улучшение обтекания элементов кабины (зеркала, ступени, обтекатель и т. д.) также является

очень важным элементом оптимизации, поскольку четверть общего сопротивления прицепного автопоезда составляет сопротивление кабины [1, 4, 5].

С учетом рассмотренных особенностей обеспечения стилевых, прочностных и аэродинамических свойств следует отметить, что при создании современного АТС крайне важен синтез параметров конструкции экстерьера по комплексу критериев, в первую очередь определяющих прочностные, аэродинамические и эстетические свойства изделия. Для реализации названного подхода необходимо выработать алгоритм с параллельной структурой проектирования кабин перспективных транспортных средств, который отразит взаимосвязь и приоритетность используемых критериев этих свойств для достижения наилучшего результата (рис. 8).

Источником для разработки технических предложений (позиция 1) являются требования к дизайну автопоезда, параметрам безопасности и аэродинамики. По нашему мнению целесообразно, чтобы коэффициент аэродинамического сопротивления не превышал заданной величины, поскольку любое его увеличение сразу приводит к росту расхода топлива и снижению экономической эффективности перевозки грузов. Данное требование отражено в блоке 7.

В отношении безопасности кабин следует сказать, что в отличие от аэродинамического сопротивления, уменьшение которого только приветствуется, прочность кабины нельзя уменьшать, но одновременно и нельзя увеличивать (позиция 8), поскольку ее увеличение ведет к перерасходу материала и удорожанию кабины.

Как следует из рис. 8, на основании технического предложения осуществляется параллельная разработка дизайна кабины (блок 2) и ее каркаса (блок 3). Данные, полученные в ходе выполнения работ блока 3, являются основой для создания 3D-моделей оболочки кабины. Итогом завершения поиска стилевых решений кабины и конструктивных решений для ее каркаса является проведение их виртуальных испытаний с анализом показателей аэродинамики и прочности (блоки 5 и 6). Полученные результаты могут не устроить разработчиков и потребуют, например, для дизайна не только доработки внешних форм, но и уточнения конструкции каркаса. По этой причине блоки 7 и 8 имеют по два выхода в случае получения решения с неудачным комплексом конструктивных параметров.

Если же полученное решение по совокупности стилевых, аэродинамических и прочностных характеристик устраивает разработчиков, следует переходить к разработке технического задания и конструкции кабины (блоки 9 и 10). Вместе с тем, данные стадии работ могут повлиять на изменение дизайна автопоезда. В этом случае потребуются вернуться к уточнению стилевых решений (блок 11).

После отработки конструкции кабины и решения вопросов дизайна (блоки 10 и 11), следует повторить комплекс виртуальных испытаний с учетом реальных конструктивных особенностей (блоки 12...15). Только после их успешного завершения следует переходить к изготовлению опытного образца и физическим испытаниям кабины для подтверждения всех ее заданных характеристик.

Данный подход позволит повысить качество проектирования, сократить их сроки, а также средства на доводку конструкции кабин перспективных автомобилей.

Таким образом, для сокращения сроков и финансовых затрат на разработку перспективных автотранспортных средств целесообразно использовать методы компьютерного проектирования и виртуальных испытаний разрабатываемой конструкции кабин с учетом критериев дизайна, аэродинамики и прочности.

Одним из перспективных подходов при создании кабин с применением компьютерного проектирования является использование каркасно-панельных конструкций. При этом прочность кабины будет обеспечиваться за счет каркаса, а применение облицовочных панелей позволит создать современный дизайн и оптимизировать аэродинамические характеристики автопоезда. Данный подход позволяет осуще-

свить технически обоснованный выбор геометрических форм и параметров кабин, а также материалов их исполнения на основе удовлетворения комплекса требований по эстетике, аэродинамике и действующих норм по безопасности.

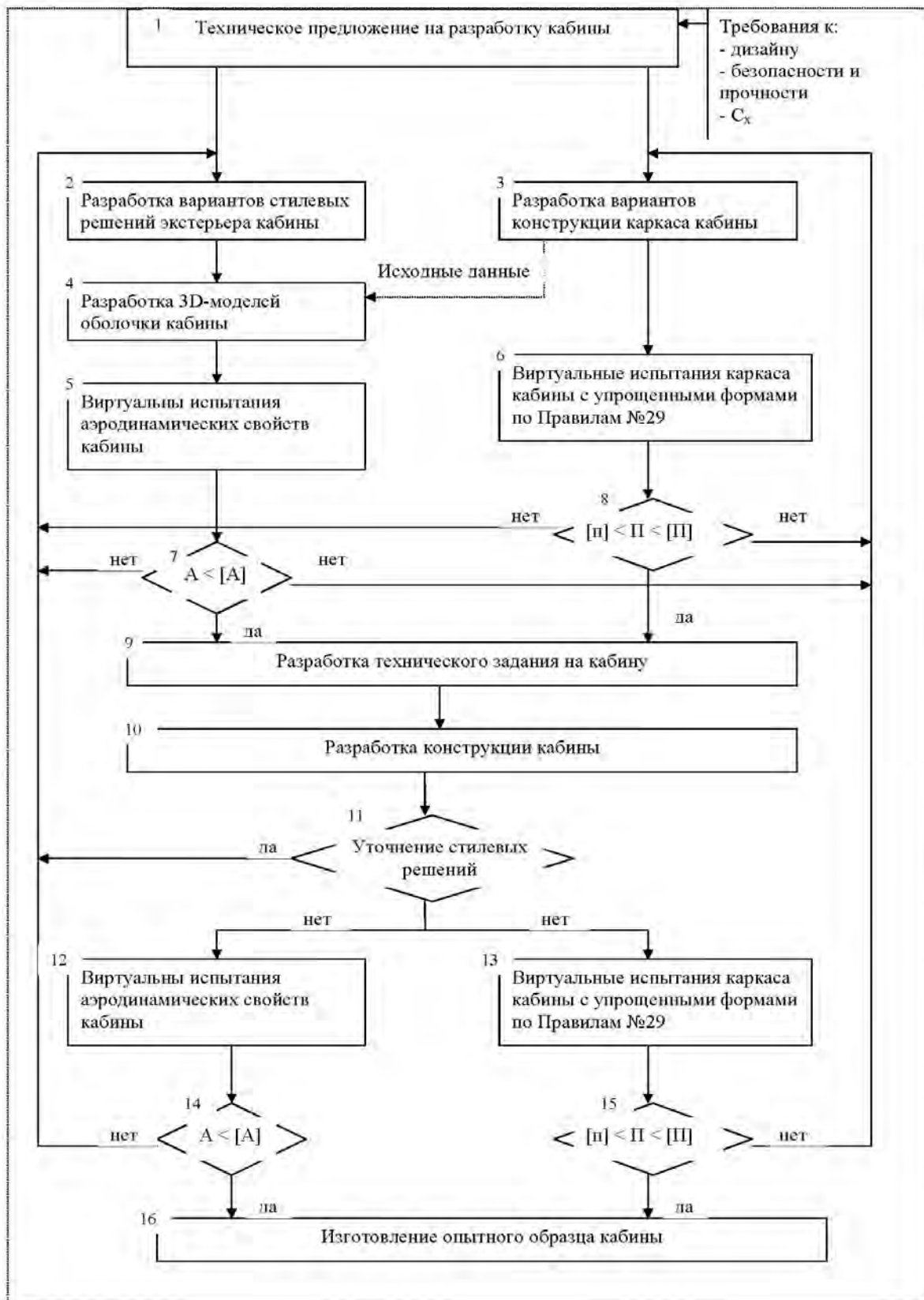


Рис. 8. Алгоритм проектирования кабин

ЛИТЕРАТУРА

1. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С. Аэродинамика колесного транспорта / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий // Минск: НИРУП "Белавтотракторостроение", 2001. – 368 с.
2. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев // СПб: Балтийский Государственный технический университет, 2001. – 108 с.
3. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев // СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
4. Wood R., Bauer S. Simple and low-cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer trucks / R. Wood, S. Bauer // SAE International Report. – 2003. – No. 01-3377. – 18 p.
5. Kopp S. The aerodynamic development of the new MAN trucks TGX & TGS / S. Kopp // MAN Nutzfahrzeuge AG Report. – 2008. – No. F2008-04-001. – 7 p.