УДК 656.085.11 DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-107-120

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО 3D - ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМА ИНЕРТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ АВТОМОБИЛЬНОЙ ЛОГИСТИКИ ПРЕДПРИЯТИЯ

**И. Д. Лубанов, Е. Ф. Ерофеевский**
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

*Современные предприятия горнодобывающей и строительной отраслей характеризуются добычей и переработкой полезных ископаемых, производства строительных материалов, выполнения земляных работ и транспортировки нерудных материалов осуществляется большое количество операций по погрузке и перевозке щебня, песка и других навалочных грузов. Большая часть таких операций выполняется с использованием карьерных и обычных самосвалов. В связи с этим точность определения количества перевозимого материала непосредственно влияет на достоверность производственного учета, эффективность использования транспортных средств и контроль материальных потоков предприятия.*

*Одной из ключевых задач при организации автомобильных перевозок сыпучих грузов является определение фактического количества материала, находящегося в кузове транспортного средства. В традиционной системе контроля данная задача преимущественно решается путем взвешивания автомобиля. Масса груза определяется как разность между массой загруженного и порожнего транспортного средства либо непосредственно регистрируется автомобильными весами. Такой подход позволяет достаточно эффективно контролировать массу перевозимого материала и широко применяется на промышленных предприятиях, карьерах, объектах строительства и в логистических комплексах.*

*Технологии не стоят на месте и эти отрасли постоянно развивают новые системы определения объема перевозимых грузов. Одной из таких систем является технология лазерного 3D – сканирования.*

*Ключевые слова: LaseTVM-3D-S, LaseTVM-3D-M, 2D-сканер, самосвал, сыпучий груз, объем, влажность.*

***Для цитирования:***

*Лубанов, И. Д. Исследование эффективности применения лазерного 3D - измерения объема инертных материалов в системе автомобильной логистики предприятия / И. Д. Лубанов, Е. Ф. Ерофеевский // Системный анализ и логистика. – 2026. – № 3(51). – с. 107-120. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-107-120.*

# RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF USING LASER 3D MEASUREMENT OF INERT MATERIAL VOLUME IN AN ENTERPRISE'S AUTOMOTIVE LOGISTICS SYSTEM

**I. D. Lubanov, E. F. Erofeevskiy**
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

*Modern enterprises in the mining and construction industries are characterized by the extraction and processing of minerals, the production of building materials, earthworks, and the transportation of non-metallic materials, which involve a large number of operations for loading and hauling crushed stone, sand, and other bulk cargoes. The majority of such operations are performed using mining and conventional dump trucks. In this regard, the accuracy of determining the amount of transported material directly affects the reliability of production accounting, the efficiency of vehicle utilization, and the control of the enterprise's material flows.One of the key tasks in organizing road transport of bulk materials is determining the actual amount of material located in the vehicle body. In traditional control systems, this problem is mainly solved by weighing the vehicle. The cargo weight is determined as the difference between the weight of the loaded and empty vehicle or is directly registered by truck scales. This approach allows for quite effective monitoring of the transported material weight and is widely applied at industrial enterprises, quarries, construction sites, and logistics complexes.Technologies do not stand still, and these industries are constantly developing new systems for determining the volume of transported cargo. One of such systems is the 3D laser scanning technology.*

*Keywords: LaseTVM-3D-S, LaseTVM-3D-M, 2D scanner, dump truck, bulk cargo, volume, moisture content.*

***For citation:***

*Lubanov, I. D. Research on the efficiency of using laser 3D measurement of inert material volume in an enterprise's automotive logistics system / I. D. Lubanov, E. F. Erofeevskiy // System analysis and logistics. – 2026. – № 3(51). – p. 107-120. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-107-120.*

## Введение

На сегодняшний день на рынке существуют различные технологии лазерного сканирования как отечественного, так и зарубежного производства. В данном исследовании

будет рассматриваться зарубежный программно-аппаратный комплекс LaseTVM (Truck Volume Measurement – лазерное измерение объема инертных материалов на грузовом автотранспорте) – это цифровая метрологическая платформа объективного учета объемного расхода инертных и навалочных материалов на грузовом автотранспорте (любые шоссейные или карьерные самосвалы), основанная на LiDAR-технологии Light Detection And Ranging лазерного 3D-сканирования и высокоточного измерения геометрических размеров и объема насыпи (лазерные автомобильные весы).

Цель исследования – разработать и обосновать методику оценки эффективности внедрения автоматизированного лазерного 3D-измерения объема сыпучих грузов в систему контроля автомобильных перевозок на предприятии горнодобывающей отрасли.

## 1. Исследование принципа работы лазерной 3D-технологии на примере LaseTVM – 3D

Существуют две модификации данного комплекса: стационарный LaseTVM-3D-S (Static) и динамический LaseTVM-3D-M (Motion).

В системе Static используются один высокоточный лазерный 3D-сканер, который подключается на П-образной опоре в зоне контрольно-измерительного прибора (КИП) объекта на высоте 7 метров над полосой движения автотранспорта. 3D-лазерный сканер состоит из 2 компонентов: 2D-лазерного сканера и поворотной платформы, которая приводится в движение серводвигателем.



Рис. 1. 2D-лазерный сканер LASE 3000D-C2-11x Series

2D-сканер определяет пространство только в одной плоскости и измеряет его в двумерных, радиальных координатах. При отражении волны ИК (инфракрасный) импульса от объекта определяется его положение за счёт данных о расстоянии и угле отклонения по каждой точке 2D плоскости. Сканирование производится в диапазоне поля обзора с углом 190° с удалением от объекта до 80 м на светлых поверхностях и до 40 м на тёмных. Сканер обеспечивает точность до 98 % в зависимости от объёма материала и размера фракции, при типовой погрешности 2 % (±1 % на каждое сканирование) и температуре эксплуатации от −40 °C до +50 °C. Также имеет срок службы до 10 лет (100 тыс. часов), обеспечивает автоматическую фильтрацию помех от дождя, снега, стекла, пыли, грязи, пара и тумана по технологии мультиэхо, а также оснащён функциями самодиагностики и автоматической калибровки.

Таблица 1 – Полный комплекс дополнительного оборудования для 3D-M и 3D-S

| **Наименование системы / модуля** | **Кол-во (шт.)** | **Описание и состав комплекта** |
|---|---|---|
| Видео-распознавание ГРЗ | 2 | HD-видеокамера фронтальной съемки (на въезд и на выезд) |
| RFID-регистрация | 1 | RFID-считыватель с комплектом меток |
| Фотоконтроль кузова | 1 | HD-видеокамера общей съемки (вид сверху) |
| Навигация водителей | 2 | Светофоры двухцветные (красный, зеленый) |
| Монтажная рама | 1 | П- или Г-образная рама (сборно-разборная конструкция) |
| Диспетчерская | 1 | КИП блок-контейнерного типа |
| Автономное электропитание | 1 | Дизель-генераторная станция |
| Печать квитанций | 1 | Монохромный принтер |
| Интернет-подключение | 1 | Точка доступа Wi-Fi |
| Бизнес-платформа | 1 | Учетная система 1С (синхронизация) |

Машина подъезжает в зону КИП и останавливается. Сканер производит серию волновых импульсов в ИК-спектре с длиной волны 905 нм по поверхности периметра кузова самосвала и принимает их обратно с отражением. Полученный массив данных автоматически направляется в модуль обработки ПК (инженерная станция). Там и происходит вычисление объема груза. 3D-сканирование кузова занимает не более 20 секунд и проводится как при въезде, так и при выезде самосвала, через графический интерфейс диспетчера. Static работает в режиме расчета объема приемки или отгрузки и предусматривает сопряжение распределенных КПП, когда въезд и выезд устроены в разных местах.

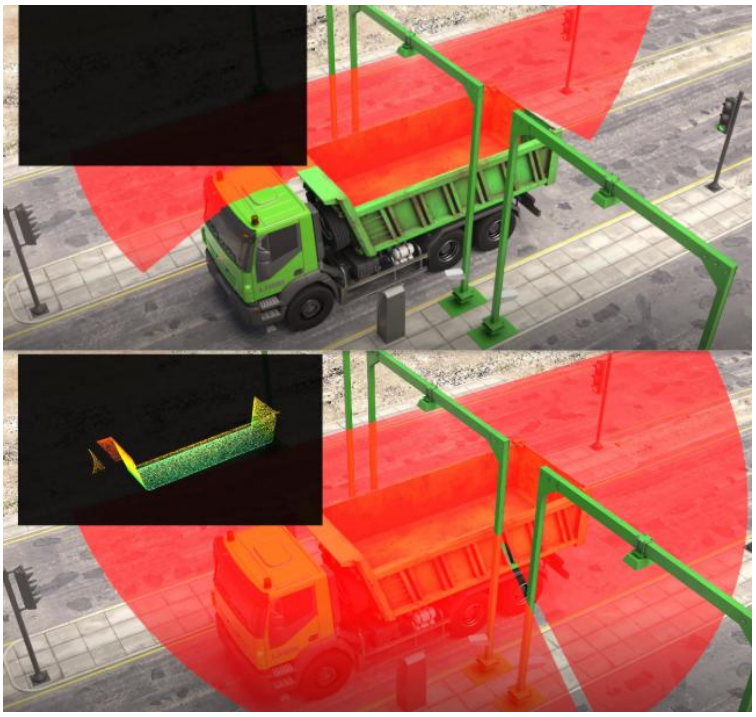


Рис. 2. Пример работы сканера Static на пустом самосвале

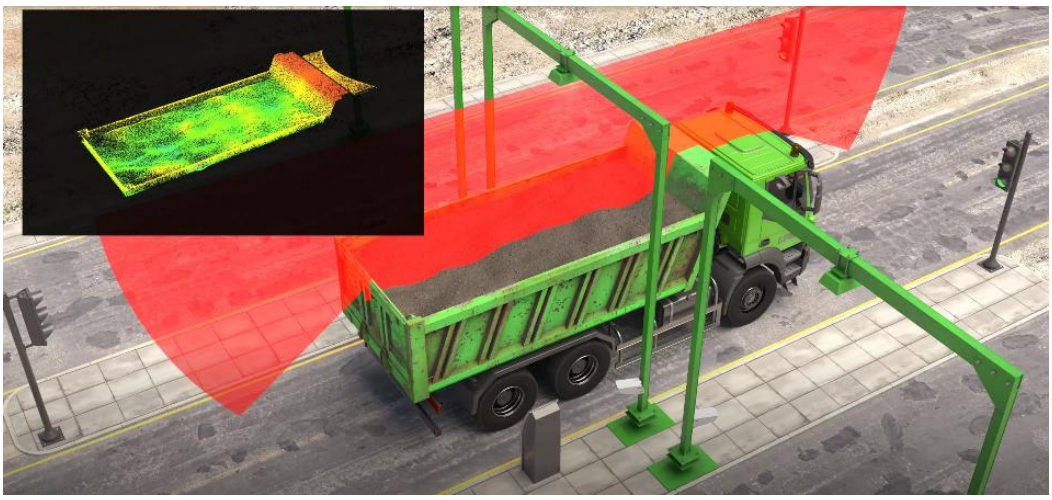


Рис. 3. Пример отсканированного самосвала с грузом

На рассмотренных примерах (рисунок 2 и 3) наглядно показано как система видит машину с грузом и без. Система запоминает модель пустого кузова и после прохода загруженного автомобиля сравнивает два трехмерных профиля и вычисляет фактический объем перевозимого груза.

В системе Motion работает в динамической схеме сканирования грузового автотранспорта – без остановки. Состоит из двух лазерных 2D-сканеров, плоскости сканирования которых взаимно перпендикулярны. Датчики сопряжены в общем конструктиве и подключаются также на П-образной опоре в зоне КИП объекта на высоте 12 м над полосой движения.

При медленном проезде самосвала под лазерным измерителем один 2D-сканер производит излучение в его продольной плоскости, а другой – в поперечной, образуя полную геометрическую 3D-модель кузова. Так же, как в стационарной схеме, объединение 3D-скан-профилей машины при ее въезде и выезде дает учетный объем навала. Эти расчеты производятся автоматически в инженерной станции через графический интерфейс диспетчера. Для обеспечения точности результата система требует от водителя двигаться с малой скоростью, не более 10 км/ч, прямолинейно, по выделенной полосе. Режимы работы такие же, как в модификации Static.

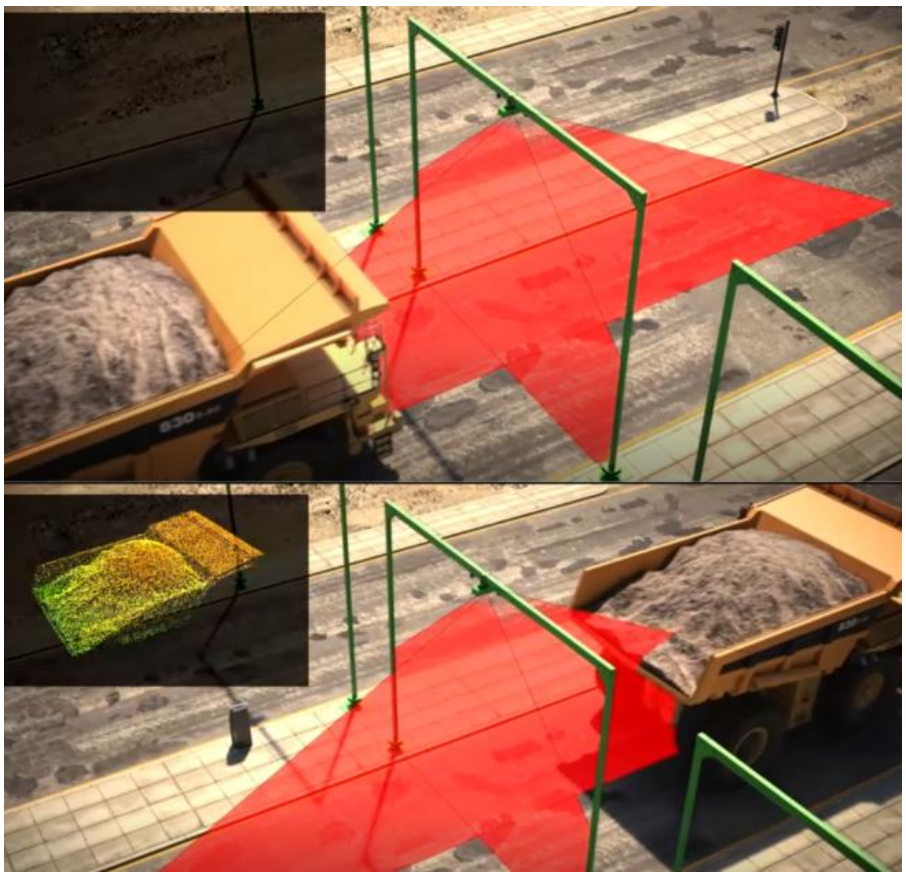


Рис. 4. Пример работы сканеры модификации Motion

## 2. Сравнительный анализ методов определения объема сыпучих грузов

Одна из ключевых задач добывающей отрасли – оптимизация коэффициента загрузки карьерного транспорта ($К_г$) в непрерывном рабочем цикле. Этот показатель рассчитывается как отношение фактически перевозимой массы груза к паспортной грузоподъемности машины:

$$K_Г = \frac{m_{факт}}{q_{пасп}} \quad (1)$$

Идеальное управление логистикой стремится к удержанию $К_г$ на уровне 1.0 (100%). Максимизация этого коэффициента обеспечивает рост объемов перевозимой породы и экономию дизельного топлива на тонно-километр.

Традиционно количество перевозимого сыпучего материала определяется с помощью автомобильных весов. В данном случае непосредственно измеряется масса груза, после чего его объем рассчитывается с учетом плотности материала:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2)$$

где (V) – объем груза, (m) – его масса, (p) – плотность материала. Основным недостатком такого подхода является необходимость использования достоверного значения плотности, поскольку при изменении характеристик сыпучего материала изменяется и результат пересчета массы в объем.

При расчете объема влажного груза стандартная формула усложняется. Влажность увеличивает массу, но почти не меняет сухой объем. Приведем основные добавочные

формулы и коэффициенты, которые используют в логистике и строительстве.

Корректировка на влажность (Расчет сухого веса). Вода увеличивает общую массу на весах, из-за чего чистый объем материала может быть завышен. Чтобы узнать реальный объем твердого вещества, сначала находят его сухую массу. Формула сухой массы:

$$m_{сух} = \frac{m_{вл}}{1 + \frac{W}{100}} \quad (3)$$

где $m_{вл}$ – масса влажного груза по весам (кг), W – влажность материала в процентах (%).

Формула итогового объема:

$$V = \frac{m_{сух}}{\rho_{сух}} \quad (4)$$

где $\rho_{сух}$ – насыпная плотность абсолютно сухого материала.

Именно это несовершенство измерений объясняет отраслевую статистику: усредненный коэффициент использования грузоподъемности говорит о том, что автосамосвалы часто недогружаются сухим веществом. Недогруз чистой породы составляет до 20 % и более (в 65–70 % транспортных циклах), из-за чего производится большее число груженых рейсов, увеличивается общий пробег, расход топлива, а также увеличивается периодичность обслуживания транспорта.

Лазерное 3D-измерение использует другой принцип. Система LaseTVM получает пространственные данные о кузове автомобиля и формирует его трехмерную модель. Путем сравнения моделей пустого и загруженного кузова определяется непосредственно объем перевозимого материала.

Но важно учитывать, что при полной загрузке объема кузова самосвала может нести под собой следующий риск перегруза из-за недоучета влажности перевозимого материала.

Таблица 2 – Сравнение традиционного весового и лазерного 3D-метода контроля

| Показатель | Автомобильные весы | LaseTVM |
|---|---|---|
| Измеряемая величина | Масса | Объем |
| Определение объема | Через плотность материала | Непосредственно по 3D-модели |
| Контроль формы навала | Нет | Да |
| Формирование 3D-модели | Нет | Да |
| Бесконтактное измерение | Нет | Да |

Таким образом, автомобильные весы и лазерное 3D-сканирование измеряют разные физические характеристики: весы – массу, а LaseTVM – объем. Поэтому наиболее рациональным является не противопоставление этих методов, а их совместное использование.

Результаты проведенного сравнения показывают, что лазерное 3D-измерение и традиционное взвешивание характеризуют разные параметры перевозимого груза. В связи с этим для оценки целесообразности внедрения лазерной системы необходимо учитывать не только технические характеристики оборудования, но и параметры транспортного процесса предприятия. Предлагаемая методика позволяет определить потенциальный эффект от применения лазерного 3D-контроля и оценить срок окупаемости затрат на его внедрение.

В качестве основных исходных параметров исследования принимаются годовой объем перевозимого материала, средняя загрузка одного транспортного средства, количество выполненных рейсов, интенсивность транспортного потока, стоимость перевозимого

материала, существующая погрешность учета и затраты на внедрение системы 3D-измерения.

Количество рейсов, необходимое для перемещения заданного годового объема материала, определяется выражением:

$$N_{год} = \frac{Q_{год}}{q_{рейс}} \quad (5)$$

где $N_{год}$ – количество рейсов за год, ед, $Q_{год}$ – годовой объем перевозимого материала, т; $q_{рейс}$ – средняя масса груза за один рейс, т.

Для определения годовой интенсивности, то есть количества рейсов за год, используется формула:

$$N_{год} = N_{сут} \times D \quad (6)$$

где $N_{сут}$ – среднее количество рейсов в сутки, ед.; D – количество рабочих дней в году.

Для определения потенциального объема материала, проходящего через систему контроля за расчетный период, используется выражение:

$$V_{год} = N_{год} \times V_{рейс} \quad (7)$$

где $V_{год}$ – общий объем перевозимого материала за год; м³; $V_{рейс}$ – средний объем груза одного рейса, м³.

При использовании традиционного метода определения объема через массу нужно использовать коэффициент плотности. В данном случае объем определяется по формуле (2)

Поскольку фактическая плотность сыпучего материала может изменяться, использование постоянного значения приводит к ошибкам при определении объема. Для оценки влияния данной ошибки в расчетах вводится показатель (e).

Перевезенный объем с учетом ошибки определяется как:

$$\Delta V = V_{год} \times e \quad (8)$$

где $\Delta V$ – объем материала, соответствующий ошибке учета, м³; e – ошибка учета

Для подсчета потенциальных потерь от ошибки учета за расчетный период определяется по формуле:

$$L = \Delta V \times C \quad (9)$$

где C – стоимость одного кубического метра материала, руб./м³.

Для оценки эффекта от внедрения лазерного 3D-измерения вводится величина ($e_{3D}$), характеризующая относительную ошибку после внедрения системы. Тогда потенциальные потери после внедрения определяются следующим образом:

$$L_{3D} = V_{год} \times e_{3D} \times C \quad (10)$$

Экономический эффект от снижения ошибки учета определяется как разность между потенциальными потерями до и после внедрения:

$$E = L - L_{3D} \quad (11)$$

Данный показатель характеризует расчетную величину годового эффекта, получаемого за счет повышения точности контроля количества перевозимого материала.

Для оценки экономической целесообразности внедрения системы необходимо учитывать совокупные затраты на приобретение, монтаж и интеграцию оборудования: средняя цена внедрения данной системы

$$С_{вн} = 4 \text{ млн рублей}$$

На основании рассчитанного экономического эффекта и первоначальных затрат определяется простой срок окупаемости:

$$T_{ок} = \frac{C_{вн}}{L_{3D}} \quad (12)$$

где $T_{ок}$ – срок окупаемости системы, лет.

Предложенная методика предполагает рассмотрение нескольких сценариев интенсивности транспортного потока. Это необходимо для определения зависимости экономического эффекта от количества выполняемых рейсов в сутки. В качестве расчетных сценариев рассматриваются низкая, средняя и высокая интенсивность движения самосвалов.

Для каждого сценария определяются количество рейсов, годовой объем перевозимого материала в зависимости от сезона, потенциальная ошибка учета, экономический эффект и срок окупаемости. Полученные результаты позволяют определить интенсивность самосвалов, при которой внедрение лазерного 3D-измерения станет экономически целесообразным.

Таким образом, данная математическая модель связывает технические параметры транспортного процесса с экономическими результатами от внедрения рассматриваемой лазерной системы учета. Её применение на предприятии позволяет перейти от общего анализа преимуществ к количественной оценке от внедрения.

## 3. Расчетный пример оценки эффективности применения лазерного 3D-измерения

Для количественной оценки эффективности применения лазерного 3D-измерения рассмотрим условное горнодобывающее предприятие, осуществляющее перевозку сыпучего материала автомобильным транспортом.

В качестве исходных условий принимается, что предприятие осуществляет перевозку сыпучего материала карьерными и дорожными самосвалами. Для расчета используется средняя масса груза одного транспортного средства 25,5 т (Самосвал КАМАЗ 65201), средняя насыпная плотность материала -1,54 т/м³(песок дробленный по ГОСТ 32730-2014), количество рабочих дней – 365 в год. Таким образом, расчетный объем одного рейса определяется выражением по формуле (2):

$$V_{рейс} = \frac{25,5}{1,54} \approx 16,559 м^3$$

Для оценки влияния интенсивности транспортного потока рассмотрим три расчетных сценария: 100, 250 и 500 рейсов в сутки.

$$N_{год1} = 100 \times 365 = 36500 \, рейсов$$

где $N_{год1}$ – первый сценарий количество рейсов в год при интенсивности 100 автомобилей в сутки

$$N_{год2} = 250 \times 365 = 91250 \, рейсов$$

$$N_{год3} = 500 \times 365 = 182500 \, рейсов$$

Соответствующий годовой объем перевозимого материала определяем из формулы (5)

$$Q_{год1} = 36500 \times 25,5 = 930750 т$$

$$Q_{год2} = 91250 \times 25,5 = 2326875 т$$

$$Q_{год3} = 182500 \times 25,5 = 4653750т$$

Годовой объем материала в кубических метрах определяется по формуле (7):

$$V_{год1} = 36500 \times 16,559 \approx 605864м^3$$

$$V_{год2} = 91250 \times 16,559 \approx 1511009м^3$$

$$V_{год3} = 182500 \times 16,559 \approx 3220018м^3$$

Результаты расчета исходных параметров представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные параметры расчетного примера

| Показатель | Сценарий 1 | Сценарий 2 | Сценарий 3 |
|---|---|---|---|
| Интенсивность, автомобилей/сутки | 100 | 250 | 500 |
| Рабочие дни, дней/год | 365 | 365 | 365 |
| Количество рейсов, рейсов/год | 36500 | 91250 | 182500 |
| Средняя масса груза, т/рейс | 25,5 | 25,5 | 25,5 |
| Годовой объем перевозки, т | 930750 | 2326875 | 4653750 |
| Средняя плотность, т/м³ | 1,54 | 1,54 | 1,54 |
| Объем одного рейса, | 16,559 | 16,559 | 16,559 |
| Годовой объем, м³ | 605864 | 1511009 | 3220018 |

Для дальнейшего расчета необходимо учитывать влияние влажности перевозимого материала на определение его объема с помощью весов для самосвалов. Так как при наличии влаги масса груза увеличивается, но фактический объем материала изменяется значительно меньше. Поэтому использование постоянной плотности без учета влажности может приводить к завышению посчитанного объема. При отсутствии влаги расчетный объем одного рейса составляет 16,559 м³. Рассмотрим груз в зависимости от сезона с 5%, 10%, 15%, 20% влажности для оценки влияния на объем.

При наличии влаги сначала определяется масса сухого вещества по формуле (3):

$$m_{сух5\%} = \frac{25,5}{1 + \frac{5}{100}} = 24,286т$$

После определения сухой массы рассчитывается объем сухой составляющей по формуле (4):

$$V = \frac{24,286}{1,54} = 15,770м^3$$

Результаты подсчета сухого объема представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Влияние влажности материала на расчетный объем

| Влажность, % | Масса влажного груза, т | Масса сухого вещества, т | Расчетный объем сухого вещества, м³ | Расхождение с объемом при 0 %, м³( $V_{рас}$) | Сезон |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 25,5 | 24,286 | 15,77 | 0,79 | Лето |
| 10 | 25,5 | 23,18 | 15,051 | 1,508 | Осень |
| 15 | 25,5 | 22,173 | 14,398 | 2,161 | Зима |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 25,5 | 21,25 | 13,798 | 2,761 | Весна |

Рассмотрим влияние сезона на отклонение объема. Возьмем что в каждом сезоне имеем следующее количество дней: зима – 90 дней; весна – 92 дня; лето – 92 дня; осень – 91 день. Тогда получим при интенсивности автомобилей 100 в сутки:

$$N_{сезон} = N_{сут} \times D_{сезон} = 100 \times 90 = 9000 \, рейсов$$

Таблица 5– Количество рейсов в день

| Сезон | Дней | Рейсов при 100 авто/сутки | Рейсов при 250 авто/сутки | Рейсов при 500 авто/сутки |
|---|---|---|---|---|
| Зима | 90 | 9 000 | 22500 | 45000 |
| Весна | 92 | 9 200 | 23000 | 46000 |
| Лето | 92 | 9 200 | 23000 | 46000 |
| Осень | 91 | 9100 | 22750 | 45500 |

После это для каждого сезона рассчитаем:

$$\Delta V_{сезон(зима)100} = N_{сезон} \times V_{рас} = 9000 \times 2{,}161 = 19449 м^3$$

И затем рассчитываем сезонные потери:

$$L_{сезон(зима)100} = \Delta V_{сезон} \times C = 19449 \times 500 = 9724500 \, рублей$$

После подсчетов всех сезонов рассчитаем годовые потери:

$$L_{год} = L_{сезон(зима)} + L_{сезон(лето)} + L_{сезон(весна)} + L_{сезон(осень)}$$

Общие результаты подсчета представлены в таблице 6 и 7

Таблица 6 – Количество перевозимого объема в сезон

| Сезон | $\Delta V_{сезон}$ 100 рейсов,м³ | $\Delta V_{сезон}$ 250 рейсов,м³ | $\Delta V_{сезон}$ 500 рейсов, м³ |
|---|---|---|---|
| Зима | 19449 | 48622,5 | 97245 |
| Весна | 25401,2 | 63503 | 127006 |
| Лето | 7268 | 18170 | 36340 |
| Осень | 13722,8 | 34307 | 68614 |
| Год $\Delta V_{год}$ | 65841 | 164603 | 329205 |

Таблица 7 – Количество сезонных и годовых потерь

| Сезон | Сезонные потери $L_{сезон}$ 100 рейсов, рублей | Сезонные потери $L_{сезон}$ 250 рейсов, рублей | Сезонные потери $L_{сезон}$ 500 рейсов, рублей |
|---|---|---|---|
| Зима | 9724500 | 24311250 | 48622500 |
| Весна | 12700600 | 31751500 | 63503000 |
| Лето | 3634000 | 9085000 | 18170000 |
| Осень | 6861400 | 17153500 | 34307000 |
| Годовые потери | 32920500 | 82315250 | 164602500 |

Полученные результаты показывают, что изменение влажности материала оказывает существенное влияние на результат определения объема при использовании весового измерения. Например: при влажности 5 % расхождение составляет 0,79 м³ на один рейс.

Для сравнения с лазерным 3D-методом примем погрешность измерения ±1 %, так как она заявлена в технических характеристиках LaseTVM. При расчетном объеме одного рейса 16,559 м³, перевезенный объем с учетом ошибки определяется по формуле (8):

$$\Delta V_{рас3D} = 16,559 \times 0,01 = 0,16559 м^3$$

Полученную погрешность необходимо перенести с одного рейса на годовой объем перевозок. Для этого количество рейсов в каждом расчетном сценарии умножается на абсолютную погрешность одного измерения:

$$\Delta V_{3D,год} = N_{год} \times \Delta V_{рас3D}$$

Для сценария с интенсивностью 100 автомобилей в сутки:

$$\Delta V_{3D,год} = 36500 \times 0,16559 = 6044,035 м^3$$

Для сценария с интенсивностью 250 автомобилей в сутки:

$$\Delta V_{3D,год} = 91250 \times 0,16559 = 15110,0875 м^3$$

Для сценария с интенсивностью 500 автомобилей в сутки:

$$\Delta V_{3D,год} = 182500 \times 0,16559 = 30220,175 м^3$$

Сравнения результатов весового и лазерного методов представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Сравнение годового расхождения при определении объема

| Интенсивность, автомобилей/сутки | Традиционный метод, м³/год | LaseTVM, м³/год | Снижение расхождения, м³/год |
|---|---|---|---|
| 100 | 65841 | 6044,035 | 59796,965 |
| 250 | 164603 | 15110,0875 | 149492,9125 |
| 500 | 329205 | 30220,175 | 298984,825 |

Из таблицы 8 видно, что при всех рассматриваемых сценариях интенсивности расчетное расхождение для 3D-сканирования существенно меньше, чем для весового метода. Для оценки экономического эффекта используется формула (9):

$$L_{3D(100)} = (\Delta V_{год} - \Delta V_{3D,год}) \times C = 59796,965 \times 500 \approx 29898483 рублей$$
$$L_{3D(250)} = 149492,9125 \times 500 \approx 74746457 рублей$$
$$L_{3D(500)} = 298984,825 \times 500 \approx 149492413 рублей$$

Таблица 9 – Расчетный экономический эффект от применения LaseTVM

| Интенсивность, автомобилей/сутки | Расхождение традиционного метода, м³/год | Расхождение LaseTVM, м³/год | Снижение расхождения, м³/год | Расчетный экономический эффект, руб./год |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 65 841 | 6 044,0335 | 59 797,965 | 29 898 483 |
| 250 | 164 603 | 15 110,0875 | 149 493,9125 | 74 746 457 |
| 500 | 329 205 | 30 220,175 | 298 985,825 | 149 492 413 |

Для оценки срока окупаемости используется принятая ранее стоимость внедрения системы:

$$C_{вн} = 4000000\,рублей$$

Для трех сценариев автомобилей в сутки, рассчитаем срок окупаемости 3D-сканера по формуле (12):

$$T_{ок,100} = \frac{4000000}{29898483} = 0,13года = 1,5месяца$$

$$T_{ок,250} = \frac{4000000}{74746457} = 0,054года = 20дней$$

$$T_{ок,500} = \frac{4000000}{149492413} = 0,027года = 10дней$$

Результаты расчета дают понять, что с увеличением интенсивности рейсов расхождение весового метода возрастает, что приводит к увеличению экономического эффекта от внедрения лазерного 3D-измерения на предприятии. Использование 3D-сканирования позволяет снизить годовое расхождение объема. В отличие от метода пересчета массы, этот подход не требует постоянной корректировки данных в зависимости от меняющейся влажности материала.

Однако внедрение системы 3D-сканирования нужно рассматривать не как замену весового метода, а как эффективное дополнение к нему. Совместное использование позволяет сопоставлять массовые и объемные характеристики каждого транспортного цикла. Что в свою очередь сводит к минимуму влияние сезонных и погодных факторов, обеспечивая максимальную точность учета вывозимого материала.

**Заключение**

Проведенный анализ показывает, что лазерное 3D-сканирование является перспективной технологией контроля объема сыпучих материалов при автомобильных перевозках. Применение LaseTVM позволяет непосредственно получать геометрические характеристики навала, автоматизировать процесс измерения и снизить зависимость результата от ручной обработки данных. Возможность интегрирования данной технологии в различные 1С системы позволяет предприятию наиболее точно рассчитывать вывезенный или привезенный материал каждым самосвалом.

Рассмотренный весовой метод обеспечивает надежное определение массы груза, однако проведенные расчеты показали его ограниченность при определении объема материала. Так при изменении влажности от 5 до 20 % расчетное расхождение объема увеличивается с 0,79 до 2,761 м³ на один рейс. Исходя из этого использование только весового метода влечет за собой потерю приобретенных предприятием кубометров груза или недополученных в следствии неправильного расчета объема по массе.

В то же время использование только лазерного 3D-сканирования также не позволяет полностью отказаться от весового контроля, поскольку система определяет геометрический объем и по нему может автоматически высчитать массу, но из-за влажности может сделать это с ошибкой. Поэтому при изменении плотности и влажности материала одного объема недостаточно для определения фактической массы груза.

Наиболее рациональным решением является совместное применение двух методов. Весовой контроль позволяет определять массу груза, а лазерное 3D-сканирование – непосредственно его объем. Их объединение позволяет сопоставлять массовые и объемные показатели, учитывать влияние изменения влажности материала и повышать достоверность контроля транспортных операций. Таким образом, лазерное 3D-измерение целесообразно рассматривать не как полную замену взвешивания, а как дополнительный измерительный инструмент, расширяющий возможности существующей системы учета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Семенов М. А., Большунова О. М., Гаврилов Ю. А. Автоматический контроль загрузки карьерных автосамосвалов [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskiy-kontrol-zagruzki-kariernyh-avtosamosvalov/viewer (дата обращения: 20.08.2026).
2. Лавренко С. А., Шорников В. В., Ботян Е. Ю., Пушкарев А. Е., Шмидт И. В. Взвешивание самосвалов как инструмент повышения эффективности эксплуатации погрузочно-доставочной техники [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vzveshivanie-samosvalov-kak-instrument-povysheniya-effektivnosti-ekspluatatsii-pogruzochno-dostavochnoy-tehniki (дата обращения: 20.08.2026).
3. Песок намывной крупный навалом [Электронный ресурс]. – URL: https://spb.blizko.ru/products/124958623-pesok_namyvnoy_krupny_navalom (дата обращения: 20.08.2026).
4. LaseTVM – 3D-объем сыпучих грузов на автотранспорте [Электронный ресурс]. – URL: https://lase-tvm.ru/ (дата обращения: 20.08.2026).
5. LASE 3000D-C2-11x Series: технический паспорт. Лазерный 3D-сканер [Электронный ресурс]. – URL: https://lase-tvm.ru/wp-content/uploads/2026/05/ds_LASE_3000D-C2-11x-series_RU.pdf (дата обращения: 20.08.2026).
6. LASE 2000D-11x Series: технический паспорт. Лазерный 2D-сканер [Электронный ресурс]. – URL: https://lase-tvm.ru/wp-content/uploads/2026/05/ds_Lase-2000D-11x-series_RU.pdf (дата обращения: 20.08.2026).
7. LaseTVM-3D-M – Truck Volume Measurement (Motion) [Электронный ресурс]: видеоматериал. – URL: https://rutube.ru/video/26683346657abb745235558479586fe6/?r=wd (дата обращения: 20.08.2026).
8. LaseTVM-3D-S – Truck Volume Measurement (Static) [Электронный ресурс]: видеоматериал. – URL: https://rutube.ru/video/b46c7e2dd7d0b32507576c9fd0234994/?r=wd (дата обращения: 20.08.2026).
9. Измерение объема груза. Сканер. Программно-аппаратный комплекс «ВесТэк» [Электронный ресурс]. – URL: https://zvtvestek.ru/scaner-lidar/ (дата обращения: 20.08.2026).
10. Шилов И. Высокоточное лазерное 3D-измерение объема сыпучих материалов на грузовом транспорте [Электронный ресурс]. – URL: https://techinform-press.ru/articles/vysokotochnoe-lazernoe-3d-izmerenie-obema-sypuchikh-materialov-na-gruzovom-transporte (дата обращения: 20.08.2026).
11. Шилов И. Карьерные самосвалы: лазерный 3D-контроль погрузки и объема навала в динамике потока [Электронный ресурс]. – URL: https://zolteh.ru/tekhnika/karernye-samosvaly-lazernyy-3d-kontrol-pogruzki-i-obema-navala-v-dinamike-potoka/ (дата обращения: 20.08.2026).
12. Карьерные самосвалы: лазерный 3D-контроль погрузки и объема навала в динамике потока [Электронный ресурс]. – URL: https://dprom.online/mining/saiteks-tsifr-resheniya-lazer-3d-skanir-uim25/?erid=F7NfYUJCUneRJUHSyrff (дата обращения: 20.08.2026).
13. Песок дробленый по ГОСТ 32730-2014 от производителя [Электронный ресурс]. – URL: https://nsmural.ru/pesok-gost_32730-2014 (дата обращения: 20.08.2026).
14. LASE встречают в Кузбассе: лазерное 3D-измерение объема погрузки самосвалов на угольном разрезе [Электронный ресурс]. – URL: https://dprom.online/mtindustry/lase-vstrechayut-v-kuzbasse/ (дата обращения: 20.08.2026).



## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Лубанов Илья Дмитриевич**
Студент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: ilialubanov@gmail.com

**Ерофеевский Егор Федорович**
Студент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: erofeevskiy.egor34@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Lubanov Ilia Dmitrievich**
Student
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: ilialubanov@gmail.com

**Erofeevskiy Egor Fedorovich**
Student
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: erofeevskiy.egor34@mail.ru

*Дата поступления: 10.09.2026*
*Дата принятия: 11.09.2026*