

## Формализация коэффициента совокупных потерь при каскадной трансляции геометрических моделей

М. А. Серова

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** В работе рассматривается задача корректной передачи геометрических моделей между CAD-системами в контексте обеспечения непрерывности жизненного цикла изделия. Основное внимание уделено формализации коэффициента совокупных потерь при трансляции через промежуточные среды. Для учёта дублирования ошибок на последовательных этапах введён параметр  $\Delta$ , характеризующий долю пересечения потерь. Теоретический анализ показал, что  $\Delta$  ограничен интервалом между полной независимостью и полным дублированием ошибок.

Экспериментальная часть включала 110 опытов трансляции деталей и сборок с использованием нейтральных и специализированных форматов. Результаты демонстрируют высокие значения  $\Delta$ , что указывает на значительное пересечение потерь при последовательных трансляциях. Отмечено, что величина  $\Delta$  зависит от выбора формата, используемого геометрического ядра и сложности исходной модели. Полученные выводы подтверждают системный характер ошибок передачи и могут использоваться для прогнозирования совокупных потерь при практическом обмене данными между CAD-системами.

**Ключевые слова:** геометрическая модель; трансляция геометрической информации; CAD-системы; коэффициент потерь; пересечение потерь; нейтральные форматы.

## Formalization of the Cumulative Loss Coefficient in Multi-Step CAD Model Translation

М. А. Серова

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** This study addresses the challenge of reliable transfer of geometric models between different CAD systems, which is essential for maintaining product lifecycle continuity. The research focuses on formalizing the cumulative loss coefficient when models are translated through intermediate environments. To capture the overlap of errors occurring at successive stages, a parameter  $\Delta$  is introduced. Theoretical analysis shows that  $\Delta$  is bounded between two extremes: complete duplication of losses and their full independence.

The experimental part included 110 translation trials of parts and assemblies across CAD chains using both neutral (STEP, IGES) and proprietary formats. The results demonstrate consistently high values of  $\Delta$ , indicating a significant overlap of losses across translation steps. Moreover, the findings suggest that  $\Delta$  is influenced by the choice of format, the underlying geometric kernel, and the structural complexity of the model. These insights highlight the systemic nature of translation errors and provide a basis for predicting cumulative losses in practical scenarios of CAD data exchange.

**Keywords:** geometric model; geometric data translation; CAD systems; loss coefficient; loss overlap; neutral formats

### Введение

Проблема корректной трансляции геометрических моделей сохраняет высокую актуальность, поскольку для обеспечения полного жизненного цикла объектов необходимо передавать цифровые представления между различными программными средами. Особое значение данный процесс приобретает в ситуации роста актуальности построения полноценных цифровых двойников [1], что влечет за собой интеграции различных CAD-систем. На практике моделирование редко выполняется «с нуля»: зачастую требуется использование или доработка уже существующей геометрии с последующей интеграцией в более современную или специализированную среду.

Основные проблемы трансляции заключаются в несовпадении форматов обмена данными и различиях в способах их интерпретации экспортными узлами различных систем. В результате файлы одного и того же формата, созданные в различных средах, могут содержать неодинаковые структуры и приводить к потерям или искажениям данных [2]. Задачу трансляции геометрической модели из одной среды S1 в среду S2 целесообразно рассматривать как задачу поиска оптимального пути трансляции через промежуточную среду S3, обеспечивающую минимальные потери информации при трансляции. Особое внимание в работе уделяется количественной оценке этих потерь, что позволяет сравнивать различные маршруты трансляции и выявлять оптимальные варианты передачи геометрической информации.

### Постановка задачи

Для подтверждения гипотезы необходимо сопоставить величину потерь при прямой трансляции из S1 в S2 с потерями, возникающими при передаче через промежуточную среду S3. Прямые трансляции могут быть оценены эмпирически или спрогнозированы на основе экспериментальных данных [3]. Однако при построении математической модели, ориентированной на использование множества программных сред и форматов, требуется формализованная методология, описывающая механизм вычисления совокупных потерь на маршруте трансляции через промежуточные среды.

Для оценки качества трансляции необходимо прийти к математическому сравнению двух путей трансляции и выбора из них трансляции с наименьшими потерями.

$$q_{S1-S3-S2} < q_{S1-S2}.$$

Сложность оценки заключается в том, что совокупные потери трансляции через промежуточную среду  $q_{S1-S3-S2}$  не могут быть сведены к сумме потерь  $q_{S1-S3} + q_{S3-S2}$ , если не введены определённые допущения относительно характера накопления ошибок. В частности, требуется зафиксировать модель взаимодействия между потерями на каждом этапе трансляции – аддитивную, мультипликативную либо взвешенную в зависимости от семантической значимости передаваемых параметров.

### Теория

Рассмотрим частный случай независимости потерь, при котором ошибки, возникающие на участке трансляции S3-S2 не зависят от потерь на предыдущем участке и оцениваются как абсолютные. Для такой ситуации применим некоторые элементы мультипликативного способа оценки качества, а именно способ агрегирования коэффициентов качества [4]. Коэффициент качества передачи K в общем случае указывает на долю корректно переданной информации. Тогда при независимых трансляциях общий коэффициент качества вычисляется как произведение коэффициентов отдельных этапов:

$$k_{S1-S3-S2} = k_{S1-S3} * k_{S3-S2} = (1 - q_{S1-S3}) * (1 - q_{S3-S2}).$$

Соответствующий коэффициент совокупных потерь принимает вид

$$q_{S1-S3-S2} = q_{S1-S3} + q_{S3-S2} - q_{S1-S3} * q_{S3-S2}.$$

Таким образом, при условии независимости потерь совокупная величина трансляционных ошибок оказывается меньше их простой суммы, что отражает эффект компенсации при мультипликативной оценке качества.

Приведённая выше формула справедлива лишь в условиях независимых и равномерно распределённых потерь при трансляции модели. Однако подобная ситуация представляет собой частный и сравнительно редкий случай. На практике потери, как правило, являются зависимыми: они включают накопление ошибок на последовательных этапах, внутренние погрешности алгоритмов экспорта/импорта, а также постепенную деградацию данных. Указанные факторы существенно усложняют процесс формализации и должны быть учтены в общей модели расчёта совокупных потерь при трансляции через промежуточные среды.

Для перехода от частного случая независимых потерь к более общей модели введём величину  $\Delta$  для *пересечения потерь*. Эта величина условно отражает количество информации, утраченное на первом этапе трансляции и повторно учитываемое как утраченное на втором этапе. С его учётом коэффициент совокупных потерь при передаче через промежуточную среду S3 может быть записан в виде

$$q_{S1-S3-S2} = q_{S1-S3} + q_{S3-S2} - \Delta.$$

Таким образом, задача оценки суммарных потерь передачи геометрии через промежуточную среду сводится к предсказанию величины  $\Delta$ . Определим пределы изменения этой величины, для чего рассмотрим пограничные ситуации.

Возможна ситуация, при которой трансляция S3 → S2 полностью дублирует ошибки, возникшие на этапе трансляции S1 → S3. В таком случае дополнительные потери отсутствуют, а величина  $\Delta$ , отражающая долю пересечения потерь, принимает максимально возможное значение. Это означает, что суммарные потери совпадают с наибольшей из двух частных величин, поскольку все искажения второго этапа уже были учтены при первой трансляции.

$$q_{S1-S3-S2} = \max\{q_{S1-S3}; q_{S3-S2}\},$$

$$\Delta = \min\{q_{S1-S3}; q_{S3-S2}\}.$$

Возможна и противоположная ситуация, когда потери на каждом из этапов трансляции относятся к различным параметрам геометрической модели. В этом случае пересечения отсутствуют,  $\Delta=0$ , и совокупный коэффициент потерь определяется как аддитивная сумма частных коэффициентов

$$q_{S1-S3-S2} = q_{S1-S3} + q_{S3-S2}, \\ \Delta = 0.$$

Такой случай отражает максимально возможное дублирование ошибок при последовательной передаче, когда каждый этап трансляции вносит уникальные искажения в структуру модели.

Однако при приравнивании коэффициента совокупных потерь к сумме коэффициентов потерь могут возникнуть некорректные случаи, где совокупные потери превысят 1, что противоречит как математической корректности, так и смыслу задачи.

Физический смысл коэффициента потерь заключается в количественной оценке утраченной информации при трансляции геометрической модели. Значение данного коэффициента отражает долю параметров, которые не удалось корректно сохранить при передаче из одной среды в другую. При этом  $q=0$  соответствует идеальной передаче без потерь, а  $q=1$  означает полную утрату информации, когда ни один из параметров исходной модели не был транслирован корректно. Исходя из физического смысла, коэффициент потерь всегда изменяется в пределах от 0 до 1, что гарантирует его интерпретацию как вероятностной или относительной меры.

$$q_{S1-S3-S2} = \max\{q_{S1-S3} + q_{S3-S2}; 1\}.$$

Совокупный коэффициент потерь при последовательной трансляции геометрической модели также должен быть ограничен единицей, поскольку потеря не может превышать весь объём передаваемой информации: модель либо сохраняет часть параметров, либо теряет их полностью при любом количестве трансляций.

Таким образом, введение величины  $\Delta$  также должно балансировать модель между двумя крайними сценариями: полной независимостью ошибок и полным их дублированием. Диапазон значений  $\Delta$  задаёт допустимые границы модели, исключающие появление абсурдных результатов и обеспечивающие её применимость в практических задачах передачи геометрической информации.

$$\Delta_{min} = \max\{0; q_{S1-S3} + q_{S3-S2} - 1\}; \\ \Delta_{max} = \min\{q_{S1-S3}; q_{S3-S2}\}.$$

При любых значениях коэффициентов потерь, характеризующих прямые трансляции между системами, величина пересечения потерь при передаче через промежуточную среду всегда ограничена строгими пределами. Данное ограничение отражает фундаментальный принцип: повторные трансляции не способны уменьшить уже произошедшие потери, но также не могут привести к утрате информации в объёме, превышающем суммарное действие отдельных этапов передачи.

### Накопление потерь

Основная задача при формализации коэффициента совокупных потерь заключается в предсказании величины параметра  $\Delta$ . Очевидно, что определить его абсолютное значение невозможно, поскольку накопление и дублирование потерь зависят от множества скрытых факторов: особенностей геометрического ядра, версии формата и вариативности экспортно-импортных узлов в средах.

Статистический подход предполагает оценку  $\Delta$  на основе большого массива экспериментальных данных, однако объем требуемых опытов делает такой метод практически нереализуемым. В связи с этим более перспективным является категориальный подход, при котором пересечение потерь прогнозируется исходя из анализа параметров, утраченных при трансляции. Такой способ позволяет аппроксимировать  $\Delta$ , опираясь на описание геометрической модели, специфику формата передачи, а также на характеристики сред, участвующих в трансляции.

В рамках анализа программных сред сложно сделать устойчивый вывод о влиянии на величину  $\Delta$  совпадения или различия геометрического ядра сред, участвующих в трансляции. При использовании одинакового ядра CAD среды реализуют схожие процедуры экспорта и импорта, что позволяет выдвинуть гипотезу о том, что значительная доля информации, утратившаяся на первом шаге, фиксируется как аналогичные потери на втором, что увеличивает пересечение потерь.

Использование сред с различными геометрическими ядрами, напротив, должно влечь за собой различия в интерпретации геометрических моделей. Подобная закономерность отмечается в

исследованиях по совместимости CAD-систем, демонстрирующих, что унификация геометрического ядра снижает вероятность случайных ошибок, но усиливает эффект дублирования систематических потерь при каскадной трансляции [5]. Таким образом, совпадение ядра обеспечивает высокую предсказуемость потерь, но одновременно увеличивает величину пересечения  $\Delta$ , тогда как различие ядер делает процесс менее предсказуемым, но снижает эффект дублирования потерь.

Дублирование потерь может быть связано с использованием идентичных форматов на различных этапах трансляции модели. Связано это в первую очередь с ограниченными возможностями формата хранить конкретную информацию. Однако в работах последних лет отмечается, что повторное использование одного и того же формата в трансляционных цепочках сопровождается накоплением систематических ошибок и затрудняет последующую реконструкцию модели [6].

Использование для трансляции различных форматов уменьшает пересечение потерь, однако увеличивает вероятность возникновения новых, уникальных ошибок. На эти ошибки влияют не только формат и его характеристики, но и специфика формата в конкретной среде. Последовательная трансляция в различных форматах сопровождается накоплением систематических ошибок и затрудняет последующую реконструкцию модели.

В оценке качества передачи и количества потерь при трансляции принимается исходное допущение, что геометрическая модель в среде S1 при передаче  $S1 \rightarrow S2$  и в среде S2 при передаче  $S2 \rightarrow S3$  содержит полный набор параметров, включающий до 30 различных характеристик геометрии и метаданных, принятых за параметры модели и описанных в [7]. Именно полнота модели используется как эталон для сопоставления и анализа качества передачи. Однако на практике трансляция часто осуществляется не для иерархических геометрических структур с развернутым набором атрибутов, а для сравнительно упрощённых моделей, представляющих собой лишь геометрическое описание с ограниченным числом параметров. В таких случаях расчёт потерь относительно «идеальной» геометрической модели приводит к заниженной оценке, так как часть параметров изначально отсутствует и не может быть утрачена. Следовательно, чем выше структурная сложность исходной модели, тем больше вероятность наложения и дублирования потерь при последовательных трансляциях, что усиливает расхождение между теоретической и практической величиной коэффициента потерь. Исходя из этого рассуждения можно утверждать, что существует зависимость величины  $\Delta$  от величины коэффициента потерь на каждом из шагов.

## Результаты экспериментов

Теоретический анализ совокупных потерь и обоснование введения величины  $\Delta$  объясняют механизмы накопления или дублирования ошибок при трансляции геометрических моделей. Однако верификация выведенных ограничений может быть продемонстрирована только на реальных данных, полученных в ходе экспериментальной трансляции моделей между различными системами. Для подтверждения предложенной модели и выявленных закономерностей необходимо провести ряд опытов по последовательной трансляции геометрической модели для оценки величины совокупных потерь.

Для проверки выдвинутых теоретических положений проведён комплекс экспериментов, направленных на выявление закономерностей дублирования и накопления ошибок при трансляции геометрических моделей. На данном этапе задачей являлось сопоставление поведения трансляций внутри семейств CAD-систем, основанных на единых геометрических ядрах. Такой подход позволяет зафиксировать влияние ядра как фактора, определяющего структуру и характер потерь.

В первую серию опытов включена цепочка КОМПАС-3D → Inventor → Fusion360, представляющая семейство, использующее геометрическое ядро ASM (Autodesk ShapeManager/ACIS). Вторая серия опытов построена по аналогичной схеме, но на базе ядра Parasolid и включает цепочку КОМПАС-3D → SolidWorks → Solid Edge. Трансляция геометрических моделей осуществлялась с использованием различных форматов представления данных. В исследовании были задействованы как универсальные нейтральные форматы (STEP, IGES), традиционно применяемые для обеспечения межсистемной совместимости, так и специализированные форматы ограниченного распространения, включая .x\_t и .iam, позволяющие зафиксировать особенности отдельных CAD-систем. Такой выбор форматов обеспечил более широкий охват сценариев трансляции и позволил учесть как стандартные, так и редкие практические случаи передачи моделей.

Эксперименты проведены на двух типах тестовых моделей, отличающихся по геометрической сложности: твердотельной детали и сборке. Деталь включает фаски, резьбы, сквозные и глухие отверстия, вытачки, построенные с использованием встроенных инструментов CAD-системы. Часть элементов имеет параметрические зависимости, что позволяет оценить сохранение семантической информации при передаче. Помимо указанных выше элементов, сборка содержит сопряжения, массивы и стандартные соединения, что существенно усложняет её структуру и позволяет анализировать не только сохранение геометрии, но и корректность передачи связей между компонентами.

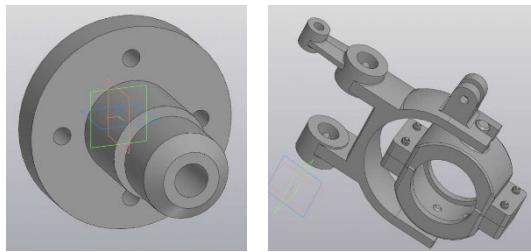


Рисунок 1. Геометрические модели для эксперимента: деталь (слева) и сборка (справа)

Общая методика оценки качества трансляции строится следующим образом. Геометрическая модель описывается набором из девятнадцати параметров: точность узлов, ребер, поверхностей, объёмов; сохранение типа моделирования, точность фасок, геометрическая и иерархическая параметризация, эскизы и чертежи, массивы, материалы; точность массы, плотности, площади, объема; центр масс, возможность использования кириллицы и размер файла. Каждому параметру присваивается весовой коэффициент, определяющий его значимость в структуре модели. Данный коэффициент формируется с учетом экспертной оценки, основанной на предположении о трудоёмкости восстановления соответствующего параметра в случае его утраты при трансляции.

При трансляции геометрической модели из одной среды в другую передача каждого параметра оценивается обособленно. Весовой коэффициент параметра домножается на показатель его сохранности при передаче. При этом значение показателя принимается равным 0, если параметр не удалось передать, 0,5 – в случае передачи с ошибками или неточностями, и 1 – если параметр был воспроизведен корректно и полностью. Сумма утраченной информации о параметрах представляет собой коэффициент потерь при данной трансляции. Совокупные потери оцениваются аналогичным способом для геометрической модели спустя две трансляции.

В рамках экспериментальной части исследования было проведено 110 опытов трансляции геометрических моделей через промежуточную систему. Коэффициенты потерь прямых трансляций, а также коэффициент совокупных потерь получены эмпирическим путем по описанной выше технологии. На их основе была рассчитана доля пересечения потерь  $\Delta$ . Результаты первых 10 опытов отражены в таблице.

#### Результаты эксперимента

i	Формат S1 - S3	Формат S3 - S2	Потери S1 → S3	Потери S3 → S2	Совокупные потери	Доля пересечения	$\Delta_{min}$	$\Delta_{max}$	$\Delta_{norm}$
1	F1	F6	0,3015	0,3285	0,3350	0,2950	0	0,3015	0,9784
2	F1	F7	0,3015	0,3445	0,3510	0,2950	0	0,3015	0,9784
3	F1	F1	0,3015	0,4140	0,4140	0,3015	0	0,3015	1
4	F1	F2	0,3015	0,6950	0,6950	0,3015	0	0,3015	1
5	F1	F3	0,3015	0,4265	0,4330	0,2950	0	0,3015	0,9784
6	F1	F4	0,3015	0,4330	0,4330	0,3015	0	0,3015	1
7	F2	F6	0,6610	0,3285	0,6950	0,2945	0	0,3285	0,8965
8	F2	F7	0,6610	0,3445	0,6950	0,3105	0,0055	0,3445	0,8997
9	F2	F1	0,6610	0,4140	0,6950	0,3800	0,0750	0,4140	0,8997
10	F2	F2	0,6610	0,6950	0,6950	0,6610	0,356	0,6610	1

В экспериментальной части используется зависимость между долей пересечения потерь и коэффициентом совокупных потерь. Основной интерес заключается в возможности экстраполирования величины  $\Delta$  на иные сценарии трансляции, но вычисление  $\Delta$  без проведения эмпирических испытаний затруднительно.

Однако границы изменения величины  $\Delta$  могут быть рассчитаны, они зависят исключительно от коэффициентов потерь, зафиксированных при прямых трансляциях, входящих в рассматриваемую цепочку. Таким образом, для каждого конкретного случая трансляции возможно определить диапазон допустимых значений  $\Delta$  без проведения эксперимента. В теоретической части работы были выведены соответствующие зависимости, что позволяет использовать их для расчёта индивидуальных границ  $\Delta$ : максимальное значение, соответствующее полному дублированию потерь, и минимальное значение, отражающее их полное различие.

Для сопоставимости полученных результатов целесообразно использовать не абсолютные значения доли пересечения потерь  $\Delta$ , а их нормализованные величины. Такая нормализация осуществляется относительно рассчитанного диапазона изменения  $\Delta$ , определяемого на основе коэффициентов прямых трансляций. Применение нормализованной  $\Delta^{\text{норм}}$  позволяет свести все наблюдения к единой шкале и устранить зависимость оцениваемой доли от конкретных коэффициентов потерь. Преобразование значения  $\Delta$  в его нормализованную форму  $\Delta^{\text{норм}}$  осуществляется по формуле

$$\Delta^{\text{норм}} = \frac{\Delta - \Delta_{\min}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}}.$$

Полученная нормализованная доля, а также рассчитанные на основе коэффициентов потерь прямых трансляций пограничные значения доли пересекающихся потерь также занесены в таблицу 1. Для удобства распределение нормализованных значений представлено в виде гистограмм на рисунке 2.

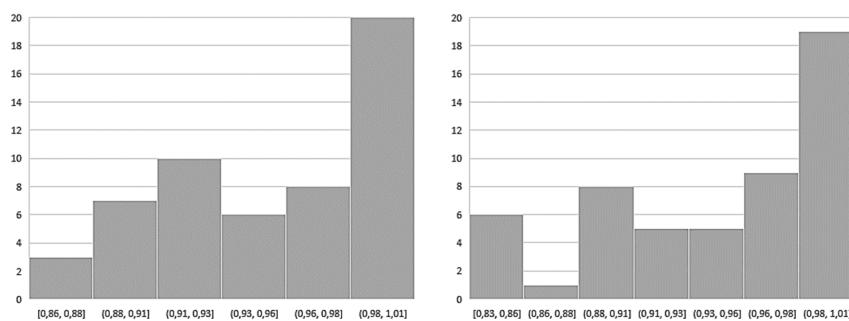


Рисунок 2. Распределение  $\Delta^{\text{норм}}$ : при трансляции детали (слева) и сборки (справа)

Таким образом, на основе проведённых расчётов и эмпирических наблюдений были получены значения  $\Delta$ , а также их нормализованные распределения. Построенные гистограммы позволяют выявить характерные диапазоны изменения величины и очертить область наиболее вероятных значений. Полученные данные представляют собой основу для дальнейшего анализа и требуют интерпретации с точки зрения закономерностей трансляции геометрической информации между системами.

### Обсуждение результатов

Объем экспериментальных данных, включающий 110 опытов по трансляции деталей и сборок, не является достаточным для полной аппроксимации результатов. Ограниченностю выборки не позволяет в полной мере зафиксировать редкие сценарии трансляции с минимальной долей пересечения потерь. Тем не менее даже при таком числе наблюдений выявляются устойчивые закономерности.

Распределение значений нормализованной дельты демонстрирует ненормальный характер, что подтверждает системный, а не случайный характер потерь. Диапазон  $\Delta^{\text{норм}}$  находится в пределах 0,8317–1, при этом значения ниже 0,83 отсутствуют. Это свидетельствует о том, что даже в условиях высоких коэффициентов потерь доля пересечения потерь остаётся высокой.

Наибольшая плотность значений в обеих группах опытов фиксируется в интервале 0,89–0,99, что отражает высокий уровень дублирования ошибок. При этом для трансляций во второй группе опытов

диапазон значений несколько уже, нижняя граница смещена вверх, а разброс меньше по сравнению с первой группой. Таким образом, трансляция сборок характеризуется большей стабильностью и меньшей вариативностью совокупных потерь. Однако между опытами с формально идентичными условиями по трансляции деталей и сборок устойчивая корреляция не наблюдается: пересечение потерь зависит от конкретной комбинации систем, форматов и геометрии моделей.

Подтвердить влияние геометрического ядра на основании текущего объема экспериментов невозможно. Однако отмечается связь между использованием специализированных форматов и принадлежностью систем к одному и тому же ядру. Это частично объясняет распределение  $\Delta^{\text{норм}}$ , а именно высокие значения нормализованной дельты и насыщение вблизи верхней границы. Таким образом, зафиксированное дублирование потерь является проявлением системной зависимости, а не случайного фактора.

Дополнительный интерес представляет влияние формата передачи. В случаях, когда в цепочке S1–S3 и S3–S2 использовался один и тот же формат,  $\Delta^{\text{норм}}$  достигала значения 1, что зафиксировано в 20 опытах. Следовательно, при одинаковых форматах вероятность дублирования потерь максимальна. При этом величины коэффициентов потерь при прямых трансляциях не оказывают взаимного влияния: максимально возможное значение  $\Delta$  не зависит от совпадения этих коэффициентов, а определяется условиями трансляции.

Некоторые опыты с одинаковыми парами форматов показали расхождения как в значениях  $\Delta^{\text{норм}}$ , так и в совокупных потерях. Аналогичные различия проявляются при работе с разными геометрическими моделями и программами, что указывает на локальную зависимость параметра от конкретных условий трансляции.

В целом эксперименты демонстрируют, что совокупные потери при двукратной трансляции геометрической информации остаются ограниченными и близкими к минимальным значениям.

Следует отметить, что *полученные в эксперименте значения доли пересечения потерь  $\Delta$  во всех случаях находились внутри теоретически рассчитанных границ*. Однако ни в одном опыте  $\Delta$  не достигла минимального значения. Это указывает на то, что даже при неблагоприятных сценариях трансляции потери имеют значительное пересечение. При этом можно предположить, что усреднённое значение  $\Delta$  располагается ближе к верхней границе диапазона, однако данное утверждение требует дополнительной проверки на расширенной выборке. Таким образом, теоретически рассчитанные границы доли  $\Delta$  сохраняют практическую значимость и могут использоваться в прикладных задачах оценки качества передачи геометрической информации, задавая допустимый интервал значений для анализа и прогнозирования.

## Выводы

Результаты экспериментов показывают, что существующая методика оценивания качества передачи имеет ограниченную применимость. Большинство трансляций не сохранили параметризацию и зависимости, полностью утратили информацию о массивах, а сведения о материалах деталей оказались искажёнными. Для практических задач целесообразно оценивать сохранность отдельных параметров. Повторение экспериментов на иной системе параметров может позволить получить более нормированное распределение и выявить дополнительные закономерности.

Анализ полученных результатов позволяет поставить вопрос о возможности экстраполяции разработанных формул на случай последовательной трансляции через несколько промежуточных систем. Теоретически такая экстраполяция возможна, однако с увеличением числа шагов накапливаются как ошибки экспорта, так и ошибки импорта, вследствие чего коэффициент совокупных потерь перестаёт иметь однозначную интерпретацию. Дополнительно следует учитывать и практический аспект: увеличение количества промежуточных трансляций ведёт к росту трудоёмкости процесса передачи моделей, что делает подобные маршруты нецелесообразными.

Результаты экспериментов также позволяют выдвинуть гипотезу о зависимости величины пересечения потерь  $\Delta$  не только от используемых форматов передачи и геометрического ядра, но и от характеристик самой модели. В частности, на примере опытов с более сложными объектами (сборочные модели) зафиксировано незначительное повышение коэффициента совокупных потерь по

сравнению с аналогичными опытами, проведёнными на менее сложных моделях (отдельные детали) при использовании тех же программных сред и форматов.

#### Список литературы

1. Data Exchange with Support for the Neutral Processing of Formats in Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing Systems / P. Kuryło, P. Frankovský, M. Malinowski, et al. // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, iss. 17. P. 9811. DOI: 10.3390/app13179811
2. Problems of data exchange between BIM and facility management systems, standardization and ensuring data continuity in BIM throughout the lifecycle / R. B. Otranto, et al. // ITcon. 2025. URL: <http://www.itcon.org> (дата обращения: 19.08.2025).
3. Филинских А. Д., Мерзляков И. Н., Курушин Е. А. Оценка потери данных геометрической модели в условиях импортозамещения // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон». 2022. № 32. С. 917–924. DOI: 10.20948/graphicon-2022-917-924; EDN: GHRKCP
4. Multiplicative method of multi-criteria analysis based on expected criteria values / M. M. Žižović, M. R. Žižović, N. Ž. Damjanović, K. Ž. Pavlović // Reports in Mechanical Engineering. 2023. Vol. 4, iss. 1. Pp. 224–234. DOI: 10.31181/rme230402224z
5. Schnitger C. New Math. The Hidden Costs of Kernel Change. Schnitger Corporation, 2020. 24 p. URL: <https://schnitgercorp.com/wp-content/uploads/2020/12/SchnitgerCorp-Hidden-Cost-of-Kernel-Change-2020.pdf> (дата обращения: 19.08.2025).
6. Evaluation of CAD Data Exchange Using Neutral File Formats / P. Kuryło, A. Przesmycki, A. Wróbel, S. Wierzbicki // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, iss. 17. P. 9811. DOI: 10.3390/app13179811
7. Boytyakov A., Filinskikh A. Data conversion model using the principles of geometric model structure proximity comparison // GraphiCon 2021: Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision, Nizhny Novgorod, September 27–30, 2021. Nizhny Novgorod, 2021. Vol. 3027. Pp. 1064–1072. EDN: PABKMS