

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА ДЛЯ КОДИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ВЕЩАНИЯ В ФОРМАТАХ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧЁТКОСТИ

DETERMINATION OF THE OPTIMAL FLOW RATE FOR ENCODING DIGITAL BROADCASTING IN ULTRA-HIGH DEFINITION FORMATS

Дмитрий Сергеевич Анахов **Dmitriy Sergeevich Anakhov**

Магистрант

razter@mail.ru

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет теле-
коммуникаций им. проф. М. А. Бонч-
Бруевича», Россия, Санкт-Петербург

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State
University of Telecommunications, Russia, St.
Petersburg

Сергей Вадимович Анахов **Sergey Vadimovich Anakhov**

Кандидат физ.-мат.наук, доцент

sergej.anahov@rsvpu.ru

ФГАОУ ВО «Российский государственный
профессионально-педагогический
университет», Россия, Екатеринбург

Russian State Vocation Pedagogical
University, Russia, Yekaterinburg

***Аннотация.** Представлено одно из решений задачи выбора оптимальных технологических решений для визуализации телевизионного контента. С применением методов субъективной сравнительной экспертизы качества ТВ-изображения определены оптимальные скорости кодирования ТВ-программ форматов 4К, 8К. Выявлены наиболее подходящие для работы с этими форматами стандарты кодирования — h.265 и VP9. Данный вывод сделан с учетом высоких оценок, полученных при экспертизе результатов процесса обработки видеофайлов и наличия искажений, а также с учетом скорости кодирования, размера получаемого файла, распространенности и актуальности выбранного стандарта. Полученные результаты важны для организации работы с онлайн-трансляциями, широко применяемыми в последнее время в научно-образовательной среде. Правильный выбор и использование современных кодеков позволит сократить объём загружаемой информации на учебные порталы, повысит скорость передачи видеоконтента, облегчит показ видеофайлов высокого качества, загружаемых по интернет-сетям. Представленные выводы помогут в решении вопросов, связанных с оптимизацией соответствующего оборудования при переходе на новые форматы и оценкой затрат, необходимых для его осуществления.*

Ключевые слова: цифровое телевидение, медиаконтент, видеофайл, 4К, 8К, кодек, стандарт кодирования, формат вещания, телевидение сверхвысокой четкости.

Abstract. *One of the solutions to the problem of choosing optimal technological solutions for the visualization of television content is presented. Using the methods of subjective comparative examination of the TV image quality, the optimal encoding rates of 4K, 8K TV programs were determined. The coding standards h.265 and VP9 that are most suitable for working with these formats have been identified. This conclusion is made taking into account the high ratings obtained during the examination of the results of the video file processing and the presence of distortions, as well as taking into account the encoding speed, the size of the resulting file, the prevalence and relevance of the selected standard. The results obtained are important for the work with online broadcasts, which have been widely used recently in the scientific and educational environment. The correct choice and use of modern codecs will reduce the amount of information uploaded to educational portals, increase the speed of video content transmission, and facilitate the display of high-quality video files uploaded over Internet networks. The presented conclusions will help in solving issues related to the optimization of the appropriate equipment during the transition to new formats and the assessment of the costs necessary for its implementation.*

Keywords. *digital television, media content, video file, 4K, 8K, codec, encoding standard, broadcast format, ultra-high definition television.*

В современном мире стремительно повышаются требования как к качеству создаваемого медиаконтента, так и к техническим характеристикам воспроизводящих его устройств. С момента появления цифрового телевидения появилась и потребность в неких стандартах и форматах вещания. Запуск цифрового телевидения помог решить большинство проблем, связанных с качеством и помехами сигнала, и позволил вещать в стандартах 720p и 1080i. Развитие цифрового телевидения привело как к появлению всё более высококачественных форматов, так и к развитию стандартов обработки изображений данных форматов. В настоящее время к уже имеющимся форматам 480p, 720p и 1080p добавились современные UHD TV (Ultra-High-Definition Television) или 4K и UHD TV 8K, которые становятся всё более востребованными. Следует заметить, что новейшие стандарты кодирования (H.264, H.265, H.266 или VVC, VP9 и AV1), несмотря на их всё более широкое внедрение, остаются пока малоизученными. Для полноценного перехода на работу с этими форматами необходимо провести исследование методов кодирования видеоконтента в формате сверхвысокой чёткости и его взаимодействие с устройствами воспроизведения, представленными на рынке. Необходимо также определить оптимальную скорость кодирования потока для различных видов его практического использо-

вания, включая особенности их применения в научной и образовательной практике.

Анализ специфики применения новых HD-форматов в научно-образовательной среде позволяет сделать вывод о больших перспективах повышения скорости передачи видеоконтента и сокращения объёма загружаемой на учебные порталы информации. В результате внедрения новых форматов должен облегчиться показ видеофайлов, загружаемых по интернет-сетям, повыситься эффективность их загрузки и качество изображения. Например, наблюдаемые в настоящее время более высокие скорости загрузки и качество просмотра видео на портале YouTube связано с применением кодека Google VP9. Очевидно, что сфера внедрения данных новейших HD-форматов будет только расширяться и найдет своё применение в различных видах научной, образовательной и практической деятельности, связанной с эффективной дистанционной передачей больших объёмов информации (медицина, мобильная связь, GPS, космические исследования и т. д.).

Говоря о современных методах вещания, необходимо чётко понимать как техническую составляющую всех комплектующих, так и методы их развития, предпосылки и потребности для изобретения всё более сложных в реализации компонентов, а также разницу и преимущества всех имеющихся в данный момент технических

решений. Начиная с момента стремительного развития размеров телевизоров и планшетов в 10-х годах XXI века возникла потребность в разработке соответствующего им по качеству формата видеоизображения. При расстоянии просмотра в 10 метров человеческий глаз почти не различает разницу между пикселями размером менее 3 мм. Исходя из этого, для комфортного просмотра размер устройства воспроизведения должен быть не более 10 метров по диагонали. Следовательно, проблемы могут возникнуть или при более близком просмотре (персональные мониторы), или при просмотре на экране, превышающим данные размеры (кинотеатры).

Внедрение формата 4K предоставило возможность использовать поле зрения человека в большей степени, чем было до этого. Так, почти во всех имеющихся современных персональных средствах воспроизведения видеоконтента наличие экрана, поддерживающего 4K формат, позволит избежать каких-либо проблем с наличием видимых пикселей. В свою очередь внедрение формата 8K позволит избежать схожих проблем при просмотре в кинотеатрах, а также при взаимодействии с VR-контентом, область воспроизведения которого напрямую зависит от разрешения воспроизводящего устройства.

Внедрение более современных и, следовательно, более сложных в исполнении форматов неизбежно приводит к затратам и усилиям, которые необходимо приложить для работы с ними. Большие затраты требуются на каждом из этапов телевизионного вещания в форматах сверхвысокой чёткости. Источник сигнала должен записывать его в сверхвысоком качестве, компьютеры, обрабатывающие данный тип изображения, должны обладать достаточными мощностями, ресурсами и, о чём не стоит забывать, свободным местом на хранилищах. Передающие тракты должны обладать достаточной пропускной способностью для передачи сигналов такого объёма, а приёмное оборудование должно «уметь» принимать сигнал данного типа и воспроизводить, а воспроизводящее устройство, будь то монитор или проектор, должно обладать достаточным разрешением для его показа. Для конечного пользователя очевиден только последний этап, но, для корректного отображения необходимого качества, должно быть совместно всё оборудование на всех этапах.

Контент должен быть записан в формате UHD. Это предполагает:

- использование камеры и объектива с разрешением не менее 3840 x 2160 пикселей;
- захват не менее 12 делений динамического диапазона;
- настройка камеры на запись 25 или 50 кадров в секунду на данный момент, хотя со временем будет важно обеспечить высокую частоту кадров (100 кадров в секунду) для определённых жанров;
- вывод контента либо в гибридной логарифмической гамме (HLG — формат, разработанный BBC и NHK, в частности, для прямых телетрансляций), либо в необработанном или логарифмическом форматах, чтобы цветовое пространство HDR и WCG можно было применять при постобработке.

Контент необходимо редактировать, чтобы использовать потенциал UHD. Это может включать цветокоррекцию с использованием возможности более широкой цветовой гаммы и расширенного динамического диапазона при постобработке, масштабирование и повторное кадрирование (масштабирование кадров, снятых в формате сверхвысокой чёткости, менее критично влияет на качество конечного изображения), стабилизацию изображения (возможностей для стабилизации кадров, снятых со сверхвысоким разрешением, гораздо больше).

Для того чтобы насладиться самым высоким разрешением, зрителям необходимо подключение к Интернету со скоростью около 30 Мбит/с для прямой трансляции UHD и 18–20 Мбит/с для видео по запросу, а это не у всех есть. Зрители с медленным широкополосным доступом или без широкополосного доступа не смогут ощутить все преимущества UHD. Однако даже при более низкой скорости интернета изображения WCG HDR все равно выглядят лучше, чем HD.

Формат файла UHD должен быть совместим с сигналом телевизора зрителя. Чтобы избежать несовместимости, важно создавать правильные пути для маршрута распространения. Для прямой трансляции лучше всего создавать гибридные файлы логарифмической гаммы, которые будут совместимы с большинством телевизоров, купленных в 2016 году или позже [11]. Экран телевизора должен отображать UHD.

Даже если телевизор может считывать сигнал UHD, программа не будет видна в UHD, если только сам экран не может ее показать. Для отображения UHD экран должен иметь ширину не менее 3840 пикселей и более широкую цветовую гамму. В идеале это должен быть HDR. В 2017 году было подсчитано, что менее 10% населения РФ имеют телевизоры, способные отображать UHD-контент во всей его красе, хотя со временем эта цифра будет только увеличиваться.

Стандартный современный web-плеер имеет, как правило, следующие потоки: 360p (минимальное качество с минимальной необходимой скоростью подключения); 480p (среднее качество с чуть большими затратами интернет-трафика); 720p (высокое качество с достаточно высокой необходимой скоростью подключения); 1080p Full HD (наивысшее качество с высокой необходимой скоростью подключения). Кроме них, может встречаться разрешение 144p (минимальная детализация), 1440p (крайне высокое качество детализации с разрешением видео 2560×1440 пикселей), а также 2160p (иначе, 4K, 3840×2160 пикселей). В рамках данной работы были рассмотрены форматы вещания 4K и 8K.

4K-формат был утверждён в 2012 году, а его активное использование началось только в 2016 году. Общепринятым стандартом Ultra HD 4K считается соотношение сторон 16:9 в количестве 3840×2160 пикселей. Формат назван 4K, потому что изображения имеют ширину около 4000 пикселей. И необходимо упомянуть о том, что индустрия назвала разрешение 1080 по высоте изображения, но назвала 4K по ширине изображения. Здесь не стоит искать глубинных смыслов, ведь в web-плеере разрешение будет отображаться как стандартные 2160 пикселей, а обозначение 4K распространилось из-за удобства. Технически «сверхвысокая четкость» на самом деле является производным от стандарта цифрового кино 4K. Однако в то время как локальный мультиплекс показывает изображения с исходным разрешением 4096×2160 пикселей, новый потребительский формат Ultra HD имеет немного более низкое разрешение, 3840×2160. Это одна из причин, по которой некоторые бренды предпочитают вообще не использовать маркировку 4K, придерживаясь вместо этого Ultra HD или UHD. Тем не менее, числовое сокращение, похоже, останется [26].

Ultra HD 8K на данный момент не имеет широкого распространения, но его повсеместное использование является лишь вопросом времени. Общепринятым стандартом Ultra HD 8K считается соотношение сторон 16:9 в количестве 7680×4320 пикселей [14]. (СТА) объявила о стандартизации формата 8K.

Любой телевизор, который соответствует спецификациям СТА (ассоциации потребительских технологий) для 8K, должен иметь разрешение 8K (7680×4320) и иметь возможность повышать качество материала, отличного от 8K до полного разрешения 8K. Он также должен поддерживать HDR, хотя нет требований, какой из множества форматов HDR он должен поддерживать. Наконец, у него должен быть хотя бы один вход, совместимый с HDCP 2.2, и он должен иметь возможность обрабатывать 10-битный цвет на попиксельной основе [29].

На данный момент на рынке представлено большое количество устройств с возможностью воспроизведения 4K и 8K контента. Среди них нужно выделить несколько основных категорий:

- домашние телевизоры телевизоры 8K (наибольшее количество моделей предлагает Samsung) с дисплеями ЖК, WOLED и QD;
- персональные мониторы (в настоящее время разрешение 4K считается обязательным для графических дизайнеров, художников и профессионалов области визуальной обработки);
- проекторы различных типов и предназначений (4K-проекторы JVC и SONY и профессиональные кинопроекторы Barco, Nec, Christie, Sony стандартов цифрового кинематографа DCI);
- телефоны, ноутбуки и прочие устройства, предназначение которых не ограничивается воспроизведением видео.

Как при записи видео, так и при его кодировании могут появляться искажения. Более того, наиболее часто их можно встретить при передаче видеофайлов/трансляции видеопотока. Это может быть связано с разными причинами: при работе с видео размер канала передачи данных может быть недостаточен (например, при выставлении слишком низкого значения скорости потока), или же выбранный цветовой профиль на выходе кодера может ограничивать количе-

ство градаций цвета исходного файла. Упомянем основные виды искажений, встречающиеся в ТВ-вещании [16]:

- замирание изображения — искажение, возникающее из-за недостаточного объема буфера при трансляции видеопотока, а также из-за недостаточной скорости интернет-соединения (как на стороне источника, так и на приёмной стороне, у абонента);

- разбиение изображения на блоки — два вида искажений («блокинг-эффект» и «мозаичный эффект»), связанные с резкими скачками яркости от одного блока к другому, в связи с независимым кодированием блоков посредством ДКП (дискретно-косинусного преобразования) и квантованием коэффициентов (рис. 1);

- зернистый шум — вид искажений, выражающийся в медленно движущихся дрожащих шумах низкой интенсивности в стационарных областях или же в областях с очень небольшим движением. Возникает из-за недостаточной точности коэффициента квантования для восстановления оригинального изображения;

- «паразитные» цвета — искажение, определяемое часто как искажение цвета всего макроблока по отношению к собственному оригинальному цвету либо же к цвету окружающей (соседней) области (рис. 2). Причины те же, что и у «блокинг-эффекта», а также имеющийся акцент на сигнал яркости при анализе вектора движения. В результате полу-



Рис. 1. Пример рассыпания изображения на блоки



Рис. 2. Пример наличия паразитных цветов

ченный блок может хорошо коррелировать по уровню яркости, но иметь при этом сильные отличия по цвету.

Для реализации поставленных в рамках данной работы задач было проведено практическое исследование, первый этап которого включал в себя анализ и сравнение всех параметров, необходимых для определения оптимальной скорости кодирования ТВ-изображения. Были отобраны наиболее актуальные методы кодирования и самые часто встречающиеся искажения.

Первым делом в список включенных в исследуемый список методов кодирования были внесены h.264 и h.265 (hevc) как самые известные и востребованные методы, пользующиеся широким спросом как в профессиональной среде, так и среди рядовых пользователей. Кроме того, данные методы имеют достаточно гибкие настройки и широкие возможности взаимодействия со сторонними утилитами и рабочими пространствами, ввиду своей повсеместной распространенности. В связи с неготовностью для повсеместного использования (в свободном доступе были обнаружены только консольные версии кодера и декодера, разработанные институтом Фраунгофера в Берлине [32]), было принято решение о нецелесообразности рассмотрения самого современного стандарта кодирования H.266 (Versatile Video Coding) в данной работе. В обозримом будущем он не имеет предпосылок для выхода на массовый рынок, но достаточно интересен для изучения в качестве более эффективного метода кодирования в дальнейших работах по сжатию видеоизображений. После отказа от VVC не составляло большого труда определить оставшиеся методы, которые вошли в перечень

исследуемых в данной работе. Ими оказались актуальные, удобные и распространенные форматы VP9 и AV1.

При проведении работы по анализу и оценке оптимальной скорости кодирования сигнала ТВ-изображения было принято решение остановиться на субъективной сравнительной экспертизе качества ТВ-изображения. Алгоритм данной экспертизы включал в себя следующие этапы исследования:

1. Подготовка испытательных сигналов.

2. Подбор испытуемой группы экспертов, достаточно компетентной для выставления оценок и достаточно релевантной для молодой и современной аудитории, потребляющей видео-контент, пользующейся облачными сервисами и социальными сетями.

3. Проведение образовательных занятий/лекций по имеющимся видам искажений для погружения аудитории в цель исследовательской работы и для присвоения этой аудитории компетенции в выставление оценок по рассмотренным видам искажений.

4. Сбор и анализ полученных результатов субъективной экспертизы, перевод «сухой» статистической информации в доступный вид, полезный как профессионалу в данной области, так и среднестатистическому пользователю, решившему сделать свои первые шаги в работе с видео.

5. Выводы об оптимальных условиях и скоростях кодирования видеосигнала как в общем случае, так и в множестве частных.

В работе были исследованы изображения в форматах сверхвысокой чёткости, а именно 4К (3840x2160 пикселей) и 8К (7680x4320). В качестве оптимальной частоты кадров были взяты два значения: 24 кадра в секунду для 4К (стандартизированный формат для съемки кинолент, использующийся во всех странах и основанный на комфортной глазу скорости смены кадров в кинотеатре) и 60 кадров в секунду для 8К (максимально доступное и распространенное на данный момент разрешение для человека, использующего телевизор последнего поколения или самый «продвинутой» игровой монитор). И в том, и в другом случае были взяты примеры, использующие HDR (High Dynamic Range, технология с повышенным диапазоном яркости) для больших возможностей по определению

различий в участках с минимальным цветовым и световым различием.

Главным критерием, различающим испытательные видеосигналы между собой, была выбрана скорость передачи потока данных по каналу. Её диапазон варьировался от 5 до 12,5 Мбит/с. Создавались тестовые сигналы в консольной утилите `ffmpeg`, обладающей наиболее широкими возможностями по обработке видеоизображений, а также максимальной надежностью. Методика проведения экспертизы была составлена в соответствии с рекомендацией МСЭ-R BT.500-14 (10/2019), «Методики субъективной оценки качества телевизионных изображений», в соответствии с которой оценка экспертами испытательных сигналов происходила в следующих условиях:

1. Общее количество испытательных сигналов, расположенных случайным образом, — 32. В это количество видеофайлов входит 4 оригинальных видеофайла, расположенных случайным образом. Эксперты не знают об их расположении и выставляют оценки так же, как и предыдущим и последующим файлам. Это необходимо для более «честной» оценки ввиду «замыливания глаза» после многократного просмотра похожего друг на друга видеоряда.

2. Перед представлением оцениваемых видеофайлов экспертам показывается оригинальный видеоряд, без искажений. Это необходимо для понимания уровня вносимых искажений. Данный файл не оценивается и не входит в статистику.

3. Между испытательными видеофайлами экспертам в течение 10–15 секунд выводится на экран серое поле.

4. Для уверенности в правильной оценке степени искажений перед проведением испытания экспертам зачитывается лекционный материал о видах искажений с примерами и предварительным обсуждением.

5. Длительность каждого из испытательных файлов 30 секунд. Общее время проведения испытаний по оценке видеофайлов у одной группы экспертов 30 минут.

Исходя из рекомендации МСЭ-R BT.500-14 (10/2019) [2-10], определение качества ТВ изображения производилось в соответствии со шкалой оценок, представленной в таблице 1.

В соответствии с рекомендациями было принято решение разбить оценку общего уровня искажений на четыре дифференцированные:

- оценка степени «рассыпания» на блоки;
- оценка уровня наличия шумов;
- оценка степени зами- рания изображения;
- оценка степени нали- чия «паразитных» цветов.

Виды искажений были отобраны по степени их при-

сутствия в реальных, несмоделированных ситуациях: просмотр потоковой трансляции в сети интернет, просмотр фильма на боль- шом домашнем экране, представление киноленты в общественном кинозале больших размеров. Экспертиза проходила в специально оборудованном помещении (лаборатории), в котором все экспер- ты находились в одинаковых условиях. Освещенность помещения находилась на низком уровне (внутреннее освещение было вы-

Таблица 1.

Стандартизированная шкала оценок испытательного сигнала

Шкала общего качества	Шкала искажений
5 – Отлично	5 – Незаметны
4 – Хорошо	4 – Заметны, но не раздражают
3 – Удовлетворительно	3 – Слегка раздражают
2 – Плохо	2 – Раздражают
1 – Очень плохо, недопустимо	1 – Сильно раздражают

Таблица 2.

Результаты субъективной экспертизы по стандартам кодирования

	Скорость потока (Мбит/с)	Общая оценка	Δ	Рассыпа- ние на блоки	Δ	Шумы	Δ	Зами- рание	Δ	Паразит- ные цвета	Δ
h.264 8K	5	3,01	0,89	2,55	0,96	2,52	0,91	3,70	0,76	4,41	0,76
	7,5	3,54	0,68	3,14	0,79	3,31	0,89	4,02	0,98	4,59	0,54
	10	3,87	0,74	4,24	0,75	3,98	0,78	4,15	0,98	4,78	0,51
	12,5	4,18	0,83	4,60	0,56	4,39	0,63	4,49	0,77	4,80	0,46
h.265 8K	5	4,04	0,66	3,57	0,97	4,08	0,72	4,63	0,64	4,61	0,70
	7,5	4,42	0,57	3,86	0,88	4,45	0,68	4,85	0,36	4,74	0,52
	10	4,70	0,49	4,39	0,68	4,51	0,58	4,78	0,42	4,73	0,57
VP9 8K	5	4,82	0,44	4,80	0,46	4,63	0,55	4,87	0,39	4,86	0,50
	7,5	4,83	0,38	4,78	0,47	4,64	0,52	4,88	0,31	4,90	0,31
	10	4,88	0,39	4,76	0,48	4,81	0,38	4,82	0,39	4,82	0,44
	12,5	4,85	0,41	4,74	0,60	4,68	0,55	4,87	0,34	4,79	0,49
AV1 8K	5	4,56	0,61	4,69	0,50	4,66	0,51	4,14	0,97	4,84	0,36
	7,5	4,34	0,94	4,79	0,46	4,55	0,73	4,41	0,84	4,94	0,24
	10	4,67	0,55	4,82	0,44	4,73	0,53	4,34	0,74	4,87	0,36
h.264 4K	5	3,74	0,69	3,67	0,94	3,82	0,99	4,83	0,43	4,57	0,68
	7,5	4,17	0,66	4,04	0,96	4,30	0,68	4,79	0,48	4,66	0,57
	10	4,45	0,57	4,45	0,74	4,43	0,67	4,86	0,35	4,70	0,61
	12,5	4,81	0,39	4,82	0,44	4,93	0,25	4,88	0,39	4,73	0,49
h.265 4K	5	4,78	0,42	4,71	0,58	4,70	0,50	4,94	0,24	4,70	0,50
	7,5	4,88	0,33	4,92	0,28	4,81	0,44	4,96	0,20	4,87	0,34
	10	4,94	0,24	4,90	0,31	4,78	0,47	4,96	0,20	4,91	0,28
VP9 4K	5	4,49	0,51	4,55	0,68	4,45	0,65	4,85	0,41	4,71	0,46
	7,5	4,67	0,51	4,76	0,48	4,73	0,57	4,80	0,50	4,90	0,31
	10	4,72	0,45	4,80	0,50	4,78	0,47	4,90	0,31	4,82	0,39
	12,5	4,87	0,34	4,92	0,34	4,80	0,41	4,87	0,34	4,82	0,43
AV1 4K	5	4,64	0,52	4,67	0,55	4,39	0,64	4,74	0,48	4,61	0,66
	7,5	4,64	0,52	4,76	0,48	4,49	0,65	4,36	0,88	4,69	0,64
	10	4,71	0,50	4,82	0,44	4,71	0,50	4,65	0,55	4,84	0,43

ключено, доступ солнечного света был исключен при помощи зашторивания окон) для повышения контрастности изображения [1].

В общей сложности в экспертизе участвовали пять групп экспертов, в количестве от 8 до 15 человек. Общее количество экспертов 50 человек. В качестве экспертов были задействованы студенты Санкт-Петербургского Государственного Университета Телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича, 3–5 курсов обучения, обучающиеся по программам 11.03.02 и 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи. Направленность «Цифровое телерадиовещание».

Для расчета погрешности оценок использовались статистические методы:

$$\Delta = t_{pn} \cdot S$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{n - 1}}$$

где S — среднее квадратическое отклонение, n — количество экспертов, p — доверительная вероятность (0,95), x_j — оценка, выставленная одним экспертом; x_{cp} — среднее значение всех оценок, выставленных данному видеофайлу.

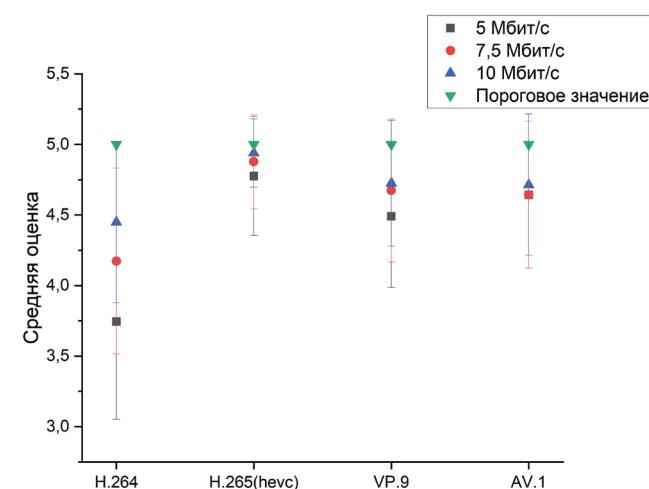
Итоговые результаты субъективной экспертизы представлены в таблице 2.

На заключительном этапе исследования по 5-балльной шкале (5 баллов или пороговое значение — идеальный испытательный видеофайл, ничем не отличающийся от исходного) определялся уровень или пороговое значение, указанное оптимальным и обозначающее минималь-

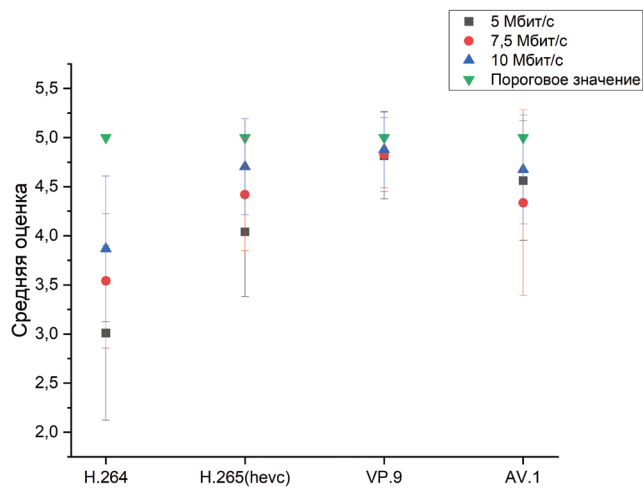
ный допустимый уровень наличия искажений. Чем ближе средняя оценка данного видеофайла к пороговому значению, тем лучше данный стандарт кодирования справился с данным видеофайлом в указанных условиях и тем предпочтительнее использовать данный стандарт для последующей работы в аналогичных условиях. Если полученная усреднённая оценка видеофайла достигает порогового значения в пределах статистической погрешности, то данное испытание считается пройденным, а стандарт кодирования — пригодным для использования в указанных условиях. Другими словами, человеческий глаз не может определить наличие искажений в данном видеофайле и считает его не отличающимся от оригинала, а следовательно, считает данный метод кодирования пригодным к использованию. Во всех случаях были рассмотрены 3 основных средних скорости потока, которые выставлялись при настройках кодирования — 5, 7,5 и 10 Мбит/с.

Как видно из представленного на рис. 3а графика, при кодировании видеоизображений формата 4К наилучшие результаты показал стандарт h.265 (HEVC). Судя по средним оценкам испытательных видеосигналов, выставленным экспертами, видеофайлы, обработанные в данной конфигурации, наиболее приближены к оригинальному видео. Разобьем рекомендации отдельно по каждому стандарту:

H.264 — Наименее пригодна к использованию в 4К-формате. Для приемлемого изображения необходимо использовать скорость потока больше 10 Мбит/с, что приведёт к нецелесообразно большому размеру файла;



а



б

Рис. 3. Общая оценка: а — формата 4К, б — формата 8К

H.265(HEVC) — Показал наилучшие результаты среди всех представленных стандартов кодирования. Рекомендован к использованию в формате 4К, начиная со скорости потока в 5 Мбит/с;

VP9 — Средний результат. Рекомендован к использованию в формате 4К, начиная со скорости потока в 7,5 Мбит/с;

AV1 — Несмотря на хорошие результаты и рекомендованную скорость потока в 5 Мбит/с, уступает стандарту h.265, вдобавок уступает ему в скорости кодирования.

Исходя из графика, представленного на рис. 3б, наилучший результат в формате 8К показал стандарт кодирования VP9. Разброс выставленных оценок по данному стандарту минимален, что говорит о сложности нахождения искажений в видеофайлах, закодированных стандартом VP9, а следовательно, о максимальной его приближенности к оригиналу. Детальнее о каждом из стандартов.

H.264 — не пригоден для использования в 8К формате, за исключением случаев многократного увеличения скорости потока, в сравнении с аналогами. В рассмотренном диапазоне эксперты посчитали файл отличным от оригинала при всех указанных скоростях кодирования. Стоит заметить, что многократное увеличение скорости потока неизменно приведёт к многократному увеличению размера конечного файла.

H.265 (HEVC) — рекомендован для использования в формате 8К со скоростью потока от 10 Мбит/с. При указанном значении наличие искажений минимально и конечный файл слабо отличим от оригинального.

VP9 — стандарт, превзошедший всех конкурентов при кодировании в формате 8К. Рекомендован к использованию, начиная от скорости потока в 5 Мбит/с, так как эксперты не заметили существенных изменений при последующем увеличении скорости кодирования.

AV1 — средний результат. При любой из скоростей потока средние значения хуже, чем у VP9, при этом возможно использование без особых замечаний при скорости кодирования в 7,5 Мбит/с, но, в связи с меньшей скоростью кодирования в сравнении с VP9 использование не рекомендовано за исключением ситуаций, когда работа с VP9 невозможна, или последующе-

го обновления стандарта с появлением новых функций и возможностей.

По результатам анализа оценок отдельно определяемых параметров (уровня рассыпания на блоки, наличия шумов, замирания и паразитных цветов) были сделаны нижеследующие выводы:

1. Наиболее пригодными для работы с форматами сверхвысокой четкости являются стандарты кодирования h.265 и VP9. Это обусловлено не только высокими оценками, полученными за процесс обработки видеофайлов и наличие искажений, но и ещё одним немаловажным фактором, который надо обязательно учитывать при работе с форматами 4К и 8К — скорость кодирования. И если у стандарта h.264 она максимальна, а у стандарта AV1 минимальна, то стандарты h.265 и VP9 находятся где-то посередине, ближе к высокой скорости. К примеру, подготовка одного испытательного сигнала длительностью тридцать секунд в утилите `ffmpeg`, с использованием наиболее распространенных и надежных библиотек (как показано в приложении А) стандарта h.264, занимала около 30 секунд. Стандартов h.265 и VP9 — 1–2 минуты. Стандарта AV1 — 7–12 минут.

2. При выборе стандарта следует учитывать его распространенность и актуальность. Если стандарт h.264 присутствует в каждом устройстве, воспроизводящем видео, и изучен максимально подробно, то стандарт AV1 труден не только в воспроизведении на устройстве, но и в самом кодировании, так как не каждая утилита поддерживает данный стандарт и может правильно его обработать. Большинство использованных библиотек кодировали один испытательный файл стандарта AV1 более 30 минут, что неприемлемо при работе с большими объемами данных. Стандарты h.265 и VP9 пока что тяжелы в оценке их распространенности. Существенная часть современного контента большой продолжительности, будь то кинолента или эпизод сериала, кодируется в стандарте h.265 для уменьшения занимаемого объема. Однако большинство современных устройств в настоящее время не обладают встроенными кодеками для работы с данным стандартом. Следовательно, минимальное, что необходимо будет сделать для воспроизведения, это купить/скачать необходимый набор кодеков (при их наличии).

Стандарт VP9, в свою очередь, присутствует в большинстве современных онлайн-платформ и является одной из основ построения их систем обработки видео (YouTube, Twitch, Vimeo), но не так распространен на бытовом уровне и требует отдельных усилий для занесения его в свою рабочую среду.

3. Необходимо учитывать размер получаемого файла. Одна из причин ухода от стандарта h.264 — большой объем занимаемой информации. Исходя из размера файлов испытательных сигналов можно сделать вывод о том, что в сравнении с h.264 h.265 и VP9 показали двукратное уменьшение объема занимаемого места на диске, а стандарт AV1 — трехкратное. Это особенно важно при работе с онлайн-трансляциями, имеющие максимальную актуальность в последнее время. Сокращение объема передаваемой информации важно как источнику для передачи всей картинки без рассыпания и появления других искажений, так и абоненту (зрителю) на приемной стороне, которому необходимо смотреть трансляцию в исходном качестве, без задержек, замираний экрана и заполнения буфера. Так как не каждое учреждение, впрочем, как и мобильное устройство, имеет высокоскоростной интернет с достаточной пропускной способностью, данный вопрос должен обязательно

рассматриваться при подготовке онлайн-трансляции. Кроме того, для создания онлайн-трансляции, как правило, источнику необходимо передавать не только исходный сигнал (например, 4K со скоростью 20 Мбит/с), но и все меньшие разрешения (1080 p со скоростью 10 Мбит/с, 720 p со скоростью 6 Мбит/с и т. д.) для предоставления выбора зрителю. Создатель трансляции должен в таком случае обладать подключением со скоростью, покрывающей все указанные выше, а также и другие расходы.

4. Говоря о практическом применении, необходимо упомянуть, что для комфортного и надёжного потокового вещания видео в формате 8K требуется подключение к сетям со скоростью не менее 85 Мбит/с, что превышает возможности многих пользователей на сегодняшний день [7]. При внедрении H.266 кодека необходимая скорость интернета может упасть до 40-50 Мбит/с, что выглядит вполне приемлемо. Ещё одним преимуществом будет возможность сохранения на носителях в среднем в 2 раза большего материала при условии использования кодека. Очевидно, что применение формата 8K на мобильных устройствах будет во многом зависеть от скорости и ширины внедрения новых поколений мобильной связи 5G и 6G.

Список литературы

1. ГОСТ 26320-84. Оборудование телевизионное студийное и внестудийное. Методы субъективной оценки качества цветных телевизионных изображений // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200016441>.
2. Рекомендация МСЭ-R BT.500-6. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500-6-199407-S/en>.
3. Рекомендация МСЭ-R BT.500-7. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. URL: <https://www.itu.int/rec/recommendation.asp?lang=en&parent=R-REC-BT.500-7-199510-S/en>.
4. Рекомендация МСЭ-R BT.500-8. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500-8-199802-S/en>.
5. Рекомендация МСЭ-R BT.500-9. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500-9-199811-S/en>.
6. Рекомендация МСЭ-R BT.500-10. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500-10-200003-S/en>.
7. Рекомендация МСЭ-R BT.500-11. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500-11-200206-S/en>.
8. Рекомендация МСЭ-R BT.500-12. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500-12-200909-S/en>.

9. Рекомендация МСЭ-R BT.500-13. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-13-201201-I!!PDF-R.pdf.
10. Рекомендация МСЭ-R BT.500-14. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500-14-201910-I/en>.
11. Мамчев Г. В. Цифровое телевидение. Теоретические основы и практическое применение. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. 563 с.
12. Брайс Р. Руководство по цифровому телевидению. М.: ДМК Пресс, 2012. 279 с.
13. Мамчев Г. В. Теория и практика наземного цифрового телевизионного вещания. М.: Горячая Линия – Телеком, 2012. 344 с.
14. Карякин В. Л. Цифровое телевидение. 2-е изд., перераб. и доп. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2013. 448 с.
15. Мамчев Г. В. Цифровое телевизионное вещание. М.: Горячая Линия – Телеком, 2012. 448 с.
16. Маклаков Д. В. Классификация специфических искажений изображения и методы их оценки в системах кодирования MPEG-2. URL: http://www.autex.spb.su/download/dsp/dspa/dspa2004/t2_48.pdf.
17. Тепляков Д. Обзор стандарта VVC: интересные технологии и сравнение с HEVC. URL: <https://vc.ru/tech/267256-obzor-standarta-vc-interesnye-tehnologii-i-sravnienie-s-hevc>.
18. Принципы кодирования изображений. URL: <https://studfile.net/preview/9149458/page:41/>.
19. AVC/H.264. URL: <https://www.elecard.com/ru/page/avc>.
20. Проекторы для кинотеатров. URL: <https://kino-oborudovanie.ru/info/articles/proektory-dlya-kinoteatrov/>.
21. Максименко А. Тестируем 8K-проектор для домашнего кинотеатра JVC DLA-NX9B. URL: <https://www.hi-fi.ru/magazine/video/jvc-dla-nx9b-projector-test/>.
22. Видеокодек VP9 – преимущества и недостатки. URL: <https://navertel.net/videokodek-vp9-preimushhestva-i-nedostatki>.
23. Разрешение глаза человека: Нужны ли нашим глазам 8K экраны. URL: <https://primelens.ru/raznoe/razreshenie-glaza-cheloveka-nuzhny-li-nashim-glazam-8k-ekrany-aleksandr-navagin-hajp.html#i-21>.
24. Morrison G. 8K TV Explained, and Why You Definitely Don't Need to Buy One. URL: <https://www.cnet.com/tech/home-entertainment/8k-tv-explained-and-why-you-definitely-dont-need-to-buy-one/>.
25. Bizzaco M., Levenson J. What is 4K? Everything you need to know about 4K Ultra HD. URL: <https://www.digitaltrends.com/home-theater/everything-you-need-to-know-about-4k-ultra-hd>.
26. Pino N., Leger H. St. What is 4K? The basics of Ultra HD explained // techradar. URL: <https://www.techradar.com/news/what-is-4k-resolution-ultra-hd>.
27. Finding 8K Content. URL: <https://discover8k.com/finding-8k-content/>.
28. Chinnock C. DSCC Forecasts 8K TVs Shipments. URL: <https://8kassociation.com/industry-info/8k-news/dsc-forecasts-8k-tvs-shipments/>.
29. Wilkinson S. 8K vs 4K TVs: Double-blind study by Warner Bros. et al reveals most consumers can't tell the difference. URL: <https://www.techhive.com/article/578376/8k-vs-4k-tvs-most-consumers-cannot-tell-the-difference.html>.
30. Hoffman T. The Best 4K Monitors for 2022. URL: https://www.pcmag.com/picks/the-best-4k-monitors?test_uuid=06r4MYCu5PZzCkufjQSV3po&test_variant=b.
31. Bach M. Can you see the difference with a 4K monitor?. URL: <https://www.pugetsystems.com/labs/articles/Can-you-see-the-difference-with-a-4K-monitor-729/>.
32. Fraunhofer Versatile Video Encoder (VVenC). URL: <https://github.com/fraunhoferhhi/vvenc/wiki>.
33. Which Codecs Does YouTube Use?. URL: <https://streaminglearningcenter.com/codecs/which-codecs-does-youtube-use.html>.

34. Cohen S., Malcolm D. 8K TV: Everything you need to know about television's future. URL: <https://www.digitaltrends.com/home-theater/8k-tv-everything-you-need-to-know/>.
35. Ozer J. VP9 Codec: Google's Open-Source Technology Explained. URL: <https://www.wowza.com/blog/vp9-codec-googles-open-source-technology-explained>.
36. Ozer J. Moscow State Reports: FFmpeg Still Tops for H.264, but Falts for HEVC and AV1. URL: <https://www.streamingmedia.com/Articles/ReadArticle.aspx?ArticleID=147394>.
37. Bilodeau S. Delivering 8K using AVC/H.264. URL: <https://www.mysterybox.us/blog/2017/2/21/delivering-8k-using-avch264>.