

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9123

УДК 630.37

Обзор

Анализ конструкций и характеристик систем охлаждения двигателей лесных машин

Кононов Иван Тимурович

*аспирант, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация),
vanya.kononov.99@list.ru*

Тихонов Евгений Андриянович

*доктор технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет
(Российская Федерация), tihonov@petrstu.ru*

Получена: 16 октября 2025 / Принята: 14 января 2026 / Опубликовано: 4 февраля 2026

Аннотация: В работе представлен обзор современных решений и тенденций в области систем охлаждения лесозаготовительной техники, работающей в тяжёлых климатических условиях. Рассмотрены конструкции и параметры крыльчаток радиаторов, их влияние на энергоэффективность и надёжность двигателей, а также особенности различных типов приводов — механических, электрических и гидравлических. Проанализированы данные отечественных и зарубежных производителей по 31 модели лесозаготовительных машин, оценены применяемые подходы к повышению эффективности охлаждения и снижению энергопотребления. На основе анализа установлено, что наиболее распространёнными в отрасли являются крыльчатки диаметром 700 мм, применяемые на двигателях семейства Д-260. По результатам сравнительной оценки конструктивных и эксплуатационных характеристик обоснован выбор серийной крыльчатки АМК700.001.00.000 в качестве базовой модели для дальнейшей оптимизации. В будущем планируется создание цифрового двойника выбранной крыльчатки, проведение численных исследований с использованием CFD и акустического анализа, а также разработка критериев улучшения аэродинамических и эксплуатационных свойств. Результаты обзора могут быть использованы при модернизации систем охлаждения отечественной лесозаготовительной техники с минимальными затратами и без необходимости существенных изменений базовой конструкции.

Ключевые слова: крыльчатка радиатора; лесозаготовительная техника; система охлаждения; топливная экономичность; оптимизация конструкции

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9123

Review

Analysis of design and performance of cooling systems of forestry machine engines

Ivan Kononov

*Ph. D. student, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
vanya.kononov.99@list.ru*

Evgeny Tihonov

*D. Sc. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University
(Russian Federation), tihonov@petrsu.ru*

Received: 16 October 2025 / Accepted: 14 January 2026 / Published: 4 February 2026

Abstract: The paper presents a review of current solutions and trends in cooling systems for forestry machinery operating under severe climatic conditions. The study examines the design and parameters of radiator impellers, their impact on engine energy efficiency and reliability, as well as the features of various drive types — mechanical, electric, and hydraulic ones. Data from domestic and foreign manufacturers covering 31 models of forestry machines were analyzed, and existing approaches to improving cooling efficiency and reducing energy consumption were evaluated. Based on the analysis, it was found that the most common impellers in the industry are those with a 700 mm diameter, used in engines of the D-260 family. According to the comparative assessment of structural and operational characteristics, the serial impeller model AMK700.001.00.000 was selected as the baseline for further optimization. Future research will focus on creating a digital twin of the selected impeller, conducting numerical simulations using CFD and acoustic analysis, and developing criteria for improving aerodynamic and operational performance. The review results may be applied to modernizing the cooling systems of domestic forestry equipment with minimal costs and without major design modifications.

Keywords: radiator impeller; forestry machinery; cooling system; fuel efficiency; design optimization

1. Анализ систем охлаждения двигателей лесных машин и обоснование выбора крыльчатки в качестве объекта оптимизации для повышения топливной экономичности

Стабильная и эффективная работа двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в экстремальных условиях лесозаготовительных работ является фундаментальным требованием, определяющим производительность и надёжность всей машины. Одним из ключевых факторов, обеспечивающих долговечность и сохранение номинальных мощностных характеристик силового агрегата, является поддержание оптимального теплового режима. Эту функцию выполняет система охлаждения, задача которой заключается в непрерывном и управляемом отводе избыточного тепла, выделяющегося в процессе сгорания топлива и трения в подвижных узлах. В лесозаготовительной и лесохозяйственной технике, работающей в условиях высоких переменных нагрузок, запылённости, повышенной влажности и значительных перепадов температур, требования к эффективности и надёжности системы охлаждения многократно возрастают, что требует строгого следования общим принципам конструирования и безопасности [11]. В современном машиностроении для тяжёлой техники применяются, главным образом, два принципиальных типа систем охлаждения, каждый из которых обладает своими конструктивными и эксплуатационными особенностями [1], [15].

Воздушная система охлаждения основана на принципе непосредственного отвода тепла от нагретых поверхностей двигателя (цилиндров, головки блока) в окружающую атмосферу. Для этого цилиндры и головки выполняются с развитым оребрением, увеличивающим площадь теплообмена, а для создания принудительного воздушного потока используется вентилятор, часто оснащённый направляющим кожухом. К основным достоинствам такой системы относятся простота конструкции, которая исключает наличие радиатора, водяных рубашек, насоса и трубопроводов, что приводит к снижению общей массы, стоимости и трудоёмкости обслуживания. Система менее уязвима к низким температурам, т. к. отсутствует риск замерзания охлаждающей жидкости. Однако для мощных лесозаготовительных машин воздушное охлаждение обладает рядом критических недостатков. Во-первых, обеспечить равномерное и достаточное охлаждение всех зон крупногабаритного двигателя технологически сложно, что может приводить к локальным перегревам и термическим деформациям. Во-вторых, эффективность теплоотдачи сильно зависит от чистоты рёбер, которые в условиях лесозаготовки быстро загрязняются хвоей, пылью и грязью, резко ухудшая теплопередачу. В-третьих, такая система создаёт высокий уровень шума от вентилятора и плохо приспособлена для организации эффективного охлаждения других рабочих жидкостей, таких как гидравлическое масло или рабочая жидкость коробки передач, которые в современной технике также требуют интенсивного теплоотвода [3], [8], [14]. По этим причинам воздушное охлаждение в современной мощной лесозаготовительной технике (харвестерах, форвардерах, трелёвочных тракторах) имеет крайне ограниченное применение [9].

Подавляющее большинство современных лесозаготовительных машин оснащается жидкостной (водяной) системой охлаждения закрытого типа с принудительной циркуляцией. Эта система является сложным инженерным комплексом, в котором тепло от деталей двигателя сначала передаётся циркулирующей жидкости (антифризу), а затем рассеивается в атмосферу через теплообменник-радиатор. Основными компонентами такой системы являются: центробежный жидкостной насос (помпа), обеспечивающий циркуляцию антифриза по рубашке охлаждения блока и головки цилиндров; термостат — клапанное устройство, регулирующее поток жидкости по малому или большому кругу в зависимости от её температуры и обеспечивающее быстрый прогрев двигателя; основной радиатор, представляющий собой трубчато-пластинчатый или сотовый теплообменник; расширительный бачок для компенсации изменения объёма жидкости; соединительные патрубки и, что наиболее важно для данного исследования, вентилятор с приводным механизмом, создающий необходимый воздушный поток через сердцевину радиатора. Часто в лесозаготовительной технике применяется сдвоенный или даже строенный радиаторный блок, где в едином кожухе размещены отдельные секции для охлаждения двигателя, гидравлического масла и жидкости системы рециркуляции отработавших газов (EGR). Главные преимущества жидкостной системы — это способность поддерживать более стабильный и оптимальный температурный режим двигателя (в среднем 85—95 °C) независимо от режима работы, высокая эффективность отвода больших тепловых потоков, возможность компактной компоновки подкапотного пространства и значительное снижение шума по сравнению с воздушными системами. Именно всеобщее распространение жидкостных систем охлаждения в отрасли делает их анализ и совершенствование наиболее актуальными для решения задачи повышения топливной экономичности [20], [23].

Топливная экономичность лесозаготовительной машины представляет собой комплексный показатель, на который влияет множество взаимосвязанных факторов. Условно их можно разделить на две крупные категории. Первая категория — это основные, или тяговые, энергетические потери. К ним относится мощность, затрачиваемая непосредственно на перемещение машины и выполнение технологического процесса: преодоление сил сопротивления качению и движению на уклонах; механические потери в трансмиссии (в коробке передач, мостах, конечных передачах); энергозатраты на привод рабочего гидравлического оборудования (насосов, приводящих в действие манипуляторы, харвестерные головки, захваты форвардеров). Оптимизация этих потерь является предметом постоянных исследований, но часто связана с глубокой модернизацией базовой конструкции машины или силового агрегата, что требует колоссальных затрат [6]. Вторая категория — вспомогательные, или паразитные, потери. Это мощность, которая отбирается от коленчатого вала двигателя для привода агрегатов, не участвующих напрямую в создании тягового усилия или выполнении рабочих операций. К таким агрегатам относятся генератор, питающий электрические системы; компрессор пневмосистемы; насосы вспомогательных гидросистем (например, усилителя руля) и, что крайне важно, вентилятор системы охлаждения. Мощ-

ность, потребляемая приводом вентилятора, является одной из наиболее существенных в группе паразитных потерь. При работе двигателя на номинальных оборотах в условиях максимальной тепловой нагрузки (высокая температура окружающего воздуха, засорение радиатора пухом и грязью) традиционная крыльчатка с клиноременным приводом и вязкостной муфтой может потреблять от 8 до 15 % полезной мощности двигателя [4]. Даже в стандартных эксплуатационных условиях, характерных для среднестатистической смены, эта величина редко опускается ниже 5 % [12]. Следовательно, любое, даже незначительное, снижение энергопотребления вентилятора имеет прямой, измеримый эффект в виде уменьшения нагрузки на двигатель и сокращения удельного расхода топлива, что в масштабах парка техники и всего жизненного цикла машины даёт существенную экономию [19].

Повышение эффективности системы охлаждения в целом — многогранная инженерная задача, которая теоретически может решаться по нескольким направлениям. Это оптимизация конструкции радиатора (применение более тонких трубок, высокоэффективных алюминиевых лент, улучшение обтекаемости) для снижения аэродинамического сопротивления и улучшения теплообмена; использование более эффективных помп с регулируемой производительностью; внедрение интеллектуальных систем управления на основе электронных термостатов и датчиков, которые могли бы более точно дозировать интенсивность охлаждения [8], [22]. Однако выбор в качестве первоочередного объекта оптимизации именно крыльчатки вентилятора представляется наиболее обоснованным, технически достижимым и экономически целесообразным по ряду определяющих причин.

Крыльчатка является финальным и ключевым элементом, преобразующим механическую энергию привода в кинетическую энергию воздушного потока, преодолевающего аэродинамическое сопротивление плотного пакета радиаторов. Её геометрические параметры (диаметр, форма профиля лопасти, угол её установки, количество лопастей, форма ступицы) напрямую и в наибольшей степени определяют гидродинамическую характеристику вентилятора, т. е. зависимость создаваемого полного давления от объёмного расхода воздуха. Неоптимальная геометрия приводит к возникновению вихрей, зон отрыва потока и турбулентности, что увеличивает гидравлические потери и, как следствие, мощность, необходимую для вращения [17].

Анализ показывает, что конструкции многих серийно производимых крыльчаток для отечественных двигателей, широко применяемых в лесной технике (таких как семейство Д-260), зачастую не являются результатом глубокой аэродинамической оптимизации [12]. Их форма исторически формировалась на основе эмпирических данных, упрощённых расчётов и, в значительной степени, технологических ограничений литейного или штамповочного производства прошлых лет. Таким образом, они содержат значительный нереализованный потенциал для совершенствования. Современные методы компьютерного инжиниринга, такие как параметрическое твердотельное моделирование (CAD), вычислительная гидродинамика (CFD) и топологическая оптимизация, позволяют радикально пересмотреть геометрию лопастей [7], [26]. Эти методы дают возможность спроектировать крыльчатку с аэро-

динамически чистым профилем, минимизировать массу за счёт удаления малонагруженного материала и снизить уровень шума, что является дополнительным важным преимуществом [5], [10], [27].

С точки зрения внедрения усовершенствованная крыльчатка представляет собой, как правило, взаимозаменяемый узел. Её установка не требует кардинальных изменений в конструкции двигателя, модернизации радиаторного блока, кожуха или коренного пересмотра системы привода (если не меняется принцип привода). Это значительно снижает стоимость проектирования, испытаний и последующей модернизации парка техники, делая решение экономически привлекательным.

Оптимизация крыльчатки даёт синергетический эффект. Помимо прямого снижения потребляемой мощности, улучшение аэродинамики ведёт к снижению уровня звукового давления, что напрямую улучшает условия труда оператора, снижая шумовую нагрузку [4], [15]. Кроме того, более эффективная крыльчатка может позволить в перспективе использовать приводной механизм меньшей мощности или реализовать более гибкие алгоритмы управления оборотами вентилятора [25], [29].

Таким образом, комплексный анализ типов систем охлаждения, структуры энергопотерь в лесозаготовительной машине и сравнительных возможностей модернизации её узлов однозначно выделяет привод крыльчатки вентилятора как значительный и технически реализуемый резерв для повышения топливной экономичности. Последующее детальное исследование существующих конструкций крыльчаток, их эксплуатационных характеристик и применяемых типов приводов позволит конкретизировать объект для глубокой инженерной проработки, направленной на снижение энергоёмкости системы охлаждения двигателей лесозаготовительных и лесохозяйственных машин.

2. Анализ рынка лесозаготовительных и лесохозяйственных машин в России

Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в лесозаготовительных и лесохозяйственных машинах имеет ряд особенностей, обусловленных спецификой условий работы, характером нагрузок и требованиями к надёжности. Лесозаготовительная техника, такая как харвестеры, форвардеры и трелёвочные тракторы, работает в условиях повышенной запылённости, высокой влажности и на неровных поверхностях. Это требует использования усиленных систем фильтрации воздуха для предотвращения попадания абразивных частиц в двигатель, а также устойчивости к коррозии и вибрациям [1], [22]. Кроме того, перепады температур, особенно в зимний период, диктуют необходимость применения качественных охлаждающих жидкостей и масел, способных сохранять свои свойства в широком диапазоне температур [2].

Характер нагрузок на ДВС в лесозаготовительной технике отличается цикличностью и высокой интенсивностью. Машины часто работают в режиме частых стартов и остановок, что приводит к повышенному износу двигателя. Кроме того, выполнение таких операций, как валка деревьев или транспортировка брёвен, требует высокого крутящего момента

на низких оборотах, что создаёт дополнительную нагрузку на силовую установку [14]. Длительная работа на холостом ходу, характерная для многих лесозаготовительных операций, также негативно сказывается на ресурсе двигателя, увеличивая нагрузку на систему смазки и охлаждения [21], [23].

Требования к надёжности и долговечности ДВС в лесозаготовительной технике включают устойчивость к перегреву, защиту от загрязнений и простоту обслуживания. Эффективные системы охлаждения и усиленные фильтры являются обязательными элементами конструкции. В условиях удалённости лесных участков важно, чтобы двигатели были легко обслуживаемыми, с доступными запчастями и минимальными требованиями к техническому уходу [12]. Современные двигатели также оснащаются системами диагностики, которые позволяют своевременно выявлять неисправности и предотвращать серьёзные поломки.

Экологические аспекты эксплуатации ДВС в лесозаготовительной технике становятся всё более важными. Современные двигатели должны соответствовать строгим экологическим стандартам, таким как Евро-4 и Евро-5, что требует использования систем очистки выхлопных газов, включая катализаторы и сажевые фильтры [19]. Кроме того, в последние годы наблюдается тенденция к использованию альтернативных видов топлива, таких как биодизель, а также к внедрению гибридных силовых установок, сочетающих ДВС и электродвигатели [2], [13]. Это позволяет снизить расход топлива и уменьшить вредные выбросы, что особенно важно в условиях работы в лесных массивах.

Перспективы развития ДВС в лесозаготовительной технике связаны с повышением их эффективности и экологичности. Одним из направлений является электрификация, которая уже активно внедряется в отрасли. Полностью электрические машины, такие как электрические харвестеры и форвардеры, позволяют совсем отказаться от ДВС, снижая зависимость от ископаемого топлива и уменьшая выбросы [13], [28]. Другим перспективным направлением является использование водородных двигателей, которые обладают высоким экологическим потенциалом. Однако внедрение таких технологий требует значительных инвестиций и инфраструктурных изменений [30].

Производство лесозаготовительной техники в России представляет собой важный сектор машиностроения, обеспечивающий отечественный лесозаготовительный рынок специализированной техникой. В стране действует ряд крупных предприятий, таких как «Алтайлесмаш», «КАМАЗ», «Амкодор-Онего», которые выпускают тракторы, лесозаготовительные машины, а также специальное оборудование. Российские заводы ориентированы на создание техники, адаптированной к сложным климатическим условиям и особенностям эксплуатации, включая гусеничные тракторы, лесопожарные машины, трелёвочные тракторы. Приоритетом отрасли является локализация производства, развитие инновационных технологий и повышение энергоэффективности техники, что способствует снижению зависимости от импорта и увеличению экспортного потенциала [22].

Завод «Алтайлесмаш» специализируется на производстве гусеничных тракторов, предназначенных для лесного хозяйства. Основные модели тракторов, выпускаемые предприятием

для лесопромышленного комплекса, включают: машина гусеничная ТЛ-ЗАЛМ (фото 1) предназначена для механизации работ в лесной промышленности в макроклиматических районах с умеренным климатом по ГОСТ 15150. Машина оборудована следующими типами двигателей от производителя «Арзамасский машиностроительный завод»: А41СИ-02 мощностью 69,1/94 кВт/л. с. и Д-442 мощностью 99,3/135 кВт/л. с.



Фото 1. Машина гусеничная ТЛ-ЗАЛМ [<https://altailesmash.ru>]

Photo 1. Tracked vehicle TL-ZALM

Машина гусеничная МТЧ-4, ТЛ-5АЛМ-01 используется для трелёвки леса и других лесозаготовительных работ, оснащена соответствующим оборудованием для эффективной работы в лесной промышленности (фото 2). Оснащена двигателями ЯМЗ-536М2 мощностью 132/180 кВт/л. с. или А-01МРСИ мощностью 95,5/130 кВт/л. с.



Фото 2. Машина гусеничная МТЧ-4, ТЛ-5АЛМ-01 [<https://altailesmash.ru>]

Photo 2. Tracked vehicle MTC-4, TL-5ALM-01

Машина гусеничная ТЛ-4 — это специализированная техника, предназначенная для борьбы с лесными пожарами и проведения профилактических противопожарных мероприятий (фото 3). Она оснащена передним навесным оборудованием, таким как толкатель, бульдозер или клинобульдозерное устройство, а также пожарным оборудованием и плугом.

Используются с разными двигателями, которые устанавливаются на производстве, такими как ЯМЗ-236М2 мощностью 132/180 кВт/л. с., А-01МРСИ 99/135 кВт/л. с., А41СИ-02 мощностью 69/100 кВт/л. с., Д-442 мощностью 106,5/145 кВт/л. с.



Фото 3. Машина гусеничная ТЛ-4 [<https://altailesmash.ru>]

Photo 3. Tracked vehicle TL-4

Также на заводе «Алтайлесмаш» производятся следующие машины для лесопромышленного комплекса: лесопогрузчик челюстной ЛТ-188АЛМ с двигателем А-01МРСИ, самоходная энергетическая машина СЭМ-4 с коником на базе двигателя ЯМЗ-236М2, трактор гусеничный ТЛС-5.01 для предотвращения лесных пожаров, который оснащён двигателем Д-442-25ЛИ, мульчер ИДС с двигателем ЯМЗ-536 мощностью 312 л. с.

Трактор ЛТ-157 — лесопромышленная модификация трактора Т-150К-09 повышенной проходимости, с каркасом безопасности (фото 4). Предназначен для эксплуатации с трелёвочным оборудованием [8], оснащается двигателем ЯМЗ-236 мощностью 128,7/175 кВт/л. с. или двигателем Д260.4 мощностью 154/210 кВт/л. с.



Фото 4. Трактор ЛТ-157 [<https://altailesmash.ru>]

Photo 4. Tractor LT-157

На территории Республики Карелия расположен завод по производству лесозаготовительной техники ООО «Амкодор-Онего» [9]. Основная продукция предприятия включает: форвардеры, машины для транспортировки лесоматериалов с мест заготовки к месту погрузки. Предприятие выпускает форвардеры с колёсной формулой 6×6 и 8×8 , грузоподъёмностью 14 т и 15 т. Харвестеры: многофункциональные машины для валки, обрезки сучьев и раскряжёвки деревьев. В частности, модель харвестера АМКОДОР 2561/2561-01 объединяет передовые разработки и собственные компоненты компании, обеспечивая высокую эффективность в лесозаготовке (фото 5). Харвестер АМКОДОР 2561/2561-01 оснащён двигателем от Минского моторного завода Д-262S2 мощностью 220,6/300 кВт/л. с.



Фото 5. Харвестер АМКОДОР 2561/2561-01 [<https://amkodor-onego.ru>]

Photo 5. Harvester AMKODOR 2561/2561-01

Лесопогрузчики: машины для погрузки и разгрузки лесоматериалов. Например, модель АМКОДОР 352Л/352Л-01 грузоподъёмностью 3800 кг, оснащённая двигателем Д-260.9 мощностью 132/180 кВт/л. с. (фото 6).



Фото 6. Лесопогрузчик АМКОДОР 352Л/352Л-01 [<https://amkodor-onego.ru>]

Photo 6. Forestry loader AMKODOR 352L/352L-01

Машины для трелёвки (транспортировки) деревьев или хлыстов из леса к месту погрузки. Модель АМКОДОР 2243 обладает тяговым усилием лебёдки 6000 кг с двигателем Д-260.1, обладающим мощностью 116/155 кВт/л. с. (фото 7).



Фото 7. Тягач трелёвочный АМКОДОР 2243 [<https://amkodor-onego.ru>]

Photo 7. Skidding tractor AMKODOR 2243

Модель форвардера АМКОДОР 2682-01 обладает грузоподъемностью 15 т и оснащена двигателем Д-260.9S2 мощностью 132/180 кВт/л. с. (фото 8).



Фото 8. Форвардер АМКОДОР 2682-01 [<https://amkodor-onego.ru>]

Photo 8. Forwarder AMKODOR 2682-01

На производстве «Амкодор-Онего» также производятся следующие лесозаготовительные и лесохозяйственные машины:

1. Форвардер АМКОДОР FF560 с китайским двигателем Power WP 2.3N мощностью 66/90 кВт/л. с.
2. Форвардер АМКОДОР 2631 с белорусским двигателем Д-245.2S2 мощностью 90/122 кВт/л. с.
3. Форвардер АМКОДОР 2641 с белорусским двигателем Д-260.1S2 мощностью 116/158 кВт/л. с.
4. Форвардер АМКОДОР 2661-01 с белорусским двигателем Д-260.4S2 мощностью 156/212 кВт/л. с.
5. Форвардер АМКОДОР 2662-01 с белорусским двигателем Д-260.9S2 мощностью 132/180 кВт/л. с.
6. Форвардер АМКОДОР FF1461 с отечественным двигателем ЯМЗ-536 мощностью 243/330 кВт/л. с.
7. Форвардер АМКОДОР FF1681 с отечественным двигателем ЯМЗ-536 мощностью 243/330 кВт/л. с.
8. Харвестер АМКОДОР FH840 с китайским двигателем Power WP 2.3N мощностью 66/90 кВт/л. с.
9. Харвестер АМКОДОР 2531 с белорусским двигателем Д-245.2S2 мощностью 90/122 кВт/л. с.

10. Харвестер АМКОДОР 2541 с белорусским двигателем Д-260.9 мощностью 132/180 кВт/л. с.

11. Тягач трелёвочный АМКОДОР 2242В с белорусским двигателем Д-260.1S2 мощностью 116/155 кВт/л. с.

12. Рубильная машина АМКОДОР 2904-02 с белорусским двигателем Д-260.9S2 мощностью 132/180 кВт/л. с.

Производитель КАМАЗ также планирует выпускать линейку лесозаготовительной техники, харвестер КАМАЗ-1010 (фото 9), оснащённый 325-сильным дизельным двигателем Cummins, и форвардер КАМАЗ-1011 (фото 10), оснащённый таким же дизельным мотором [10]. На данный момент опытные образцы проходят испытания в Республике Карелия на предприятии Segezha Group.



Фото 9. Харвестер КАМАЗ-1010 [<https://segezha-group.com/press-center/news/segezha-group-b-kamaz-prodolzhayut-testirovat-pervye-otchestvennyye-lesozagotovitelnye-kompleksy/>]

Photo 9. Harvester KAMAZ-1010

Отдельного внимания заслуживают китайские лесные машины, которые в последние годы активно завоёвывают мировой рынок благодаря своей доступности и адаптации к различным условиям эксплуатации. LOGSET — китайская компания, специализирующаяся на лесной технике [11]. Её харвестеры Н8 и Н12 оснащены двигателями Weichai WP7 и Weichai WP10 мощностью 130 кВт/175 л. с. и 160 кВт/215 л. с. соответственно (фото 11). Форвардеры F8 и F12 имеют аналогичные показатели: 130 кВт/175 л. с. для F8 и 160 кВт/215 л. с. для F12 (фото 12). Лесная техника Logset адаптирована для работы в сложных условиях, например, на местности с большими уклонами.



Фото 10. Форвардер КАМАЗ-1011 [<https://segezha-group.com/press-center/news/segezha-group-b-kamaz-prodolzhayut-testirovat-pervye-otechestvennyye-lesozagotovitelnye-komplekсы/>]

Photo 10. Forwarder KAMAZ-1011



Фото 11. Харвестер Logset H8 [<https://www.техногир.рф/tehnika-dlya-lesozagotovki/-harvester-logset-8h-2022-900-m-ch>]

Photo 11. Harvester Logset H8



Фото 12. Форвардер Logset F8 [<https://www.техногир.рф/tehnika-dlya-lesozagotovki-harvester-logset-8F-2022-900-m-ch>]

Photo 12. Forwarder Logset F8

В таблице 1 представлены лесозаготовительные и лесохозяйственные машины, включая их технические характеристики, модели двигателей и ключевые особенности.

Таблица 1. Анализ производителей лесных машин и их двигателей

Table 1. Analysis of forestry machinery manufacturers and their engines

№	Марка и модель машины	Производитель	Тип машины	Варианты установочных двигателей	Мощность, кВт
1	ТЛ-ЗАЛМ	Алтайлесмаш	Гусеничная	А41СИ-02 Д-442-25ЛИ	69,1 99,3
2	МТЧ-4	Алтайлесмаш	Гусеничная	ЯМЗ-536М2 А-01МРСИ	132 95,5
3	ТЛ-5АЛМ-01	Алтайлесмаш	Гусеничная	ЯМЗ-536М2 А-01МРСИ	132 95,5
4	ТЛ-4	Алтайлесмаш	Гусеничная	ЯМЗ-236М2 А-01МРСИ А41СИ-02 Д-442	132 99 69 106,5
5	ЛТ-188АЛМ	Алтайлесмаш	Лесопогрузчик	А-01МРСИ	99
6	СЭМ-4	Алтайлесмаш	Самоходная энергетическая машина	ЯМЗ-236М2	132

7	ТЛС-5.01	Алтайлесмаш	Гусеничная	Д-442-25ЛИ	99,3
8	ИДС	Алтайлесмаш	Мульчер	ЯМЗ-536	312
9	АМКОДОР 2561/2561-01	АМКОДОР-ОНЕГО	Харвестер	Д-262S2	220,6
10	АМКОДОР 352Л/352Л-01	АМКОДОР-ОНЕГО	Лесопогрузчик	Д-260.9	132
11	АМКОДОР 2243	АМКОДОР-ОНЕГО	Тягач трелёвочный	Д-260.1	116
12	АМКОДОР 2682/2682-01	АМКОДОР-ОНЕГО	Форвардер	Д-260.9S2	132
13	АМКОДОР FF560	АМКОДОР-ОНЕГО	Форвардер	Power WP 2.3N	66
14	АМКОДОР 2631	АМКОДОР-ОНЕГО	Форвардер	Д-245.2S2	90
15	АМКОДОР 2641	АМКОДОР-ОНЕГО	Форвардер	Д-260.9S2	132
16	АМКОДОР 2661-01	АМКОДОР-ОНЕГО	Форвардер	Д-260.4S2	156
17	АМКОДОР 2662-01	АМКОДОР-ОНЕГО	Форвардер	Д-260.9S2	132
18	АМКОДОР FF1461	АМКОДОР-ОНЕГО	Форвардер	ЯМЗ-536	243
19	АМКОДОР FF1681	АМКОДОР-ОНЕГО	Форвардер	ЯМЗ-536	243
20	АМКОДОР FH840	АМКОДОР-ОНЕГО	Харвестер	Power WP 2.3N	66
21	АМКОДОР 2531	АМКОДОР-ОНЕГО	Харвестер	Д-245.2S2	90
22	АМКОДОР 2541	АМКОДОР-ОНЕГО	Харвестер	Д-260.9	132
23	АМКОДОР 2242В	АМКОДОР-ОНЕГО	Тягач трелёвочный	Д-260.1S2	116
24	АМКОДОР 2904-02	АМКОДОР-ОНЕГО	Рубильная машина	Д-260.9S2	132
25	КАМАЗ-1010	КАМАЗ	Харвестер	Cummins	239
26	КАМАЗ-1011	КАМАЗ	Форвардер	Cummins	239
27	H8	Logset	Харвестер	Weichai WP7	130
28	H12	Logset	Харвестер	Weichai WP10	160
29	F8	Logset	Форвардер	Weichai WP7	130
30	F12	Logset	Форвардер	Weichai WP10	160
31	ЛТ-157	Агроимпорт	Тягач трелёвочный	ЯМЗ-236 Д-260.4	128,7 154

3. Анализ системы охлаждения силовых установок

Тип привода играет ключевую роль в управлении охлаждением. Привод от шкива коленчатого вала применяется в таких моделях двигателей, как А41СИ-02 и Д-442-25ЛИ, обладает рядом недостатков. Ремни подвержены естественному износу: со временем они растягиваются, покрываются трещинами или полностью рвутся. Это вынуждает проводить регулярные проверки натяжения, а также периодически заменять ремни и шкивы. Подобное обслуживание не только увеличивает эксплуатационные расходы, но и требует временных затрат, что может быть критично для непрерывных производственных процессов. При перегрузках или недостаточном натяжении ремни склонны к проскальзыванию. Это приводит к потере

КПД системы и снижению точности передачи вращения. Клиноременные передачи генерируют значительно больше шума и вибраций по сравнению с гидромоторами или электрическими муфтами [3]. Эксплуатация в агрессивных средах (пыль, влага, масло, перепады температур) ускоряет износ ремней. Клиноременная передача менее эффективна при передаче высоких мощностей в сравнении с прямыми приводами, такими как гидромоторы. Это делает её непригодной для тяжелонагруженных систем, где требуется высокая производительность и надёжность [16], [29].

Вязкостная муфта, используемая в двигателях с приводом от шкива коленчатого вала, имеет ряд существенных недостатков. При длительной работе под нагрузкой жидкость внутри муфты нагревается, что снижает её вязкость и способность передавать крутящий момент. Это приводит к потере КПД системы и необходимости введения пауз для охлаждения. Вязкостная муфта требует регулярной проверки и замены специальной силиконовой жидкости, которая теряет свойства из-за термического старения или загрязнения. Процедура обслуживания часто требует специализированного оборудования и навыков, что увеличивает эксплуатационные расходы. Муфта медленно реагирует на резкие изменения нагрузки. При внезапном увеличении сопротивления крыльчатки передача момента происходит с задержкой, что нарушает стабильность работы системы. Низкие температуры снижают вязкость жидкости, ухудшая передачу момента. В холодном климате требуется дополнительный прогрев системы перед запуском. Кроме того, вибрации и удары могут нарушить герметичность муфты, приводя к утечке жидкости и поломкам [4], [21].

Электрический привод, используемый в Weichai WP7/WP10, требует постоянного и качественного электропитания. Перепады напряжения, скачки или отключения электроэнергии могут нарушить её работу, что критично для систем, где необходима бесперебойная передача момента. Электрический привод дороже в производстве и обслуживании. Его стоимость увеличивается из-за сложной электроники, датчиков и систем управления. Для работы электрического привода требуется значительное количество электроэнергии, что повышает эксплуатационные расходы. Кроме того, часть энергии преобразуется в тепло, что снижает общий КПД системы. Электрические приводы содержат чувствительные электронные компоненты, которые сложно диагностировать и ремонтировать. Для обслуживания требуются специалисты с узкопрофильными знаниями, а замена деталей часто обходится дорого. Электроника чувствительна к влаге, пыли, вибрациям и электромагнитным помехам [6], [24].

В отличие от привода от шкива коленчатого вала, где ремни изнашиваются и требуют замены, гидромоторы не имеют быстроизнашивающихся компонентов. Их конструкция основана на герметичной системе с масляным контуром, что минимизирует трение и продлевает срок службы. Гидромоторы лишены проблемы проскальзывания, характерной для клиноременных передач, и инерционности вязкостных муфт. В отличие от вязкостных муфт, где перегрев жидкости снижает эффективность, гидромоторы используют масло, которое не только передаёт момент, но и выполняет функцию охлаждения. Это позволяет им работать длительное время без потери КПД. Гидросистемы требуют минимального

обслуживания, достаточно периодической замены масла и фильтров. Это выгодно отличает их от вязкостных муфт, где необходима замена специализированной жидкости, и электрических приводов с дорогостоящей электроникой. Гидромоторы устойчивы к пыли, влаге, вибрациям и перепадам температур. В отличие от электрических приводов их электронные компоненты отсутствуют, что исключает риски, связанные с влажностью или электромагнитными помехами. Гидромоторы способны передавать значительный крутящий момент даже при компактных размерах. Это делает их пригодными для тяжелонагруженных систем, где привод от шкива коленчатого вала или электрические приводы не справляются [6], [16], [25].

Также использование FAN DRIVE с гидромотором в лесозаготовительной и лесохозяйственной технике снижает энергопотребление и повышает эффективность работы двигателя [29]. Лесозаготовительная техника работает в условиях высоких нагрузок, часто на низких скоростях и с постоянными остановками. Это приводит к повышенному тепловыделению двигателя [18]. Fan Drive обеспечивает принудительное охлаждение радиатора двигателя, предотвращая его перегрев и возможный выход из строя. Лесозаготовка часто проводится в условиях высокой влажности, запылённости и перепадов температур. Эти факторы ухудшают теплообмен и могут привести к перегреву систем. Вентилятор с эффективным приводом помогает поддерживать оптимальную температуру даже в сложных условиях, обеспечивая не только вдув воздуха с окружающей среды, а также работая на выдув, снимая тепло с двигателя. Харвестеры и форвардеры оснащены мощными гидравлическими системами, которые используются для управления манипуляторами, захватами, колёсами и другими механизмами. Гидравлические системы выделяют значительное количество тепла, особенно при интенсивной работе. Fan Drive обеспечивает охлаждение гидравлического масла, предотвращая его перегрев и потерю эксплуатационных свойств [14], [16].

Крыльчатки охлаждения двигателей лесозаготовительной и лесохозяйственной техники играют ключевую роль в поддержании работоспособности машин в условиях интенсивных нагрузок и экстремальных температур. Их конструкция, материал и тип привода напрямую влияют на эффективность теплоотвода, долговечность двигателя и общую производительность [7], [10]. В таблице 2 представлен анализ типов приводов крыльчаток охлаждения лесозаготовительной и лесохозяйственной техники, включая харвестеры, форвардеры и трелёвочные тракторы.

Диаметр крыльчатки варьируется от 400 до 700 мм. Наибольшие размеры (640—700 мм) характерны для мощных двигателей, таких как Cummins, Д-260 и Weichai WP7/WP10, где требуется интенсивный теплообмен. Компактные модели (например, Power WP 2.3N с диаметром 400 мм) предназначены для малогабаритной техники. Большинство двигателей (А41СИ-02, Д-442, А-01МРСИ) используют крыльчатки среднего размера (500—610 мм), что обеспечивает баланс между производительностью и габаритами.

Для выбора оптимального диаметра крыльчатки проведён анализ крыльчаток, представленный в таблице 3.

Таблица 2. Анализ типов приводов крыльчаток охлаждения

Table 2. Analysis of cooling impeller drive types

№	Модель двигателя	Диаметр крыльчатки, мм	Тип привода	Тип муфты	Количество лопастей, шт.	Номинальная частота вращения коленчатого вала, об./мин
1	A41CI-02	610	Привод от шкива коленчатого вала	Вязкостная муфта	6	1750
2	Д-442-25ЛИ	610	Привод от шкива коленчатого вала	Вязкостная муфта	6	1500
3	ЯМЗ-536	650	Привод от шкива коленчатого вала	Вязкостная муфта	9	2400
4	A-01MPCII	610	Привод от шкива коленчатого вала	Вязкостная муфта	6	1700
5	ЯМЗ-236M2	520	Привод от шкива коленчатого вала	Вязкостная муфта	9	2100
6	Д-442	610	Привод от шкива коленчатого вала	Вязкостная муфта	6	1900
7	Д-262S2	700	Привод от шкива коленчатого вала	Гидропривод	7	2460
8	Д-260.9	700	Привод от шкива коленчатого вала	Гидропривод	7	2460
9	Д-260.1	700	Привод от шкива коленчатого вала	Гидропривод	7	2460
10	Д-260.4	700	Привод от шкива коленчатого вала	Гидропривод	7	2460
11	Д-260.9S2	700	Привод от шкива коленчатого вала	Гидропривод	7	2460
12	Power WP 2.3N	400	Привод от шкива коленчатого вала	Вязкостная муфта	7	1800
13	Д-260.1S2	700	Привод от шкива коленчатого вала	Гидропривод	7	2460
14	Д-260.4S2	700	Привод от шкива коленчатого вала	Гидропривод	7	2460
15	Д-245.2S2	450	Привод от шкива коленчатого вала	Гидропривод	6	2200
16	Cummins-C325	640	Привод от шкива коленчатого вала	Вязкостная муфта	9	2200
17	Weichai WP7	665	Электропривод	—	9	2100
18	Weichai WP10	665	Электропривод	—	9	2200

Таблица 3. Анализ диаметра крыльчаток охлаждения

Table 3. Analysis of cooling impeller diameter

№	Диаметр, мм	Количество двигателей	Модель двигателя
1	400	1	Power WP 2.3N
2	450	1	Д-245.2S2
4	520	1	ЯМЗ-236М2
3	610	5	А41СИ-02, Д-442-25ЛИ, А-01МРСИ и др.
4	640	1	Cummins-C325
5	650	1	ЯМЗ-536
6	665	2	Weichai WP7, Weichai WP10
7	700	7	Д-260.1, Д-260.9S2, Д-260.4S2 и др.

Анализ таблицы 3 показывает, что наиболее распространённый диаметр крыльчатки 700 мм АМК700.001.00.000 (фото 13).



Фото 13. Крыльчатка АМК700.001.00.000 [<https://amkodor-onego.ru>]

Photo 13. Impeller АМК700.001.00.000

Для крыльчатки АМК700.001.00.000 используется металлический диффузор (фото 14).



Фото 14. Диффузор крыльчатки AMK700.001.00.000 [<https://amkodor-onego.ru>]

Photo 14. Impeller diffuser AMK700.001.00.000

4. Заключение

Первой задачей, решаемой в данном обзоре, является выбор крыльчатки, применяемой в лесных машинах. По результатам выполненного обзора сделан вывод, что наиболее часто используемая крыльчатка в энергетических установках лесных машин — это крыльчатка AMK700.001.00.000 диаметром 700 мм.

Для достижения поставленной ранее цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Определить эксплуатационные параметры системы привода крыльчатки и рабочий цикл: требуемый расход воздуха через блок радиаторов и параметры реверсивного потока.
2. Выполнить разработку параметрической 3D-модели крыльчатки на базе оригинальной конструкции.
3. Выполнить оптимизацию конструкции крыльчатки на базе численного метода конечных элементов.
4. Выполнить экспериментальное исследование расходно-напорных характеристик базовой и оптимизированной крыльчаток.

Список литературы

1. *Абрамов Е. В., Калинин А. В.* Исследование энергопотребления системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания лесозаготовительной машины // Труды БГТУ. Серия: Лесохозяйственное оборудование и машины. 2020. № 1. С. 45—51.
2. *Бычков Н. С., Колесников А. В.* Исследование потерь энергии в вискомуфте привода вентилятора системы охлаждения автомобильного дизеля // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2022. Т. 22, № 1. С. 34—42.
3. *Демин А. В., Соколов Л. П.* Совершенствование аэродинамических характеристик вентиляторов систем охлаждения транспортных средств // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2018. № 4. С. 78—92.
4. *Журавец М. А.* Разработка экологически безопасной системы охлаждения воздуха в кабинках лесных машин: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2004. 179 с.

5. *Иванов С. Н.* Методы снижения шума вентиляторов систем охлаждения мощных дизелей // *Автомобильная промышленность*. 2019. № 5. С. 12—15.
6. *Карпов Е. В., Михайлов А. С.* Повышение топливной экономичности лесозаготовительных машин за счёт рекуперации энергии // *Лесной вестник*. 2019. Т. 23, № 4. С. 102—110.
7. *Петров К. С., Федоров И. А.* Численное моделирование течения воздуха в вентиляторной установке системы охлаждения двигателя // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 3. С. 45—56.
8. *Рыбаков В. П., Гусев А. С.* Автоматизация систем охлаждения дизельных двигателей специальной техники // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2021. № 4 (82). С. 56—63.
9. *Сидоров А. А.* Надёжность и эффективность гидростатического привода вентилятора строительной и дорожной техники // *Вестник ИргТУ*. 2017. № 4 (111). С. 98—104.
10. *Шмелев С. В., Козлов В. В.* Применение композиционных материалов для изготовления крыльчаток вентиляторов // *Пластические массы*. 2020. № 5-6. С. 44—48.
11. ГОСТ Р ИСО 12100-2010. Безопасность машин. Основные понятия, общие принципы конструирования. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293834/4293834963.pdf> (дата обращения: 26.01.2026). Текст: электронный.
12. Lesprominform. Оценка качества лесных машин в проектировании // [Lesprominform.ru](https://lesprominform.ru). URL: [https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4698\[reference:0\]](https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4698[reference:0]) (дата обращения: 26.01.2026). Текст: электронный.
13. *Berg H., Lundström D.* Thermal Management in Electrified Off-Highway Machinery — Challenges and Solutions // *Energies*. 2022. Vol. 15 (3). P. 1126.
14. *Bies D. A., Hansen C. H.* Engineering Noise Control: Theory and Practice. 5th ed. CRC Press, 2018. 736 p.
15. *Blake W. K.* Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration. Vol. 1: General Concepts and Elementary Sources. Academic Press, 2017. 558 p.
16. Bucher Hydraulics. Fan Drive Systems: Каталог. URL: [https://www.bucherhydraulics.com/en/products/system-solutions/specific-applications/fan-drive-systems\[reference:1\]](https://www.bucherhydraulics.com/en/products/system-solutions/specific-applications/fan-drive-systems[reference:1]) (дата обращения: 26.01.2026). Текст: электронный.
17. *Dixon S. L., Hall C. A.* Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery. 7th ed. Butterworth — Heinemann, 2013. 500 p.
18. Eberspächer. Heating and Air Conditioning Solutions for Forestry Machinery. URL: [https://www.eberspaecher-off-highway.com/applications/forestry-machines\[reference:2\]](https://www.eberspaecher-off-highway.com/applications/forestry-machines[reference:2]) (дата обращения: 26.01.2026). Текст: электронный.
19. European Parliament and Council. Regulation (EU) 2016/1628 on emission limits for gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines in non-road mobile machinery. URL: [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj/eng\[reference:3\]](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj/eng[reference:3]) (дата обращения: 26.01.2026). Текст: электронный.
20. *Fans J.* Engine Cooling Fans for Heavy-Duty Applications: Design and Performance // SAE Technical Paper 2020-01-2215. 2020.
21. *Guenther M., Wiedemann J., Lueddecke B.* Efficient Cooling System with Visco Fan for Commercial Vehicles // SAE Technical Paper. 2005-01-1383. 2005.
22. Horton, Inc. All there is to know about fan drive controls // [HortonWW.com](https://www.hortonww.com). 2021. URL: [https://www.hortonww.com/all-there-is-to-know-about-fan-drive-controls/\[reference:4\]](https://www.hortonww.com/all-there-is-to-know-about-fan-drive-controls/[reference:4]) (дата обращения: 26.01.2026). Текст: электронный.
23. *Hyvärinen J.* How cooling system optimization improves fuel-efficiency (part 1) // AGCO Power CORE Insights. 2024. URL: [https://www.agcopower.com/core-insights-how-cooling-system-optimization-improves-fuel-efficiency-part-1/\[reference:5\]](https://www.agcopower.com/core-insights-how-cooling-system-optimization-improves-fuel-efficiency-part-1/[reference:5]) (дата обращения: 26.01.2026). Текст: электронный.

24. John Deere Forestry. Cooling System Design for High-Performance Harvester Applications // OEM Solutions Technical Review. 2019. Vol. 12. P. 22—29.
25. Kronlage M. Fan Drives in Mobile Hydraulic Applications // Fluid Power Journal. 2021.
26. Kumar P., Singh R. Computational and Experimental Analysis of Radiator Fan Aerodynamics for Off-Road Vehicles // International Journal of Automotive Technology. 2023. Vol. 24 (3). P. 779—791.
27. Menter F. R. Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows // AIAA Journal. 1994. Vol. 23. P. 1308—1319.
28. Ponsse Plc. Environmental and Performance Challenges in Modern Forestry Machinery // Nordic Forestry Research Series. 2021. No. 47. P. 15—30.
29. Smith T., Zhang L. A Review on Energy Saving Strategies in Mobile Hydraulic Systems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part I. Journal of Systems and Control Engineering. 2022. Vol. 236 (5). P. 987—1002.
30. Wright T., Bulten N. An Overview of Fan Drives for Mobile Equipment // Proceedings of the 11th International Fluid Power Conference. 2018. Vol. 2. P. 243—256.

References

1. Abramov E. V., Kalinin A. V. Study of energy consumption in the cooling system of an internal combustion engine for forestry machinery. *Trudy BSTU. Series: Lesokhozyaistvennoe oborudovanie i mashiny*, 2020, no. 1, pp. 45—51. (In Russ.)
2. Bychkov N. S., Kolesnikov A. V. Study of energy losses in the viscous fan drive of an automotive diesel cooling system. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Mashinostroenie*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 34—42. (In Russ.)
3. Demin A. V., Sokolov L. P. Improvement of aerodynamic characteristics of cooling system fans for vehicles. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Series: Mashinostroenie*, 2018, no. 4, pp. 78—92. (In Russ.)
4. Zhuravets M. A. Development of an environmentally friendly air cooling system for cabins of forestry machines: Diss. ... Cand. tech. sciences. Voronezh, 2004. 179 p. (In Russ.)
5. Ivanov S. N. Methods for reducing noise of cooling system fans for heavy-duty diesel engines. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2019, no. 5, pp. 12—15. (In Russ.)
6. Karpov E. V., Mikhailov A. S. Improving the fuel efficiency of forestry machines through energy recovery. *Lesnoi vestnik*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 102—110. (In Russ.)
7. Petrov K. S., Fedorov I. A. Numerical simulation of airflow in a fan unit of an engine cooling system. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2021, no. 3, pp. 45—56. (In Russ.)
8. Rybakov V. P., Gusev A. S. Automation of cooling systems for diesel engines of special equipment. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2021, no. 4 (82), pp. 56—63. (In Russ.)
9. Sidorov A. A. Reliability and efficiency of hydrostatic fan drive for construction and road machinery. *Vestnik IrGTU*, 2017, no. 4 (111), pp. 98—104. (In Russ.)
10. Shmelev S. V., Kozlov V. V. Application of composite materials for the manufacture of fan impellers. *Plasticheskie massy*, 2020, no. 5-6, pp. 44—48. (In Russ.)
11. GOST R ISO 12100-2010. Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293834/4293834963.pdf> (accessed: 26.01.2026). Text. Image: electronic. (In Russ.)
12. Lesprominform. Assessment of the quality of forestry machines in design. Lesprominform.ru. Available at: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4698> (accessed: 26.01.2026). Text. Image: electronic. (In Russ.)

13. Berg H., Lundström D. Thermal Management in Electrified Off-Highway Machinery — Challenges and Solutions. *Energies*, 2022, vol. 15 (3), p. 1126.
14. Bies D. A., Hansen C. H. *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. 5th ed. CRC Press, 2018. 736 p.
15. Blake W. K. *Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration. Vol. 1: General Concepts and Elementary Sources*. Academic Press, 2017. 558 p.
16. Bucher Hydraulics. Fan Drive Systems: Catalog. Available at: <https://www.bucherhydraulics.com/en/-products/system-solutions/specific-applications/fan-drive-systems> (accessed: 26.01.2026). Text. Image: electronic.
17. Dixon S. L., Hall C. A. *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. 7th ed. Butterworth — Heinemann, 2013. 500 p.
18. Eberspächer. Heating and Air Conditioning Solutions for Forestry Machinery. Available at: <https://www.eberspaecher-off-highway.com/applications/forestry-machines> (accessed: 26.01.2026). Text. Image: electronic.
19. European Parliament and Council. Regulation (EU) 2016/1628 on emission limits for gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines in non-road mobile machinery. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj/eng> (accessed: 26.01.2026). Text. Image: electronic.
20. Fans J. Engine Cooling Fans for Heavy-Duty Applications: Design and Performance. *SAE Technical Paper*, 2020-01-2215, 2020.
21. Guenther M., Wiedemann J., Lueddecke B. Efficient Cooling System with Visco Fan for Commercial Vehicles. *SAE Technical Paper*, 2005-01-1383, 2005.
22. Horton, Inc. All there is to know about fan drive controls. HortonWW.com. 2021. Available at: <https://www.hortonww.com/all-there-is-to-know-about-fan-drive-controls/> (accessed: 26.01.2026). Text. Image: electronic.
23. Hyvärinen J. How cooling system optimization improves fuel-efficiency (part 1). AGCO Power CORE Insights. 2024. Available at: <https://www.agcopower.com/core-insights-how-cooling-system-optimization-improves-fuel-efficiency-part-1/> (accessed: 26.01.2026). Text. Image: electronic.
24. John Deere Forestry. Cooling System Design for High-Performance Harvester Applications. *OEM Solutions Technical Review*, 2019, vol. 12, pp. 22—29.
25. Kronlage M. Fan Drives in Mobile Hydraulic Applications. *Fluid Power Journal*, 2021.
26. Kumar P., Singh R. Computational and Experimental Analysis of Radiator Fan Aerodynamics for Off-Road Vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 2023, vol. 24 (3), pp. 779—791.
27. Menter F. R. Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows. *AIAA Journal*, 1994, vol. 23, pp. 1308—1319.
28. Ponsse Plc. Environmental and Performance Challenges in Modern Forestry Machinery. *Nordic Forestry Research Series*, 2021, no. 47, pp. 15—30.
29. Smith T., Zhang L. A Review on Energy Saving Strategies in Mobile Hydraulic Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part I. Journal of Systems and Control Engineering*, 2022, vol. 236 (5), pp. 987—1002.
30. Wright T., Bulten N. An Overview of Fan Drives for Mobile Equipment. *Proceedings of the 11th International Fluid Power Conference*, 2018, vol. 2, pp. 243—256.