

УДК 623.746

Н.В. КОЧЕТОВ, канд. техн. наук, доц., магистр экономики
ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела¹
E-mail: nio@optron.by

И.В. ПОДОРОЖНЯЯ, магистр техн. наук
научный сотрудник научно-исследовательского отдела¹
E-mail: nio@optron.by

О.Л. МИРАНОВИЧ, канд. техн. наук, доц.
начальник научно-исследовательского отдела¹
E-mail: nio@optron.by

¹ОАО «Приборостроительный завод Оптрон», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25.07.2025.

КОНЦЕПЦИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ ДЛЯ БПЛА

Рассматривается процесс совершенствования двухтактных двигателей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Подробно проанализирована система охлаждения и способы эффективного отвода тепла. Традиционно для двухтактных двигателей используют воздушное охлаждение, которое впоследствии рассеивает избыточную теплоту в окружающую среду через поток воздуха. Такие двигатели внутреннего сгорания относительно просты, имеют малый вес, дешевы. В более мощных автомобильных двигателях система охлаждения сложнее. Здесь используется жидкостное охлаждение с применением радиатора, что позволяет существенно увеличить площадь рассеяния избыточного тепла в окружающую среду — воздушный поток. Для увеличения воздушного потока включают специальный вентилятор. Двигатели летательных аппаратов сталкиваются с техническим противоречием: нужен мощный двигатель, но использование водяного охлаждения существенно увеличивает вес воздушного судна. Некоторые зарубежные фирмы, например немецкая Hirth, предлагают двигатели с жидкостным охлаждением для средних мощностей, но они не получили широкого распространения. Авторы предлагают сочетание воздушного и жидкостного охлаждения. Основное теплоотведение осуществляется за счет обдуваемой воздушной струи. В случае повышения температуры двигателя выше критической величины быстрый отвод тепла осуществляется жидкостным охлаждением посредством испарения воды. Парообразование требует много тепла, которое выводится в окружающую среду с образующимся паром. Использование эндотермического явления при парообразовании легло в основу предложенного вида охлаждения двигателя БПЛА. При переходе из одного агрегатного состояния (воды в пар) температура вещества практически не меняется, что позволяет стабилизировать температурный режим двигателя.

Ключевые слова: БПЛА, отвод тепла, жидкостное охлаждение, эндотермическое явление, двухтактный двигатель

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-12-17>

Введение. В период стремительного увеличения спроса на БПЛА появилась потребность в подборе и создании специализированного двигателя. Рынок БПЛА пополнился рядом достойных силовых установок. Ведущие игроки в этой области — производители из Германии, Австрии, Италии, России и Китая [1, 2].

В зависимости от размера, назначения и требований к БПЛА используются различные типы двигателей, такие как поршневые, роторно-поршневые, турбовальные, турбореактивные, электрические, двигатели внутреннего сгорания [3].

Зарубежные конструкторские разработки для моторов БПЛА включают в себя объемный перечень технических решений от небольших электрических двигателей до мощных турбореактивных и турбовинтовых. Аналогичная задача стояла и перед отечественным моторостроением с учетом специфики применения. Среди известных типов двигателей оптимальными оказались двигатели внутреннего сгорания с искровым зажиганием из-за их большей удельной мощности и простоты конструкции, хотя и требуется улучшение их системы охлаждения, что представляет собой важную задачу.

В статье [4] рекомендуется использовать для БПЛА двухтактные двигатели с искровым зажиганием из-за их простоты, технологичности, дешевизны и высокой энергоэффективности.

Источники [5, 6] указывают на преимущество двухтактных двигателей перед четырехтактными по удельной мощности — она примерно на 50–70 % выше. Именно это стало решающим фактором при выборе типа двигателя для БПЛА.

Двухтактные двигатели чаще всего охлаждаются воздушным или жидкостным способом. Воздушное охлаждение основано на естественной циркуляции воздуха, проходящего через ребра на цилиндре. Такой способ охлаждения не требует дополнительных компонентов, таких как насосы и радиаторы, но менее эффективен при высоких температурах окружающей среды, так как воздух менее теплопроводен по сравнению с жидкостью.

Жидкостное охлаждение эффективнее отводит тепло из-за циркуляции охлаждающей жидкости через рубашку вокруг цилиндра, хотя и требует более сложной и дорогой системы, включающей насос, радиатор, шланги и саму охлаждающую жидкость.

Для летательных аппаратов, где весовые показатели являются критическими, жидкостное охлаждение не получило широкого применения. Воздушное охлаждение применяется в большинстве изобретенных БПЛА с двигателем внутреннего сгорания, в том числе, и для контроля температуры электрохимических реакций топливных элементов электродвигателей [7–13]. Недостатком некоторых систем воздушного охлаждения топливного элемента является необходимость использования большого количества компонентов, что не только усложняет сборку и обслуживание, но и увеличивает массу устройства, материальные затраты.

Жидкостное охлаждение приводит к усложнению и удорожанию мотора, что в конечном итоге ведет к ухудшению технических характеристик БПЛА [14, 15].

В данной работе авторы предлагают компромиссное решение для минимизации расхождения между эффективным охлаждением двигателя и его технико-экономическими показателями.

Отечественная концепция системы охлаждения двигателя БПЛА. Основная проблема заключалась в необходимости обеспечить эффективное охлаждение при компактных размерах и ограниченном весе аппарата. Двухтактный двигатель БПЛА, как и любой тепловой, помимо механической энергии выделяет много тепла, что чревато отказами двигателя. Обычно двигатели такого типа охлаждаются воздушным потоком, который обдувает двигатель во время движения. Объем теплоотводящей массы неограничен, важно, чтобы был хороший переход избыточного тепла в окружающий воздух. Для этого конструк-

тивно увеличивают поверхность соприкосновения двигателя и окружающего летательный аппарат воздуха. Обычно делают специальное ребрение поверхности цилиндра и его головки. Форма ребер должна позволять легко проходить воздушному потоку с минимальным сопротивлением и быстрым воздухозамещением. Дополнительно могут быть сделаны направляющие для увеличения потока воздуха, что несколько усложняет конструкцию и удорожает двигатель, увеличивая вес БПЛА. Но пока это наиболее распространенный способ для БПЛА.

При интенсивных режимах работы, характерных для многих типов БПЛА, традиционные методы воздушного охлаждения оказываются недостаточно эффективными.

Жидкостное охлаждение чаще встречается в автомобильном транспорте, где увеличение массы не носит такого первоочередного значения, как в БПЛА. В автомобильном двигателе конструктивно выполняется водяная рубашка, которая представляет собой еще одну герметичную оболочку на двигателе. По этой оболочке принудительно циркулирует охлаждающая жидкость, которая потом через радиатор отдает избыточное тепло в окружающую атмосферу. Пока двигатель не перегрелся, работает малый круг и отдача тепла небольшая. При перегреве двигателя начинает открываться специальный клапан — термостат [16]. Жидкость начинает поступать в контур большого круга, включающий теплообменник — радиатор. Избыточное тепло выделяется в окружающий воздух, струя которого пронизывает теплообменник. Если этого недостаточно, при определенной температуре включается вентилятор, который увеличивает приток воздуха [17].

При запуске БПЛА температура двигателя равна температуре окружающего воздуха (от $-50\dots-60^{\circ}\text{C}$ зимой до 50°C летом). Самый большой перепад температуры возникает именно при работе двигателя [18, 19].

В связи с этим авторами предложена двойная (гибридная) система охлаждения, сочетающая в себе воздушную и жидкостную. Основное теплоотведение от двигателя БПЛА остается за воздушным потоком, однако при приближении к опасно высоким температурам следует подключать жидкостное, а именно водяное охлаждение. Суть предложенного нами подхода в том, что интенсивный отвод тепла может быть достигнут другим путем, например, при переходе вещества из одного агрегатного состояния в другое [20–22].

Вода является одним из наиболее теплоемких веществ в природе: при 18°C удельная теплоемкость составляет $4,19 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ [23]. Это означает, что для нагрева 1 кг воды с 18 до 100°C потребуется затратить $343,58 \text{ кДж}$.

Но для того чтобы 1 кг воды в жидком состоянии при 100°C превратить в пар при этой же тем-

пературе, необходимо затратить еще энергию для парообразования в количестве 2260 кДж [23]. Таким образом, парообразование требует в 6,5 раза больше энергии (при той же температуре). При этом образующийся пар переходит в окружающий воздух, а летательный аппарат теряет в весе на эту же величину испарившейся воды.

Предлагаемая авторами гибридная система охлаждения двигателя БПЛА работает следующим образом. Основной объем избыточного тепла отводится от двигателя БПЛА через проходящий воздушный поток. Однако при обстоятельствах, когда двигатель начинает перегреваться и температура приближается к критическим значениям, начинает работать водяное охлаждение, эффективно отводя избыточное тепло путем перевода воды в другое агрегатное состояние — газообразное. Схема системы водяного охлаждения двухтактного двигателя внутреннего сгорания для БПЛА показана на рисунке 1.

Конструктивно практическая реализация водяного охлаждения предлагаемого нами решения может быть выполнена следующим образом.

Изначально вода находится в сосуде, соединенном трубкой с дозатором. При достижении критического значения температуры цилиндра двигателя срабатывает датчик, подающий сигнал на дозатор для открытия каплепадения.

Дозатор с определенным интервалом времени выпускает порцию воды, чтобы температура всего цилиндра успевала выровняться и цилиндр не «половел» от большого перепада температур. Обычно в материале возникают остаточные деформации при большом перепаде температур между отдельными частями детали за короткий промежуток времени (сварка, закалка в воде). Это возможно только при температурных деформациях, выходящих за пределы упругости материала.

Поскольку направление воды из дозатора идет в определенную точку, для более равномерного охлаждения цилиндра пришлось бы ставить равномерно по окружности несколько форсунок в кольцевой камере. Это усложняет конструкцию, ухудшая другие параметры (вес, стоимость, надежность, ремонтоспособность). Например, одиночные многоэлектродные свечи зажигания. Последние дороже и менее распространены.

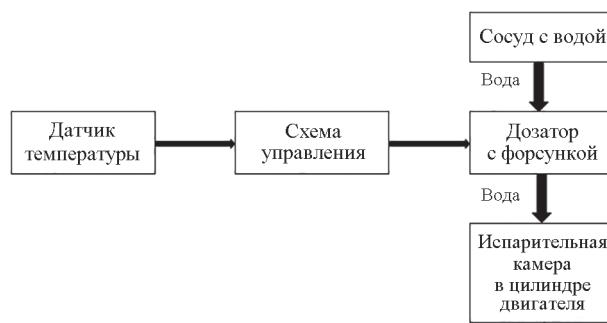


Рисунок 1 — Схема действия системы водяного охлаждения
Figure 1 — Operation scheme of the liquid cooling system

Вскипающая вода охлаждает двигатель, температура падает до нормальных рабочих значений, дозатор закрывается. Степень отвода тепла будет определяться количеством испаряемой воды. При снижении температуры и при запуске двигателя система водяного охлаждения работать не будет. Таким образом поддерживается докритическая температура.

Обслуживание водяного охлаждения заключается в периодической очистке внутренней поверхности испарительной камеры от накипи и других посторонних отложений, чтобы обеспечить хорошую теплопроводность от поверхности к корпусу цилиндра. Поэтому форма испарительной камеры должна быть простой и доступной для очистки.

Рекомендуется, чтобы от наружного воздуха она была закрыта резьбовой пробкой с дренажным клапаном для выпуска пара в окружающую среду. Чтобы снизить вероятность появления накипи, предпочтительно использовать дистиллированную воду.

После возвращения БПЛА на базу производится его заправка топливом, маслом и водой. В этом случае дистиллированная вода становится расходным материалом, который требуется пополнять по мере необходимости (по аналогии с горюче-смазочными материалами).

На рисунке 2 описано конструктивное исполнение испарительной камеры.

В корпусе двигателя имеется испарительная камера 1. Ее внутренняя поверхность должна быть расположена так, чтобы отводить избыточное тепло от камеры сгорания за наименьшее время [24]. Важным условием является распыление воды не в воздух, а на поверхность двигателя. Для этого имеется резьбовая крышка на испарительной камере, в которой встроены гидрофорсунка-дозатор 2

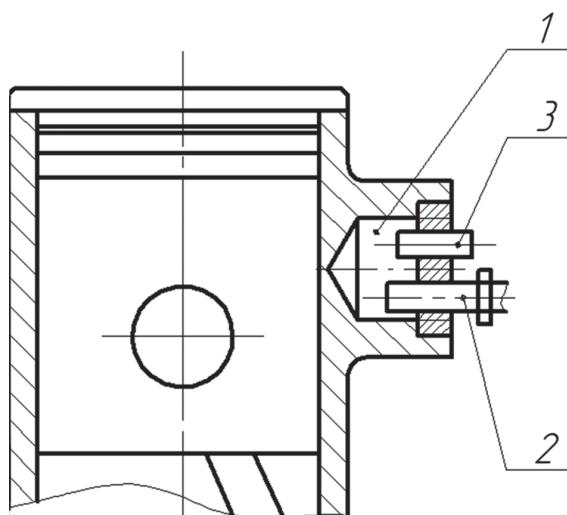


Рисунок 2 — Устройство испарительной камеры:

1 — внутренняя поверхность испарительной камеры;

2 — гидрофорсунка-дозатор;

3 — дренажный клапан

Figure 2 — Scheme of the evaporation chamber:

1 — inner surface of the evaporation chamber;

2 — dispenser nozzle; 3 — drain valve

и дренажный клапан 3. Дозатор необходим для подачи воды определенными порциями, количество которых будет определяться степенью охлаждения двигателя. Сигнал на включение гидрофорсунки-дозатора подается со схемы управления.

Дренажный клапан 3 необходим для отвода образующегося при испарении пара (с которым должно уходить и избыточное тепло от двигателя). Дренажный клапан должен быть настроен так, чтобы в испарительной камере оставалось давление. Температура кипения в испарительной камере будет зависеть от настройки дренажного клапана 3.

Для удобства прочистки внутренней поверхности испарителя предусмотрена резьбовая крышка большого диаметра, в которой размещены гидрофорсунка-дозатор для подачи воды в испарительную камеру и дренажный клапан для отведения пара в атмосферу.

Схема управления имеет определенные настройки, которые должны учитывать следующее. При испарении воды с внутренней поверхности камеры должно пройти какое-то время, чтобы избыточное тепло перешло из камеры сгорания в испарительную камеру. Здесь важно, чтобы обеспечивалась хорошая теплопроводность материала цилиндра двигателя, и испарительная камера была в непосредственной близости от камеры сгорания, например, с противоположного направления потока воздуха. Следовательно, нужно предусмотреть задержку во времени для сигнала, запускающего следующее открытие форсунки, чтобы избежать избыточного поступления воды.

На рисунке 3 показан пример циклограммы, по которой работает предлагаемое жидкостное охлаждение двигателя БПЛА. Важно, что водяное охлаждение включается только при достижении предельных температур двигателя. Воздушное же охлаждение сопровождает работу двигателя БПЛА и функционирует параллельно и непрерывно.

Водяное охлаждение характеризуется быстрым отбором избыточного тепла путем испарения, что возвращает температуру к нормальному рабочему уровню.

Заключение. С целью повышения надежности двигателя для БПЛА была предложена гибридная

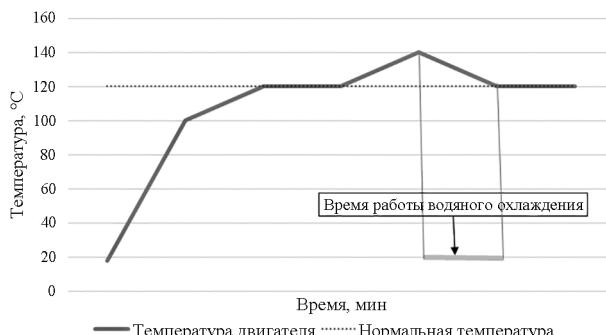


Рисунок 3 — Пример циклограммы работы жидкостного охлаждения двигателя БПЛА

Figure 3 — Example of a UAV engine liquid cooling cyclogram

система охлаждения. Основной поток избыточного тепла отводится традиционно воздушным потоком. В случае увеличения температуры двигателя и выхода за пределы рабочего диапазона начинает работать водяное охлаждение, увеличивающее теплоотдачу в окружающую среду и возвращающее температуру двигателя в рабочий диапазон.

Это позволит продлить ресурс двигателя БПЛА, улучшить надежность, расширить область применения двигателя в различных типах БПЛА, включая аппараты с длительным временем полета и интенсивной нагрузкой.

Дальнейшие исследования направлены на совершенствование системы управления температурой двигателя, систем выпуска и инерционного наддува для двухтактных двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием.

Список литературы

1. Каталог авиационных двигателей для СЛА // Вид сверху. — URL: <https://vidsverhu.ru/aviatehnika/dvigateli> (дата доступа: 25.06.2025).
2. ТОП 10. Китайские производители двигателей BLDC // Greensky Power. — URL: <https://greensky-power.com/ru/chinese-bldc-motor-manufacturers> (дата доступа: 25.06.2025).
3. Двигатели для отечественных беспилотников: прошлое, настоящее и будущее / А.Н. Черкасов, Д.С. Легоногих, Ю.В. Зиненков, С.Ю. Панов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2018. — Т. 17, № 3. — С. 127–137. — DOI: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-3-127-137>.
4. Эволюция тепловых двигателей / Н.В. Кочетов, С.Н. Янкевич, И.Н. Хроль [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2024. — № 3(68). — С. 99–104. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-99-104>.
5. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания / В.М. Кондрашов, Ю.С. Григорьев, В.В. Тупов [и др.]. — М.: Машиностроение, 1990. — 272 с.
6. Боярских, С. Как четырехтактные моторы одолели двухтактные и любые другие / С. Боярских // ABW.by. — URL: <https://abw.by/news/knowledge/2024/02/26/kak-chetyrekhstaktnye-motory-odoleli-dvuhstaktnye-i-lubye-drugie> (дата обращения: 31.05.2025).
7. Патент RU 2712352 C1, МПК B64C 39/02 (2006.01), H01M 8/00 (2006.01). Беспилотный летательный аппарат с системой охлаждения батареи топливных элементов: № 2019112528: заявлено 24.04.2019; опубл. 28.01.2020 / Сычев И.А., Ермухamedов М.А., Сергеев А.И., Сивак А.В., Кашин А.М.; заявитель ООО «Иннерджи». — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2712352C1/ru> (дата обращения: 31.05.2025).
8. Патент RU 2492116 C1, МПК B64D 27/00 (2006.01). Авиационная силовая установка на базе топливных элементов: № 2012103819: заявлено 06.05.2012; опубл. 10.09.2013 / Братухин А.Г., Яновский Л.С., Пекарш А.И., Байков А.В., Разносчиков В.В., Аверьяков И.С., Олесова Н.И.; заявитель ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова». — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2492116C1/ru> (дата обращения: 31.05.2025).
9. Патент RU 2829240 C1, МПК F02B 57/06 (2006/01). Способ работы двигателя беспилотного летательного аппарата: № 2023126326: заявлено 13.10.2023; опубл. 30.10.2024 / Оленев Е.А.; заявитель Оленев Евгений Александрович. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2829240C1/ru> (дата обращения: 31.05.2025).
10. Патент RU 211789 U1, МПК B64D 33/08 (2006/01). Гибридная силовая установка беспилотного летательного аппарата: № 2022105968: заявлено 05.03.2022; опубл. 22.06.2022 / Барбасов В.К., Черницкий Р.О., Омелько В.В., Халиуллин А.М.; заявитель ООО «ДРОН СОЛЮШЕНС». — URL: <https://patents.google.com/patent/RU211789U1/ru> (дата обращения: 31.05.2025).

11. Патент RU 2567496 С1, МПК B64C 39/02 (2006.01). Много-винтовой беспилотный летательный аппарат вертикального взлета и посадки: № 2014138255/11: заявлено 22.09.2014: опубл. 10.11.2015 / Голощапов В.М., Баклин А.А., Асанина Д.А., Силаков В.Р., Бурлов В.В., Барабаш В.С.; заявитель Пензенский гос. технол. ун-т. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2567496C1/tu> (дата обращения: 31.05.2025).
12. Патент RU 2371359 С1, МПК B64D 27/00 (2006/01). Беспилотный летательный аппарат: № 2008110343/11: заявлено 20.03.2008: опубл. 27.10.2009 / Голобородько В.Е., Карпов С.И., Левченко Ю.Н., Обрезчиков В.В., Смирнов В.Н., Сыздыков Е.К., Усачев М.А., Щеглов В.А.; заявитель ОАО «Государственное машиностроительное конструкторское бюро «Радуга» имени А.Я. Березняка» — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2371359C1/tu> (дата обращения: 31.05.2025).
13. Патент RU 2818844 С1, МПК F04F 5/14 (2006/01). Эжектор системы воздушного охлаждения беспилотного летательного аппарата: № 2023129403: заявлено 14.11.2023: опубл. 06.05.2024 / Сатин А.А., Брончуков С.А., Табунов Н.А.; заявитель ПАО «ОАК». — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2818844C1/tu> (дата обращения: 31.05.2025).
14. Приводные решения для беспилотных летательных аппаратов // ИНЕЛСО. — URL: <https://inelso.ru/library/blog/privodnye-resheniya-dlya-bespilotnykh-letatelnykh-apparatom/> (дата обращения: 31.05.2025).
15. Зиненков, Ю.В. Концепция многодисциплинарного формирования предварительного технического облика силовых установок беспилотных летательных аппаратов военного назначения / Ю.В. Зиненков, А.В. Луковников // Вестник Московского авиационного института. — 2022. — Т. 29, № 3. — С. 94–110. — DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2022-3-94-110>.
16. Дружинин, А.М. Модернизация двигателей внутреннего сгорания. Цилиндроворшневая группа нового поколения: учеб.-методич. пособие / А.М. Дружинин. — М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 148 с.
17. Сухопаров, С.И. Двигатели внутреннего сгорания: учеб.-методич. пособие / С.И. Сухопаров, В.Б. Брублевский, В.А. Дащковский. — Гомель: БелГУТ, 2009. — 48 с.
18. Старостин, А.А. Специальные температурные измерения / А.А. Старостин, Е.М. Шлеймович, В.Г. Лисиенко. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 168 с.
19. Салтыкова, А. Какой должна быть рабочая температура двигателя / А. Салтыкова // Авто.ру. — URL: https://auto.ru/mag/article/kakoy-dolzhna-byt-rabochaya-temperatura-dvigatelya/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (дата обращения: 16.10.2023).
20. Яворский, Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. — М.: Наука, 1979. — 944 с.
21. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Наука, 1972. — 721 с.
22. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндин. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 409 с.
23. Справочник по элементарной математике, механике и физике / под ред. Н.И. Кузнецова. — 9-е изд. — Минск: Наука и техника, 1966. — 200 с.
24. Исаченко, В.П. Теплопередача: учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, В.С. Сукомел. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.

KOCHETOV Nikolay V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof., M. Sc. in Economics
 Leading Researcher of the Research Department¹
 E-mail: nio@optron.by

PADAROZHNIAYA Iryna V., M. Sc. in Eng.
 Researcher of the Research Department¹
 Email: nio@optron.by

MIRANOVICH Oleh L., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.
 Head of Research Department¹
 Email: nio@optron.by

JSC “Instrument-Making Plant Optron”, Minsk, Republic of Belarus

Received July 25, 2025.

THE CONCEPT OF A HYBRID COOLING SYSTEM FOR A SPARK-IGNITION TWO-STROKE ENGINE FOR UAV

The process of improving two-stroke engines for unmanned aerial vehicles (UAV) is considered. The cooling system and methods of effective heat removal are analyzed in detail. Traditionally, two-stroke engines use air cooling, which subsequently dissipates excess heat into the environment through the airflow. Such internal combustion engines are relatively simple, lightweight, and cheap. More powerful car engines have a more complex cooling system. Liquid cooling is used here with the use of a heatsink. This makes it possible to significantly increase the area of excess heat dissipation into the environment, the airflow. To increase the airflow, a special fan is turned on. Aircraft engines face a technical contradiction: a powerful engine is needed, but the use of water cooling significantly increases the weight of the aircraft. Some foreign firms, such as Hirth in Germany, offer liquid-cooled engines for medium power. But they are not widespread. The authors offer a combination of air and liquid cooling. The main heat dissipation is carried out by a blown air stream. If the engine temperature rises above the critical value, rapid heat removal is carried out by liquid cooling through water evaporation. Vaporization requires a lot of heat, which is discharged into the environment with the steam generated. The use of the endothermic phenomenon in vaporization

formed the basis of the proposed type of cooling of the UAV engine. During the transition from one state of aggregation (water into steam), the temperature of the substance practically does not change. This makes it possible to stabilize the temperature regime of the engine.

Keywords: UAV, heat dissipation, liquid cooling, endothermic phenomenon, two-stroke engine

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-12-17>

References

1. *Katalog aviationsionnykh dvigateley dlya SLA* [Catalog of aircraft engines for ULA]. Available at: <https://vidsverhu.ru/aviatehnika/dvigateli> (accessed June 25, 2025) (in Russ.).
2. *TOP 10. Kitayskie proizvoditeli dvigateley BLDC* [TOP 10. Chinese BLDC engine manufacturers]. Available at: <https://greensky-power.com/ru/chinese-blcd-motor-manufacturers> (accessed June 25, 2025) (in Russ.).
3. Cherkasov A.N., Legkonogikh D.S., Zinenkov Yu.V., Panov S.Yu. *Dvigateli dlya otechestvennykh bespilotnikov: proshloe, nastoyashchee i budushchee* [Engines for domestic drones: past, present and future]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-3-127-137> (in Russ.).
4. Kochatau M.U., et al. *Evolyutsiya teplovyykh dvigateley* [Evolution of heat engines]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2024, no. 3(68), pp. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-99-104> (in Russ.).
5. Kondrashov V.M. [et al.] *Dvukhtaktnye karburatornye dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Two-stroke carburetor internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 272 p. (in Russ.).
6. Boyarskikh S. *Kak chetyrekhstaktnye motory odoleli dvukhtaktnye i lyubye drugie* [How four-stroke engines overcame two-stroke and any other]. 2024. Available at: <https://abw.by/news/knowledge/2024/02/26/kak-chetyrekhstaktnye-motory-odoleli-dvuhtaktnye-i-lubye-drugie> (accessed May 31, 2025) (in Russ.).
7. Sychev I.A., et al. *Bespilotnyy letatelnyy apparat s sistemoy okhlazdeniya batarei toplivnykh elementov* [Unmanned aerial vehicle with fuel cell battery cooling system]. Patent RU, no. RU2712352C1, 2020 (in Russ.).
8. Bratukhin A.G., et al. *Aviatsionnaya silovaya ustanovka na baze toplivnykh elementov* [Aircraft power plant built around fuel elements]. Patent RU, no. RU2492116C1, 2013 (in Russ.).
9. Olenev E.A. *Sposob raboti dvigatelya bespilotnogo letatelnogo appara* [Unmanned aerial vehicle engine operation method]. Patent RU, no. RU2829240C1, 2024 (in Russ.).
10. Barbasov V.K., Chernitskiy R.O., Omelko V.V., Khalilullin A.M. *Gibridnaya silovaya ustanovka bespilotnogo letatelnogo appara* [Hybrid power plant of an unmanned aerial vehicle]. Patent RU, no. RU211789U1, 2022 (in Russ.).
11. Goloschapov V.M., et al. *Mnogovintovoy bespilotnyy letatelnyy apparat vertikalnogo vzleta i posadki* [Multirotor VTOL drone]. Patent RU, no. RU2567496C1, 2015 (in Russ.).
12. Goloborod'ko V.E., et al. *Bespilotnyy letatelnyy apparat* [Pilotless aircraft]. Patent RU, no. RU2371359C1, 2009 (in Russ.).
13. Satin A.A., Bronchukov S.A., Tabunov N.A. *Ezhektor sistemy vozduzhnogo okhlazhdeniya bespilotnogo letatelnogo appara* [Unmanned aerial vehicle air cooling system ejector]. Patent RU, no. RU2818844C1, 2024 (in Russ.).
14. *Privodnye resheniya dlya bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Powered solutions for unmanned aerial vehicles]. Available at: <https://inelso.ru/library/blog/privodnye-resheniya-dlya-be-spilotnykh-letatelnykh-apparatov/> (accessed May 31, 2025) (in Russ.).
15. Zinenkov Yu.V., Lukovnikov A.V. *Konseptsiya mnogodisplinarnogo formirovaniya prevaritel'nogo tekhnicheskogo oblika silovykh ustanovok bespilotnykh letatelnykh apparatov voennogo naznacheniya* [The concept of pluridisciplinary forming of precursory technical appearance of military purpose unmanned aerial vehicles]. *Aerospace MAI journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 94–110. DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2022-3-94-110> (in Russ.).
16. Druzhinin A.M. *Modernizatsiya dvigateley vnutrennego sgoraniya. Tsilindroporoshnevaya gruppa novogo pokoleniya* [Modernization of internal combustion engines. New generation cylinder piston group]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2023. 148 p. (in Russ.).
17. Sukhoparov S.I., Vrublevskiy V.B., Dashkovskiy V.A. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engines]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2009. 48 p. (in Russ.).
18. Starostin A.A., Shleymovich E.M., Lisienko V.G. *Spetsial'nye temperaturnye izmereniya* [Special temperature measurements]. Yekaterinburg, Uralskogo universiteta Publ., 2016. 168 p. (in Russ.).
19. Saltykova A. *Kakoy dolzha byt' rabochaya temperatura dvigatelya* [What the operating temperature of the engine should be]. 2023. Available at: https://auto.ru/mag/article/kakoy-dolzha-byt-rabochaya-temperatura-dvigatelya/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (accessed May 31, 2025) (in Russ.).
20. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 944 p. (in Russ.).
21. Vargaftik, N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 721 p. (in Russ.).
22. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.E. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 409 p. (in Russ.).
23. *Spravochnik po elementarnoy matematike, mehanike i fizike* [Handbook of elementary mathematics, mechanics and physics]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1966. 200 p. (in Russ.).
24. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel V.S. *Teploperekhoda* [Heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 488 p. (in Russ.).