



## Теплотехнические основы создания пароаккумуляторных локомотивов



Валентин БАЛАБИН



Алексей СЕРБУЛОВ

*Валентин Николаевич Балабин<sup>1</sup>,  
 Алексей Юрьевич Сербулов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Российский университет транспорта, Москва, Россия.

<sup>2</sup> ООО «Белспецлесмаш», Гомель, Беларусь.

✉ <sup>1</sup> [vbbn2347@gmail.com](mailto:vbbn2347@gmail.com).

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены этапы создания и применения на промышленных предприятиях теплоаккумуляторных (пароаккумуляторных) локомотивов, цели их создания до сих пор актуальны – это разработка и внедрение экономичных и экологически чистых локомотивов для подъездных путей необщего пользования.

Выполнение маневровых работ рассматривается как самостоятельный род деятельности предприятий, не связанных с их основной деятельностью. Применяемые сегодня для этой цели локомотивы транспортных цехов предприятий расходуют дизельное топливо, что заметно повышает логистическую стоимость грузов и снижает конечную прибыль.

В статье рассмотрено одно из направлений использования тепловой энергии (пара), идущей на технологические цели, которую можно утилизировать для выполнения иной работы, что с энергетической точки зрения будет выполнено бесплатно, так как стоимость получения энергии уже покрыта стоимостью выпускаемой продукции.

Специально для предприятий и подъездных путей к ним разработан пароаккумуляторный локомотив с силой тяги в 90 кН (9 т). Он не нуждается в топливе, а работает на тех-

нологическом паре, который поступает от стационарных котлов предприятий и аккумулируется в резервуаре высокого давления с теплоизоляцией.

Локомотив был спроектирован на базе модели танк-паровоза 9П типа 0-3-0, который использовался раньше. Котёл и топка были заменены котлом с паронакопителем (закрытый цилиндрический резервуар с высокой степенью термоизоляции). Расчётное время работы машины на одной зарядке – 6–8 ч. Максимальная расчётная масса состава на прямом участке пути при скорости 30 км/ч и силе тяге 83 кН·т составляет 3000 т.

Применение такого типа локомотива позволяет: экономить дизельное топливо в количестве 0,75–1,0 т/сут, снизить затраты на ремонт на 90 % по сравнению с тепловозом, уменьшить затраты на обслуживающий персонал, получить возможность использования на предприятиях, предъявляющих повышенные требования по взрыво- и пожаробезопасности..

Дан пример расчёта применения шести локомотивов на нефтеперерабатывающем заводе, что даст годовую экономию дизельного топлива 1444 т, при сроке окупаемости самого локомотива 3,2 года.

**Ключевые слова:** паровая энергетика, паровой аккумуляторный локомотив, промышленный транспорт, экономическое сравнение.

*Для цитирования:* Балабин В. Н., Сербулов А. Ю. Теплотехнические основы создания пароаккумуляторных локомотивов // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 2 (99). С. 94–99. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-2-10>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.  
 The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

## ВВЕДЕНИЕ

На настоящий момент выполнение маневровых работ на железнодорожном промышленном транспорте рассматривается как самостоятельный род деятельности. Применяемые для этой цели локомотивы транспортных цехов предприятий расходуют дизельное топливо, что заметно повышает логистическую стоимость грузов и снижает конечную прибыль. Желательно устранить лишние непроизводительные расходы на проведение маневровых операций.

Предельные значения расхода дизельного топлива тепловозами в районе 198–220 г/кВт·ч снижаются крайне медленно и практически достигли своего эксплуатационного минимума. Таким образом, искать решение в рамках существующей системы бессмысленно, необходима другая система, в которой за счёт полной энергосвязи элементов между собой, происходит минимизация всех расходов. При этом желательно, чтобы система потребляла только один вид энергии – наивыгоднейший с экономической точки зрения.

## ИСТОРИЯ

Основные принципы создания подобных систем были изложены профессором В. В. Дмитриевым ещё в 1927 году в работе «Современные достижения в области энергетического хозяйства в производствах с большим расходом тепла на единицу обрабатываемого продукта» [1].

В этой работе указано, что потребности производства в электрической и тепловой энергии дают возможность расположить их в особом, с точки зрения энергетики, порядке, так как нормы расхода этих видов энергии на единицу производимого продукта уже установились и могут приниматься за базу для расчёта.

Профессор Дмитриев вводит понятие «коэффициент энергетической пропорциональности (КЭП)», показывающий соотношение между видами энергий при производстве единицы продукта.

Для большинства производств (в том числе для металлургических, нефтехимических и многих других) КЭП более 10, что говорит о преимущественном использовании тепловой энергии, например, в виде пара [2]. Далее указано, что если этот пар, идущий на технологические цели, будет тем или иным образом утилизирован для выполнения иной работы,

то работа эта с энергоэкономической точки зрения будет выполнена бесплатно, так как стоимость пара уже покрыта стоимостью выпускаемой продукции.

Применительно к промышленному железнодорожному транспорту можно сказать, что, если энергию пара направить на выполнение маневровой работы и убрать непроизводительные тепловозы с дизельными двигателями (современные подходы также принимают во внимание их «углеродный след»), то стоимость энергии будет стремиться к нулю.

Этот подход в начале XX века был осуществлён в Германии и дал результаты столь выдающиеся, что применяется до сих пор с неизменным успехом. Он связан, в первую очередь, с разработкой пароаккумуляторов Рутса для выравнивания графиков нагрузки паровых котлов при колеблющемся потреблении пара. Если в заполненную водой закрытую ёмкость вводить пар, то он будет конденсироваться, одновременно повышая температуру воды. Как только температура воды достигнет температуры насыщенного пара при заданном давлении, поступление пара прекратится. Если после этого понизить давление в ёмкости, то вода закипит и отдаст следующую порцию аккумулярованного пара. Количество отданного пара практически равно количеству поступившего. При этом отбираемый пар может быть использован для производства механической работы.

Если такой пароаккумулятор установить на железнодорожный экипаж с приводом от известной паровой машины, то получим пароаккумуляторный локомотив (Dampf-speicherlokomotive). Эта машина будет совершать работу за счёт энергии бесплатного пара. При этом затраты на маневровую работу будут практически ничтожны при высокой надёжности и долговечности локомотива (срок до 70 лет – по существующим данным немецких источников [2]). Эффективность таких локомотивов столь высока, что в Германии в своё время насчитывалось свыше 1600 единиц бестопочных локомотивов, в т.ч. и рассматриваемого типа.

Многолетней практикой в Германии выработан тип маневрового пароаккумуляторного локомотива<sup>1</sup> со следующими характеристиками:

<sup>1</sup> Паровой транспорт вчера и сегодня Иван Трохин, инженер. 2019 год. [Электронный ресурс]: <https://perevozki-stolitsa.ru/parovoj-transport-vchera-i-segodnya/>. Доступ 18.03.2022.



**ПАРОАККУМУЛЯТОРНЫЙ ЛОКОМОТИВ**



**ПАЛ 9П**

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В Германии паровозомоторные локомотивы строили следующие фирмы:

1. Borsig - 112 шт;
2. Maschinenfabrik Esslingen - 39 шт;
3. Hakoag - 90 шт;
4. Sächsische Maschinenfabrik AG, vormals Richard Hartmann, Chemnitz - 1 шт;
5. Heuschel - 230 шт;
6. Hokensohnen - 400 шт;
7. Maffei - 59 шт;
8. Krauss - 18 шт;
9. Krauss-Maffei - 120 шт;
10. Krupp - 74 шт;
11. LKM - Lokomotivbau Karl Marx, Hahneberg - 53 шт;
12. Raw "Helmuth Scholz" Meiningen - 202 шт;
13. Orenstein & Koppel - 301 шт.

Суммарно (Borsig 112шт + Maschinenfabrik Esslingen 39шт + Hakoag 90шт + Sächsische Maschinenfabrik AG, vormals Richard Hartmann, Chemnitz 1шт + Heuschel 230шт + Hokensohnen 400шт + Maffei 59шт + Krauss 18шт + Krauss-Maffei 120шт + Krupp 74шт + LKM - Lokomotivbau Karl Marx, Hahneberg 53шт + Raw "Helmuth Scholz" Meiningen 202шт + Orenstein & Koppel 301шт) = 1592шт.



Рис. 1. Данные из брошюры с описанием локомотива ПАЛ 9П [разработана авторами].

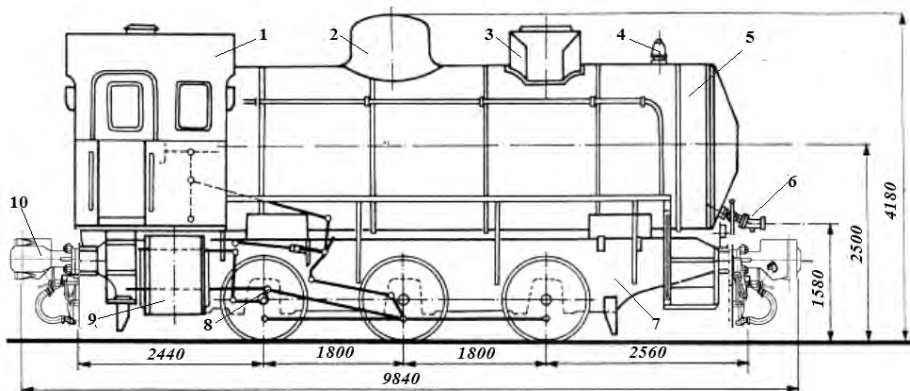


Рис. 2. Схема и габаритные размеры локомотива ПАЛ-9П:

1 – будка управления; 2 – сухопарник; 3 – песочница; 4 – предохранительный клапан 5 – котёл-пароаккумулятор; 6 – экипировочный патрубков; 7 – рама локомотива; 8 – движущий механизм; 9 – паровой цилиндр; 10 – автосцепка [разработано авторами].

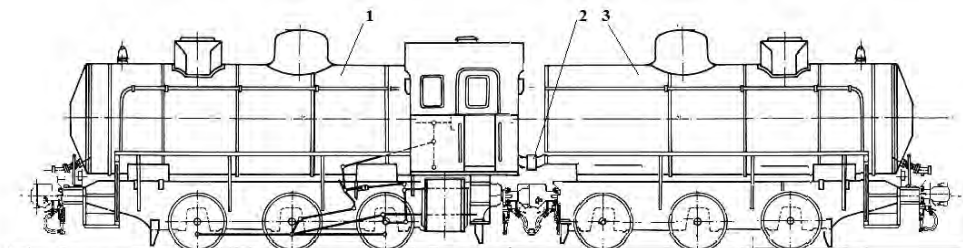


Рис. 3. Вариант тендерного локомотива ПАЛm-9П:

1 – ПАЛ-9П; 2 – соединительный паропровод; 3 – тендер [разработано авторами].

**Технические характеристики локомотива (соответствуют типу 5 ГОСТ 22339-88\* габарита 1-ВМ, 02-ВМ по ГОСТ 9238-83)**

Колея, мм	1524
Объём котла, м <sup>3</sup>	21,0
Давление пара, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	2 (20)
Масса локомотива в рабочем состоянии, т	56,5
Сила тяги рабочая, кН	90
Сила тяги при трогании с места, кН	125
Сила тяги минимальная, кН	83
Максимальная скорость, км/ч	30
Максимальная масса состава на прямой при скорости 30 км/ч и силе тяге 83 кН, т	3000
Длина по осям автосцепок, мм	9820
Диаметр колёс, мм	1050
Минимальный радиус кривой, м	40

\* ГОСТ 22339-88 Тепловозы маневровые и промышленные. Типы и основные параметры. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200011008>. Доступ 21.04.2022.

- осевая формула – 0–3–0;
- рабочая (сцепная) масса – 55 т;
- выполняемая работа на одной парозарядке – 6000 т•км;
- максимальная масса состава на прямом, горизонтальном пути – 3000 т.

Этот локомотив может использоваться на подъездных путях необщего пользования и является единым маневровым локомотивом, что упрощает его изготовление, обслуживание и эксплуатацию [3; 4].

Система, состоящая из парового котла, технологического потребителя пара и пароаккумуляторного локомотива (или нескольких), называется транспортно-энергетическим узлом и изменяет статьи затрат при выполнении ж.д. маневровых операций.

Кроме этого, появляется возможность точного учёта выполняемой маневровой работы. Пароаккумуляторный локомотив расходует 0,37 кг пара на 1 т•км [5], при этом расход пара при стоянке локомотива отсутствует. Зная количество израсходованного пара можно точно определить выполненную работу в т•км, а не в локомотиво-часах, которые не могут являться единицами работы (исторически учёт работы в локомотиво-часах восходит к маневровым паровозам, котёл которых, работая непрерывно, потреблял определённое количество (до 80 кг) топлива в час. Таким образом, в те годы достигался учёт потреблённого локомотивами топлива).

В 1954 году Муромский и Коломенский заводы спроектировали и построили бестопочный паровоз БП1-01 [5, с. 522–523].

Для уменьшения расхода пара из котла паровоз имел главные резервуары большего объёма, которые заряжались сжатым воздухом параллельно при заполнении котла-аккумулятора паром. На зарядку затрачивалось 30–40 мин.

Цикличность работы локомотива между заправками паром составляла 4–6 часов в зависимости от маневровой загрузки. Согласно опытам этот паровоз мог везти состав массой 325 т со скоростью около 15 км/ч на расстояние до 30 км [6].

Самым последним бестопочным паровозом был БП1-02, который летом 1955 года показал отличные результаты. Во время испытаний он с места брал составы в 1700 т, а сам мог двигаться при давлении в котле в 1 кгс/см<sup>2</sup>.

## **ПАЛ 9П**

### **Технические характеристики**

Чтобы снизить расходы на маневровую работу на подъездных путях необщего пользования (металлургические, горно-обогатительные и деревообрабатывающие комбинаты, нефтеперерабатывающие заводы, заводы химической промышленности, тепловые электростанции и т.д.), был разработан пароаккумуляторный локомотив (ПАЛ) с силой тяги в 90 кН (9 т). Этот локомотив не нуждается ни в каком топливе, он использует исключительно технологический пар, который собирается со стационарных котлов предприятий и копится в резервуаре высокого давления с теплоизоляцией.







Рис. 4. Пароаккумуляторный локомотив. Фото с сайта компании DLM AG. [Электронный ресурс]: [https://dlm-ag.ch/wp-content/uploads/2020/10/2020-10-07\\_Energy-Steam-and-Fireless-Technology-homepage.pdf](https://dlm-ag.ch/wp-content/uploads/2020/10/2020-10-07_Energy-Steam-and-Fireless-Technology-homepage.pdf).

ПАЛ-9П был создан на базе модели танк-паровоза 9П типа 0–3–0. Изменения не коснулись экипажной части и паровой машины. Котёл с топкой заменили котлом-паронакопителем в виде цилиндрического резервуара с высокой степенью термоизоляции. Схема и габаритные размеры локомотива ПАЛ-9П, разработанные авторами статьи, представлены на рис. 2.

Вариант тендерного локомотива ПАЛт-9П с удвоенным запасом рабочего пара показан на рис. 3.

Бестопочные локомотивы практически не требуют обслуживания и ремонта, при этом сам локомотив обслуживается одним машинистом.

Главным недостатком этого типа локомотивов можно назвать ограниченный радиус действия.

#### Вариант расчёта эффективности локомотива ПАЛ 9П на нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ)

Традиционно НПЗ является крупным потребителем тепловой энергии, в частности пара высоких параметров. Отдельно пар расходуется на собственные энергетические нужды – в качестве привода для паровых насосов и компрессоров. Пар промышленных

параметров (давлением 0,8–3,5 МПа) поступает из внешних источников по магистральным паропроводам. Для обеспечения потребителей паром разного давления в центральном тепловом пункте размещены редуцирующая или редуцирующе-охлаждающая установки.

Основные характеристики НПЗ [7; 8]:

- объём переработки – 12 млн тонн нефти в год;
- технологических объектов – более 30;
- площадь предприятия – 286 га.

Годовой вес перемещаемого груза с учётом тары цистерн –  $1,4 \times 12\,000\,000 = 16\,800\,000$  т.

Суточный вес перемещаемого груза –  $16\,800\,000 / 365 = 46\,027,4$  т.

Средний путь перемещаемого по заводу груза – 3 км.

Суточная работа по перемещению груза –  $3 \times 46\,027,4 = 138\,082,2$  т•км.

Энергозатраты на 1 т•км при использовании тепловозной тяги с КПД 13 % –  $0,35$  кВтч/т•км.

Энергоёмкость 1 кг дизельного топлива при теплопроизводительности  $10\,500$  кг – кал/кг составляет  $10\,500 / 860 = 12,21$  кВт•ч.

Выполняемая работа по перемещению груза на 1 кг дизтоплива составляет  $12,21 / 0,35 = 34,9$  т•км.

Общий расход топлива тепловозами в сутки с учётом работы дизеля на холостом ходу составит  $138\,082,2 / 34,9 = 3956,5$  кг.

Необходимое число локомотивов ПАЛ-9П при четырёх парозарядках в сутки и выполняемой работе на одной парозарядке  $6000 \text{ т} \cdot \text{км}$  или  $24\,000 \text{ т} \cdot \text{км}$  в сутки (затраты пара –  $0,37 \times 24\,000 = 8\,880$  кг =  $8,88$  т/сут) составит  $138\,082,2 / 24\,000 = 5,75$ , принято шесть локомотивов.

Общий расход технологического пара давлением  $20 \text{ кгс/см}^2 - 6 \times 8,88 = 53,3$  т/сут.

Годовая экономия дизтоплива –  $365 \times 3,9565 = 1444,2$  т.

1 кг дизтоплива стоит  $51,85 \times 1,25 = 64,81$  руб. (цены указаны за литр).

Годовая экономия при использовании ПАЛ-9П составит  $1\,444\,200 \times 64,81 = 93\,600\,000$  руб. или 93,6 млн руб.

Ориентировочная стоимость локомотива на текущий момент –  $50\,000\,000$  руб., срок окупаемости шести локомотивов –  $6 \times 50\,000\,000 / 93\,602\,212,5 = 3,2$  года (3 года 3 мес.) при сроке эксплуатации 60–70 лет.

## ИСТОРИЯ ПРОДОЛЖАЕТСЯ

Попытки создания современных пароаккумуляторных локомотивов предпринимались и за рубежом (например, <sup>2,3</sup>). На рис. 4 показан пример такого локомотива<sup>3</sup>.

## Выводы

В результате применения ПАЛ-9П возможно достижение следующих положительных результатов:

1. ПАЛ-9П экономит дизельное топливо в количестве  $0,75-1,0$  т/сут на одну машину (данные приводятся в сравнении с тепловозами, работающими на дизельном топливе).

<sup>2</sup> Сайт компании Dampflokwerk Meiningen (Meiningen Steam Locomotive Works). [Электронный ресурс]: <https://www.dampflokwerk.de/en/>. Доступ 24.03.2022.

<sup>3</sup> Technology of fireless steam locomotives. Steam storage technology uses the ability of water to store large amounts of energy under pressure. Сайт компании DLM AG. [Электронный ресурс]: <https://dlm-ag.ch/en/fireless-technology/>. Доступ 24.03.2022.

2. Снижение затрат на ремонты на 90 % по сравнению с тепловозом.

3. Снижение затрат на обслуживающий персонал (машина обслуживается одним машинистом без помощника).

4. Локомотив возможно использовать (без снижения ресурса) в запылённых и загрязнённых условиях.

5. Существует возможность использовать на предприятиях, требующих особых условия по взрыво- и пожаробезопасности.

6. Экологичность (выхлоп – только водяной пар).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитриев В. В., Гаккель Я. М., Матвеев Н. Т. и др. Проблемы энергетики в промышленности // Сборник статей по электротехнике, теплотехнике и гидротехнике. – М.-Л.: Государственное издательство, 1927. – 172 с.

2. Хютте Т. П. Справочник для инженеров, техников и студентов. – 15 изд., испр. и дополн. – Т. 3 / Пер. с 26-го нем. изд. под общ. ред. В. К. Запорожец, С. И. Курбатова, Н. Л. Мануйлова. – М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР. Главная редакция литературы по машиностроению и металлообработке, 1936.

3. Pokschewinski, K. Feuerlose Lokomotiven: Geschichte, Funktion und Einsatz der Dampfspeicherloks, Lokrundschaue-Verlag, 2000, 167 p. ISBN 13 978-3931647100.

4. Röhl, F. von. Enzyklopädie des Eisenbahnwesens. Band 5. Berlin, Wien, 1914, 516 p. [Электронный ресурс]: <https://archive.org/details/enzyklopdiedes05r1>. Доступ 24.03.2022.

5. Раков В. А. Бестопочные паровозы // Локомотивы отечественных железных дорог 1845–1955 гг. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: «Транспорт», 1995. – 564 с. [Электронный ресурс]: [https://www.studmed.ru/rakov-va-lokomotivy-otechestvennyh-zheleznyh-dorog-1845-1955-gg-\\_c99cd510ffc.html](https://www.studmed.ru/rakov-va-lokomotivy-otechestvennyh-zheleznyh-dorog-1845-1955-gg-_c99cd510ffc.html). Доступ 21.04.2022.

6. Гартман Э. Паровоз без топки // Журнал «Техника – молодёжи», 1940. – № 10. – С. 65.

7. Добрава А. В. Разработка системы пароснабжения нефтеперерабатывающего завода от автономного источника. – Иваново: ИГЭУ, 2021. – 55 с. [Электронный ресурс]: <https://elib.ispu.ru/product-pdf/razrabotka-sistemy-parosnabzheniya-neftepererabatyvayushchego-zavoda-ot-avtonomnogo>. Доступ 21.04.2022.

8. Шагеев М. Ф., Ахметов Э. А. и др. Исследование и разработка рекомендаций по режиму работы системы пароснабжения при минимальных расходах пара на нефтехимических предприятиях // Экспозиция нефтьгаз. – 2009. – № 4 (4). – С. 42. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13091116>. Доступ 21.04.2022.

9. Письменный В. Л. Многорежимная парогазовая установка // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2006. – № 7–8. – С. 43–48. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12138682>. Доступ 24.03.2022. ●

### Информация об авторах:

**Балабин Валентин Николаевич** – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия, [vbbn2347@gmail.com](mailto:vbbn2347@gmail.com).

**Сербулов Алексей Юрьевич** – главный конструктор ООО «Белспецлесмаш», Гомель, Беларусь, [asrb@inbox.ru](mailto:asrb@inbox.ru).

Статья поступила в редакцию 13.02.2022, одобрена после рецензирования 21.04.2022, принята к публикации 28.04.2022.

