



УДК 629.13, 621.783

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРОВОЙ МАШИНЫ ТАНДЕМ-КОМПАУНД ПАРОВОЗА

Е.А. Оленев

IMPROVING THE STEAM ENGINE TANDEM COMPOUND OF A STEAM LOCOMOTIVE

E.A. Olenev

Аннотация. Предлагается новый тип паровой машины, позволяющей повысить КПД паровоза. Основное ее отличие от известных заключается в отсутствии парораспределительного механизма на втором цилиндре, что не только упрощает конструкцию, но и не ухудшает параметров пара, перетекающего в него из первого основного цилиндра машины.

Ключевые слова: *теплота; паровой локомотив; паровая машина.*

Abstract. A new type of steam engine is proposed, which allows to increase the efficiency of the locomotive. Its main difference from the known ones is the absence of a steam distribution mechanism on the second cylinder, which not only simplifies the design, but also does not worsen the parameters of the steam flowing into it from the first main cylinder of the machine.

Keywords: *heat; steam locomotive; steam engine.*

Введение

О каменном угле вновь заговорили как об альтернативе истощающихся запасов нефти и газа, как о топливе XXI века [1]. Российская Федерация располагает значительными балансовыми запасами угля (более 200 млрд. т), что составляет 12% мировых. Реально разведано 105 млрд. т., геологические ресурсы углей оцениваются в 4450 млрд. т (30% мировых). Очевидно, что структура расходуемого в стране топлива должна изменяться в сторону увеличения потребления угля.

Новые современные технологии сжигания твердого топлива в теплоэнергетической установке и экономное использование энергии пара в паровом двигателе позволят сократить выброс вредных веществ в атмосферу при рациональном использовании природных энергоресурсов, например на железнодорожном транспорте.

Работа энергоемкого железнодорожного транспорта в настоящее время ведется преимущественно на электрической и дизельной тяге, в результате чего такое доступное и относительно дешевое топливо как каменный уголь остается не востребованным, если не считать использование его на ТЭЦ, вырабатывающую электрическую энергию для электровоза. Отказ от использования дешевого топлива – угля, выразившийся в замене в конце 50-х – начале 60-х годов паровозов электровозами и тепловозами, привел не к снижению себестоимости перевозок на железнодорожном транспорте, а, наоборот, к их росту. Одна из причин, предопределивших судьбу паровоза, заключается в его низком КПД (около 10 %). Однако неправильно рассматривать эффективность работы железнодорожного транспорта и всей отрасли в целом только, с позиции КПД использования топлива. Необходимо учитывать все виды расходов на проведение перевозочного процесса, а также вредное воздействие последнего на окружающую среду. При этом следует заметить, что при существующих ценах на дизельное топливо и уголь эксплуатация паровоза даже с таким низким КПД будет значительно дешевле, чем тепловоза.

Крупный недостаток паровозов заключался в тяжелых условиях работы паровозной бригады. При эксплуатации паровоза большая часть рабочего времени затрачивалась на

ведение топочного процесса, приготовление нужного в данный момент количества пара и на осуществление контроля над котлом. Естественно, сейчас такие условия работы вряд ли могут оказаться привлекательными и приемлемыми. Однако применение новых современных технологий, в том числе, и информационных, позволяет усовершенствовать тепловую и механическую работу паровоза и создать условия для паровозной бригады не менее комфортными, чем на тепловозах и электровозах.

Сохраняя все лучшее из отечественных и мировых достижений паровозостроения и исключая недостатки путем внедрения новых технических решений и современных технологий, можно создать совершенный экономичный паровой локомотив с высокой степенью автоматизации рабочего процесса.

Введение в эксплуатацию паровозов нового поколения будет способствовать существенному снижению себестоимости железнодорожных перевозок при рациональном длительном использовании природных ресурсов России, а также позволит считать этот паровоз перспективным локомотивом.

Тандем-компаунд паровая машина

Прямоточная паровая машина в старых паровозах расходует пар очень расточительно, поэтому, имея даже очень экономичный паровой котел, нельзя в таком случае рассчитывать на относительно высокий КПД паровоза в целом. Этим обуславливается, в первую очередь, объективная необходимость разработки и применения новой конструкции паровой машины, которая при этом желательно была бы простой и удобной в управлении.

Для увеличения силы тяги паровоза и более рационального использования энергии пара была разработана четырехцилиндровая паровая машина, в которой управления впуском и выпуском пара осуществляется с помощью золотников, установленных только на цилиндрах высокого давления [2, 3]. Такое управление позволяет относительно свободно размещать цилиндры низкого давления на паровозе, например они могут быть установлены вертикально или в один ряд с цилиндрами высокого давления. Упрощается также и конструкция механизма управления паровой машиной в целом. Кроме того, упрощается обслуживание, так как механизм управления сосредоточен в одном месте. При этом золотник работает так, что при достижении поршнем в цилиндре высокого давления отметки 0,7 хода осуществляется подача расширившегося в этом цилиндре пара сначала в цилиндр низкого давления (расположенный на другой стороне паровоза) до момента прохождения поршнем мертвой точки. Затем при обратном движении этого поршня происходит подача пара в ресивер до момента прихода его на отметку 0,95 хода, с последующим выпуском пара наружу (конденсатор). Это позволяет повысить КПД и снизить мятие пара по следующим причинам.

Во-первых, при нахождении поршня на отметке 0,7 хода, соединенный с ним через шатун кривошип располагается под углом около 65° к горизонтали. На другой стороне кривошип будет отклонен от горизонтали на 25° , а непосредственно связанный с ним поршень отойдет при этом от мертвой точки на расстояние порядка 0,04 своего хода, образуя с крышкой цилиндра полость для впуска пара. Расширившийся в цилиндре высокого давления пар начнет заполнять эту полость и давить на поршень другого цилиндра, совершая дополнительную полезную работу.

Во-вторых, при достижении поршнем в цилиндре высокого давления мертвой точки подача пара в цилиндр низкого давления прекратится, при этом его поршень займет положение около отметки 0,5 своего хода, т.е. произойдет отсечка пара равная приблизительно 0,5. Причем роль золотника в этом случае выполняет цилиндр высокого давления, поэтому отсутствие второго золотника (на цилиндре низкого давления) способствует снижению мятия пара и упрощению конструкции машины.

В-третьих, уменьшается размер, так называемого, вредного пространства в цилиндре низкого давления, поэтому для получения паровой подушки требуется оставлять для сжатия меньше пара, снижая при этом противодействие ходу поршня.

Схема такой паровой машины представлена на рис. 1.

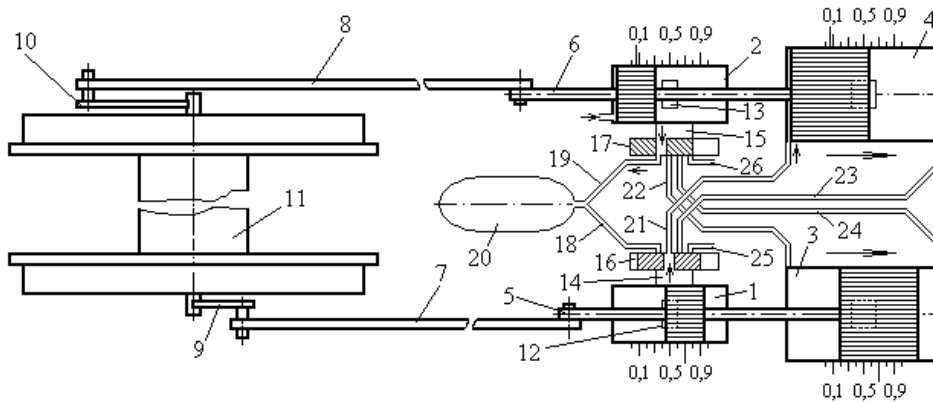


Рисунок 1 – Схема паровой машины паровоза в положении кривошипа левой машины под углом 25° к горизонтали

Паровая машина содержит соответственно правый и левый цилиндры высокого давления 1 и 2, цилиндры низкого давления 3 и 4, в которых с возможностью перемещения размещены поршни, причем поршни цилиндров 1 и 3, 2 и 4 закреплены соответственно на штоках 5 и 6, которые через шатуны 7 и 8 соединены с кривошипами 9 и 10, установленными под углом 90° относительно друг друга на колесной паре 11. Цилиндры 1 и 2 имеют окна 12 и 13 для выпуска пара, которые через коллекторы 14 и 15 соединены с распределителями 16 и 17, которые посредством: паропроводов 18 и 19 соединены с ресивером 20, паропроводов 21 и 22 – с задними, а 23 и 24 – с передними полостями цилиндров 4 и 3, паропроводов 25 и 26 – с атмосферой (конденсатором). Цилиндр низкого давления имеет окно 27 для выпуска пара в конденсатор или атмосферу.

Рассмотрим кратко работу машины. В исходном состоянии кривошип 10 левой паровой машины расположен под углом 0° к горизонтали, при этом поршень этой машины находится в заднем (левом по рисунку) положении, а кривошип 9 правой машины – в верхнем вертикальном положении. В этот момент подают свежий пар в цилиндр 2 из котла, прекращают подачу расширившегося в цилиндре 2 пара через распределитель 17 и паропровод 22 в заднюю полость цилиндра 3, переключают этот распределитель и направляют пар в ресивер 20, а пар из цилиндра 4 выпускают через окно 27 в атмосферу или конденсатор. Кроме того, заканчивают подачу свежего пара в цилиндр 1 (предположим, что работа машины происходит с отсечкой 0,5).

При достижении кривошипом 10 угла 25° (вращение, например, по часовой стрелке), а кривошипом 9 соответственно 115° , поршень левой машины отойдет от задней мертвой точки на 0,04 своего хода, а поршень правой – на 0,7 (рис. 1). Свежий пар продолжает поступать в цилиндр 2 и автоматически начинается подача через окно 12 расширившегося в цилиндре 1 пара в цилиндр 4 для повторного расширения, т.е. цилиндр высокого давления одновременно выполняет еще роль и золотникового устройства. Аналогичным образом происходит перепускание пара из второго цилиндра в третий.

Таким образом, из цилиндра высокого давления отработавший пар, практически не теряя своих свойств, поступает сначала в цилиндр низкого давления и только потом – в ресивер для других нужд, что повышает КПД паровой машины и паровоза в целом. При этом на большей части хода поршня на шток, приводящий в движение механизм вращения колес, действует суммарное усилие от поршней цилиндров высокого и низкого давления, в результате чего увеличивается мощность паровой машины, и улучшается плавность хода.

Индикаторная диаграмма паровой машины

Исследуем работу новой тандем-компаунд паровой машины, схема которой была приведена на рис. 1. Для этого сначала составим индикаторную диаграмму ее работы, учитывая, что пар из цилиндра высокого давления, выпускается в цилиндр низкого давления, расположенный на противоположной стороне, т. е. работа первого цилиндра производится совместно с четвертым цилиндром.

На рис. 2 представлена полученная индикаторная диаграмма, на которой индексы 1, 4 относятся к цилиндрам высокого и низкого давления. Степени впуска, запаздывания впуска, предварения выпуска, выпуска в ресивер и сжатия, выраженные в долях от рабочих объемов цилиндров, обозначены через ε , ζ_4 , δ , μ и σ , а коэффициент вредного пространства – ξ .

Противодавления выпуска не изменяются при движении поршня и соответственно равны: для первого цилиндра высокого давления p_{e1} и для четвертого цилиндра низкого давления p_{e4} . Давление p_{a1} впуска в первый цилиндр постоянно и изображается прямой линией a_1b_1 . Также прямыми линиями d_1e_1 и c_4d_4 изображено изменение давления в период наполнения ресивера и предварения выпуска. После прохождения поршнем точки c_1 пар из цилиндра высокого давления начинает поступать в цилиндр низкого давления, одновременно расширяясь в обоих цилиндрах. При этом давления в точках c_1 и a_4 приняты одинаковыми. В конце расширения давление в обоих цилиндрах выравняется (точки d_1 и b_4).

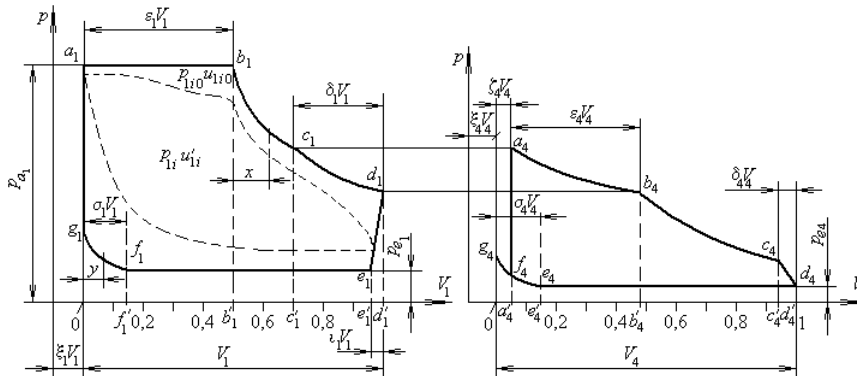


Рисунок 2 – Индикаторная диаграмма работы паровой машины компаунд

Кривые расширения b_1c_1 , c_1d_1 , a_4b_4 , b_4c_4 являются политропами расширения пара, а кривые сжатия f_1g_1 , e_4g_4 представляют собой равнобокие гиперболы. Это объясняется тем, что, если для перегретого пара применим закон расширения по политропе, то для насыщенного, к которому приближаются параметры предназначенного для выхлопа пара, ближе подходит закон $pV = \text{const}$. Согласно диаграмме среднее индикаторное давление δ_{1i0} для первого цилиндра высокого давления выразится

$$\delta_{1i0} = \frac{A_{a_1b_1c_1d_1e_1f_1g_1}}{[0;1]V_1} = \frac{A_{a_1b_1c_1d_1e_1f_1g_1}}{V_1}, \quad (1)$$

где $A_{a_1b_1c_1d_1e_1f_1g_1}$, V_1 , – площадь диаграммы и объем первого цилиндра.

Площадь этой диаграммы будет равна

$$A_{a_1b_1c_1d_1e_1f_1g_1} = A_{0a_1b_1b_1} + A_{b_1b_1c_1c_1} + A_{c_1c_1d_1d_1} - A_{e_1e_1d_1d_1} - A_{f_1f_1e_1e_1} - A_{0g_1f_1f_1}. \quad (2)$$

$$\text{Площади } A_{0a_1b_1b_1} = \delta_{a_1} \varepsilon_1 V_1, \quad A_{b_1b_1c_1c_1} = \int_{(\xi_1+\varepsilon_1)V_1}^{(\xi_1+1-\delta_1)V_1} p_{V_1\sigma} dV_{1\sigma}, \quad A_{c_1c_1d_1d_1} = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \mu \cdot \varepsilon_4} \int_{(\xi_1+1-\delta_1)V_1}^{[\xi_1+1+\mu(\xi_4+\zeta_4+\varepsilon_4)]V_1} p_{V_1\sigma} dV_{1\sigma},$$

$$A_{e_1e_1d_1d_1'} = \frac{P_{e_1} + P_{d_1}}{2} \iota_1 V_1, \quad A_{f_1'f_1e_1e_1'} = p_{e_1} (\xi_1 + 1 - \iota_1 - \sigma_1) V_1, \quad A_{0g_1f_1f_1'} = \int_{\xi_1 V_1}^{(\xi_1 + \sigma_1) V_1} P_{V_1 y} dV_{1y},$$

где $V_{1\delta}$ – текущий объем первого цилиндра в процессе расширения пара; μ – отношение площадей (объемов) цилиндров низкого и высокого давлений $\mu = d_4^2 / d_1^2$; $V_{1\delta}$ – текущий объем первого цилиндра в процессе сжатия пара.

Относительно площади $A_{c_1c_1d_1d_1'}$ следует сказать следующее. После того как поршень минует точку c_1 пар начинает поступать в цилиндр низкого давления и одновременно расширяться в обоих цилиндрах. При этом начнет также расширяться и пар, находящийся в полости между крышкой и поршнем четвертого цилиндра, т.е. занимавший объем $(\xi_4 + \zeta_4) V_4$, где V_4 объем цилиндра низкого давления. Если этого пара достаточно и он создает на поршень давление, равное давлению в точке c_1 , то нужно считать, что подвергающийся расширению пар изначально находится в обоих цилиндрах, причем в одном (перед началом расширения) он занимает объем $(\xi_1 + 1 - \delta_1) V_1$, а в другом $(\xi_4 + \zeta_4) V_4$ и, следовательно, нижний предел интегрирования будет равен $[\xi_1 + 1 - \delta_1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4)] V_1$.

Если между крышкой и поршнем в этом цилиндре пара будет мало, и его давлением можно пренебречь, то изначально расширение будет происходить из объема $(\xi_1 + 1 - \delta_1) V_1$, и в конце расширения (точка d_1) пар займет пространство $[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)] V_1$. Именно такие пределы интегрирования и были приняты, поскольку точное количество пара перед началом расширения не известно. Площадь $A_{c_1c_1d_1d_1'}$ будет пропорциональна находящейся в первом цилиндре части (σ_1) объема $(\delta_1 + \mu \cdot \varepsilon_4)$ пара, расширившегося в обоих цилиндрах, что и учитывается соответствующим соотношением перед знаком интеграла. Оставшаяся часть расширившегося пара, находящаяся в цилиндре низкого давления, будет определять площадь $A_{a_4a_4b_4b_4'}$.

На участке b_1c_1 давление $p_{V_{1\delta}}$ (с учетом, что $p_{a_1} = p_{b_1}$) выразится

$$p_{V_{1\delta}} = p_{a_1} \left[\frac{(\xi_1 + \varepsilon_1) V_1}{V_{1x}} \right]^n, \quad (3)$$

где n – показатель политропы на участке b_1c_1 .

В работе [4] приведен график изменения значения показателя политропы в зависимости от величины Δt_u перегрева пара. Автором предлагается описывать указанную зависимость следующим аналитическим выражением

$$n = \frac{109 + \Delta t_u}{118,5 + 0,612 \Delta t_u} - 10^{-7} \Delta t_u^{2,19}. \quad (4)$$

Для нахождения удельного объема перегретого пара была разработана формула, которая имеет следующий вид

$$v = \frac{\frac{6,85}{5 - \delta^{0,2}} + 0,005(t_u - 100 p^{0,251})}{p}, \quad (5)$$

где p – давление насыщенного пара в котле, кг/см²; t_u – температура перегретого пара.

В диапазоне давлений от 2 до 30 кг/см² приемлема более простая формула

$$t_{\bar{a}} = 9,175 + 95,6 \sqrt[4]{p} - \frac{5,21}{p^{0,536} p^{0,4}} \quad (6)$$

(величина относительной погрешности также не более 0,06 %).

Зная температуру и давление пара в точке b_1 , по формуле (6) находим температуру насыщенного пара и величину его перегрева

$$\Delta t_u = t_u - t_{\bar{a}}, \quad (7)$$

после чего по уравнению (4) вычисляем показатель политропы в этой точке.

При достижении поршнем точки c_1 пар займет объем

$$V_{c_1} = (\xi_1 + 1 - \delta_1) V_1, \quad (8)$$

при этом значения давления и температуры пара в точке c_1 соответственно будут равны

$$p_{\bar{n}_1} = p_{a_4} = p_{a_1} \left(\frac{\xi_1 + \varepsilon_1}{\xi_1 + 1 - \delta_1} \right)^n, \quad (9)$$

$$\dot{O}_{\bar{n}_1} = T_{a_4} = \dot{O}_{a_1} \left(\frac{\xi_1 + \varepsilon_1}{\xi_1 + 1 - \delta_1} \right)^{n-1}. \quad (10)$$

Подставляя показатель политропы, соответствующий точке b_1 , в уравнения (9), (10), находим величины давления $p_{\bar{n}_1}$ и температуры $\dot{O}_{\bar{n}_1}$ в точке c_1 , а по ним – температуру насыщенного пара и величину его перегрева в этой точке, используя формулы (6), (7). Далее вычисляем n' – показатель политропы в этой точке, который будет отправным для нахождения параметров пара на последующем участке (в данном случае на участке $c_1 d_1$).

Следует заметить, что показатель политропы в процессе расширения пара не является постоянной величиной. Если сделать допущение и принять на участке этот показатель постоянным, то полученный по формулам (9), (10) результат, следует считать окончательным и продолжить расчет параметров пара на следующем участке с показателем n' .

Если такого допущения не делать, то полученные по указанным формулам данные нужно считать предварительными и, в том числе, показатель n' , который затем использовать для вычисления среднего значения \bar{n} показателя политропы на участке $b_1 c_1$ следующим образом.

С учетом выражения (4) \bar{n} на участке с температурами t_1, t_2 будет иметь следующий вид

$$\begin{aligned} \bar{n} &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{109 + t}{118,5 + 0,612t} dt - 10^{-7} \int_{t_1}^{t_2} t^{2,19} dt = \\ &= \frac{1}{t_2 - t_1} \left(\frac{t_2 - t_1}{0,612} + 138,3 \ln \left| \frac{118,5 + 0,612t_1}{118,5 + 0,612t_2} \right| - 10^{-7} \frac{t_2^{3,19} - t_1^{3,19}}{3,19} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где t_1, t_2 – соответственно меньшая и большая температуры перегрева пара (в данном случае, на участке $b_1 c_1$, соответственно в точках c_1 и b_1).

С найденным средним значением показателя политропы повторяем расчет параметров по формулам (9), (10), подставляя вместо n значение \bar{n} , и получаем окончательные величины давления и температуры, по которым уточняем параметр \bar{n} , который уже будет исходным для последующего участка.

После того как поршень первого цилиндра минует точку c_1 , пар начнет поступать в четвертый цилиндр и расширяться в нем по политропе $a_4 b_4$ одновременно с паром в первом

цилиндре высокого давления. Объем $V_{d_1b_4}$, занимаемый паром после расширения в обоих цилиндрах (точки d_1, b_4) запишется

$$V_{d_1b_4} = (\xi_1 + 1)V_1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)V_1 = V_1[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)] \quad (12)$$

Температура пара в точке d_1 будет равна температуре в точке b_4

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_{d_1} = \dot{\delta}_{b_4} = \dot{\delta}_{\bar{n}_1} \left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right)^{n'-1} &= \dot{\delta}_{a_1} \left(\frac{\xi_1 + \varepsilon_1}{\xi_1 + 1 - \delta_1} \right)^{n-1} \left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right)^{n'-1} = \\ &= \dot{\delta}_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^{n-1} (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-n}}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'-1}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где n' – показатель политропы на участке c_1d_1 .

Отметим, что вместо n и n' подставляются или их значения, найденные в предположении, что эти показатели постоянны, или их средние значения, поскольку среднее значение n' может быть получено так же, как и для n .

В точке c_1 , которая является отправной для участка c_1d_1 , n' равна показателю n в этой точке. Давление $p_{V_{1\delta}}$ на участке c_1d_1 выразится

$$p_{V_{1\delta}} = p_{\bar{n}_1} \left[\frac{(\xi_1 + 1 - \delta_1)V_1}{V_{1x}} \right]^{n'} \quad (14)$$

а в точках d_1 и b_4 с учетом выражений (12) и (9) оно будет равно

$$\begin{aligned} p_{d_1} = \dot{\delta}_{b_4} = p_{\bar{n}_1} \left[\frac{(\xi_1 + 1 - \delta_1)}{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right]^{n'} &= p_{a_1} \left(\frac{\xi_1 + \varepsilon_1}{\xi_1 + 1 - \delta_1} \right)^n \left[\frac{(\xi_1 + 1 - \delta_1)}{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right]^{n'} = \\ &= p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-n}}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Методика определения показателя политропы, а также предварительного и окончательного значений температуры и давления аналогичны той, которая применялась на предыдущем участке диаграммы.

Теперь найдем плотность пара в точке d_1 (b_4), одна часть которого будет выпущена из цилиндра высокого давления, а другая – станет расширяться в цилиндре низкого давления по политропе b_4c_4 .

Зная температуру и давление пара, можно определить его плотность, воспользовавшись полученным автором выражением

$$\rho = \frac{p}{\frac{6,85}{5 - \delta^{0,2}} + 0,005(t_u - 100)p^{0,251}} \quad (16)$$

где ρ – плотность пара, кг/м³; p – давление пара, кг/см²; t_u – его температура, °С.

Давление пара на участке b_4c_4 описывается выражением

$$p_{V_{4\delta}} = p_{b_4} \left[\frac{(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)V_4}{V_{4x}} \right]^k \quad (17)$$

а в точке c_4 с учетом выражений (12) и (15) оно будет равно

$$p_{\bar{n}_4} = p_{b_4} \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^k = p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-n}}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}} \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^k \quad (18)$$

при этом температура пара в точке c_4

$$\dot{O}_{\bar{n}_4} = \dot{O}_{b_4} \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^{\kappa-1} = \dot{O}_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^{n-1} (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-n}}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'-1}} \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^{\kappa-1}. \quad (19)$$

где κ – показатель политропы на участке b_4c_4 ; $V_{4\delta}$ – текущий объем четвертого цилиндра в процессе расширения пара.

Подставляя вместо κ значение политропы в точке b_4 , определяем по формулам (18), (19) величины давления и температуры в точке c_4 .

По предложенным автором формулам можно определить температуру и давление пара в любой точке индикаторной диаграммы. При этом следует заметить, что формулы даны в общем виде, а при расчете этих параметров для конкретной машины эти формулы можно упростить, поскольку коэффициенты δ_1 , δ_4 , ι , ε_4 и некоторые другие будут неизменны.

Определим теперь площади фигур, из которых состоит индикаторная диаграмма, что, в конечном счете, позволит найти величину работы, совершаемой тем и другим цилиндрами.

Площадь фигуры $A_{b_1c_1c'_1}$ с учетом выражения (3) будет равна

$$\begin{aligned} A_{b_1c_1c'_1} &= \int_{(\xi_1+\varepsilon_1)V_1}^{(\xi_1+1-\delta_1)V_1} p_{V_{1\delta}} dV_{1\delta} = p_{a_1} [(\xi_1 + \varepsilon_1)V_1]^n \int_{(\xi_1+\varepsilon_1)V_1}^{(\xi_1+1-\delta_1)V_1} \frac{dV_{1\delta}}{V_{1x}^n} = \\ &= p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n V_1}{n-1} \left[\frac{1}{(\xi_1 + \varepsilon_1)^{n-1}} - \frac{1}{(\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n-1}} \right] = \frac{p_{a_1} V_1}{n-1} \left[\xi_1 + \varepsilon_1 - \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n}{(\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n-1}} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Площадь фигуры $A_{c_1c_1d_1d'_1}$ с учетом выражений (14) и (9) будет иметь вид

$$\begin{aligned} A_{c_1c_1d_1d'_1} &= p_{\bar{n}_1} \frac{\delta_1 [(\xi_1 + 1 - \delta_1)V_1]^{n'} \int_{(\xi_1+1-\delta_1)V_1}^{[\xi_1+1+\mu(\xi_4+\zeta_4+\varepsilon_4)]V_1} dV_{1x}}{\delta_1 + \mu \cdot \varepsilon_4 V_1^{n'}} = \\ &= p_{\bar{n}_1} \frac{\delta_1 (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'} V_1}{(\delta_1 + \mu \varepsilon_4)(n'-1)} \left[\frac{1}{(\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-1}} - \frac{1}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'-1}} \right] = \\ &= \frac{p_{a_1} \delta_1 (\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{1-n} V_1}{(\delta_1 + \mu \varepsilon_4)(n'-1)} \left[1 - \left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right)^{n'-1} \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

Площадь $A_{e_1e_1d_1d'_1}$ с учетом выражения (15) выразится

$$A_{e_1e_1d_1d'_1} = \frac{p_{e_1} + p_{d_1}}{2} \iota_1 V_1 = \frac{\iota_1 V_1}{2} \left[\delta_{\dot{a}_1} + p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-n}}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}} \right]. \quad (22)$$

Для гипербол сжатия будем иметь

$$p_{V_1\sigma} = p_{\dot{a}_1} \frac{(\xi_1 + \sigma_1)V_1}{V_{1y}}, \quad (23)$$

$$p_{V_4\sigma} = p_{\dot{a}_4} \frac{(\xi_4 + \sigma_4)V_4}{V_{4\sigma}}. \quad (24)$$

Тогда площадь $A_{0g_1f_1f'_1}$ под равнобокой гиперболой будет равна

$$A_{0g_1f_1f'_1} = \int_{\xi_1 V_1}^{\xi_1 + \sigma_1} p_{V_{1y}} dV_{1y} = p_{\dot{a}_1} (\xi_1 + \sigma_1)V_1 \int_{\xi_1 V_1}^{(\xi_1 + \sigma_1)V_1} \frac{dV_{1y}}{V_{1y}} = p_{\dot{a}_1} (\xi_1 + \sigma_1)V_1 \ln \frac{\xi_1 + \sigma_1}{\xi_1}. \quad (25)$$

Подставим выражения для площадей в уравнение (2) и из выражения (1) найдем значение δ_{1i0}

$$\begin{aligned}
 \delta_{1i0} &= \delta_{a_1} \varepsilon_1 + \frac{p_{a_1}}{n-1} \left[\xi_1 + \varepsilon_1 - \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n}{(\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n-1}} \right] + \\
 &+ \frac{p_{a_1} \delta_1 (\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{1-n}}{(\delta_1 + \mu \varepsilon_4)(n'-1)} \left[1 - \left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right)^{n'-1} \right] - \\
 &- p_{a_1} (\xi_1 + \sigma_1) \ln \frac{\xi_1 + \sigma_1}{\xi_1} - \frac{l_1}{2} \left[\delta_{a_1} + p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n-n}}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}} \right] - p_{e1} (\xi_1 + 1 - l_1 - \sigma_1) = \\
 &= \delta_{a_1} \varepsilon_1 + p_{a_1} (\xi_1 + \varepsilon_1)^n \left\{ \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^{1-n}}{n-1} \left[1 - \left(\frac{\xi_1 + \varepsilon_1}{\xi_1 + 1 - \delta_1} \right)^{n-1} \right] + \right. \\
 &+ \frac{\delta_1 (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{1-n}}{(\delta_1 + \mu \varepsilon_4)(n'-1)} \left[1 - \left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right)^{n'-1} \right] - \\
 &\left. - \frac{l_1 (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-n}}{2[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}} \right\} - p_{a_1} \left[(\xi_1 + \sigma_1) \ln \frac{\xi_1 + \sigma_1}{\xi_1} - \frac{l_1}{2} + \xi_1 + 1 - \sigma_1 \right]. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Перейдем теперь к вычислению площади $A_{a_4b_4c_4d_4e_4f_4}$ диаграммы цилиндра низкого давления

$$A_{a_4b_4c_4d_4e_4f_4} = A_{a'_4a_4b_4b'_4} + A_{b'_4b_4c_4c'_4} + A_{c_4c_4d_4d'_4} - A_{e_4e_4d_4d'_4} - A_{0g_4e_4e'_4}.$$

В положении поршня цилиндра высокого давления, соответствующем точке c_1 , объем, занимаемый паром в цилиндре высокого давления согласно диаграмме равен $(\xi_1 + 1 - \delta)V_1$, при этом пар начинает переходить в цилиндр низкого давления и давить на поршень, и расширение пара начнет происходить в обоих цилиндрах одновременно. В точках c_1 и a_4 (как

это было принято ранее) давление будет одинаковым, поэтому $p_{a_4} = p_{a_1} \left(\frac{\xi_1 + \varepsilon_1}{\xi_1 + 1 - \delta_1} \right)^n$, а в

точке b_4 согласно выражению (15) $p_{b_4} = p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n-n}}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}}$. После достижения

поршнем точки b_4 подача пара из первого цилиндра прекратится, и пар начнет расширяться по политропе b_4c_4 .

По аналогии с фигурой $A_{c'_1c_1d_1d'_1}$ выразим площадь $A_{a'_4a_4b_4b'_4}$ следующим образом

$$\begin{aligned}
 A_{a_4 a_4 b_4 b_4} &= \frac{\mu \varepsilon_4}{\delta_1 + \mu \varepsilon_4} \int_{\left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\mu}\right) V_4}^{\left[\frac{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)}{\mu}\right] V_4} p_{V_{1,4\delta}} dV_{1,4\delta} = p_{\bar{n}_1} \frac{\mu \varepsilon_4 \left[(\xi_1 + 1 - \delta_1) V_4\right]^{n'}}{\mu^{n'} (\delta_1 + \mu \varepsilon_4)} \int_{\left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\mu}\right) V_4}^{\left[\frac{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)}{\mu}\right] V_4} \frac{dV_{1,4\delta}}{V_{1,4x}^{n'}} = \\
 &= p_{\bar{n}_1} \frac{\mu \varepsilon_4 (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'} V_4}{\mu (\delta_1 + \mu \varepsilon_4) (n' - 1)} \left[\frac{1}{(\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-1}} - \frac{1}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'-1}} \right] = \\
 &= \frac{p_{a_1} \varepsilon_4 (\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{1-n} V_4}{(\delta_1 + \mu \varepsilon_4) (n' - 1)} \left[1 - \left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right)^{n'-1} \right] \quad (27)
 \end{aligned}$$

Указанная площадь соответствует работе, которая была выполнена поршнем четвертого цилиндра при перепуске пара из цилиндра высокого в цилиндр низкого давления. При этом сформировавшееся давление пара будет исходным при последующем расширении пара в этом цилиндре.

Площадь $A_{b_4 b_4 c_4 c_4}$ выразится

$$\begin{aligned}
 A_{b_4 b_4 c_4 c_4} &= \int_{(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4) V_4}^{(\xi_4 + 1 - \delta_4) V_4} p_{V_{4\delta}} dV_{4\delta} = p_{b_4} \left[(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4) V_4 \right]^\kappa \int_{(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4) V_4}^{(\xi_4 + 1 - \delta_4) V_4} \frac{dV_{4\delta}}{V_{4x}^\kappa} = \\
 &= p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n-n} (\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4) V_4}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}} \frac{1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^{\kappa-1} \right]. \quad (28)
 \end{aligned}$$

Площадь $A_{c_4 c_4 d_4 d_4}$ будет равна

$$A_{c_4 c_4 d_4 d_4} = \frac{p_{\bar{n}_4} + p_{\hat{a}_4}}{2} \delta_4 V_4 = 0,5 \left[p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n-n} \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^\kappa}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}} + p_{\hat{a}_4} \right] \delta_4 V_4. \quad (29)$$

Площадь $A_{e_4 e_4 d_4 d_4}$ будет иметь вид

$$A_{e_4 e_4 d_4 d_4} = p_{\hat{a}_4} (\xi_4 + 1 - \sigma_4) V_4. \quad (30)$$

С учетом уравнения (24) и по аналогии с выражением (25)

$$A_{0_{g_4 e_4 e_4}} = \int_{(\xi_4) V_4}^{(\xi_4 + \sigma_4) V_4} P_{V_{4\delta}} dV_{4y} = p_{\hat{a}_4} (\xi_1 + \sigma_1) V_4 \int_{(\xi_4) V_4}^{(\xi_4 + \sigma_4) V_4} \frac{dV_{4y}}{V_{4y}} = p_{\hat{a}_4} (\xi_4 + \sigma_4) V_4 \ln \frac{\xi_4 + \sigma_4}{\xi_4}. \quad (31)$$

Найдем значение δ_{4i0} , исходя из выражений (27) – (31) для площадей, проведя их алгебраическое суммирование,

$$\begin{aligned}
 \delta_{4i0} &= \frac{p_{a_1} \varepsilon_4 (\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{1-n}}{(\delta_1 + \mu \varepsilon_4) (n' - 1)} \left[1 - \left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right)^{n'-1} \right] + \\
 &+ p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n-n} (\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)}{[\xi_1 + 1 + \mu(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}} \frac{1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^{\kappa-1} \right] +
 \end{aligned}$$

$$+ p_{a_1} \frac{\delta_4 (\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-n} \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^{\kappa}}{2 [\xi_1 + 1 + \mu (\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}} + \frac{p_{a_4} \delta_4}{2} - p_{a_4} (\xi_4 + 1 - \sigma_4) - p_{a_4} (\xi_4 + \sigma_4) \ln \frac{\xi_4 + \sigma_4}{\xi_4}.$$

После некоторых преобразований получим окончательное выражение для величины индикаторного давления \check{d}_{4i0} в цилиндре низкого давления паровой машины

$$\check{d}_{4i0} = \frac{p_{a_1} \varepsilon_4 (\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{1-n}}{(\delta_1 + \mu \varepsilon_4) (n' - 1)} \left[1 - \left(\frac{\xi_1 + 1 - \delta_1}{\xi_1 + 1 + \mu (\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)} \right)^{n'-1} \right] + p_{a_1} \frac{(\xi_1 + \varepsilon_1)^n (\xi_1 + 1 - \delta_1)^{n'-n}}{[\xi_1 + 1 + \mu (\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)]^{n'}} \left\{ \frac{(\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4)}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^{\kappa-1} \right] + \frac{\delta_4}{2} \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^{\kappa} \right\} + p_{a_4} \left[\frac{\delta_4}{2} - \xi_4 - 1 + \sigma_4 - (\xi_4 + \sigma_4) \ln \frac{\xi_4 + \sigma_4}{\xi_4} \right]. \quad (32)$$

Разработанная индикаторная диаграмма паровой машины является теоретической. Она характеризуется индикаторным давлением p_{1i0} (p_{4i0}) и геометрическим расходом u_{1i0} (u_{4i0}). Реальная диаграмма, искаженная мятием пара (показана на рис. 1 пунктиром), описывается аналогичными параметрами, обозначаемыми p_{1i} (p_{4i}) и u_{1i} (u_{4i}). Реальная диаграмма цилиндра низкого давления на этом рисунке условно не показана.

Заключение

1. Разработана индикаторная диаграмма, показывающая зависимость давления пара в цилиндрах от хода поршня и позволяющая исследовать работу новой паровой машины тандем-компаунд паровоза.

2. Показана связь между работой пара в цилиндре высокого и низкого давления. Кривая $a_4 b_4$ начинается после перепуска пара из цилиндра высокого давления (в точке c_1) в цилиндр низкого давления, после чего каждая следующая кривая $p = (f V_4)$ начинается в точке, в которой заканчивается кривая предыдущего термодинамического процесса. Кроме того, диаграмма позволяет визуально сравнивать и оценивать работу цилиндров высокого и низкого давления.

3. Получены формулы, позволяющие аналитически находить показатель политропы и параметры перегретого пара практически на любом участке индикаторной диаграммы, а также величину работы в цилиндрах машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленников В. М. Проблемы российской энергетики // Научные технологии. 2002. № 2. Т. 3. С. 17–30.
2. Способ работы паровой машины тандем-компаунд паровоза. Пат. 2421619 С1 Российская Федерация, МПК F01B 17/04 / Оленев Е. А.; заявитель и патентообладатель Оленев Е. А. Заявка № 2010103682 от 03.02. 2010; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17. 7 с.
3. Способ работы парораспределительного механизма паровоза. Пат. 2544108 Российская Федерация, МПК F01L 15/02 / Оленев Е. А.; заявитель; патентообладатель Оленев Е. А. Заявка № 2014114809 от 14.04. 2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 7. 7 с.

4. Николаев И.И. Динамика паровоза. Москва: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1953. 308 с.

REFERENCES

1. Maslennikov V.M. *Problemy rossijskoj energetiki* [Problems of Russian energy]. *Naukoemkie tekhnologii*. 2002. No. 2. V. 3, pp. 17–30.
2. Olenov E.A. Patent 2421619 RF, IPC F01V 17/04. *Sposob raboty parovoj mashiny tandem-kompaund parovoza* [Working method of steam engine tandem-compound steam locomotive]. 2011. *Byul.* No. 17. 7 p.
3. Olenov E.A. Patent RF 2544108, IPC F01L 15/02. *Sposob raboty paroraspredelitel'nogo mekhanizma parovoza* [The method of operation of the gas distribution mechanism of a steam locomotive]. 2015. *Byul.* No. 7. 7 p.
4. Nikolaev I.I. *Dinamika parovoza* [Locomotive dynamics]. Moscow: Gosudarstvennoe transportnoe zheleznodorozhnoe izdatel'stvo, 1953. 308 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Оленев Евгений Александрович

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия, заслуженный изобретатель России, доктор технических наук, профессор, член диссертационного совета Д 212.025.02 ВАК РФ,

E-mail: olenevea@mail.ru

Olenov Evgeny Alexandrovich

Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, Vladimir, Russia, Honored Inventor of Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor, member of the Dissertation Council D 212.025.02 of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation.

E-mail: olenevea@mail.ru

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для примера произведем расчет давления и температуры в характерных точках индикаторной диаграммы, пользуясь разработанными выше формулами. Примем давление пара в золотниковой коробке равным 20 ат, его температуру 580 °С, $\zeta_4 = 0,045$, $\delta_1 = 0,3$, $\delta_4 = 0,1$, $\iota = 0,05$, $\xi_1 = \xi_4 = 0,01$, $\varepsilon_4 = 0,425$.

Сначала найдем давление и температуру пара в точке c_1 , в которой начинается выпуск пара из первого цилиндра в четвертый. По формулам (6), (7) находим температуру насыщенного пара и величину его перегрева в точке b_1

$$t_a = 9,175 + 95,6 \sqrt[4]{20} - \frac{5,21}{20^{0,536 \cdot 20^{0,4}}} = 211,4 \text{ °С.}$$

$$\Delta t_u = 580 - 211,4 = 368,6 \text{ °С.}$$

По уравнению (4) вычисляем показатель политропы в точке b_1 .

$$n = \frac{109 + 368,6}{118,5 + 0,612 \cdot 368,6} - 10^{-7} \cdot 368,6^{2,19} = 1,346 .$$

Из уравнений (9), (10) предварительно определяем давление и температуру пара в точке c_1 , приняв $\varepsilon_1 = 0,2$

$$p_{\bar{n}l} = 20 \left(\frac{0,01+0,2}{0,01+1-0,3} \right)^{1,346} = 3,88 \text{ ат}, \quad \dot{O}_{\bar{n}l} = 853 \left(\frac{0,01+0,2}{0,01+1-0,3} \right)^{1,346-1} = 560 \text{ К}, (287^\circ\text{C}).$$

Находим температуру насыщенного пара в точке c_1 и величину перегрева

$$t_{\bar{a}} = 9,175 + 95,6 \sqrt[4]{3,88} - \frac{5,21}{3,88^{0,536 \cdot 3,88^{0,4}}} = 142 \text{ }^\circ\text{C}. \quad \Delta t_u = 287 - 144 = 145 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Из выражения (11) находим средний показатель политропы

$$\bar{n} = \frac{1}{368,6 - 145} \left(\frac{368,6 - 145}{0,612} + 138,3 \ln \left| \frac{118,5 + 0,612 \cdot 145}{118,5 + 0,612 \cdot 368,6} \right| - 10^{-7} \frac{368,6^{3,19} - 145^{3,19}}{3,19} \right) = 1,299.$$

Уточняем давление и температуру пара в точке c_1 с найденным средним показателем политропы

$$p_{\bar{n}l} = 20 \left(\frac{0,01+0,2}{0,01+1-0,3} \right)^{1,299} = 4,1 \text{ ат}, \quad \dot{O}_{\bar{n}l} = 853 \left(\frac{0,01+0,2}{0,01+1-0,3} \right)^{1,299-1} = 592 \text{ К}, (319^\circ\text{C}).$$

Находим температуру насыщенного пара в точке c_1 и величину перегрева

$$t_{\bar{a}} = 9,175 + 95,6 \sqrt[4]{4,1} - \frac{5,21}{4,1^{0,536 \cdot 4,1^{0,4}}} = 144 \text{ }^\circ\text{C},$$

после чего по формуле (7) определяем величину перегрева пара

$$\Delta t_u = 319 - 144 = 175 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Из выражения (4) находим показатель политропы в точке c_1 (n')

$$n' = \frac{109 + 175}{118,5 + 0,612 \cdot 175} - 10^{-7} \cdot 175^{2,19} = 1,251.$$

Предварительно определяем давление и температуру пара в точке d_1

$$\delta_{d_1} = 20 \frac{(0,01+0,2)^{1,299} (0,01+1-0,3)^{1,251-1,299}}{[0,01+1+2(0,01+0,045+0,425)]^{1,251}} = 1,2 \text{ ат};$$

$$\dot{O}_{d_1} = 853 \frac{(0,01+0,2)^{1,299-1} (0,01+1-0,3)^{1,251-1,299}}{[0,01+1+2(0,01+0,045+0,425)]^{1,251-1}} = 458 \text{ К}, (185^\circ\text{C}).$$

Находим температуру насыщенного пара в точке d_1 и величину перегрева

$$t_{\bar{a}} = 9,175 + 95,6 \sqrt[4]{1,2} - \frac{5,21}{1,2^{0,536 \cdot 1,2^{0,4}}} = 103 \text{ }^\circ\text{C}. \quad \Delta t_u = 185 - 103 = 82 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Из выражения (11) находим среднее значение (n')

$$\bar{n}' = \frac{1}{175 - 82} \left(\frac{175 - 82}{0,612} + 138,3 \ln \left| \frac{118,5 + 0,612 \cdot 82}{118,5 + 0,612 \cdot 175} \right| - 10^{-7} \frac{175^{3,19} - 82^{3,19}}{3,19} \right) = 1,197.$$

Определяем окончательную величину давления и температуры в точке d_1

$$\delta_{d_1} = 20 \frac{(0,01+0,2)^{1,299} (0,01+1-0,3)^{1,197-1,299}}{[0,01+1+2(0,01+0,045+0,425)]^{1,197}} = 1,2 \text{ ат};$$

$$\dot{O}_{d_1} = 853 \frac{(0,01+0,2)^{1,299-1} (0,01+1-0,3)^{1,197-1,299}}{[0,01+1+2(0,01+0,045+0,425)]^{1,197-1}} = 484 \text{ К}, (211^\circ\text{C}).$$

Вычисляем температуру насыщенного пара в этой точке, температуру его перегрева и k (показатель политропы)

$$t_{\bar{a}} = 9,175 + 95,6 \sqrt[4]{1,2} - \frac{5,21}{1,2^{0,536-1,2^{0,4}}} = 105 \text{ } ^\circ\text{C}. \Delta t_u = 211 - 105 = 106 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\kappa = \frac{109 + 106}{118,5 + 0,612 \cdot 106} - 10^{-7} \cdot 106^{2,19} = 1,170.$$

По формуле (5) находим сначала удельный объем пара в точке d_1 , а затем вычисляем его плотность, которая будет равна $\rho_{d_1} = 0,535 \text{ кг/м}^3$.

Далее определяем давление и температуру пара в точке c_4

$$p_{\bar{n}_4} = 20 \frac{(0,01 + 0,2)^{1,299} (0,01 + 1 - 0,3)^{1,197-1,299} \left(\frac{0,01 + 0,045 + 0,425}{0,01 + 1 - 0,1} \right)^{1,17}}{[0,01 + 1 + 2(0,01 + 0,045 + 0,425)]^{1,197}} = 0,6 \text{ ат},$$

$$\dot{Q}_{\bar{n}_4} = 853 \frac{(0,01 + 0,2)^{1,299-1} (0,01 + 1 - 0,3)^{1,197-1,299} \left(\frac{\xi_4 + \zeta_4 + \varepsilon_4}{\xi_4 + 1 - \delta_4} \right)^{1,17-1}}{[0,01 + 1 + 2(0,01 + 0,045 + 0,425)]^{1,197-1}} = 434 \text{ К}, (161^\circ\text{C}).$$

Данные (приводятся для сравнения), вычисленные в этих точках в предположении постоянства показателя политропы, имеют следующие значения:

$$p_{\bar{n}_1} = 3,9 \text{ ат}; t_{\bar{n}_1} = 286 \text{ } ^\circ\text{C}; p_{d_1} = 1,1; t_{d_1} = 174 \text{ } ^\circ\text{C}; p_{\bar{n}_4} = 0,6 \text{ ат и } t_{\bar{n}_4} = 143 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Результаты вычислений (со средними значениями показателей политропы) для других значений отсечки ε_1 и давлений пара сведены в табл. 1.

Данные этой таблицы показывают следующее.

Направлять пар, имеющий указанную температуру перегрева, из цилиндра высокого давления в цилиндр низкого давления целесообразно только на отсечках 0,4 и более, так как при меньших отсечках давление на выхлопе из четвертого цилиндра (точка c_4) получается меньше атмосферного. Как правило, наибольшая продолжительность работы паровой машины паровоза осуществляется на отсечках 0,4 – 0,5. В этом случае даже при уменьшении давления в золотниковой коробке на 15% давление выхлопа пара больше атмосферного и колеблется от 1 до 1,6 кг/см², что свидетельствует о полноценном использовании начального давления той части перегретого пара, которая направляется в цилиндр низкого давления. Другая часть пара, при выхлопе из цилиндра высокого давления (на тех же отсечках) имеет давление 2,3 – 3,5 кг/см² и может подпитывать ресивер с давлением порядка 1,5 кг/см², а затем удаляться через конус в атмосферу. Отработавший пар имеет достаточно высокую температуру перегрева. С одной стороны это исключает его конденсацию, как в самой машине, так и при дальнейшей транспортировке в конус или в тендер паровоза. С другой стороны высокий перегрев указывает на недоиспользование тепла пара.

Таблица 1

$t_{a_1} = 580^\circ\text{C}, p_{a_1} = 20\text{ ат}, \rho_{a_1} = 5,04\text{ кг/м}^3$								$t_{a_1} = 580^\circ\text{C}, p_{a_1} = 18\text{ ат}, \rho_{a_1} = 4,50\text{ кг/м}^3$							
ε_1	$p_{c_1}, \text{ ат}$	$t_{c_1}, ^\circ\text{C}$	$p_{d_1}, \text{ ат}$	$t_{d_1}, ^\circ\text{C}$	$\rho_{d_1}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$p_{c_4}, \text{ ат}$	$t_{c_4}, ^\circ\text{C}$	ε_1	$p_{c_1}, \text{ ат}$	$t_{c_1}, ^\circ\text{C}$	$p_{d_1}, \text{ ат}$	$t_{d_1}, ^\circ\text{C}$	$\rho_{d_1}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$p_{c_4}, \text{ ат}$	$t_{c_4}, ^\circ\text{C}$
0,2	4,1	319	1,2	211	0,535	0,6	161	0,2	3,7	317	1,1	209	0,481	0,5	159
0,3	6,7	382	1,9	244	0,790	0,9	183	0,3	6,0	381	1,7	242	0,711	0,8	181
0,4	9,6	439	2,7	274	1,046	1,2	202	0,4	8,7	438	2,4	272	0,941	1,1	200
0,5	12,8	490	3,5	300	1,302	1,6	219	0,5	11,6	490	3,1	299	1,171	1,4	217
0,6	16,3	537	4,3	325	1,558	1,9	235	0,6	14,7	537	3,9	324	1,401	1,7	233
0,7	20	580	5,3	349	1,812	2,3	251	0,7	18	580	4,7	347	1,629	2,1	249
$t_{a_1} = 580^\circ\text{C}, p_{a_1} = 19\text{ ат}, \rho_{a_1} = 4,76\text{ кг/м}^3$								$t_{a_1} = 580^\circ\text{C}, p_{a_1} = 17\text{ ат}, \rho_{a_1} = 4,25\text{ кг/м}^3$							
ε_1	$p_{c_1}, \text{ ат}$	$t_{c_1}, ^\circ\text{C}$	$p_{d_1}, \text{ ат}$	$t_{d_1}, ^\circ\text{C}$	$\rho_{d_1}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$p_{c_4}, \text{ ат}$	$t_{c_4}, ^\circ\text{C}$	ε_1	$p_{c_1}, \text{ ат}$	$t_{c_1}, ^\circ\text{C}$	$p_{d_1}, \text{ ат}$	$t_{d_1}, ^\circ\text{C}$	$\rho_{d_1}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$p_{c_4}, \text{ ат}$	$t_{c_4}, ^\circ\text{C}$
0,2	3,9	318	1,2	210	0,508	0,5	160	0,2	3,5	317	1,0	208	0,454	0,5	158
0,3	6,4	382	1,8	243	0,750	0,8	182	0,3	5,7	381	1,6	241	0,671	0,7	179
0,4	9,2	438	2,5	273	0,993	1,2	201	0,4	8,2	438	2,3	271	0,888	1,0	199
0,5	12,2	490	3,3	300	1,236	1,5	218	0,5	10,9	489	3,0	298	1,105	1,3	216
0,6	15,5	537	4,1	325	1,479	1,8	234	0,6	13,9	537	3,7	323	1,323	1,6	232
0,7	19	580	5,0	348	1,720	2,2	250	0,7	17	580	4,4	347	1,538	2,0	248

Найдем теперь значение среднего индикаторного давления в первом цилиндре δ_{i10} , используя те же данные, что и для табл. 1, а также дополнительные исходные величины, приняв давление на выходе в конус $p_{a_1} = 1,5\text{ кг/см}$ и σ_1 в соответствии с параметрами парораспределительного механизма, имеющего место на паровозе ФД. Результат расчета δ_{i10} для различных отсечек ε_1 и разных давлений перегретого пара в золотниковой коробке показан в табл. 2.

Результаты расчета δ_{4i0} при разных давлениях и отсечках также сведены в табл. 2 и давление на выхлопе из цилиндра низкого давления принято 1,2 ат.

Таблица 2

$P_{a1} = 20 \text{ ат}; \rho_{a1} = 5,04 \text{ кг/м}^3; P_{e1} = 1,5 \text{ ат}; P_{e4} = 1,2 \text{ ат.}$													
ε_1	σ_1	$t_{d1}, ^\circ\text{C}$	$\rho_{d1}, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{e1}, \text{ кг/м}^3$	$P_{н10}, \text{ ат}$	$P_{410}, \text{ ат}$	$u_{н10}, \text{ кг}$	$\frac{B_{m0}/N_1, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$	$\rho_{e4}, \text{ кг/м}^3$	$u_{410}, \text{ кг}$	$\frac{B_{4m0}/N_4, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$	$\frac{N_4}{N_1}$	$\frac{B_{m0}/N, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$
0,2	0,31	211	0,535	0,664	6,3	-0,3	0,228	4,94	0,593	0,071	-	0	4,94
0,3	0,25	244	0,790	0,620	9,2	0,5	0,378	5,57	0,564	0,141	19,3	0,11	5,02
0,4	0,2	274	1,046	0,585	11,5	1,4	0,525	6,19	0,541	0,210	10,5	0,24	5,01
0,5	0,16	300	1,302	0,559	13,3	2,4	0,668	6,85	0,521	0,278	8,24	0,35	5,09
0,6	0,125	325	1,558	0,535	14,5	3,4	0,811	7,58	0,504	0,347	7,16	0,45	5,22
0,7	0,125	349	1,812	0,514	15,3	4,5	0,946	8,41	0,489	0,414	6,49	0,57	5,37
$P_{a1} = 19 \text{ ат}; \rho_{a1} = 4,76 \text{ кг/м}^3; P_{e1} = 1,5 \text{ ат}; P_{e4} = 1,2 \text{ ат.}$													
ε_1	σ_1	$t_{d1}, ^\circ\text{C}$	$\rho_{d1}, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{e1}, \text{ кг/м}^3$	$P_{н10}, \text{ ат}$	$P_{410}, \text{ ат}$	$u_{н10}, \text{ кг}$	$\frac{B_{m0}/N_1, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$	$\rho_{e4}, \text{ кг/м}^3$	$u_{410}, \text{ кг}$	$\frac{B_{4m0}/N_4, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$	$\frac{N_4}{N_1}$	$\frac{B_{m0}/N, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$
0,2	0,31	210	0,508	0,665	5,8	-0,4	0,212	4,95	0,595	0,064	-	0	4,95
0,3	0,25	243	0,750	0,621	8,6	0,4	0,355	5,58	0,565	0,130	22,9	0,09	5,12
0,4	0,2	273	0,993	0,587	10,8	1,3	0,494	6,19	0,542	0,196	11,0	0,22	5,06
0,5	0,16	300	1,236	0,559	12,5	2,2	0,630	6,85	0,522	0,261	8,47	0,34	5,13
0,6	0,125	325	1,479	0,535	13,7	3,2	0,764	7,57	0,505	0,326	7,29	0,44	5,25
0,7	0,125	348	1,720	0,515	14,4	4,2	0,892	8,41	0,490	0,390	6,58	0,56	5,39
$P_{a1} = 18 \text{ ат}; \rho_{a1} = 4,50 \text{ кг/м}^3; P_{e1} = 1,5 \text{ ат}; P_{e4} = 1,2 \text{ ат.}$													
ε_1	σ_1	$t_{d1}, ^\circ\text{C}$	$\rho_{d1}, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{e1}, \text{ кг/м}^3$	$P_{н10}, \text{ ат}$	$P_{410}, \text{ ат}$	$u_{н10}, \text{ кг}$	$\frac{B_{m0}/N_1, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$	$\rho_{e4}, \text{ кг/м}^3$	$u_{410}, \text{ кг}$	$\frac{B_{4m0}/N_4, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$	$\frac{N_4}{N_1}$	$\frac{B_{m0}/N, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$
0,2	0,31	209	0,481	0,667	5,4	-0,5	0,198	4,99	0,596	0,057	-	0	4,99
0,3	0,25	242	0,711	0,623	8,1	0,3	0,333	5,61	0,567	0,120	29,3	0,07	5,24
0,4	0,2	272	0,941	0,588	10,1	1,1	0,465	6,23	0,543	0,182	11,7	0,21	5,15
0,5	0,16	299	1,171	0,560	11,7	2,0	0,594	6,88	0,523	0,244	8,75	0,32	5,20
0,6	0,125	324	1,401	0,536	12,9	2,9	0,722	7,60	0,506	0,306	7,44	0,43	5,30
0,7	0,125	347	1,629	0,515	13,6	3,9	0,843	8,44	0,491	0,367	6,68	0,55	5,44
$P_{a1} = 17 \text{ ат}; \rho_{a1} = 4,25 \text{ кг/м}^3; P_{e1} = 1,5 \text{ ат}; P_{e4} = 1,2 \text{ ат.}$													
ε_1	σ_1	$t_{d1}, ^\circ\text{C}$	$\rho_{d1}, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{e1}, \text{ кг/м}^3$	$P_{н10}, \text{ ат}$	$P_{410}, \text{ ат}$	$u_{н10}, \text{ кг}$	$\frac{B_{m0}/N_1, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$	$\rho_{e4}, \text{ кг/м}^3$	$u_{410}, \text{ кг}$	$\frac{B_{4m0}/N_4, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$	$\frac{N_4}{N_1}$	$\frac{B_{m0}/N, \text{ кг}}{kBT \cdot \text{ч}}$
0,2	0,31	208	0,454	0,668	4,9	-0,5	0,183	5,05	0,598	0,050	-	0	5,05
0,3	0,25	241	0,671	0,624	7,5	0,2	0,312	5,67	0,568	0,109	43,7	0,05	5,42
0,4	0,2	271	0,888	0,589	9,5	0,9	0,437	6,28	0,545	0,168	12,6	0,19	5,27
0,5	0,16	298	1,105	0,561	11,0	1,8	0,559	6,93	0,525	0,227	9,08	0,31	5,29
0,6	0,125	323	1,323	0,537	12,1	2,6	0,680	7,65	0,507	0,285	7,62	0,42	5,39
0,7	0,125	347	1,538	0,516	12,7	3,6	0,795	8,49	0,492	0,343	6,79	0,54	5,52

Анализ полученных данных показывает. Несмотря на то, что давление на выхлопе при отсечках ниже 0,4 меньше атмосферного, совершаемая при этом полезная работа, еще положительна на отсечке 0,3. На отсечке 0,2 работа, идущая при расширении пара на движение поршня, меньше работы, требуемой для выхлопа пара, о чем свидетельствует знак минус в соответствующей строке.