

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

**К ВОПРОСУ ОБ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ
И РАСЧЕТЕ ЭЖЕКЦИОННОЙ ГАЗОВЫТЯЖНОЙ
УСТАНОВКИ УЗКОКОЛЕЙНЫХ ПАРОВОЗОВ****А. В. ДУРОВ**

Кандидат технических наук

(Архангельский лесотехнический институт)

1. Введение

В народном хозяйстве нашей страны используются около 5000 узкоколейных паровозов, из них свыше 2000 работает в лесной промышленности.

На этих паровозах тяга продуктов сгорания осуществляется посредством эжекционной газовытяжной установки, которая полезно использует только 6—10% энергии струи отработавшего в машине пара. Это обстоятельство ухудшает тягово-теплотехнические характеристики паровозов и ограничивает повышение форсировок паровозных котлов.

Повышение эффективности газовытяжной установки приобретает важное значение также в связи с необходимостью оборудования лесовозных паровозов более совершенными искроуловителями, создающими дополнительное гидравлическое сопротивление выходу паро-газовой смеси и уменьшающими в связи с этим паропроизводительность паровозных котлов. На преодоление этого сопротивления затрачивается часть полезной мощности локомотива. Большой экономичности паровоза можно достичь, если удастся избежать зажатия выходного конуса, а этого можно добиться путем повышения к. п. д. газовытяжной установки. При этом желательно оборудовать паровоз более надежным искроуловителем.

За последние 10—15 лет опубликовано несколько теорий и методов расчета газовытяжной установки.

Методика расчета эжекционной тяги, разработанная акад. С. П. Сыромятниковым [8], основана на эмпирических зависимостях, установленных при испытаниях уже существующих ширококолейных паровозов. Она не может быть использована для расчета паровозов узкой колеи и, кроме того, по этой методике невозможно проектировать газовытяжную установку, отличающуюся по своей эффективности от существующей.

Соотношения теории затопленных турбулентных струй, примененные к проектированию эжекционной тяги проф. П. К. Конаковым [9], позволяют рассчитать установку, подобную установке паровоза — образца.

Так, например, проф. В. Н. Сологубов [7] спроектировал для паровоза ПТ-4 газовытяжную установку, подобную имеющейся. Им для паровоза 159 типа, имеющего неудачное расположение конуса и нерациональную геометрию трубы, рассчитана улучшенная установка, подобная имеющейся у паровоза ПТ-4. Величина к. п. д. обеих газовытяжных установок находится в пределах, характерных для установок, осуществляемых по принципу свободной эжекции.

В теории проф. Н. И. Белокопя [3] рабочий процесс газовой вытяжной установки рассматривается как совокупность взаимодействующих процессов подсосывания продуктов сгорания к паровой струе, смешения потоков и восстановления давления парогазовой смеси в дымовой трубе как в диффузоре. Согласно этой теории, подтвержденной впоследствии экспериментально [1], эффективность эжекционной тяги может быть существенно повышена путем принудительного подсосывания газа паровой струей в сочетании с повышением к. п. д. дымовой трубы как диффузора и созданием соответствующей геометрии установки путем теоретического расчета. Сущность принудительной эжекции состоит в том, что продуктам сгорания перед их смещением сообщаются наиболее благоприятные начальные скорости подсосывания. Это уменьшает потери энергии паровой струи от удара потоков, являющихся основным слабым звеном в энергетическом балансе газовой вытяжной установки. Конструктивно принудительная эжекция осуществляется путем снабжения нижней части дымовой трубы направляющим раструбом, входное сечение которого устанавливается путем расчета и располагается на некотором оптимальном расстоянии от устья конуса.

Система расчетных уравнений, разработанная на основе этой теории, была применена для проектирования новых газовой вытяжных установок многих серий паровозов широкой колеи, что позволило повысить к. п. д. эжекционной тяги на 50—70%, увеличить на 25—30% выходное сечение конуса и сэкономить 3—4% топлива.

Однако применение этих уравнений для расчета паровозов узкой колеи встречает ряд существенных затруднений, поскольку при предыдущих паспортных испытаниях ряд важнейших исходных величин, характеризующих работу конуса, не измерялся. Кроме того, имеющиеся далеко неполные опытные данные относятся к паровозным топкам, имеющим в качестве топлива уголь или торф, а не дрова, на которых обычно работают лесовозные паровозы.

2. Основные расчетные характеристики газовой вытяжных установок

С целью определения основных расчетных характеристик, необходимых для проектирования газовой вытяжных установок паровозов узкой колеи, были проведены опыты с паровозом ОП, работающим на дровяном топливе. К этим характеристикам были отнесены: гидравлические сопротивления газоходов котла и его эквивалентное сечение ($F_{\text{эк}}$), давление (P_c) и температура (t_c) отработавшего пара перед конусом, коэффициент эжекции ($m = \frac{G}{D}$), соотношение удельных объемов подсосываемого и эжектирующего пара ($i_V = \frac{V_G}{V_D}$), полезная (N_G) и расходуемая (N_D) мощности, а также к. п. д. ($\eta_{\text{конт}}$) газовой вытяжной установки.

Методика опытных исследований, проведенных на стенде Архангельского лесотехнического института, и результаты измерения гидрав-

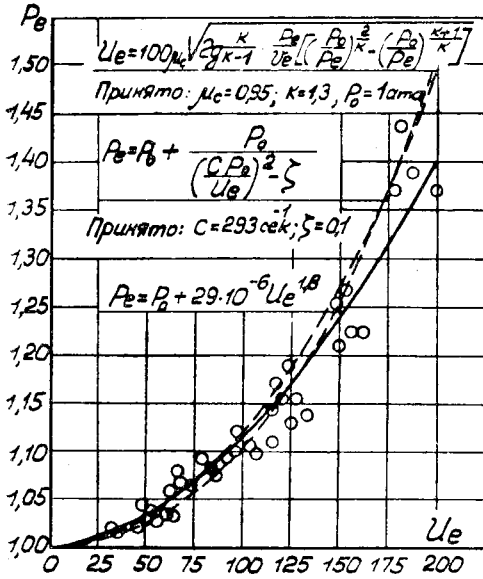


Рис. 1.

ся на кривые, вычерченные согласно уравнениям, характеризующим адиабатическое истечение пара из насадка в дозвуковой области:

$$U_e = 100 \mu_c \sqrt{2g \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_e}{V_e} \left[\left(\frac{P_0}{P_e} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_0}{P_e} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \frac{кг}{м^2 \cdot сек} \quad (1)$$

$$P_e = P_0 + \frac{P_0}{\left(\frac{C P_0}{U_e} \right)^2 - \zeta} \text{ атм}, \quad (2)$$

где K — показатель адиабаты, равный для перегретого пара 1,3;
 μ_c — коэффициент расхода пара;
 V_e — удельный объем пара перед насадком, $м^3/кг$;
 P_0 — давление в дымовой коробке, $кг/см^2$;
 ζ, C — расчетные коэффициенты расхода пара при истечении.

При построении кривых $P_e = f(U_e)$ было принято: $\mu_c = 0,95$, $P_0 = 1 \text{ кг/см}^2$, $g = 9,81 \text{ м/сек}$, $\zeta = 0,1$.

Подсчетами установлено, что для расчета режима работы газовытяжных установок узкоколейных паровозов в уравнении (2) значение физической постоянной $C = 293 \text{ сек}$.

Уравнение (1) и (2) дают практически одинаковую точность, но уравнение (2), предложенное проф. Н. И. Белоконом [2], значительно удобнее для практических расчетов.

Вполне удовлетворительные результаты при определении величины P_e дает также эмпирическая формула, опытные коэффициенты в которой получены методом наименьших квадратов:

$$P_e = P_0 + 29 \cdot 10^{-6} U_e^{1,8} \text{ атм}. \quad (3)$$

литических сопротивлений газозодов котла изложены в статье автора [4].

На рис. 1, 2 и 3 для паровоза ОП нанесены графики изменения величин P_e , t_e и m в зависимости от весовой скорости отработавшего пара перед конусом (U_e).

При диаметре насадка конуса $d_k = 45 \text{ мм}$ в интервале $U_e = 75 \div 150 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, соответствующем форсировкам по машине $Z_M = 33 \div 66 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}$, средняя величина давления отработавшего пара перед конусом находится в пределах $P_e = 1,7 \div 1,25 \text{ атм}$ эти значения P_e сравнительно невелики, если учесть чрезмерно большое гидравлическое сопротивление котла.

График, представленный на рис. 1, показывает, что опытные точки по измерению величины P_e достаточно хорошо укладываются

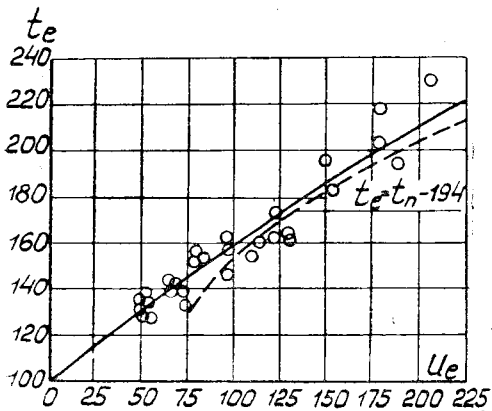


Рис. 2.

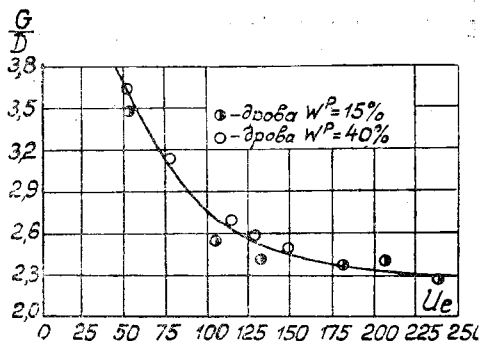


Рис. 3.

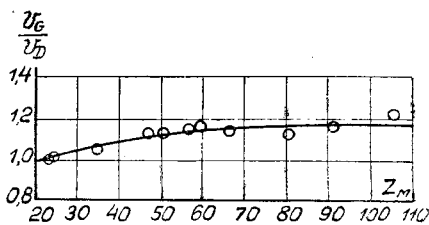


Рис. 4.

Котел паровоза ОП обеспечивает высокий перегрев пара, температура которого при форсировках $Z_m = 40 \div 80 \text{ кг/м}^2 \text{ час}$ составляет $350^\circ \div 400^\circ \text{ С}$. В связи с этим температура отработавшего пара также высока и в интервале рабочих нагрузок изменяется от 145 до 185° С (рис. 2).

Для дровяного отопления в интервале рабочих форсировок котла, соответствующих коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,2 \div 1,4$, величина отношения количества продуктов сгорания к количеству отработавшего пара изменяется в пределах $m = 2,3 \div 2,6$ (рис. 3).

Более высокий коэффициент эжекции у паровозов дровяного отопления по сравнению с коэффициентом эжекции паровоза, работающего на угольном топливе ($m = 2,1 \div 2,2$), можно объяснить тем, что первые работают с более высокими коэффициентами избытка воздуха и имеют меньшие потери тепла от механической неполноты сгорания. Существенное влияние оказывает также ручная загрузка дров, что приводит к проникновению в камеру сгорания больших масс воздуха из-за частого открывания топki.

Резкое возрастание коэффициента эжекции, происходящее при уменьшении нагрузки, обуславливается тем, что при проведении опытов количество воздуха, поступающего в топку, не подвергалось принудительному регулированию клапанами зольника. Ввиду этого коэффициент α устанавливался автоматически в соответствии с заданным режимом работы паровоза, увеличиваясь с уменьшением нагрузки.

Соотношение удельных объемов уходящих газов и отработавшего пара в конечный момент адиабатического расширения (рис. 4) является достаточно стабильной величиной и в интервале рабочих форсировок Z_m изменяется в пределах $i_V = 1,1 \div 1,15$. Это показывает, что процесс смешения происходит в условиях различных плотностей потоков пара и

газа. Следовательно, конкретные соотношения, полученные для затопленных турбулентных струй, нельзя распространять на газовытяжную установку паровоза, в которой физические параметры струи и окружающей среды различны.

Гидравлическая мощность тяги (N_G), теоретическая мощность струи отработавшего пара (N_D) и к. п. д. газовытяжной установки ($\eta_{\text{кон}}$) определялись на основании опытных данных по формулам:

$$N_G = \frac{G \Delta_k}{75 \cdot \gamma_G} \text{ л.с.}; \quad (4)$$

$$N_D = \frac{D W_D^2}{2g \cdot 75 \cdot \varphi_D} \text{ л.с.}; \quad (5)$$

$$\eta_{\text{кон}} = \frac{N_G}{N_D} = \frac{2g \Delta_k G}{W_D^2 \gamma_G D} \varphi_D^2, \quad (6)$$

где G, D — расход продуктов сгорания и пара, кг/сек ;

Δ_k — полное гидравлическое сопротивление котла, кг/м^2 ;

γ_G — удельный вес уходящих газов у передней решетки котла, кг/м^3 ;

φ_D — скоростной коэффициент истечения пара из насадка конуса, равный 0,97;

W_D — средняя скорость истечения пара через насадок конуса:

$$W_D = \frac{U_e V_D}{\sigma_D} \text{ м/сек.};$$

σ_D — коэффициент сжатия струи, равный 0,97;

V_D — удельный объем отработавшего пара перед смешением с продуктами сгорания:

$$V_D = \frac{47,1 (t_e + 273)}{10^4 P_e^{0,23}} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (7)$$

Графики изменения величин N_G , N_D и $\eta_{\text{кон}}$ (как для $W^p = 15\%$, так и для $W^p = 40\%$) в зависимости от форсировки Z_m у заводской газвытяжной установки паровоза ОП приведены на рис. 5.

При форсировке $Z_m = 60 \text{ кг/м}^2 \text{ час}$ $N_G = 1,35 \text{ л. с.}$, $N_D = 11,5 \text{ л. с.}$, что составляет около 40% индикаторной мощности машины. Соответственно величина $\eta_{\text{кон}} = 11,7\%$, причем она мало зависит от влажности дров.

Данные сравнительных подсчетов показали, что у паровоза ОП при одинаковых тепловых напряжениях колосниковой решетки величина $\eta_{\text{кон}}$ в среднем на 1,5–2,0% (абсолютных) выше, чем у паровоза ПТ-4, что можно объяснить большей температурой уходящих газов у паровоза ОП.

Известно, что у ширококолейных паровозов, использующих в качестве топлива уголь и работающих по принципу свободной эжекции (без направляющего аппарата), при рабочих форсировках $\eta_{\text{кон}} = 6\text{--}8\%$.

Поскольку паровозы ПТ-4 и ОП имеют более высокие температуры уходящих газов ($t_{yx} = 400\text{--}550^\circ \text{C}$) и меньшее противодавление пара перед конусом ($\Delta P_e = 0,2\text{--}0,3 \text{ атм.}$) то они в области рабочих форсировок котла работают с повышенным к. п. д. газовытяжной установ-

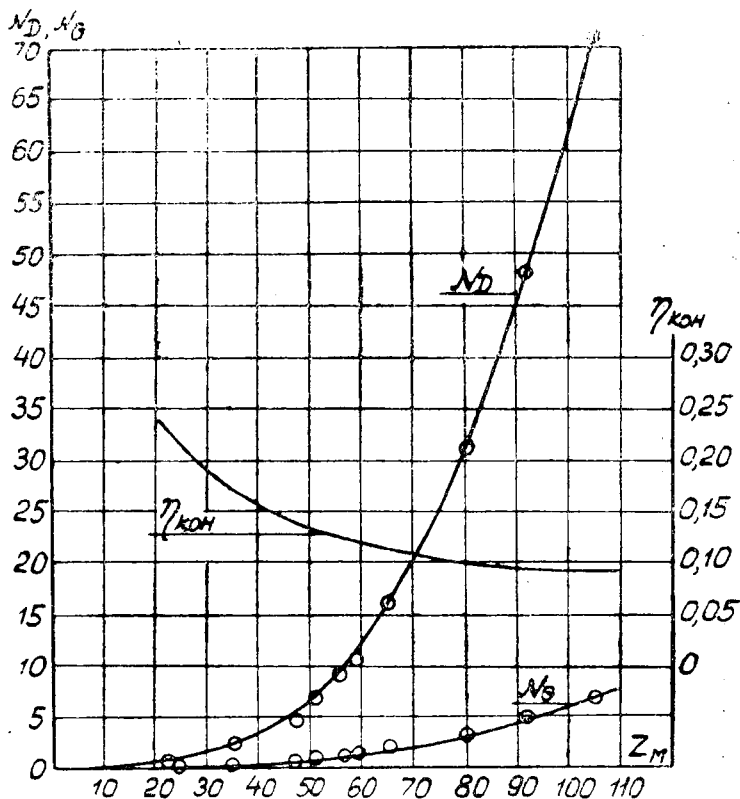


Рис. 5

ки по сравнению с паровозами широкой колеи (при этом имеется в виду, что к.п.д. дымовой трубы как диффузора $\eta_{диф} = 0,72 \div 0,79$).

Существенный вклад вносит также и более высокий, по сравнению с углем, коэффициент эжекции для дров, так как величина $\eta_{кон}$ прямо пропорциональна кубу коэффициента эжекции:

$$\eta = m^3 \cdot i_V \cdot \mu \cdot C \cdot \left(\frac{f_k}{F_{эж}} \right)^2. \quad (8)$$

Анализ опытных данных показывает, что при проектировании газовой вытяжной установки лесовозных паровозов узкой колеи нельзя без внесения существенных поправок пользоваться расчетными характеристиками и эмпирическими соотношениями, полученными для ширококолейных паровозов, работающих на угольном топливе. Различие этих характеристик обуславливается не только видом сжигаемого топлива, но и различными конструктивными соотношениями газовой вытяжной установки ширококолейных и узкоколейных паровозов.

3. Методика расчета газовой вытяжной установки и ее экспериментальная проверка

Исходными данными при расчете газовой вытяжной установки паровозов являются: эквивалентное сечение газоходов котла ($F_{эж}$), коэффициент эжекции $\left(m = \frac{G}{D} \right)$, соотношение удельных объемов уходящих

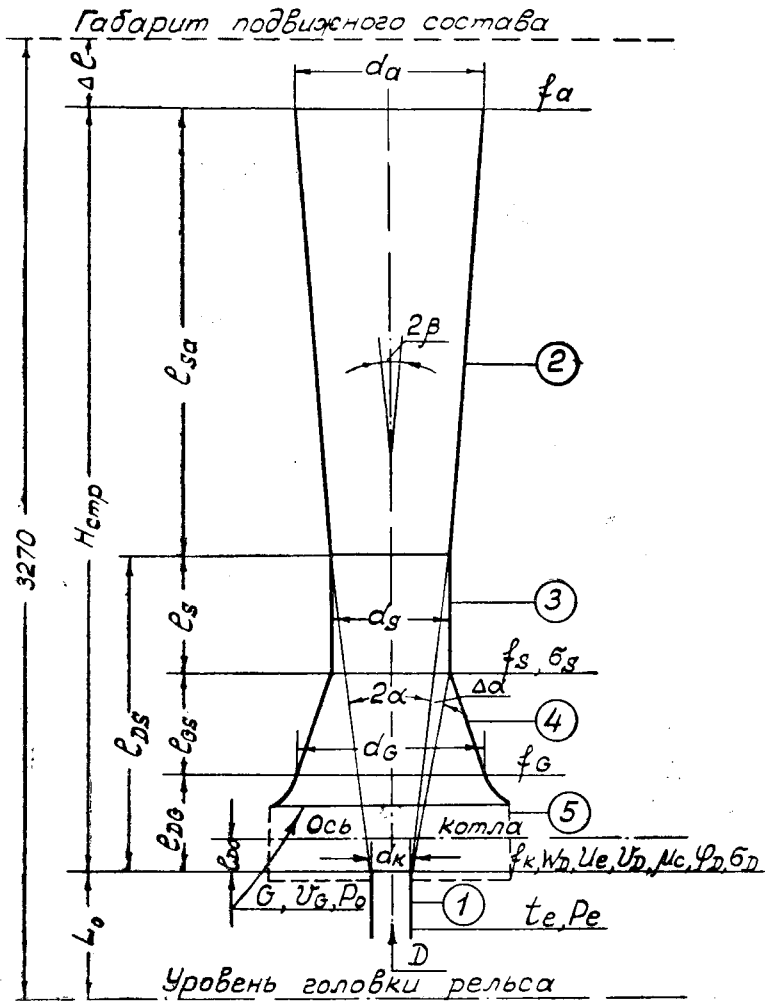


Рис. 6.

газов и отработавшего пара $\left(i_V = \frac{V_G}{V_D}\right)$, строительная высота установки $(H_{спр})$, и значения расчетных коэффициентов.

В качестве примера рассмотрим расчет газовытяжной установки паровоза ПТ-4, работающего на дровяном топливе, по методу проф. Н. И. Белокопья, для условий принудительной эжекции.

Расчетная схема установки включает (рис. 6): конус с неразделенным выхлопом пара, снабженный насадком круглого сечения (1), комбинированную дымовую трубу, состоящую из диффузора (2), цилиндрическую установку (3), направляющий растроб (4) и сетчатый искроуловитель (5).

На основании данных паспортных испытаний паровоза ПТ-4 и теплового расчета котла, произведенного при форсировке $Z_m = 40 \text{ кг/м}^2 \text{ час}$ и влажности дров $W_p = 40\%$, получены следующие исходные данные:
 Секундное количество продуктов сгорания $G = 0,980 \text{ кг/сек}$.
 Секундный расход пара $D = 0,413 \text{ кг/сек}$;

Коэффициент эжекции $m = \frac{G}{D} = 2,38$;

Удельный объем уходящих газов $V_G = 1,96 \text{ м}^3/\text{кг}$ (при $t_{yx} = 390^\circ \text{ С}$);

Удельный объем отработавшего пара $V_D = 1,94 \text{ м}^3/\text{кг}$ (при $t_e = 158^\circ \text{ С}$ и $P_e = 1,15 \text{ кг/см}^2$);

Соотношение удельных объемов газа и пара.

$$i_V = \frac{V_G}{V_D} = 1,01.$$

Полное гидравлическое сопротивление котла с учетом сопротивления, создаваемого искроуловителем $\Delta_k = 78 \text{ мм вод. ст.}$

Кроме этого заданы: расстояние от устья конуса до оси котла $l_{DO} = 60 \text{ мм}$ и строительная высота установки $H_{стр} = 1,6 \text{ м}$.

Значения расчетных коэффициентов и углов конусности принимаем по опытам ЦНИИ [1] равными:

φ_D	σ_D	μ_c	φ_s	φ_V	φ_G	σ_s	2α	$\Delta\alpha$	2β
0,97	0,97	0,95	0,9	1	0,75	0,95	15°	$1,5^\circ$	9°

где φ_s — скоростной коэффициент эжекции;

φ_V — поправочный коэффициент удельного объема паро-газовой смеси;

φ_G — скоростной коэффициент осевого подсосывания продуктов сгорания;

σ_s — коэффициент сжатия паро-газовой смеси в горловине дымовой трубы;

2α — наивыгоднейший угол вписывания паро-газовой струи в горловину трубы, который соответствует максимальному значению $\eta_{кон}$;

$\Delta\alpha$ — возможное отклонение наивыгоднейшего угла вписывания;

2β — наивыгоднейший угол раствора дымовой трубы как диффузора.

На основании этих данных определяем размеры насадка конуса дымовой трубы и их взаимное расположение.

1. Эквивалентное сечение газоходов котла:

$$F_{эк} = \frac{G}{\sqrt{\frac{2g\Delta_k}{V_G}}} = \frac{0,98}{\sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 78}{1,96}}} = 0,035 \text{ м}^2;$$

2. Характеристика выбора к. п. д. дымовой трубы как диффузора:

$$\frac{H_{стр}}{\sqrt{F_{эк}}} = \frac{1,6}{\sqrt{0,035}} = 8,9;$$

3. Оптимальный к. п. д. дымовой трубы как диффузора определяем по графику, приведенному в [1].

$$\eta_{диф} = f\left(\frac{H_{стр}}{\sqrt{F_{эк}}}, m\right), \eta = 0,8$$

(при равномерном распределении скоростей на входе и выходе).

4. К. п. д. газовытяжной установки:

$$\eta_{\text{кон}} = \frac{\eta_{\text{диф}} \cdot \varphi_S^2 \cdot \varphi_V \cdot \varphi_D^2 \cdot i_V \cdot m}{(1 + i_V m)(1 + m) - \eta_{\text{диф}} \cdot \varphi_S^2 \cdot \varphi_V \cdot \varphi_D^2 \cdot i_V \cdot m^2} =$$

$$= \frac{0,8 \cdot 0,9^2 \cdot 1 \cdot 0,97^2 \cdot 1,01 \cdot 2,38}{(1 + 1,01 \cdot 2,38)(1 + 2,38) - 0,8 \cdot 0,9^2 \cdot 1 \cdot 0,75^2 \cdot 1,01 \cdot 2,38^2} = 0,156.$$

5. Выходное сечение насадка конуса

$$f_k = \frac{F_{\text{эк}}}{i_V \cdot m \cdot \mu_c} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{кон}}}{m}} = \frac{0,035 \cdot 10^4}{1,01 \cdot 2,38 \cdot 0,95} \sqrt{\frac{0,156}{2,38}} = 38,8 \text{ см}^2$$

или

$$d_k = 70 \text{ мм}$$

6. Осевая W_D и весовая U_e скорости пара в устье конуса:

$$W_D = \frac{D}{\sigma_D} \frac{V_D}{f_k} = \frac{0,413 \cdot 1,94}{0,97 \cdot 38,8} \cdot 10^4 = 212 \text{ м/сек}$$

$$U_e = \frac{D}{f_k} = \frac{0,413}{38,8} \cdot 10^4 = 106 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{сек}}$$

7. Давление отработавшего пара перед конусом.

$$P_e = P_0 + \frac{P_0}{\left(\frac{C}{U_e}\right)^2 - \zeta} = 1 + \frac{1}{\left(\frac{293}{106}\right)^2 - 0,1} = 1,134 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}.$$

В начале расчета мы задались значением $P_e = 1,15 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ и получили $P_e = 1,134 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$. Совпадение результатов удовлетворительное.

8. Наивыгоднейшая относительная скорость подсосывания продуктов сгорания.

$$i_{W_{\text{онт}}} = \frac{\varphi_G^2}{\varphi_D^2} \eta_{\text{кон}} = \frac{0,75^2}{0,97^2} \cdot 0,156 = 0,0932.$$

9. Сечение горловины дымовой трубы:

$$f_s = \frac{\sigma_D \cdot f_k \cdot (1 + i_V m)(1 + m)}{\varphi_S \varphi_V \sigma_S (1 + i_{W_{\text{онт}}} m)} =$$

$$= \frac{0,97 \cdot 38,8 (1 + 1,01 \cdot 2,38)(1 + 2,38)}{0,9 \cdot 1 \cdot 0,95 (1 + 0,0932 \cdot 2,38)} = 415 \text{ см}^2$$

или $d_s = 230 \text{ мм}$.

10. Расстояние от устья конуса до горловины дымовой трубы:

$$l_{Ds} = \frac{d_s - d_k}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{230 - 70}{2 \operatorname{tg} 7^\circ 30'} = 610 \text{ мм}.$$

11. Высота дымовой трубы:

$$l_{sa} = H_{\text{стр}} - l_{Ds} = 1600 - 610 = 990 \text{ мм}$$

$$\frac{l_{sa}}{d_s} = \frac{990}{230} = 4,3.$$

12. Диаметр выходного сечения дымовой трубы:

$$d_a = d_s + 2l_{sa} \operatorname{tg} \beta = 230 + 2 \cdot 990 \cdot \operatorname{tg} 4^\circ 30' = 385 \text{ мм}$$

или

$$f_a = 1160 \text{ см}^2$$

13. Высота цилиндрической вставки горловины дымовой трубы:

$$l_s = \frac{\sin 2\Delta\alpha}{2 \sin^2 \alpha} (d_s - d_k) = \frac{\sin 3^\circ}{2 \sin^2 7^\circ 30'} (230 - 70) = 240 \text{ мм.}$$

14. Расстояние от устья конуса до входного сечения раструба (по опытным данным для паровоза ОП).

$$l_{DG} \approx 2d_k = 2 \cdot 70 = 140 \text{ мм.}$$

15. Диаметр входного сечения направляющего раструба

$$d_G = \sqrt{\frac{4 \cdot i \cdot V^m \cdot \sigma_D \cdot f_k}{\pi \cdot i_{W, \text{опт}}} + (d_k + 2l_{DG} \operatorname{tg} \alpha)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 1,01 \cdot 2,38 \cdot 0,97 \cdot 38,4}{3,14 \cdot 0,0932} + (7 + 2 \cdot 14 \operatorname{tg} 7^\circ 30')^2} = 36,7 \text{ см.}$$

Принимаем $d_G = 365 \text{ мм.}$

16. Проверка к. п. д. спроектированного диффузора:

а) коэффициент потерь на выходе:

$$\zeta_{\text{вых}} = \left(\frac{\sigma_s \cdot f_s}{f_s} \right)^2 = \left(\frac{0,95 \cdot 415}{1160} \right)^2 = 0,115.$$

б) коэффициент потерь на трение:

$$\zeta_{\text{тр}} = \frac{\lambda}{8 \sin \beta} \cdot (1 - \zeta_{\text{вых}}) = \frac{0,02}{8 \sin 4^\circ 30'} (1 - 0,115) = 0,028,$$

где λ — коэффициент трения паро-газовой смеси о стенки трубы, равный 0,02.

в) коэффициент потерь на расширение при равномерном распределении скорости ($k = 1$):

$$\zeta_{\text{расш}} = 3,2 \cdot (\operatorname{tg} \beta)^{1,25} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_s \cdot f_s}{f_a} \right)^2 \cdot k =$$

$$= 3,2 (\operatorname{tg} 4^\circ 30')^{1,25} \cdot \left(1 - \frac{0,95 \cdot 415}{1160} \right)^2 \cdot 1 = 0,058.$$

г) к. п. д. диффузора:

$$\eta_{\text{диф}} = 1 - (0,115 + 0,028 + 0,058) = 0,8.$$

У существующей газовытяжной установки, согласно данным проф. В. Н. Сологунова [7], при $Z_m = 40 \text{ кг/м}^2 \text{ час}$; $\eta'_{\text{кон}} = 0,10$ ($d'_k = 60 \text{ мм}$; $f'_k = 28,3 \text{ см}^2$). Тогда относительное увеличение $\eta_{\text{кон}}$ и f_k за проектированной установки, по сравнению с существующей, составит:

$$\frac{\eta_{\text{кон}}}{\eta'_{\text{кон}}} = \frac{0,156}{0,10} = 1,56 \quad \frac{f_k}{f'_k} = \frac{38,8}{28,3} = 1,337$$

Кроме сетчатых искроуловителей на лесовозных паровозах применяют искроуловители турбинного типа и искроуловители-паросушители, которые обеспечивают значительно более надежное улавливание искр. При этом система расчетных уравнений газовой вытяжной установки остается без изменения, но при определении ее размеров величина эквивалентного сечения газоходов котла подсчитывается с учетом дополнительного гидравлического сопротивления искроуловителя ($\Delta_{\text{ис}}$):

$$F_{\text{эк}} = \frac{G}{\sqrt{\frac{2g(\Delta_k + \Delta_{\text{ис}})}{V_G}}} \text{ м}^2.$$

Величины $F_{\text{эк}}$, подсчитанные нами для узкоколейных паровозов на дровяном топливе, оборудованных искроуловителями сетчатого и турбинного типов, приведены в таблице:

Серия паровоза	Форсировка Z_M кг/м ² час	Искроуловитель сетчатого типа		Искроуловитель турбинного типа	
		$F_{\text{эк}}$ м ²	$\frac{F_{\text{эк}}}{R}$	$F_{\text{эк}}$ м ²	$\frac{F_{\text{эк}}}{R}$
159	35	0,029	0,040	0,024	0,035
ПТ-4	40	0,035	0,035	0,030	0,030
ОП	20+105	0,020	0,029	0,018	0,026

где R — площадь колосниковой решетки в м².

По изложенной выше методике были рассчитаны газовытяжные установки паровозов ПТ-4 (турбинный искроуловитель), ОП и 159 (сетчатые искроуловители) для дровяного отопления. На рис. 7, 8, 9 и 10 приводятся схемы и основные размеры запроектированных (сплошные линии) и существующих (пунктирные линии) газовытяжных установок этих паровозов.

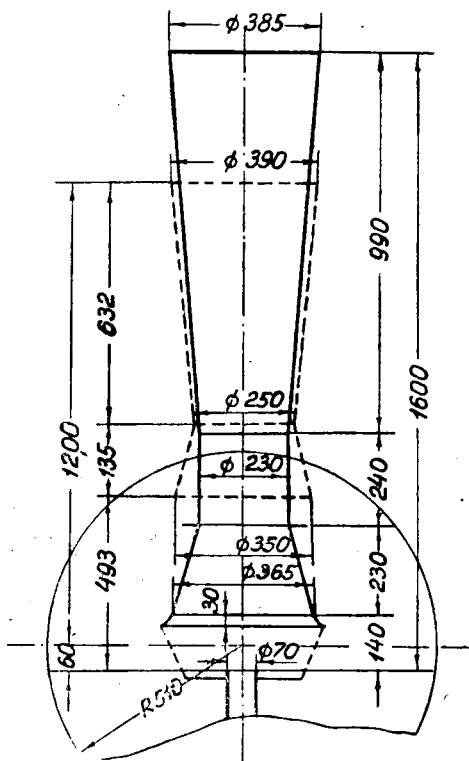


Рис. 7. Газовытяжная установка паровоза ПТ-4.

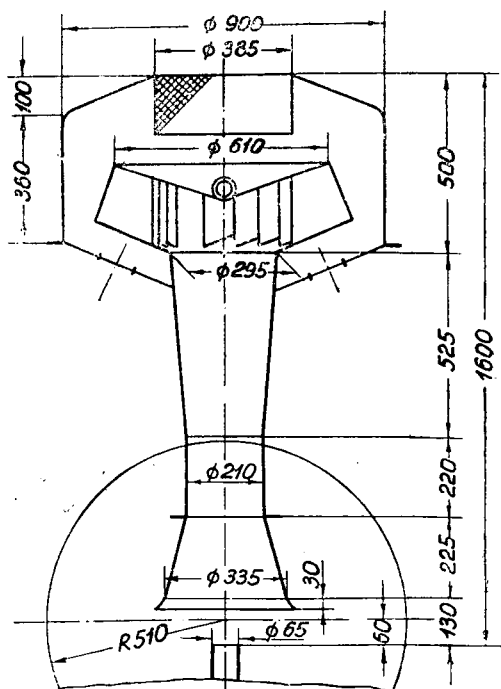


Рис. 8. Газовытяжная установка паровоза ПТ-4.

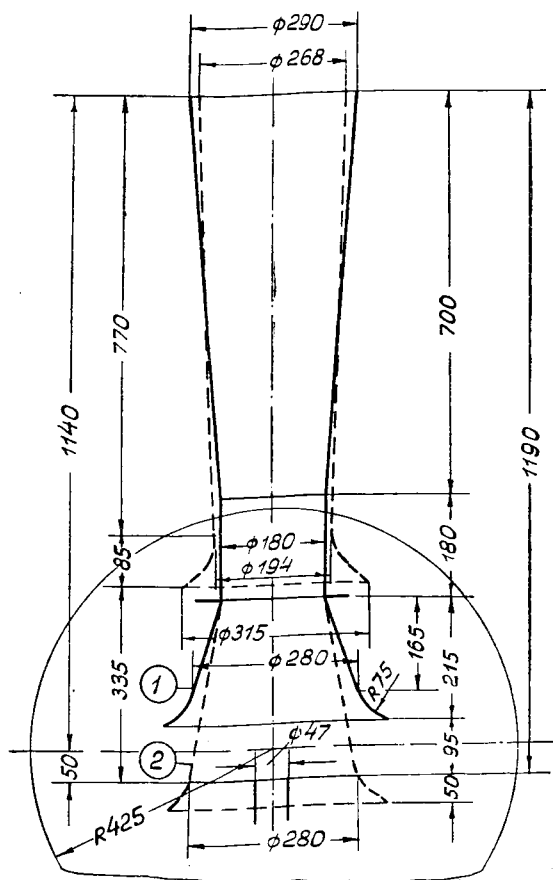


Рис. 9. Газовытяжная установка паровоза ОП.
1 — верхнее и 2 — нижнее расположение раструба.

Как видно, примененная методика позволяет получить вполне приемлемые для паровозов узкой колеи геометрические соотношения конуса и трубы, обеспечивающие к тому же весьма существенное повышение к. п. д. газовой вытяжной установки.

Согласно подсчетам, у новых установок величина к. п. д. эжекционной тяги (при расчетных форсировках) достигла около 16%, а противодействие отработавшего пара перед конусом не превышает 0,2 *атм.* Увеличение $\eta_{\text{кон}}$ составило для паровоза ОП — 30%, для ПТ-4 — 55% и для 159 $\eta_{\text{кон}}$ возрос в три раза.

Подсчеты показали, что у паровозов узкой колеи (в особенности у паровозов средней мощности) по условиям габарита подвижного состава и размещения конуса в дымовой коробке имеется полная возможность применения диффузоров с оптимальной относительной длиной $\frac{l_{sa}}{d_a} = 3 \div 4$ и углами раскрытия $2\beta = 8 \div 10^\circ$. Это позволит за счет снижения потерь энергии паро-газовой смеси на выходе, которые при углах 2β до $10 \div 12^\circ$ являются основным фактором в энергетическом балансе диффузора, получить величину к. п. д. дымовой трубы как диффузора не менее 0,8, вместо существующего 0,5 \div 0,7.

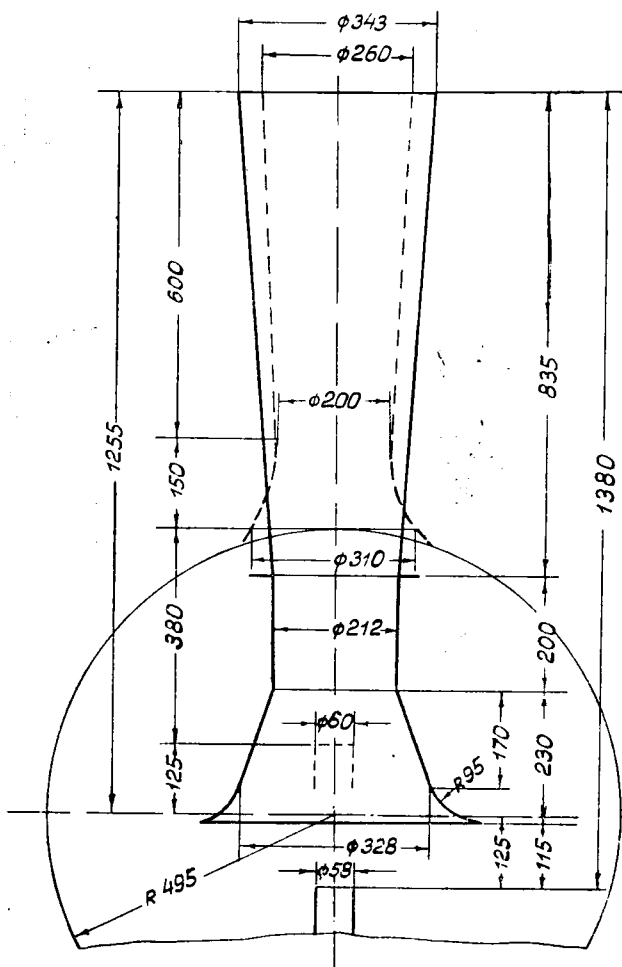


Рис. 10. Газовытяжная установка паровоза 159.

С целью проверки методики расчета и оценки относительного увеличения к. п. д. запроектированного газовытяжного устройства по сравнению с существующими установками были проведены сравнительные испытания для паровоза ОП на стенде АЛТИ*. Испытания проводились при одинаковых условиях работы котла, что достигалось проведением опытов при отоплении дровами примерно одинаковой относительной влажности ($W^p = 30\%$). Искроуловитель — сетчатого типа. Диаметр насадки конуса $d_k = 45$ мм.

Продолжительность каждого опыта около часа, форсировки — $Z_m = 20 \div 85$ кг/м²час, что достигалось изменением отсечки $z = 0,1 \div 0,7$.

Вопрос о расположении входного сечения раструба относительно устья конуса решается пока опытным путем. Приближение раструба к конусу снижает величину входного сечения потока продуктов сгорания,

* Опыты проводились под руководством автора. В этих опытах участвовали инженеры В. А. Афанасов, Н. Я. Кудряшов и В. Ф. Попов, техники З. Т. Аленичева и А. Е. Кочнева, механик И. Н. Палкин.

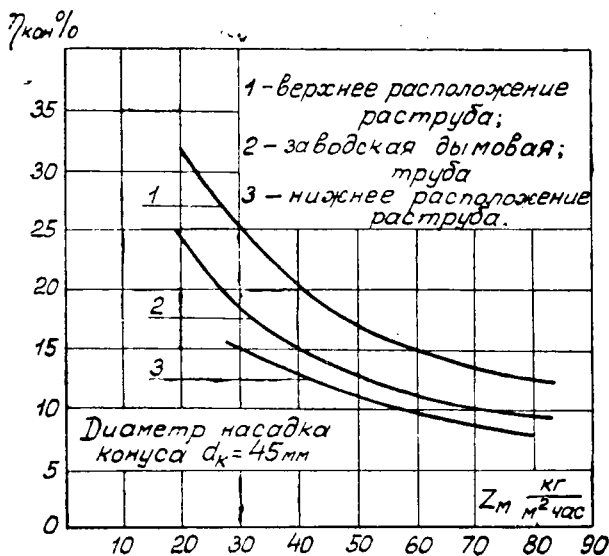


Рис. 11.

в связи с чем возрастает осевая составляющая скорости газов. С другой стороны в зоне начального участка паровой струи подсасывание газа происходит менее интенсивно, чем на основном участке. Поэтому опускание раструба к конусу может привести к отрицательным результатам. Имеющиеся в этом отношении рекомендации исследователей иногда не совпадают друг с другом и к тому же относятся к газовытяжным установкам паровозов широкой колеи.

Учитывая это обстоятельство, в опытах при одинаковых нагрузках паровоза попутно было исследовано влияние на тягу газов расположения входного сечения раструба в плоскости устья конуса (нижнее расположение раструба) и выше ее на расстоянии, составляющем около трех диаметров конуса (верхнее расположение).

При обоих расположениях раструба и при всех нагрузках поддерживалось устойчивое рабочее давление пара в котле. Котел без применения сифона покрывал расход пара машиной. Однако при нижнем расположении раструба и при одной и той же скорости истечения пара через насадок конуса тяга газов была даже хуже, чем в заводской газовытяжной установке. При реализации высоких форсировок котел работал с большим займом воды, а давление в котле было трудно поддерживать постоянным.

Лучшие результаты в отношении паропроизводительности котла и к. п. д. газовытяжной установки были получены для установки с верхним расположением раструба и средние — для заводской установки. Улучшенная газовытяжная установка позволила без всякого займа воды из котла реализовать на дровах $W'' = 30\%$ в течение часа форсировки по машине около $85 \text{ кг/м}^2\text{час}$.

Поскольку во всех трех сериях опытов расположение конуса и его диаметр были идентичными, то можно заключить, что при прочих равных условиях паропроизводительность котла и разрежения в его газоходах, а также количество продуктов сгорания, подсасываемого паровой струей, и величина к. п. д. газовытяжной установки зависят как от формы и размеров дымовой трубы, так и расстояние между конусом и раструбом.

Опыты с паровозом ОП показали, что располагать входное сечение раструба в плоскости устья конуса нецелесообразно. Его лучше размещать на расстоянии, равном $l_{DG} = (2 \div 3) d_k$, предусматривая при конструировании газовытяжных установок возможность изменения этого расстояния в процессе эксплуатации паровоза.

У существующих газовытяжных установок паровозов колеи 750 мм, работающих по принципу свободной эжекции, расстояние $l_{DG} = (6 \div 8) d_k$.

На рис. 11 для паровоза ОП приведены графики изменения к. п. д. газовытяжной установки $\eta_{\text{кон}}$ в зависимости от форсировки Z_m для всех трех испытанных дымовых труб. Из графиков видно, что при $Z_m = 60 \text{ кг/м}^2\text{час}$ величина $\eta_{\text{кон}}$ для улучшенной установки достигает значения 15% (по расчету получено $\eta_{\text{кон}} = 15,8\%$) вместо 12%, полученного при заводской дымовой трубе.

Поскольку положение конуса относительно оси котла остается прежним, то переделки существующей установки паровоза ОП сводятся к изготовлению и монтажу новой трубы, что может быть осуществлено в мастерской лесозаготовительного предприятия.

Выводы

В итоге проделанной работы получены следующие главные результаты:

1. Опытами проверено, что давление отработавшего пара перед конусом достаточно надежно определяется из уравнения истечения. Величина этого давления определяется количеством пара, проходящего через насадок конуса, его температурой и выходным сечением конуса.

2. Установлено, что величина коэффициента эжекции для дровяного отопления в интервале рабочих форсировок и коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1,2 \div 1,4$ находятся в пределах $2,3 \div 2,6$.

3. Выяснено, что коэффициент полезного действия существующей газовытяжной установки паровоза ОП при рабочих форсировках котла для дров, влажность которых равна 15% и 40%, составляет 10—12%.

4. Опытами подтверждено, что эффективность газовытяжной установки узкоколейных паровозов может быть существенно повышена путем перехода от теоретически свободной и принудительной эжекции и повышения к. п. д. дымовой трубы как диффузора. Условия габарита подвижного состава и размещения конуса в дымовой коробке позволяют довести у этих паровозов к. п. д. диффузора до 0,8 вместо $0,5 \div 0,7$.

5. Расчеты газовытяжных установок, произведенные на основе методики проф. Н. И. Белоконем для паровозов ОП, ПТ-4 и 159, а также экспериментальная проверка этой методики на паровозе ОП показали возможность применения методики для проектирования и модернизации газовытяжных установок.

6. Выяснено, что расположение входного сечения направляющего раструба относительно устья конуса может оказать существенное влияние на паропроизводительность котла, коэффициент эжекции и к. п. д. эжекционной тяги. Для паровоза ОП можно считать наиболее благоприятным верхнее расположение раструба.

7. Разработана новая схема газовытяжных установок для паровозов ПТ-4, ОП и 159, позволяющая при расчетных форсировках получить к. п. д. эжекционной тяги 15—16%, вместо 8—12%. Такая установка для паровоза ОП, показавшая при экспериментальной проверке к. п. д. в среднем на 25% выше существующего, рекомендуется к внедрению.

Новые газовытяжные установки для паровоза ПТ-4 и 159 могут быть рекомендованы после их проверки в эксплуатационных условиях.

Усовершенствование газовытяжных установок позволяет увеличить выходное сечение насадников, снизить паропроизводительность выхлопа, уменьшить расход топлива, повысить паропроизводительность и мощность паровозов узкой колеи, а также установить на них более надежные искроуловительные устройства.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Е. Т. Бартош. Конусная тяга паровозов. «Труды ЦНИИ», вып. 107. 1955.
[2]. Н. И. Белоконь. Методика испытания инжекторов мягого пара. «Транспортное машиностроение» № 2, 1936. [3]. Н. И. Белоконь. Основы теории конусной тяги. «Техника железных дорог». № 1, 1946. [4]. А. В. Дуров. О гидравлических сопротивлениях котла узкоколейных паровозов. «Труды АЛТИ», вып. 17, 1957. [5]. Повышенные эффективности конусовытяжной системы паровозов колеи 750 мм. «Отчет ЦНИИ», 1954. [7]. Результаты испытаний легкого паровоза серии ОП. «Отчеты АЛТИ», 1951. [7]. В. Н. Сологубов. Исследование рабочего процесса конусовытяжной установки узкоколейного паровоза. «Труды МЭМИИТ», вып. 62. 1953. [8]. С. П. Сыромятников. Расчеты конусовытяжной системы паровоза. «Труды МЭМИИТ», вып. 51. 1945. [9]. Эжекционные дымовытяжные установки для паровозов. Под ред. проф. П. К. Конакова. Трансжелдориздат, 1954.

Поступила в редакцию
10 марта 1958 г.