

автор предлагает формулу

$$R' = (p_1 - p_2) F_1. \quad (5)$$

Эта формула также неверна.

Если автору не ясно, каким образом происходит процесс расширения в тройнике, то следовало рассмотреть два крайних случая:

I. Расширения сразу на входе в тройник нет. В этом случае критическое давление p_2 уравновешено давлением на стенку тройника против входного сечения и поэтому в формуле (5) $p_1 = p_2$, т. е. $R' = 0$.

II. Процесс расширения на входе в тройник идет скачкообразно, т. е. до давления на выходе из тройника p_1 . В этом случае следует учитывать дополнительное количество движения $m\Delta w$, которое при повороте струи в тройнике уравновешивает падение давления, т. е.

$$(p_1 - p_2) F_1 - m\Delta w = 0.$$

Кроме того, совершенно непонятны рассуждения автора, когда он при определении равнодействующей силы учитывает центробежную силу на нижний отвод, равную 5150 кг. Если, по автору, на нижний отвод действуют центробежные силы, то почему же они исчезли на повороте в тройнике? Эти центробежные силы, несомненно, существуют и в тройнике. Отличие только в том, что их горизонтальная составляющая исчезает ввиду симметричности потока. Вертикальная составляющая действует по направлению хода пара в трубопроводе до тройника и уравновешивает вертикальную составляющую центробежных сил на нижний отвод.

4. Автор рекомендует при определении реакции на опоры вводить в расчеты динамический коэффициент, равный 1,5. Не ясно, какими соображениями или данными руководствовался автор. Этот коэффициент в статье не обоснован. Он может оказаться гораздо больше, например, равным 3, 4 или 5.

В заключение отмечаем, что в статье, кроме разобранного, имеются опечатки, иногда искажающие смысл. Например, в нижней строке первого столбца на стр. 37 формула $p_1 \geq 0,25(p_2 + \Delta p)$ не имеет смысла.

Инженеры А. И. ОСОКИН, В. Б. ПОПОВ

Уральское отделение ТЭП



УДК 621.18.004

О СИЛАХ РЕАКЦИИ ВЫХЛОПНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ¹

В статье Е. М. Залкинда содержится ряд ошибочных положений, вызвавших замечания со стороны инженеров А. И. Осокина и В. Б. Попова. К сожалению, и в их замечаниях также имеются неточности и это вынуждает рассмотреть вопрос более основательно.

В статье Е. М. Залкинда в первую очередь надо отметить неправильное представление о создании критических скоростей в трубопроводах. В этой статье принято, что «движение пара в самой выхлопной трубе и истечение в атмосферу происходит при критической скорости», причем утверждается, что «это условие всегда соблюдается при истечении пара в атмосферу при критических давлениях в устье $p_2 > 2 \text{ ат}$ ».

Подобное допущение не может быть принято. Движение пара с критической скоростью по трубе постоянного диаметра вообще немислимо, поскольку падение давления сопровождается увеличением удельного объема и пропорциональным ему увеличением скорости. Следовательно, критическая скорость может иметь место только при истечении из устья трубопровода либо в месте перехода на большее суммарное сечение трубопровода (например, в тройнике двустороннего выхлопа).

Относительное изменение основных параметров вдоль выхлопного трубопровода иллюстрирует рис. 1, из которого видно, что при критическом течении в устье уже на расстоянии 10 м от него в глубь трубы давление возрастает более чем вдвое, а скорость, удельный объем и гидродинамическое давление уменьшаются на 45%.

Для достижения критической скорости в устье при выхлопе в атмосферу достаточно абсолютного давления 1,03 ат вместо $p_2 > 2 \text{ ат}$, указанных в статье Е. М. Залкинда.

В криволинейном участке выхлопного трубопровода скорости также не могут достигать критических и, следовательно, формула (10) в статье неверна.

¹ По поводу статьи Е. М. Залкинда и отклика на нее А. И. Осокина и В. Б. Попова.

Поскольку в выхлопных трубопроводах давление и количество движения изменяются вдоль трубопровода очень быстро, а гидродинамическое давление в устье достигает 0,65 пьезометрического, вопрос о силах, возникающих в этих трубопроводах, следует рассмотреть с учетом падения давления и сил трения пара о стенки.

Для определения сил, действующих в трубопроводе, применим закон количества движения (импульса силы): равнодействующая всех сил, действующих на тело (объем жидкости), равна производной количества движения по времени. Для применения этого закона к движущейся по трубопроводу жидкости следует выделить исследуемый участок трубопровода контрольными поверхностями и определить изменение количества движения жидкости, протекающей за 1 сек через эти поверхности².

Выделим сечениями 1 и 2 участок от поворота до устья выхлопной трубы (рис. 2) и примем силы, направленные вверх, за положительные. Площадь сечения трубопровода предположим постоянной, равной F , давление обозначим p . На объем пара между сечениями 1 и 2 действуют силы давления $N_1 = p_1 F$ и $N_2 = -p_2 F$, а также сила трения пара о стенки трубы $N_{тр}$. Равнодействующая всех этих сил равна изменению количества движения за 1 сек, т. е.

$$N_1 + N_2 + N_{тр} = (p_1 - p_2) F + N_{тр} = m(w_2 - w_1),$$

где $m = \frac{G}{g}$, а G — расход пара, кг/сек, через сечения 1 и 2.

Отсюда сила трения, действующая на трубу, равна сумме

$$N'_{тр} = -N_{тр} = N_1 + N_2 - m(w_2 - w_1).$$

Эта сила является единственной силой, действующей на отрезок прямой трубы 1—2, открытый с обоих торцов. Вертикальная составляющая сил, действующих на колено, равна

$$N_{в.к} = -(p_1 - 1) F - m w_1 = -N_1 + 1 F - m w_1,$$

а общая реакция выхлопного трубопровода определится как

$$R = N'_{тр} + N_{в.к} = N_2 + 1 F - m w_2 = -(p_2 - 1) F - m w_2. \quad (1)$$

Таким образом, реакция выхлопа с учетом сил трения и реакции, возникающей на повороте, определяется избыточным давлением, действующим на площадь устья F , и количеством движения пара в сечении устья.

Формула (1) универсальна. При докритической скорости $p_2 = 1 \text{ ат}$, при критической — зависит от расхода пара. При критической скорости $m w_2 = k p_2 F$ и абсолютная величина реакции выхлопа получается равной $R = [(k+1)p_2 - 1] F$.

Таким образом, высказанное в статье Е. М. Залкинда мнение, что в директивном указании № 1907-т Главэнергопроекта МЭС якобы не учитываются силы реакции на поворотах, является ошибочным. Это заблуждение возникло вследствие того, что автор, учитывая силы реакции при истечении (в сечении 2), не принял во внимание силу реакции при входе в прямую трубу (в сечении 1).

Относительно двустороннего выхлопа (рис. 3) в статье высказано мнение, что силы реакции, возникающие

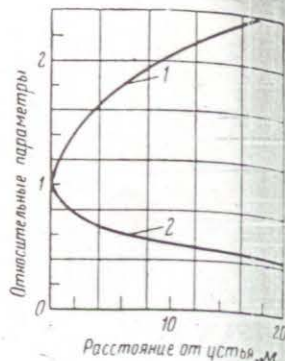


Рис. 1. Изменение относительных параметров пара вдоль выхлопного трубопровода диаметром 219 × 7 мм (при критическом истечении).

1 — давление p/p_k ; 2 — удельный объем v/v_k , число Маха, w/w_k , гидродинамическое давление $p_d/p_{d,k}$.

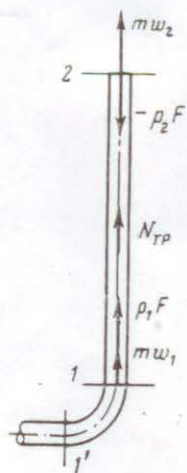


Рис. 2. Схема сил, действующих на объем пара в выхлопном трубопроводе, и векторы количества движения.

² Л. Прандтль, Гидроаэромеханика, изд-во «Иностранная литература», 1951.

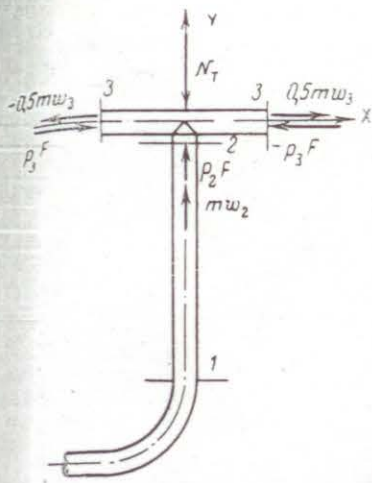


Рис. 3. Схема сил, действующих на объем пара в двустороннем выхлопном трубопроводе, и векторы количества движения.

Сила воздействия пара на тройник, за вычетом равнодействующей атмосферного давления $1F$, равна, следовательно:

$$N'_T = -N_T - 1F = -N_2 - 1F + m w_2.$$

Суммируя это усилие с остальными силами, действующими на выхлопной трубопровод в направлении Y , силами трения $N'_{TP} = N_1 + N_2 - m(w_2 - w_1)$ и составляющей сил, действующих на колено,

$$N''_K = -(p_1 - 1)F - m w_1 = -N_1 - m w_1 + 1F,$$

получим $R = N'_T + N'_{TP} + N''_K = 0$.

Таким образом, применив фундаментальный закон механики, мы получили для двустороннего выхлопа рис. 3 силу реакции, равную нулю. Формула (12), предлагаемая в статье для этого случая, основана на произвольных допущениях и неверна.

В примере, приведенном в статье Е. М. Залкинда, вычислена горизонтальная составляющая силы реакции, в качестве которой принято количество движения в сечении 1 (на входе в колено, рис. 2); однако при этом не учтено ни количество движения, ни давление на входе в горизонтальный участок, ни силы трения на этом участке. Но и для этого участка, так же как и для участка 1—2 (рис. 2), может быть показано, что сумма всех сил, действующих на этот участок трубопровода при установившемся течении, равна нулю.

При принятых в численном примере исходных данных ($D=290$ т/ч, $p_0=12,7$ ат) действительные значения сил реакции в установившемся режиме составят: для одностороннего выхлопа (рис. 2) вертикальная 8850 кг, вместо указанных 14050 кг, горизонтальная—нуль, вместо 5150 кг; для выхлопа двустороннего (рис. 3)—нуль, вместо 7940 кг.

Следует также отметить, что в статье неверно принята пропускная способность предохранительного клапана с импульсным устройством. Формула Госгортехнадзора выведена для тех клапанов, у которых шток тарелки не проходит через отверстие седла, и не может поэтому применяться к импульсным клапанам, у которых значительная часть отверстия седла занята штоком тарелки. По каталогу Венюковского арматурного завода для клапанов с диаметром отверстия седла 90 мм пропускная способность равна 160 т/ч, вместо указанных в статье 400 и 290 т/ч. Температура пара в этом примере ошибочно указана равной 540° С, а не 570° С.

Относительно рекомендуемой конструкции выхлопа (см. рис. 5,а в статье Е. М. Залкинда) надо отметить, что применение перфорированного колпака не влияет на величину реакции выхлопной трубы 2, и идея применения такого устройства из приведенного описания неясна.

Замечания А. И. Осокина и В. Б. Попова по поводу ошибочности предлагаемого Е. М. Залкиндом метода определения реакций выхлопа являются в принципе правильными. Однако формула (4) в их отклике нуждается в исправлении, последний член этой формулы должен иметь вид:

$$\left(2m w \sin \frac{\alpha}{2}\right) \frac{1}{2} \operatorname{cosec} \frac{\alpha}{2} = m w.$$

в тройнике, «ввиду сложности и неясности процесса падения скоростей в тройнике рассчитать и достаточно точно оценить невозможно». Однако эта реакция определяется совершенно точно и элементарно просто. Сумма сил и количества движения в направлении X равна нулю (вследствие симметрии выхлопной части между сечениями 2 и 3), необходимо рассмотреть силы, действующие только в направлении Y . В этом направлении на жидкость действует сила давления в сечении 2, равная $p_2 F = -N_2$, и равнодействующая реакций стенок тройника N_T . Согласно закону количества движения

$$N_T - N_2 = -m w_2.$$

Относительно формулы для определения критического давления в устье выхлопной трубы авторы отклика пришли к выводу о неправильности формулы

$$p_2 = 7,25 \frac{D}{F_2} \sqrt{p_0 v_0}, \text{ ат} \quad (2)$$

на том основании, что формула $w_k = 333 \sqrt{p_0 v_0}$ определяет скорость истечения из предохранительного клапана, а не из устья трубы (при $k=1,3$). Ошибочность этого утверждения нетрудно показать.

При теплоизолированном течении в трубопроводе справедливо равенство

$$p_0 v_0 = \left(p + \frac{k-1}{k} p_k\right) v, \quad (3)$$

где p_0, v_0 —давление и удельный объем при нулевой скорости; p, v, p_k —давление, удельный объем и гидродинамическое давление в рассматриваемом сечении трубопровода; k —показатель адиабаты.

Из формулы для критической скорости $w_k = \sqrt{g k v_k p_k} \cdot 10^4$ следует, что гидродинамическое давление при этом равно $p_{k.k} = \frac{k}{2} p_k$. Подставив это отношение в (3), получим равенство

$$p_k v_k = \frac{2}{k+1} p_0 v_0.$$

справедливое не только при критическом отношении давлений ($p_k=0,546 p_0$), но и для любого $p_k < 0,546 p_0$. Отсюда следует, что скорость критического течения зависит только от параметров p_0, v_0 и остается одинаковой для всех сечений выхлопного паропровода, в которых скорость возрастает до критической. Таким образом, формулу (2) следует считать верной.

Инж. Б. В. РУДОМИНО

Ленинград

ОТ РЕДАКЦИИ

В № 4 за 1966 г. была помещена статья Е. М. Залкинда «Определение реакций при работе предохранительных клапанов», которая содержала ряд ошибок, обнаруженных тт. А. И. Осокиным и В. Б. Поповым. Поскольку в отклике наряду с правильными указаниями содержатся некоторые противоречия, редакция проконсультировала все материалы с Б. В. Рудомино, который изложил свои взгляды на вопрос в виде статьи. Публикуя оба материала, редакция считает полезным уточнить указания на допущенные в статье Е. М. Залкинда ошибки и их сущность, а также пояснить, какие расчетные формулы можно считать верными.

Формулу (3) из статьи Е. М. Залкинда, поставленную под сомнение в письме А. И. Осокина и В. Б. Попова, по которой определяется конечное давление истечения в устье выхлопной трубы

$$p_2 = 7,25 \frac{D}{F_2} \sqrt{p_0 v_0}, \text{ кг/см}^2,$$

можно считать правильной (см. статью Б. В. Рудомино).

Формула (8), дающая величину реакции струи, вытекающей из выхлопной трубы

$$R = (2,3 p_2 - 1) F_2, \text{ кг},$$

указана правильно и совпадает с формулой, полученной Б. В. Рудомино, если в нее подставить показатель адиабаты для перегретого пара $k=1,3$:

$$R = [(k+1) p_2 - 1] F = (2,3 p_2 - 1) F, \text{ кг}.$$

Принципиальная ошибка автора статьи Е. М. Залкинда заключается в том, что при расчете усилий, действующих на опору выхлопного устройства, он учитывал составляющую центробежной силы в изогнутом колене, возникающую при течении жидкости. Все силы, действующие в колене, являются внутренними и уравновешиваются сопротивлением его стенок.

Эти внутренние силы не передаются на внешние опоры и не оказывают на них никакого влияния. В своем отклике А. И. Осокин и В. Б. Попов правильно указали, что в численном примере расчета в статье Е. М. Залкинда вертикальная реакция должна подсчитываться только по формуле (8), а составляющая центробежной силы должна быть исключена.

При расчете выхлопной системы с двусторонним горизонтальным выходом пара допущены две ошибки: одна из них та же, что и в первом примере — учтена слагающая центробежной силы в колене; вторая состоит в том, что вертикальная реакция на опору должна быть равна нулю, а не указанная в статье величина.

В статье Е. М. Залкинда действительно есть опечатка: на стр 37, внизу указано неверно

$$p_1 \geq 0,25(p_2 + \Delta p),$$

правильно следует читать

$$p_1 \geq (p_2 + \Delta p).$$

Опубликованием настоящих материалов редакция считает целесообразным завершить дискуссию по вопросу определения реакций при работе предохранительных клапанов.

Редакция обращает внимание читателей, что в настоящее время Госгортехнадзор СССР утвердил новые «Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов» (Москва, изд-во «Недра», 1968). В них, в частности, имеются указания (пп. 5-2-20 и 5-2-21) по определению расхода пара через предохранительные клапаны и расчет самих клапанов, которыми в настоящее время и надлежит руководствоваться.

ОТВЕТ НА ДИСКУССИЮ ПО СТАТЬЕ «ОПЫТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ИЗОЛЯТОРОВ С ГЛАЗУРЬЮ ПОВЫШЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ»¹

В отзывах представителей Азглавэнерго [Л. 1], Сахалинэнерго [Л. 2], Небит-Дагэнерго [Л. 3] содержатся материалы, подтверждающие целесообразность более широкого применения изоляторов с глазурью повышенной проводимости.

Что касается замечания Е. В. Калинина, С. Д. Мерхалева и Е. А. Соломоника [Л. 4], то необходимо отметить следующее. Они сообщают, что в Ростовэнерго и Донбассэнерго имели место перекрытия изоляторов ПНБ-35 с полупроводящей глазурью. В нашей статье было указано, что в Ростовэнерго имело место тепловое разрушение двух изоляторов из 21 шт. в связи с низким сопротивлением той части проходных изоляторов ПНБ-35, которая находилась в помещении станции. Эти два случая разрушения и затем перекрытия изоляторов не связаны с загрязнением. Что касается Донбассэнерго, то при детальном обследовании² установлено, что в указанном авторами районе перекрывались опытные изоляторы ПНБ-35, мастиконаполненные, с обычной глазурью, которые затем были заменены на вводы ВМ-125.

Е. В. Калинин, С. Д. Мерхалев и Е. А. Соломоник касаются не только опыта эксплуатации изоляторов с полупроводящей глазурью, но и предлагают дальнейшее направление разработок и исследований таких изоляторов, что в нашей статье не рассматривалось.

Авторы замечаний считают, что необходимо разработать полупроводящую глазурь с таким же температурным коэффициентом сопротивления, как у новой английской глазури — ангобы на основе окислов титана. Они предлагают отказаться от оправдавшей себя в эксплуатации глазури лишь потому, что в Англии существует полупроводящая глазурь с меньшим температурным коэффициентом сопротивления, которая, кста-

ти, авторами не была исследована и в Англии находится еще в стадии эксплуатационной проверки.

Мы считаем, что более целесообразно накапливать и изучать опыт применения изоляторов с существующей полупроводящей глазурью и одновременно заниматься ее совершенствованием.

По-видимому, авторам [Л. 4] неизвестно, что новая английская глазурь была разработана в связи с необходимостью увеличения электрокоррозионной стойкости, а не потому, что старая глазурь имела большой температурный коэффициент сопротивления. На этом основании в отечественную глазурь была введена двуокись титана задолго до появления новой английской глазури.

При рассмотрении тепловой устойчивости авторы ссылаются на работу Е. В. Калинина, в которой испытывались чистые увлажненные изоляторы. При этом они распространяют полученные выводы на загрязненные и увлажненные изоляторы, что, по нашему мнению, неправильно ввиду неучета эффекта охлаждения изоляторов при увлажнении их туманом или моросью.

Далее авторы рекомендуют применить изоляторы, имеющие относительно небольшую разность в диаметрах фарфора по пути тока утечки.

Это было отражено в выводах нашей статьи (изоляторы ПС-35, ОСН-35, ОН-10, ПНБ-35). Наряду с этим есть и другой путь создания надежных изоляторов с полупроводящей глазурью [Л. 5]. Он основан на положительных результатах эксплуатации изоляторов типа ИШД-35 и ШТ-35, имеющих большую разность в диаметрах фарфора вдоль пути тока утечки. В Англии, например, подобные изоляторы с полупроводящей глазурью нашли широкое распространение [Л. 6].

Авторы замечаний считают, что механизм перекрытия изоляторов с обычной и полупроводящей глазурью не имеет принципиальных отличий. С этим нельзя согласиться. Известно, например, что на изоляторах с полупроводящей глазурью отсутствуют частичные разряды, тогда как на обычных изоляторах они имеют место; на изоляторах с полупроводящей глазурью наблюдается прожиг глазури (трек), тогда как на обычных этого явления нет и т. д.

Таким образом, авторы высказывают ряд несостоятельных гипотез, без убедительных на то доказательств. Что касается их рекомендаций по методике исследования, то этот вопрос должен быть рассмотрен шире, в отдельной дискуссии, так как сами авторы такие изоляторы в условиях загрязнения и увлажнения не исследовали.

Опубликованные в последнее время в зарубежной технической литературе статьи свидетельствуют о том, что интерес к изоляторам с полупроводящей глазурью не ослабевает. В одной из статей [Л. 7] приведено описание полупроводящей глазури на окиси олова.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Алиев, Результаты эксплуатации вводов типа ПНБ-35 с повышенной проводимостью, «Электрические станции», 1969, № 5.
2. В. И. Ткачев, Тен-хо-гир, Р. С. Тегай, Результаты опытной эксплуатации изоляторов с глазурью повышенной проводимости, «Электрические станции», 1969, № 8.
3. В. Н. Трусова, А. С. Харин, Ю. Т. Локтев, М. Л. Арутюнян, А. Ф. Додонов, Исследование подстанционной изоляции в условиях загрязнения солнечочковой пылью и морскими туманами, «Электрические станции», 1969, № 8.
4. Е. В. Калинин, С. Д. Мерхалев, Е. А. Соломоник, По поводу статьи Р. Т. Левшунова и др. «Опытная эксплуатация изоляторов с глазурью повышенной проводимости», «Электрические станции», 1968, № 8.
5. Р. Т. Левшунов, Грязеразрядные напряжения и тепловая устойчивость изоляторов с полупроводящей глазурью, «Электричество», 1969, № 10.
6. С. Н. W. Clark, Electrical Review, стр. 174, 1964, 15 May.
7. Electrical Review, 1968, № 23, стр. 183.

Инженеры Р. Т. ЛЕВШУНОВ, Н. Л. ГЕЛЬМАН,
Г. И. ЛЫСАКОВСКИЙ, М. В. ХОМЯКОВ

СибНИИЭ — Ростовэнерго — ЦВЛ Мосэнерго

¹ См. «Электрические станции», 1968, № 8.

² С участием высоковольтной лаборатории энергосистемы.