

УДК 621.165:51.380

**В. П. Скляр**, канд. техн. наук**В. П. Орловский****А. А. Дворников**Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(г. Харьков, E-mail: sklyarov@ipmach.kharkov.ua)**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВНЕЗАПНОМ РАСШИРЕНИИ  
СВЕРХЗВУКОВОГО ПАРОВОГО ПОТОКА**

*Описаны температурные эффекты, возникающие при истечении сверхзвукового парового потока в выхлопной патрубке большого сечения. Показано, что в выхлопном патрубке могут возникать как локальное переохлаждение, так и локальный перегрев пара, при котором температура превышает температуру перед соплом на 5–10 °С. Предложена гипотеза, объясняющая это необычное явление.*

*Описано температурні ефекти, які виникають при витіканні надзвукового парового потоку у вихлопний патрубок великого перерізу. Показано, що у вихлопному патрубку можуть виникати як локальне переохолодження, так і локальний перегрів пари, при якому температура перевищує температуру перед соплом на 5–10 °С. Запропоновано гіпотезу, що пояснює це незвичайне явище.*

**Введение**

Известно, что при расширении водяного пара в сопле часть тепловой энергии преобразуется в кинетическую. Кинетическая энергия потока [1]

$$W_k = I_{1-2},$$

где  $I_{1-2}$  – работа расширения при переходе системы из точки 1 в точку 2

$$I_{1-2} = \frac{k \cdot p_1 \cdot v_1}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right],$$

где  $k$  – показатель адиабаты;  $p_1$  – давление в начале процесса расширения;  $v_1$  – удельный объём пара в начале процесса расширения;  $p_2$  – давление в конце процесса расширения.

В области перегретого пара значение показателя адиабаты изменяется незначительно ( $k \approx 1,3$ ). При расширении пара в области ниже линии насыщения значение показателя адиабаты меняется в пределах  $k \approx 1,35-1,12$  и зависит от степени неравновесности процесса (величины переохлаждения и влажности). Показатель адиабаты на участке процесса  $i-(i+1)$  может быть определен как

$$k_{i-(i+1)} = \frac{\ln p_i}{p_{i+1}} \bigg/ \frac{\ln v_{i+1}}{v_i},$$

где  $p_i, p_{(i+1)}, v_i, v_{(i+1)}$  – соответственно давление и удельный объём в начале и в конце элементарного участка процесса.

Среднее значение показателя адиабаты процесса можно принять [2]

$$k = \frac{h_0 - h_1}{u_0 - u_1},$$

где  $h_0, h_1, u_0, u_1$  – энтальпия и внутренняя энергия пара в начале и в конце процесса расширения соответственно.

Действительная скорость парового потока на срезе сопла

$$C = \sqrt{2 \cdot H_p \cdot \eta}.$$

Здесь  $H_p$  – располагаемый теплоперепад на сопле

$$H_p = h_0 - h_1,$$

где  $h_0$  – энтальпия пара перед соплом;  $h_1$  – энтальпия пара на срезе сопла при изоэнтропном процессе;  $\eta$  – коэффициент полезного действия процесса.

При торможении потока кинетическая энергия преобразуется в тепловую, в результате чего температура пара увеличивается на

$$\Delta T = \frac{C^2}{2c_p} = \frac{k \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_{2ст}}{p_{2полн.}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{c_p \cdot (k-1)}.$$

Здесь  $c_p$  – средняя теплоемкость пара в зоне торможения;  $p_{2ст}$  – статическое давление в конце процесса расширения;  $p_{2полн.}$  – полное давление в конце процесса расширения

$$p_{2полн.} = p_{2ст} + \Delta p_d,$$

где  $\Delta p_d$  – динамическое давление.

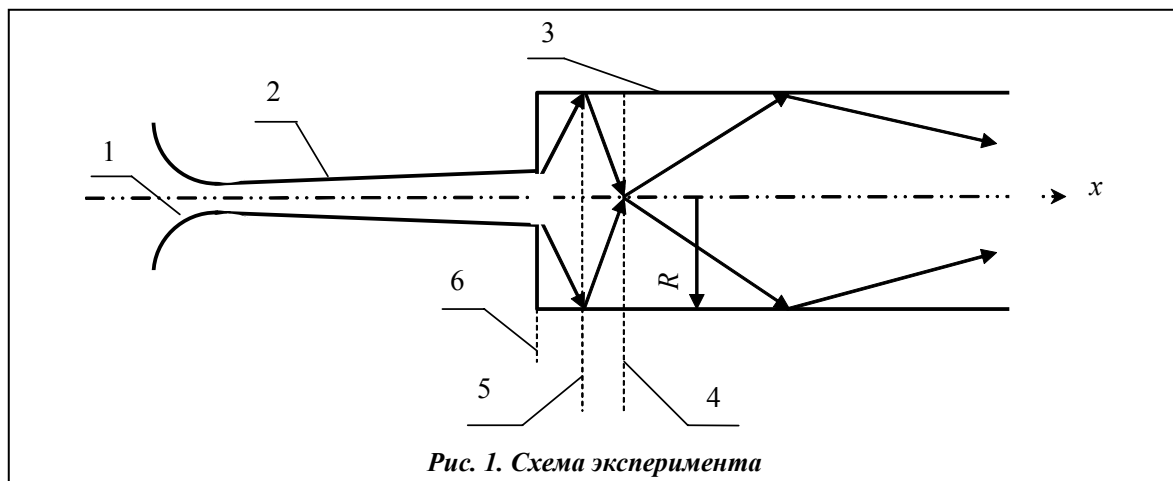
Общеизвестно, что если процесс расширения и торможения носит идеальный характер, то температура заторможенного пара в точности равна начальной температуре (перед соплом) и ни при каких обстоятельствах не может быть выше.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования, в результате которого установлено, что при возникновении волн разрежения и сжатия локальная температура заторможенного потока в волне сжатия может превысить начальную температуру пара. При внезапном расширении сверхзвукового парового потока давление снижается скачком, в результате чего возникают специфические изменения температуры как по оси, так и по радиусу потока.

Исследование этих процессов представляет значительный интерес, как с практической точки зрения, так и с точки зрения получения новых знаний о динамике изменения параметров сверхзвукового парового потока при внезапном расширении.

На рис. 1 приведена схема эксперимента, траектория движения пара за соплом показана стрелками.

Пар поступает на вход 1 сопла 2, где расширяется, приобретая скорость  $C \sim 1,1M$  на срезе 6 сопла 2. Выйдя из сопла, пар попадает в цилиндрический выхлопной патрубок 3.



Из выхлопного патрубка пар поступает в конденсатор (на рис. 1 не показан). Поскольку площадь сечения выхлопного патрубка значительно (в 34,6 раз) больше выходного сечения сопла, за срезом сопла возникает внезапное расширение пара. Это вызывает возникновение волны разрежения на оси патрубка вблизи выхода из сопла. В результате внезапного расширения паровой поток устремляется к стенкам в виде расширяющегося конуса с небольшой толщиной стенки. Вблизи оси этого конуса образуется область пониженного давления (сечение 5, рис. 1). Паровой поток, дойдя до стенки выхлопного патрубка, отражается и начинает двигаться к оси выхлопного патрубка, образуя суживающийся конус (волна сжатия). У вершины этого конуса вблизи оси выхлопного патрубка струи пара сталкиваются, вызывая повышение давления (сечение 4) и температуры.

Поскольку процесс расширения и сжатия сопровождается испарением и конденсацией, параметры пара в каждом сечении патрубка определяются не только газодинамикой потока, а и направлением, и интенсивностью фазовых переходов. При определенных условиях скорость столкновения струй пара, отраженных от стенок выхлопного патрубка, может превысить скорость парового потока на выходе из сопла. В результате температура пара в этой области может превысить начальную температуру.

Для измерения распределения температуры пара в выхлопном патрубке установлены три подвижных термопары – одна на оси (для измерения температуры пара вдоль оси) и по одной в сечениях 4 и 5 (для измерения температуры по радиусу). В эксперименте использованы термопары типа ТП – 0198/1 ХА в чехле из нержавеющей стали с наружным диаметром 1,5 мм.

Основные характеристики сопла и параметры пара во время эксперимента приведены ниже:

- расход пара через сопло  $G_n = 0,00136$  кг/с;
- площадь выходного сечения сопла  $F_1 = 1,418 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>;
- площадь сечения выхлопного патрубка  $F_2 = 4,909 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;
- давление пара перед соплом  $P_0 = 68,55$  кПа;
- давление в конденсаторе  $P_k = 5,96$  кПа.

Как показали результаты эксперимента, температура парового потока по оси цилиндрического выхлопного патрубка меняется в широких пределах и сильно зависит от состояния пара на срезе сопла. Измеренная температура парового потока в случае перегретого или сухого насыщенного пара

$$T_{\text{изм}} = T_{\text{ст}} + \Delta T_{\text{д}} \cdot k_t,$$

где  $T_{\text{ст}}$  – статическая (термодинамическая) температура;  $\Delta T_{\text{д}}$  – динамическая надбавка;  $k_t$  – коэффициент восстановления термометра (термопары).

Коэффициент восстановления термометра зависит от параметров среды и пропорционален корню из числа Прандтля  $Pr$  [3]

$$k_t \cdot \alpha \sqrt{Pr}.$$

Для воздуха и других двухатомных газов при низких температурах число Прандтля  $Pr = 0,72-0,75$ , при высоких температурах  $0,6-0,65$ , для трехатомных газов  $0,85$ , для водяного пара при низких давлениях  $Pr = 1,0-1,1$ , при высоких давлениях и вблизи линии насыщения приближается к 2 [4]. Поэтому в газовых потоках измеренная температура всегда будет ниже действительной. Предвидеть, будет ли измеренная температура в паровом потоке выше или ниже действительной, представляется затруднительным.

Коэффициент восстановления зависит не только от параметров среды, а и от конструкции термометра, угла натекания потока и от наличия в паровом потоке влаги. Например, для термопар, использованных в эксперименте, коэффициент восстановления, определенный на воздушном стенде (см. рис. 2) при скорости 90 м/с воздушного потока 3, при установке термопары 1 в лобовой точке на поверхности цилиндра 2 диаметром 40 мм  $k_t \cong 1$ , при установке термопары 5 вдоль потока  $k_t = 0,75$  и при поперечном обтекании потоком термопары  $k_t = 0,65$ .

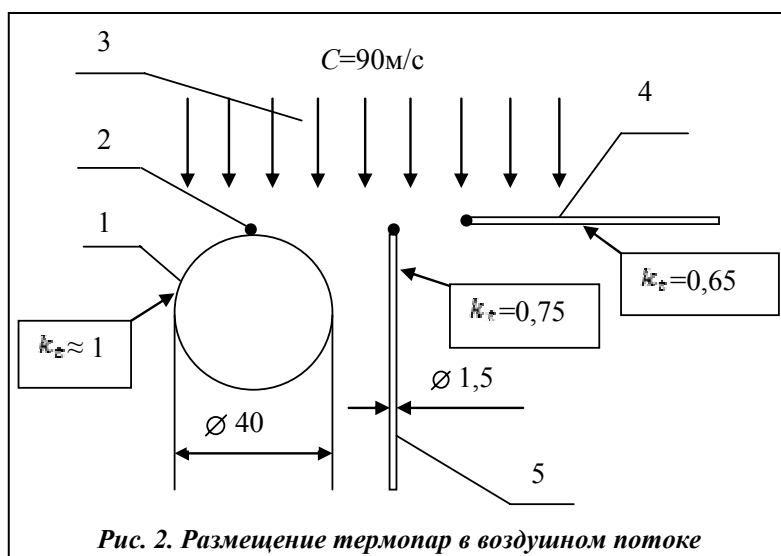


Рис. 2. Размещение термопар в воздушном потоке

Зависимость коэффициента восстановления от угла натекания приводит к тому, что температура потока, измеренная в одной и в той же точке, будет зависеть от положения термопары относительно направления потока. При измерении температуры влажного парового потока необходимо учитывать изменение температуры на поверхности термометра, вызванное испарением влаги [5].

При проведении эксперимента температура перед соплом измерялась с точностью  $\pm 0,1$  °C. Поскольку скорость парового потока в патрубке перед соплом не превышает 1,2 м/с, динамическая надбавка не превышает  $3,6 \cdot 10^{-4}$  К и ею можно пренебречь. При измерении за соплом, где меняется скорость и направление потока, коэффициент восстановления также меняется.

При проведении эксперимента температура перед

Определение коэффициента восстановления термопары в паровом потоке, движущемся со сверхзвуковой или околосзвуковой скоростью, да еще и при изменяющейся влажности, представляет собой весьма сложную экспериментальную задачу и в рамках данной работы не рассматривается. Поскольку коэффициент восстановления термопары всегда меньше единицы, температура, измеренная за соплом, меньше действительной. Изменение измеренной температуры вдоль оси выхлопного патрубка показано на рис. 3.

Как видно из рис. 3, при внезапном расширении вблизи выхода из сопла температура пара вначале резко снижается, достигая минимального значения на расстоянии  $\sim 6-9$  мм. В координате  $x \approx 9$  мм температура пара на  $\sim 70$  °C ниже начальной температуры. На расстоянии  $\sim 13-16$  мм от среза сопла температура достигает максимального значения. При этом в

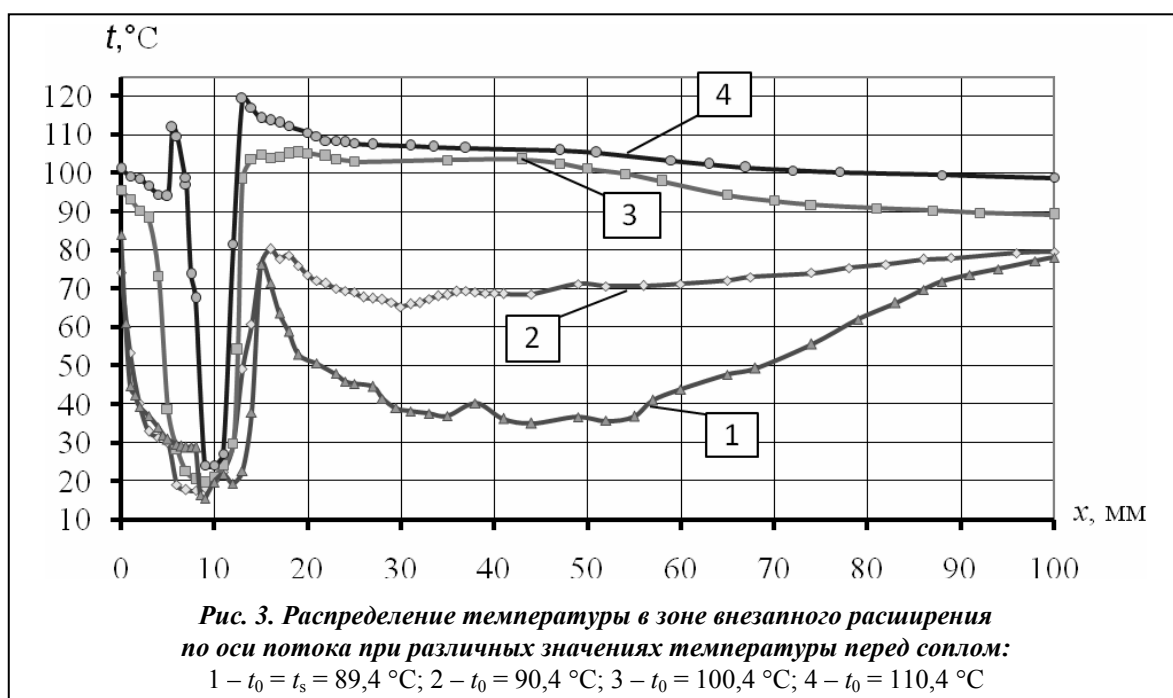


Рис. 3. Распределение температуры в зоне внезапного расширения по оси потока при различных значениях температуры перед соплом:  
 1 –  $t_0 = t_s = 89,4$  °C; 2 –  $t_0 = 90,4$  °C; 3 –  $t_0 = 100,4$  °C; 4 –  $t_0 = 110,4$  °C

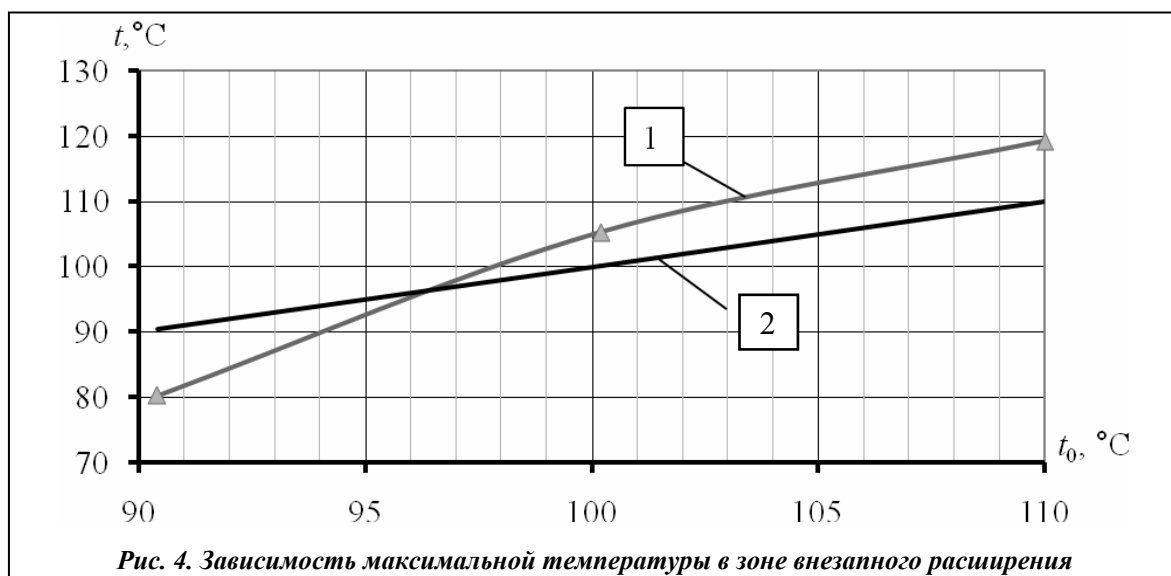
зависимости от температуры перед соплом максимальное значение температуры в патрубке может быть как ниже, так и выше начальной температуры пара.

Обращает на себя внимание тот факт, что при начальной температуре выше  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  максимальное значение температуры в координате  $x \sim 13\text{ мм}$  превышает начальную температуру на  $\sim 5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 3, кривые 3 и 4). Такой результат на первый взгляд кажется парадоксальным. Хотя известно, что подобное повышение температуры потока в периферийной зоне потока наблюдается при эффекте Ранка [6] в вихревой трубе. Однако в рассматриваемом эксперименте пар из сопла подается в цилиндрический канал соосно, а не тангенциально. Поэтому наблюдаемые в зоне внезапного расширения изменения температуры, очевидно, не могут быть связаны с эффектом Ранка и вызваны волнами разрежения и сжатия. Наблюдаемое явление скорее напоминает эффект Прандтля–Глоерта, который состоит в том, что при полете с околосзвуковыми и сверхзвуковыми скоростями вокруг самолета из-за снижения давления возникает облако сконденсировавшейся влаги, которая испаряется на небольшом расстоянии за самолетом, после восстановления давления. В отличие от последнего, наблюдаемый эффект возникает не во влажной атмосфере, а в потоке водяного пара при внезапном расширении за сверхзвуковым соплом.

Снижение температуры за срезом сопла обусловлено волной разрежения, вызванной резким падением давления в зоне внезапного расширения. Поскольку давление на срезе сопла  $\sim 30\text{ кПа}$ , а давление в конденсаторе и соответственно статическое давление в патрубке  $\sim 5\text{ кПа}$  ( $t_s = 32,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), происходит практически расширение в вакуум. Температура пара, измеренная на оси патрубка в зоне пониженного давления ( $x \sim 6\text{--}9\text{ мм}$ ), составляет  $17\text{--}24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что соответствует давлению насыщения  $1,9\text{--}3\text{ кПа}$ . Измеренная температура на  $9\text{--}16\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже температуры насыщения в конденсаторе. Учитывая, что термopара находится в потоке, измеренная температура должна быть выше статической. Тот факт, что измеренная температура ниже температуры насыщения, свидетельствует о наличии переохлаждения в волне разрежения. Если на выходе сопла имеется влага, температура капель равна температуре насыщения при давлении  $\sim 30\text{ кПа}$ , что соответствует  $\sim 69\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Попадая в область внезапного расширения с давлением  $\sim 5\text{ кПа}$  ( $t_s \approx 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), капли оказываются перегретыми на  $\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$  и испаряются, пока их температура не опустится до температуры насыщения. При большой скорости расширения (что имеет место в данном эксперименте) и недостаточной концентрации капель расширение пара происходит с переохлаждением. При достижении критического переохлаждения в паровом потоке возникает спонтанная конденсация, сопровождающаяся выделением теплоты конденсации, ростом температуры и ударной волной, распространяющейся во всех направлениях [7], в том числе и навстречу паровому потоку. При столкновении потока, вытекающего из сопла, с ударной волной, вызванной спонтанной конденсацией, локальная температура (на границе столкновения) может превысить начальную температуру перед соплом. Кроме спонтанной конденсации, вызывающей появление ударной волны навстречу потоку, на изменение температуры за соплом могут оказывать влияние процессы, связанные с волнами разрежения и сжатия.

При внезапном расширении от среза сопла к стенке выхлопного патрубка распространяется ударная волна, которая после отражения от стенки движется к оси патрубка. Скорость столкновения отраженных ударных волн на оси патрубка может оказаться значительно выше скорости парового потока на срезе сопла. При таком столкновении ударных волн кинетическая энергия (а значит, и температура) части молекул может оказаться выше, чем перед соплом.

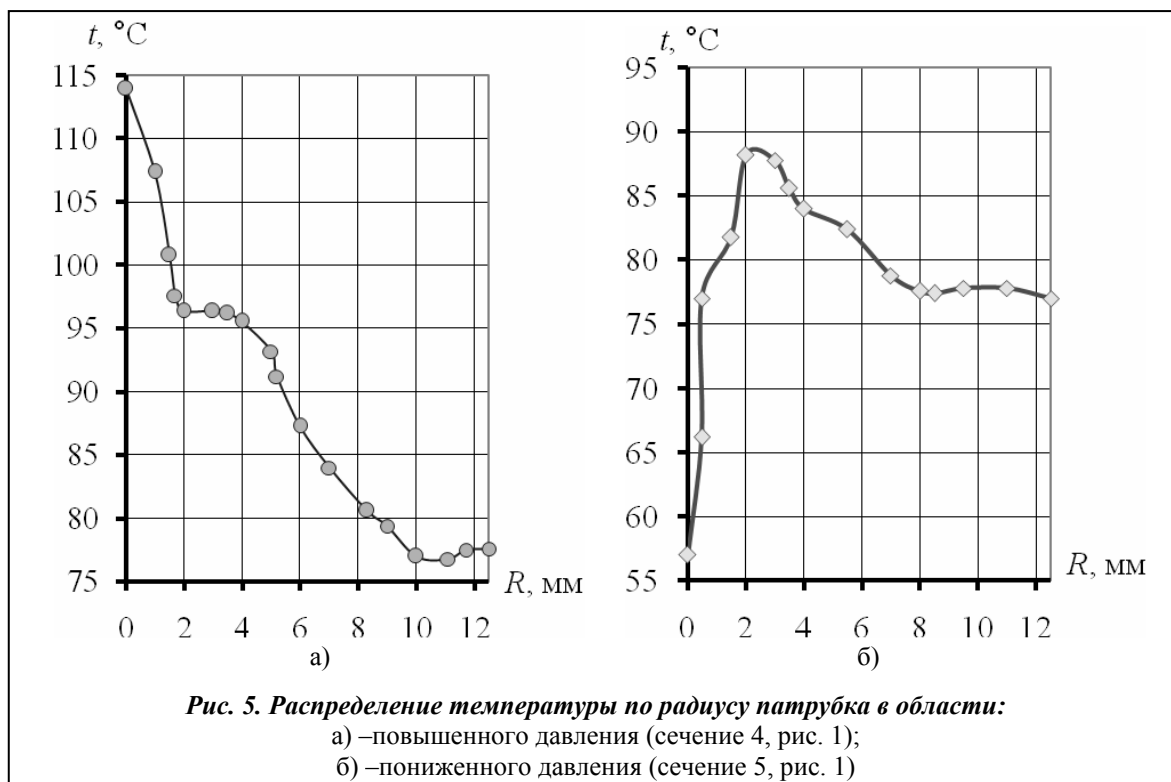
При снижении начальной температуры со  $110$  до  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  диаграммная влажность пара на выходе сопла повышается с  $2,7$  до  $4,1\%$ , что, очевидно, сопровождается ростом действительной влажности. Повышение влажности пара за соплом приводит к уменьшению переохлаждения, что снижает интенсивность конденсации и соответственно температуру в скачке (рис. 3, кривые 1 и 2). Как показал эксперимент, температура в волне сжатия может превысить начальную температуру (перед соплом) только в случае, когда начальная температура



превышает определенное значение и соответственно влажность пара за соплом не должна превышать некоторого значения.

На рис. 4 приведена зависимость максимальной температуры за соплом от начальной. Из рис. 4 видно, что при начальной температуре выше  $\sim 97^\circ\text{C}$  температура 1 в волне сжатия превышает начальную температуру 2. Повышение температуры выше начальной в области повышенного давления (сечение 4, рис. 1) наблюдается только вблизи оси патрубка. По мере приближения к стенке патрубка в сечении 4, рис. 1, температура пара снижается (см. рис. 5, а).

В области пониженного давления (рис. 5, б) наблюдается обратная картина – на оси патрубка температура имеет минимальное значение, увеличиваясь при удалении от оси. На расстоянии 2 мм от оси температура достигает максимального значения и постепенно снижается по мере приближения к стенке.



Обращает на себя внимание тот факт, что максимальный градиент температур и в области повышенного (рис. 5, а), и в области пониженного давления (рис. 5, б) наблюдается на радиусе от 0 до 2 мм, практически равном радиусу выходного сечения сопла 2,1 мм.

### Заключение

На первый взгляд, описанное в работе явление можно рассматривать как специфический эффект, который возникает только при вполне определенных условиях:

- сверхзвуковой паровой поток попадает в канал, сечение которого значительно больше выходного сечения сопла;
- влажность парового потока должна быть незначительной.

При этом повышение температуры парового потока (впрочем, как и резкое снижение) носит локальный характер.

Явление повышения локальной температуры выше полной свидетельствует о том, что при обтекании потоком препятствий возможна ситуация, при которой скорость столкновения смыкающихся потоков и ударной волны, возникающей при спонтанной конденсации, превысит скорость свободного потока, что приведет к повышению потерь энергии. Подобное явление может возникать в проточной части паровых турбин и увеличивать потери энергии.

По мнению авторов, представляет интерес обнаруженное влияние влажности пара на характер изменения температуры в зоне внезапного расширения. Это явление может быть использовано для определения влажности потока.

### Литература

1. Сушков В. В. Техническая термодинамика. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 336 с.
2. Кириллин В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шнейдлин. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Вулис Л. А. О равновесной температуре тела в газовом потоке // Журн. техн. физики. – 1950. – XX, вып. 1. – С. 97–109.
4. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. – М.: Наука, 1964. – 816 с.
5. Складов В. П. Измерение температуры влажного парового потока в паровых турбинах // Пробл. машиностроения. – 2005. – 8, № 3. – С. 8–15.
6. Бродянский В. М. О градиенте температур в трубе Ранка–Хильша / В. М. Бродянский, И. Л. Лейтес // Инж.-физ. журн. – 1960. – III, № 12. – С. 72–77.
7. Вегенер П. П. Конденсация в сверхзвуковых и гиперзвуковых аэродинамических трубах // Пробл. механики. – 1961. – Вып. 3. – С. 254–367.

Поступила в редакцию  
07.11.09