

*Наведені результати лабораторних досліджень впливу іонізації на процес конденсації водяної пари при розширенні в надзвуковому соплі. Показано, що створення штучних ядер конденсації дозволяє наблизити процес розширення пари до рівноважного та підвищити ККД процесу розширення. Показана можливість створення умов для рівноважного розширення пари в частині низького тиску парової турбіни за рахунок іонізації пари*

*Ключові слова: іонізація, конденсація, рівноважність*

*Приведены результаты лабораторных исследований влияния ионизации на процесс конденсации водяного пара при расширении в сверхзвуковом сопле. Показано, что создание искусственных зародышей конденсации позволяет приблизить процесс расширения пара к равновесному и увеличить КПД процесса расширения. Показана возможность создания условий для равновесного расширения пара в части низкого давления паровой турбины за счет ионизации пара*

*Ключевые слова: ионизация, конденсация, равновесность*

*Laboratory investigation results for ionization influence on the condensation of steam, expanding in supersonic nozzle are presented. It is demonstrated, that creating of artificial centers of condensation make it possible to do expansion of steam more equilibrium and to increase efficiency of expansion process. Possibility of creating conditions for equilibrium steam expansion in low pressure part of steam turbine with the aid of steam ionization is shown*

*Key words: ionization, condensation, equilibrium*

# ВЛИЯНИЕ ИОНИЗАЦИИ НА ПРОЦЕСС РАСШИРЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ

**А. А. Тарелин**

Доктор технических наук, профессор, руководитель  
отдела  
Отдел общетехнических исследований в энергетике\*  
Контактный тел.: 8 (0572) 94-27-44  
E-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua

**В. П. Скляр**

Кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник\*  
Контактный тел.: 8 (0572) 95-95-43  
E-mail: sklyarov@ipmach.kharkov.ua

\*Институт проблем машиностроения им. А.Н.  
Подгорного НАН Украины  
ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

## 1. Введение

Несмотря на то, что паровые турбины существуют более 100 лет, проблема неравновесного расширения пара в части низкого давления до настоящего времени не решена. Неравновесное расширение пара порождает целый ряд проблем. Часть ступеней цилиндра низкого давления работает в зоне переохлажденного пара, что заметно снижает вырабатываемую ими мощность. При существующих в части низкого давления скоростях расширения величина переохлаждения может достигать 32-35°C [1]. Что снижает работу расширения пара на 2-2,5кДж/кг, и мощность ступени на 1-1,5%. При достижении критического переохлаждения в паровом потоке возникает спонтанная конденсация сопровождающаяся пульсациями давления (так называемая

конденсационная нестационарность) с частотой 0,5-2кГц [2] и увеличением потерь энергии. Конденсационная нестационарность в проточной части низкого давления может приводить к поломке рабочих лопаток [3]. Концентрации капель, образующихся при спонтанной конденсации оказывается недостаточно, чтобы полностью снять переохлаждение. В результате дальнейший процесс расширения сохраняет неравновесный характер. При таком процессе на выходе турбины влажность пара ниже диаграммной, а температура ниже температуры насыщения (т.е. процесс протекает с частичным переохлаждением) [4, 5], а значит работа расширения уменьшается.

Для обеспечения равновесного расширения в паровом потоке перед зоной фазового перехода необходимо создать достаточное количество искусственных за-

родышей конденсации. Эмиссия зародышей конденсации может быть осуществлена при течении пара через поле коронного разряда [6].

При протекании водяного пара через зону коронного разряда образуются устойчивые зародыши конденсации, которые представляют собой гидратированные электроны и гидратированные ионы. Попадая в область насыщенного или пересыщенного пара эти зародыши начинают расти. Размеры образующихся в процессе конденсации капель зависят от концентрации зародышей и диаграммной влажности в конце процесса расширения.

$$r = \sqrt[3]{\frac{3Y}{4\pi \cdot N \cdot \rho}}; \tag{1}$$

Где Y-диаграммная влажность пара в долях;  
N-концентрация капель в паровом потоке (кг<sup>-1</sup>);  
ρ -плотность воды (кг/м<sup>3</sup>).

Увеличивая концентрацию искусственных ядер (зародышей конденсации в паровом потоке можно обеспечить процесс расширения максимально приближенный к равновесному и уменьшить размер капель в конце процесса расширения. Поскольку при наличии достаточно большой концентрации зародышей конденсации переохлаждение пара незначительно, образование новых зародышей прекращается. В результате при увеличении влажности увеличивается не количество капель, а только их размер. Изменяя концентрацию зародышей конденсации перед зоной фазового перехода можно изменять размер капель в конце процесса расширения.

На рис. 1 приведена зависимость диаметра капель в конце процесса расширения от концентрации зародышей конденсации.

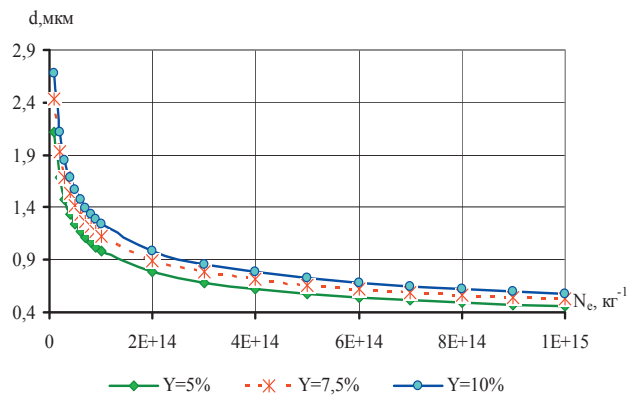


Рис. 1. Зависимость диаметра капель в конце процесса расширения от концентрации зародышей конденсации при различной влажности

Как видно из рис. 1, размер капель сильно зависит от концентрации зародышей и слабо зависит от влажности. Для того, чтобы диаметр капель в конце процесса расширения не превышал 1мкм концентрация зародышей конденсации должна быть не менее 2 · 10<sup>14</sup>кг<sup>-1</sup>.

Если для создания зародышей конденсации в паровом потоке использовать коронный разряд, то для обеспечения необходимой концентрации 2 · 10<sup>14</sup>кг<sup>-1</sup> (при условии что, каждый электрон и ион, образовавшийся в поле коронного разряда становится зародышем кон-

денсации), плотность тока коронного разряда должна составлять J = 3,2 · 10<sup>-5</sup> А/кг.

$$J = (n_e \cdot e) / G, \tag{3}$$

где G-расход пара, кг/с

Величина тока коронного разряда I<sub>к.р.</sub> в этом случае

$$I_{к.р.} = J G, \tag{4}$$

По предварительной оценке, для обеспечения указанной концентрации ядер конденсации в паровом потоке турбины К-300-240 на номинальном режиме (расход пара через ЦНД G<sub>ЦНД</sub>=154кг/с) ток коронного разряда должен составлять ~ 5мА. При напряжении на коронирующем электроде 10кВ, мощность потребляемая коронным разрядом составит ~ 50Вт.

### Экспериментальные исследования

Исследование процесса расширения пара при наличии искусственных зародышей конденсации выполнено на сверхзвуковом сопле. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

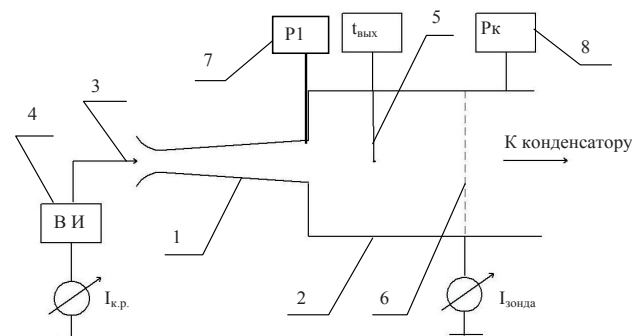


Рис. 2. Схема измерения параметров расширяющегося пара: 1-сопло; 2-выхлопной патрубок (зона внезапного расширения); 3-коронирующий электрод; 4-высоковольтный источник; 5-термопара; 6-сетка (электрический зонд); 7,8-манометры.

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

- расход пара через сопло G<sub>п</sub> = 0,00115кг/с;
- площадь выходного сечения сопла F<sub>1</sub>=1,418 · 10<sup>-5</sup> м<sup>2</sup>;
- площадь сечения в зоне внезапного расширения F<sub>2</sub> = 1,539 · 10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>;
- давление пара перед соплом P<sub>0</sub> = 59кПа;
- статическое давление на срезе сопла при естественном течении пара P<sub>1</sub> = 28,23кПа;
- статическое давление на срезе сопла при ионизации пара P<sub>1е</sub> = 29,09кПа;
- статическое давление в зоне внезапного расширения P<sub>к</sub> = 5,98 кПа;

Для создания искусственных зародышей конденсации на входе в сопло 1 установлен коронирующий электрод 3. Для измерения тока переносимого потоком пара в выхлопном патрубке 2 установлена сетка 6 (электрический зонд). Давление P<sub>0</sub> и температура пара t<sub>0</sub> перед соплом измеряются в подводящем паропроводе (на рисунке не показан). Для измерения дав-

лений использован датчик «ABB 265AS» класса 0,025. Температура перед соплом и в выхлопном патрубке измерялась при помощи термопар ТХА. Термопары перед экспериментом тарировались по лабораторному ртутному термометру с точностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Во время эксперимента колебания давления перед соплом не превышали 10Па.

При естественном процессе расширения (без искусственных зародышей конденсации) пар пройдя через канал сопла, попадает в зону внезапного расширения.

Площадь сечения в зоне внезапного расширения в  $\sim 11$  раз больше площади выходного сечения сопла. Благодаря этому при истечении пара из сопла происходит дросселирование. При дросселировании температура пара в зоне внезапного расширения будет зависеть от влажности пара на срезе сопла. Если влажность пара на срезе сопла равна нулю (пар сухой насыщенный или перегретый) температура пара может незначительно возрасти из-за торможения потока. В этом случае температура пара может быть определена по упрощенной формуле

$$T_1 = T_0 + \Delta T = T_0 + \frac{C_0^2 - C_1^2}{2C_p}, \quad (10)$$

где  $T_0$ - статическая температура пара на срезе сопла;  $C_0$ - скорость потока на срезе сопла;

$C_1$ -установившаяся скорость потока в зоне внезапного расширения.

Если вытекающий из сопла пар содержит влагу, при резком снижении давления в зоне внезапного расширения влага начнет испаряться, в результате чего температура пара снизится на

$$\Delta T_Y = -\frac{L(1-x)}{C_p}. \quad (11)$$

В этом случае температура пара

$$T_{1Y} = T_0 + \frac{C_0^2 - C_1^2}{2C_p} - \frac{L(1-x)}{C_p}. \quad (12)$$

Влажность пара в конце процесса расширения в канале (в сопле) может быть определена по изменению температуры в зоне внезапного расширения (см. рис. 2).

$$Y = \frac{\Delta T_Y \cdot C_p}{L}, \quad (13)$$

Где  $C_p$  - теплоёмкость пара в зоне внезапного расширения (кДж/кг·К),

Для условий эксперимента  $C_p = 1,9265 \text{ кДж/кг·К}$ .

Очевидно, что температура пара не может быть ниже температуры насыщения соответствующей статическому давлению в зоне внезапного расширения. Для определения значения  $\Delta T_Y$  построена зависимость температуры  $T_1$  в зоне внезапного расширения от температуры пара  $T_{вх}$  перед соплом для условий нулевой конденсации (см. рис. 4). Для построения этой зависимости на вход сопла подавался перегретый пар. При постепенном снижении температуры пара на входе в сопло измерялась температура пара в зоне

внезапного расширения (рис. 3, кривая 1). Путем экстраполяции линейного участка кривой 1 построена зависимость  $T_1$  от  $T_{вх}$  (рис. 3, прямая 2) при нулевой конденсации.

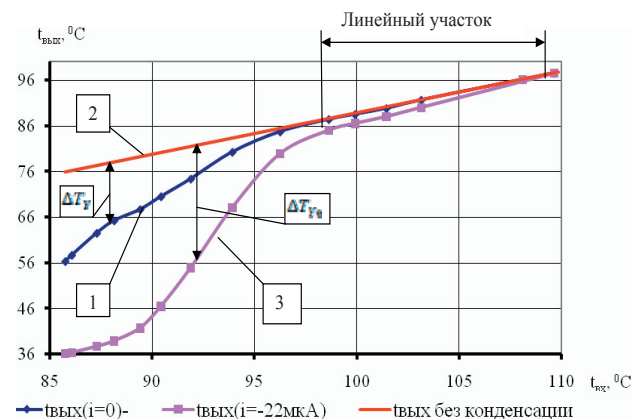


Рис. 3. Зависимость температуры пара в зоне внезапного расширения от температуры перед соплом: 1-при естественном процессе; 2-при нулевой конденсации (получена путем экстраполяции линейного участка кривой 1); 3-при ионизации пара

При протекании пара через поле коронного разряда в канале сопла образуется мелкодисперсная влага, которая испаряется при попадании в зону внезапного расширения. В результате температура пара заметно снижается. Температура и влажность пара в конце процесса расширения зависят от начальных параметров пара.

На рис. 3 приведены зависимости температуры в зоне внезапного расширения от температуры перед соплом при естественном расширении пара и при включенном коронном разряде.

При протекании пара через поле коронного разряда на отдельных ионах и электронах образуются устойчивые зародыши конденсации. При расширении пара на этих зародышах происходит конденсация. При постоянном значении тока коронного разряда, количество образующихся устойчивых капель зависит от начальных параметров пара. В момент образования размер зародыша конденсации зависит от температуры пара, что влияет на его подвижность и, соответственно на время его жизни. При повышении температуры пара размеры зародышей уменьшаются, а подвижность возрастает. Заряженные зародыши под действием электрического поля объёмного заряда движутся к заземленным стенкам сопла, где оседают, отдавая свой заряд.

При снижении начальной температуры пара размеры зародышей быстро увеличиваются, благодаря чему большая их часть «доживает» до зоны начальной конденсации. В результате растет число капель в паровом потоке и, соответственно, влажность на выходе из сопла.

Влажность пара на срезе сопла на каждом режиме рассчитывалась в соответствие с (13) по измеренным значениям  $\Delta T_Y$  при естественном расширении пара и  $\Delta T_{Ye}$  при расширении ионизированного пара.

Зависимость влажности пара на выходе сопла от начальной температуры приведена на рис. 4.

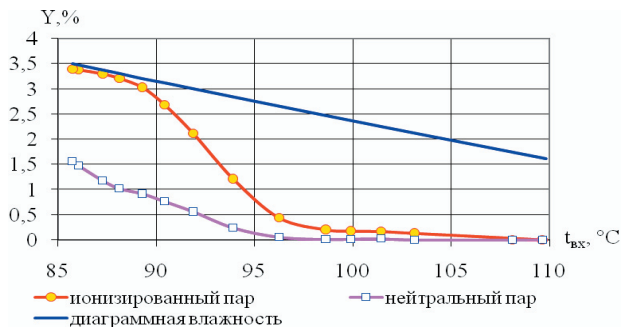


Рис. 4. Зависимость влажности пара на выходе из сопла от начальной температуры

Из рис. 4 видно, что в ионизированном паре влажность может достигать значения близкого к адиабатической.

При наличии заряженных частиц процесс конденсации начинается значительно раньше и происходит значительно интенсивнее, чем при расширении нейтрального пара.

Увеличение влажности пара в конце процесса расширения сопровождается уменьшением его энтальпии. На рис. 5 приведена зависимость энтальпии пара на выходе из сопла от начальной температуры.

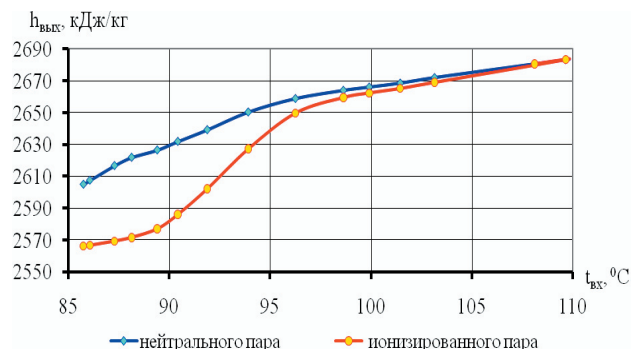


Рис. 5. Зависимость энтальпии пара на выходе из сопла от начальной температуры.

Как видно из рис. 5, энтальпия нейтрального пара выше, чем ионизированного. В области начальных температур ниже 95°C наблюдается резкое снижение энтальпии на выходе сопла как нейтрального, так и ионизированного пара.

При снижении температуры со 105 до 100°C энтальпия нейтрального и ионизированного пара на выходе из сопла уменьшается на ~ 10-11кДж/кг. При снижении температуры со 95 до 90°C энтальпия нейтрального пара на выходе из сопла уменьшается на ~ 25кДж/кг, а ионизированного - уменьшается на ~ 60 кДж/кг.

Уменьшение энтальпии пара в конце процесса приводит к увеличению использованного теплоперепада и, соответственно к росту КПД процесса. Хотя при снижении начальной температуры уменьшается располагаемый теплоперепад использованный теплоперепад возрастает (см.рис. 6).

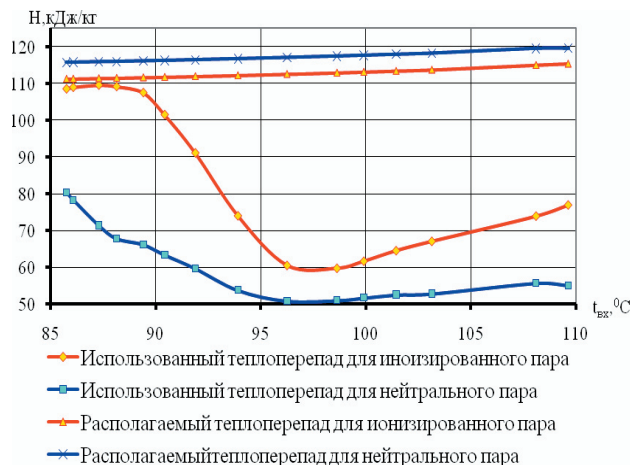


Рис. 6 Зависимость располагаемого и использованного теплоперепада от температуры перед соплом

Как видно из рис. 6, снижение температуры перед соплом сопровождается уменьшением располагаемого теплоперепада во всем диапазоне температур. Для ионизированного пара использованный теплоперепад больше, чем для нейтрального во всем диапазоне температур. Таким образом, ионизация пара позволяет приблизить влажность пара к адиабатическому значению и за счет этого существенно увеличить КПД процесса.

Аналогичный процесс может иметь место и во влажно-паровых ступенях турбин. Незначительное повышение температуры пара перед цилиндром низкого давления (ЦНД) может приводить к существенному увеличению энтальпии пара на выходе турбины, и, соответственно к снижению КПД турбоустановки.

### Выводы

При расширении нейтрального пара в сопле действительная влажность в конце процесса расширения может быть значительно ниже диаграммой. Влажность пара на выходе сопла нелинейно зависит от начальной температуры пара. Поэтому незначительное повышение начальной температуры может привести к резкому снижению влажности, увеличению энтальпии в конце процесса расширения и, соответственно к снижению КПД процесса. Ионизация пара перед зоной фазового перехода приближает процесс расширения к равновесному а влажность в конце процесса – к диаграммой, что приводит к увеличению КПД процесса расширения.

### Литература

1. Качуринер Ю.А. Расчет потерь от влажности в ступенях влажнопаровых турбин// Труды ЦКТИ. – 2002. – Вып.283, - С.85-96.
2. Бенсман Л.Г. Конденсационная нестационарность в проточных частях влажнопаровых турбин/ Л.Г.Бенсман, Г.Н.Дикарева, Ю.Я.Качуринер, Р.М.Яблонник// Труды ЦКТИ. – 1982. – Вып.196. – С.102-113.
3. McCloskey T.N. Turbine Steam Path Damage: Theory and Practice / T.N.McCloskey, R.B.Dooley. – Palo Alto, California 94304: Epr, 1999. – Volume 1. – P.8-13.

Поломка лопаток

4. Garmathy G. Grundlagen einer Theorie der Nabdampfturbine. – Zurich, 1962. – 284 p.
5. Скляр В.П. Измерение температуры влажного парового потока в паровых турбинах// Проблемы машиностроения. – 2005. – Т.8, №3. – С.8-15.
6. Пат. 74193 Украина, МКИ F01D5/28. Способ увеличения КПД паровых турбин / В. П. Скляр, А. А. Тарелин (Украина). – № 20030103319; Заявлено 14.12.03; Опубл. 15.11.05, Бюл. №11.

*Запропоновано ресурсозберігаючу технологію підготовки води для виробництва екологічної та енергетичної пари у газотурбінних установках транспортування природного газу. Технологія передбачає поєднання традиційних та новітніх методів обробки води, у тому числі баро- та електромембранні процеси. Головною перевагою запропонованої технології є відсутність твердих та рідких відходів*

*Ключові слова: технологія, підготовка води, газотурбінна установка*

*Предложена ресурсосберегающая технология подготовки воды для получения экологического и энергетического пара в газотурбинных установках транспортировки природного газа. Технология предусматривает сочетание традиционных и новейших методов обработки воды, в том числе, баро- и электромембранные процессы. Главным преимуществом предлагаемой технологии является отсутствие твердых и жидких отходов*

*Ключевые слова: технология, подготовка воды, газотурбинная установка*

*The resource-saving technology of water treatment is presented for obtaining the ecological and energetic steam in gas-turbine installations of the natural gas transportation. The technology used provides the combination of traditional and new methods of water treatment including the bar- and electric membrane processes. The main advantage of the technology proposed is the absence of solid and liquid waste*

*Key words: technology, water treatment, gas-turbine installation*

УДК 628.16.08

## РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ ВОДИ ДЛЯ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК «ВОДОЛІЙ»

**А. А. Тарелин**

Доктор технических наук, заведующий отделом\*

Контактный тел.: 8 (0572) 95-96-09

E-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua

**В. Г. Михайленко**

Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник\*

**О. И. Князева**

Ведущий инженер\*

\*Отдел общетехнических исследований в энергетике

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного

НАН Украины

ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

Контактный тел.: 8 (0572) 95-95-59

E-mail:port34@inbox.ru

**А. В. Антонов**

Ассистент

Кафедра химии

Харьковский государственный университет питания и торговли

ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051

Контактный тел.: 8 (0572) 95-95-59

E-mail:port34@inbox.ru

Згідно свого географічного положення Україна є транзитною державою, і від можливостей та надійності нашої газотранспортної системи залежить енергетична безпека країни. Транспортування газу здійснюється шляхом закачування його під

високим тиском на газоперекачувальних станціях у магістральні трубопроводи. Турбокомпресори газоперекачувальних станцій приводяться в дію за допомогою газових турбін, які спалюють так званий технологічний газ.