

УДК 621.165

# ИОНИЗАЦИЯ ВЛАЖНОПАРОВОГО ПОТОКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ В ТУРБОУСТАНОВКАХ

**А. А. Тарелин,**

чл.-кор. НАН Украины

[tarelin@ipmach.kharkov.ua](mailto:tarelin@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0001-7160-5726

**И. Е. Аннопольская,**

канд. техн. наук

[anna@ipmach.kharkov.ua](mailto:anna@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0002-3755-5873

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

*Рассматриваются экспериментальные исследования по ионизации парового потока в сверхзвуковом сопле и возможности влияния искусственной ионизации потока на неравновесные процессы в цилиндрах низкого давления (ЦНД) и повышение коэффициента полезного действия (КПД) турбины. Приведены результаты исследований по оценке влияния барьерного и коронного ионизаторов на процесс интенсификации мелкодисперсной влаги в сверхзвуковом сопле. Показано, что ионизация позволяет интенсифицировать процессную конденсацию пара в виде мелкодисперсной влаги, уменьшить пленочную конденсацию и концентрацию крупнодисперсной влаги, снизить уровень переохлаждения и конденсационной нестационарности. Определена область параметров, при которых ионизация пара наиболее эффективна. Рассмотрены преимущества и недостатки использования барьерного и коронного ионизаторов. Приведены зависимости и определены дисперсность потока и концентрация зародышей конденсации, при которых процесс расширения пара приближается к равновесному. Показано, что возникающие при ионизации пара положительные эффекты сопоставимы с применением в турбинах дозирующих химических добавок. При этом ионизация пара имеет ряд существенных преимуществ. Рассмотрены возможные варианты реализации использования ионизаторов в ЦНД влажнопаровых турбин как на стадии создания или модернизации турбин, так и для действующих турбоустановок. Показано, что в перспективе применение ионизаторов позволит повысить эффективность и экономичность турбинных ступеней, работающих в двухфазной области, и увеличить КПД турбоагрегатов на 1–1,5%.*

**Ключевые слова:** паровой поток, сверхзвуковое сопло, ионизация, неравновесные процессы, влажнопаровая турбина, эффективность, КПД.

## Введение

Известно [1, 2], что наиболее активными зародышами конденсации в зоне фазового перехода как в природных явлениях, так и в технических устройствах, являются заряженные частицы (ионы и электроны). В паровой турбине естественная электризация в этой зоне слишком мала, и объемная плотность зарядов, образованных заряженными частицами, составляет всего  $10^{11}$ – $10^8$  Кл/м<sup>3</sup>. Плотность зарядов, достаточная для того, чтобы повлиять на процесс объемной конденсации, достигается только за последней ступенью турбины, где процесс расширения пара уже завершен.

Отсутствие реальных методов управления процессом объемной конденсации пара с целью снижения уровня переохлаждения пара и повышения КПД турбины до последнего времени являлось сдерживающим фактором развития данного направления. К сожалению, некоторые попытки, например, использование химических добавок к питательной воде, которые предпринимались для управления процессом конденсации пара в зоне фазового перехода, до настоящего времени не нашли промышленного применения.

Поэтому авторами статьи предлагается способ интенсификации образования зародышей конденсации за счет искусственной ионизации парового потока перед зоной фазового перехода, осуществляемой с помощью коронного или барьерного разрядов [1].

## Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований в этом направлении в ИПМаш НАН Украины был создан термодинамический стенд (рис. 1).

Функционально стенд состоит из:

- парогенератора;
- ионизатора;
- сверхзвукового сопла;

© А. А. Тарелин, И. Е. Аннопольская, 2019



Рис. 1. Общий вид стенда

- измерительной системы;
- конденсатора.

Парогенератор обеспечивает необходимый расход пара заданных параметров:

- абсолютное давление от 30 до 110 кПа;
- расход пара до 0,0015 кг/с;
- температура пара до 200 °С.

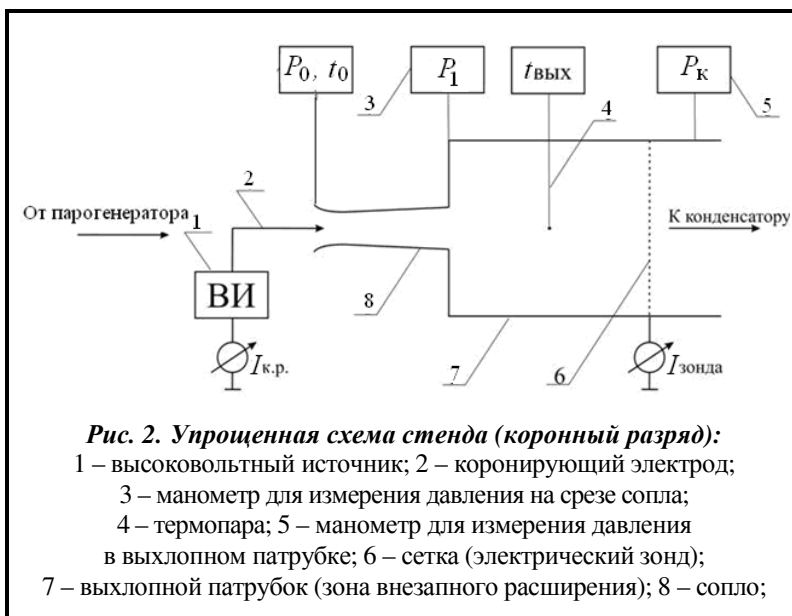
Схематически стенд представлен на рис. 2.

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, служащая в качестве электрического зонда.

Одним из главных элементов экспериментального стенда является осесимметричное конфузorno-диффузорное сопло с возможностью измерения давления в 14 точках.

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

- расход пара через сопло  $G_0=0,00115$  кг/с;
- площадь выходного сечения сопла  $F=1,418 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>;
- давление пара перед соплом  $p_0=59$  кПа;
- давление в зоне внезапного расширения  $p_k=5,99$  кПа;
- теплота испарения в зоне внезапного расширения  $\chi=2415,3$  кДж/кг;
- удельный ток коронного разряда в эксперименте  $J=3,2 \cdot 10^{-3}$  А/(кг/с).



Исследования процесса расширения пара в осесимметричном сопле показали, что характер изменения давления существенно меняется в процессе ионизации пара. При этом под действием электроразрядного устройства из нейтральных молекул пара образуются заряженные частицы.

На рис. 3 представлено изменение относительной величины давления пара вдоль сопла.

При расширении нейтрального пара за горлом сопла наблюдается уменьшение градиента давления, вызванное спонтанной конденсацией. При расширении ионизированного пара давление равномерно уменьшается по всей длине сопла (рис. 3, кривая 2) и процесс приближается к равновесному.

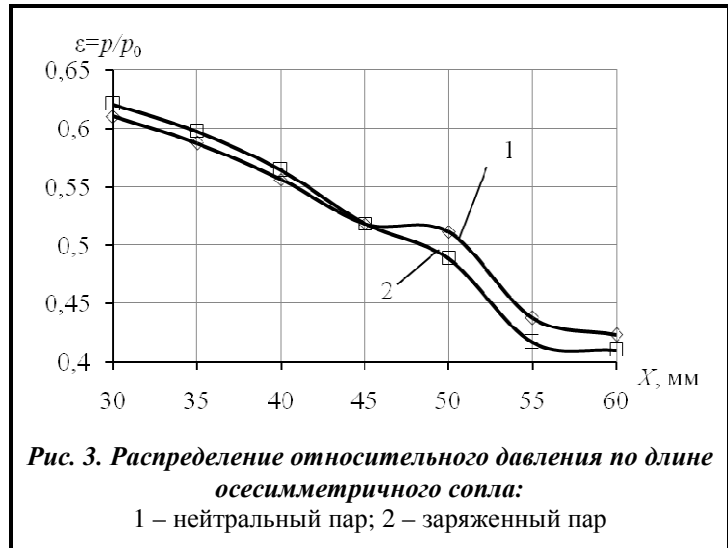


Рис. 3. Распределение относительного давления по длине осесимметричного сопла:  
1 – нейтральный пар; 2 – заряженный пар

При ионизации парового потока степень сухости пара на срезе сопла снижается с 0,991 до 0,9718, а энтальпия уменьшается с 2601,5 до 2557,5 кДж/кг (рис. 4.). В результате на 44 кДж/кг увеличивается количество теплоты фазового перехода, использованной в сопле, что увеличивает КПД процесса расширения с 0,52 до 0,933. Максимальная влажность нейтрального пара на выходе из сопла не превышает 1,5% (при адиабатической – 3,5%). В ионизированном паре влажность может достигать значения 3,4 %, что очень близко к адиабатической, т.е. процесс приближается к равновесному. Положительный эффект достигается за счет действия ионизатора, образующего в объеме пара многочисленные гидратированные ионы (дополнительные зародыши гетерогенной конденсации), которые представляют собой комплекс из иона и связанных с ним электростатическими силами молекул воды. Они оказываются «вмороженными» в паровой поток и, попадая в объем насыщенного и пересыщенного пара, интенсифицируют процесс конденсации, снижая тем самым уровень переохлаждения процесса.

Следует отметить, что такой процесс и рост КПД соответствуют только данному соплу. Тем не менее, можно утверждать, что благодаря более полному использованию теплоты конденсации при ионизации пара тенденция увеличения КПД должна сохраниться для любого процесса расширения пара, в том числе и в реальных турбинах.

Для практической реализации такого подхода очень важно определить термогазодинамические параметры пара, при которых гидратированные ионы оказываются устойчивыми (живучими) и не разрушаются как в зоне температур незначительного перегрева (зона перед фазовым переходом), так и в зоне низкого давления, т.е. необходимо определить границы термодинамических параметров расширения пара, при которых процесс ионизации будет эффективным.

Особенно важно знать максимальные значения давлений и температур пара, при которых воздействие ионизатора инициирует и интенсифицирует начало процесса конденсации пара.

Установить эти значения можно путем многочисленных экспериментов на стенде, позволяющем определить КПД процесса расширения пара при ионизации и без нее. Однако, кроме трудоемкости такого подхода, следует отметить сложности, возникающие при определении параметров пара, соответствующих началу конденсации.

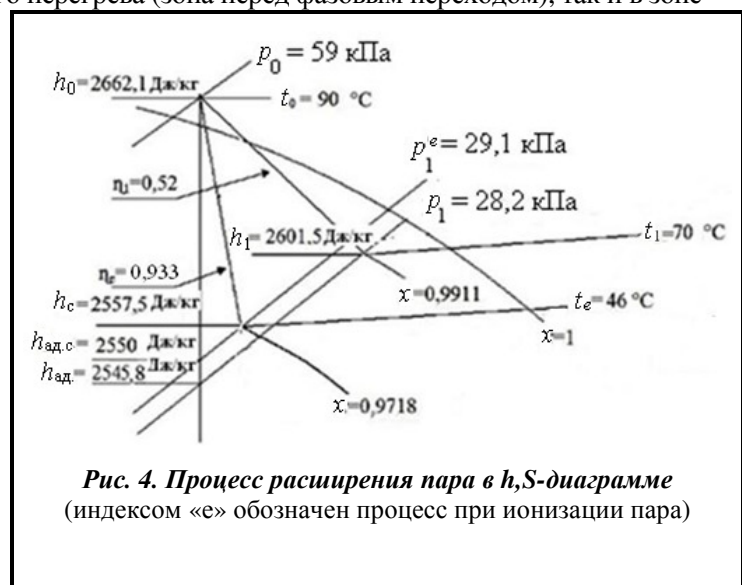


Рис. 4. Процесс расширения пара в  $h,s$ -диаграмме (индексом «е» обозначен процесс при ионизации пара)

Изменение давления и температуры в сопле, величины которых фиксируются в эксперименте, в данном случае неоднозначно определяют точку начала конденсации, т.к. на процесс влияют такие факторы, как потери, возникающие в сопле и на его срезе, которые сложно учесть при проведении экспериментов, кроме того, на результате сказывается точность измерений.

Поэтому был предложен другой, достаточно простой и оригинальный подход к решению данной задачи с использованием как барьерного ионизатора (БИ), так и коронного разряда (КР).

Для этих целей использовались оптические зонды, воспринимающие в видимой части светового спектра изменения оптической плотности парового потока

в зависимости от влажности по значениям выходного тока зонда. Величина разности значений тока оптического зонда в нейтральном и заряженном потоках в данных опытах использована для оценки эффективности ионизации. Чем больше разность значений указанных токов (больше плотность тумана), тем выше эффективность ионизации.

Для этих исследований был модернизирован термодинамический паровой стенд (рис. 1). Схема модернизированного участка с БИ и оптическим зондом показана на рис. 5.

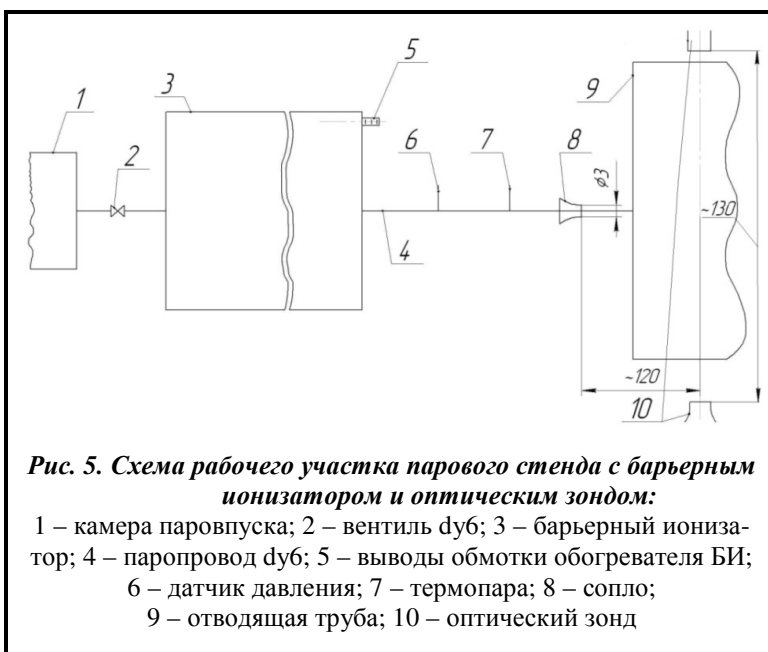
Во время опытов на всех режимах работы стенда фиксировались значения тока оптического зонда нейтрального и заряженного потоков пара при разных значениях начальной температуры перед соплом.

Для проведения режимных испытаний был принят ряд значений давлений, характерных для ряда влажнопаровых ступеней ЦНД турбин,  $p_0$ : 112,8; 127,5; 142,2; 156,9; 176,5 кПа. При наибольшем значении  $p_0$  обеспечивался околокритический перепад давлений на дозвуковом сопле, а также надежная работа элементов стенда. Значения начальных температур и диапазоны их изменения определялись во время опытов.

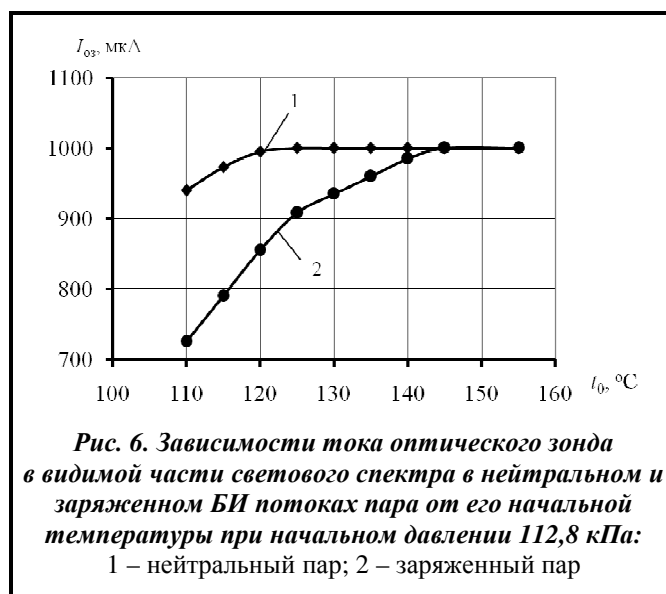
На рис. 6–8 приведены результаты исследований, полученные на некоторых режимах работы стенда.

Как видно из рис. 6–8, при каждом значении начального давления  $p_0$  имеется диапазон начальных температур, в котором наблюдается влияние ионизации на состояние парового потока за соплом. Об этом свидетельствует изменение тока зонда в видимой части светового спектра в потоке неионизированного (нейтрального) и ионизированного (заряженного) пара при одинаковых значениях начальной температуры. При повышении начальной температуры эффективность ионизации снижается. Это объясняется следующим.

В заряженном потоке пара, как было сказано выше, возникают гидратированные ионы, которые при расширении пара и понижении его температуры до температуры насыщения или близкой к ней являются дополнительными центрами конденсации. Чем больше концентрация таких



**Рис. 5. Схема рабочего участка парового стенда с барьерным ионизатором и оптическим зондом:**  
 1 – камера паровпуска; 2 – вентиль дуб; 3 – барьерный ионизатор; 4 – паропровод дуб; 5 – выводы обмотки обогревателя БИ; 6 – датчик давления; 7 – термопара; 8 – сопло; 9 – отводящая труба; 10 – оптический зонд



**Рис. 6. Зависимости тока оптического зонда в видимой части светового спектра в нейтральном и заряженном БИ потоках пара от его начальной температуры при начальном давлении 112,8 кПа:**  
 1 – нейтральный пар; 2 – заряженный пар

ионов, тем больше конденсируется пара и тем больше плотность тумана из-за большого количества влаги в потоке. Поэтому его прозрачность снижается и ток зонда уменьшается. При повышении начальной температуры пара  $t_0$ , т.е. при увеличении перегрева пара, кинетическая энергия молекул водяного пара увеличивается, число молекул пара, оседающих на заряженных частицах, уменьшается, масса гидратированных ионов и их количество тоже уменьшаются. При этом и количество конденсируемого пара уменьшается, а прозрачность потока увеличивается. Следовательно, разность значений тока оптического зонда в нейтральном и заряженном потоке уменьшается. При дальнейшем повышении начальной температуры пара кинетическая энергия молекул водяного пара становится столь большой, что они не удерживаются на заряженных частицах в зоне барьерного или коронного разряда ионизатора. Гидратированные ионы при этом просто не образуются и ядра конденсации отсутствуют. Поэтому говорить о «живучести» гидратированных ионов в данном случае неправомерно. При этом конденсации пара не происходит. Прозрачность потока не меняется, поэтому ток зонда нейтрального пара, имеющий наибольшее значение, равен току зонда заряженного пара. Чем выше начальные давления, тем при более высокой начальной температуре  $t_0$  наступает равенство тока зонда нейтрального и заряженного пара, т.е.  $I_{oz}^H = I_{oz}^3$ . Так, например, на режиме с  $p_0 = 112,8$  кПа равенство тока зонда нейтрального и заряженного пара происходит при  $t_0 \approx 145$  °С, а на режиме с  $p_0 = 176,5$  кПа – при  $t_0 \approx 160$  °С (см. рис. 6 и 8). Таким образом, в исследованном диапазоне начальных давлений перед соплом  $p_0$  112,8÷176,9 кПа максимальные значения начальных температур  $t_{0max}$ , при которых уже не наблюдается влияние ионизации пара барьерным ионизатором, находятся в диапазоне  $\approx 150 \div 160$  °С.

Результаты исследования влияния ионизации пара БИ на параметры парового потока позволили определить максимальные значения начальных температур  $t_{0max}$  на всех исследованных режимах, при которых влияние ионизации уже не наблюдается и ток оптического зонда нейтрального пара равен току заряженного пара (рис. 6–8). Естественно, что использование ионизации пара при температурах равных или больших, чем  $t_{0max}$ , не имеет смысла.

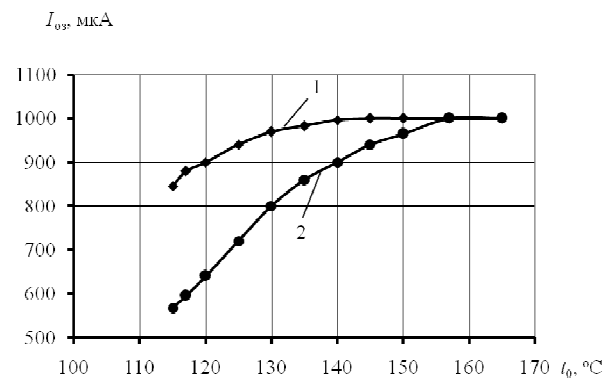


Рис. 7. Зависимости тока оптического зонда в видимой части светового спектра в нейтральном и заряженном БИ потоке пара от его начальной температуры при начальном давлении 142,2 кПа: 1 – нейтральный пар; 2 – заряженный пар

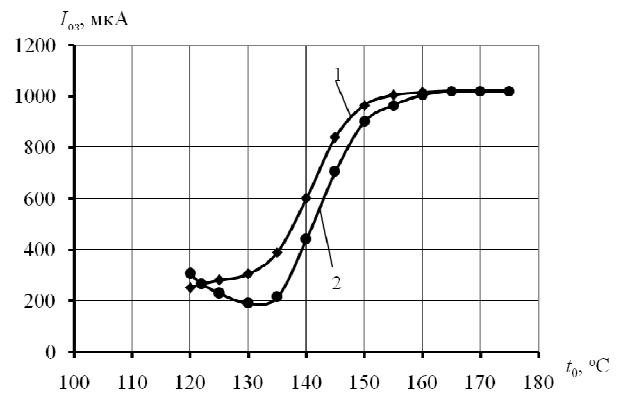


Рис. 8. Зависимости тока оптического зонда в видимой части светового спектра в нейтральном и заряженном БИ потоках пара от его начальной температуры при начальном давлении 176,5 кПа: 1 – нейтральный пар; 2 – заряженный пар



Рис. 9. Эффективность ионизации пара в зависимости от изменения давления и температуры: 1 –  $\Delta I_{oz} = 50$  мкА; 2 –  $\Delta I_{oz} = 100$  мкА; 3 –  $\Delta I_{oz} = 150$  мкА; 4 –  $\Delta I_{oz} = 200$  мкА; 5 –  $\Delta I_{oz} = 250$  мкА



При этом, с увеличением давления  $p_0$  перед соплом  $t_{0max}$  растет, а эффективность ионизации уменьшается. То же самое будет наблюдаться при понижении температуры расширяющегося пара в проточной части влажнопаровых ступеней турбины.

В результате исследований были получены линии равного уровня (рис. 9), которые отображают степень эффективности ионизации пара при изменении давления и температуры, а также определены их граничные значения.

Из всего сказанного следует, что в исследованном диапазоне начальных давлений влияние ионизации пара наиболее эффективно при температуре, близкой к температуре насыщения, и ее влияние практически отсутствует при повышении  $t_0$  до  $t_{0max}$ .

Аналогичные исследования, при тех же режимных параметрах пара, что и опыты с БИ, были проведены с коронным ионизатором (КИ). По итогам испытаний для всех режимов получены зависимости тока оптического зонда в видимой части светового спектра в нейтральном и заряженном КИ потоке пара от его начальной температуры при выбранном давлении.

Верхние границы максимальной температуры и давления пара для опытов с КИ находились при тех же параметрах пара на входе в сопло, что в опытах с БИ.

Для определения нижней границы влияния ионизации пара на параметры потока в проточной части сопла достаточно было использовать полученные ранее результаты исследований, проведенных на вышеупомянутом стенде [3], которые выполнены при различных минимально возможных значениях начального давления перед соплом. Эффективность ионизации определялась в этих экспериментах по величине снижения относительного давления в выходной части сопла. При этом начальная температура пара выбиралась так, чтобы перегрев пара сохранялся для всех принятых значений давления перед соплом в диапазоне 30–72 кПа. Результаты исследования представлены на рис. 10 в виде зависимости относительного изменения давления от давления пара перед соплом при ионизации. При максимальном давлении  $p_0=72$  кПа изменение  $\Delta p$  составляет 8–8,2%, а при давлении  $p_0=30$  кПа влияние ионизации практически отсутствует.

Результат ранее представленного эксперимента при  $p_0=59$  кПа (рис. 3) также нанесен на рис. 10 и находится в зоне эффективной ионизации пара (точка А).

Таким образом, при работе ступеней турбин во влажном паре, где плотность пара небольшая (давление  $p_0 \leq 30$  кПа), применение ионизатора для уменьшения потерь от переохлаждения пара может оказаться малоэффективным.

Проведенные исследования позволили определить область наиболее эффективной ионизации пара в  $h,s$ -диаграмме (рис. 11), что особенно важно для практической реализации этого метода.

В результате проведенных исследований было показано, что ионизация пара на базе БИ и КИ эффективна в зоне найденных рациональных параметров потока.

Было установлено, что если ионизация происходит в поле барьерного разряда, то образуется квазинейтральный влажный пар. Это дает

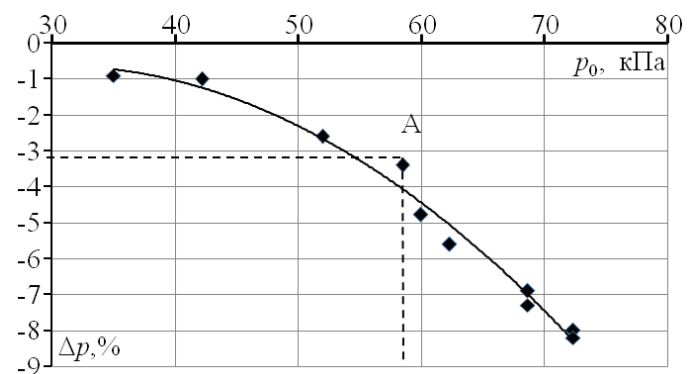


Рис. 10. Относительное изменение давления на выходе из сопла от начального давления

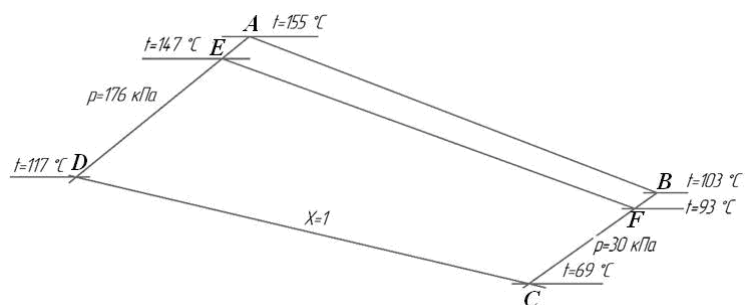


Рис. 11. Область в  $h,s$ -диаграмме водяного пара, включающая параметры, при которых ионизация пара наиболее эффективна: ABCD – при ионизации БИ; EFCD – при ионизации КИ

основание считать, что такой разряд не будет оказывать существенного влияния на электрокоррозионные процессы в проточной части. При этом эффективность влияния на параметры потока влажного пара часто превышает показатели, полученные при коронном разряде.

Что касается коронного ионизатора, то, как показали специальные исследования, проведенные в ИПМаш НАН Украины, при отрицательной полярности потока ионизация также не оказывает существенного влияния на ухудшение поверхностной прочности металла.

### Определение дисперсности потока

Для практической реализации рассмотренного подхода не менее важным является наличие информации о дисперсности потока, возникающей в результате ионизации пара, так как известно, что наличие в потоке капель крупного размера приводит к снижению показателей экономичности и надежности.

Остановимся подробнее на определении дисперсности потока.

Известно, что размеры образующихся в процессе конденсации капель зависят от концентрации зародышей и диаграммной влажности в конце процесса расширения

$$r_k = \sqrt[3]{\frac{3G \cdot Y}{4\pi \cdot n \cdot \rho}},$$

где  $r_k$  – радиус капель, м;  $G$  – расход пара через канал, кг/с;  $Y$  – диаграммная влажность пара;  $n$  – количество капель, образующихся в паровом потоке в секунду, 1/с  $\rho$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>.

Поскольку каждый зародыш может содержать не более одного элементарного заряда [2], количество капель в конце процесса расширения равно количеству зародышей конденсации и может быть определено по величине электрического тока, переносимого паровым потоком,

$$n_e = \frac{I}{e},$$

где  $n_e$  – количество зародышей конденсации, переносимых паровым потоком, с<sup>-1</sup>;  $I$  – ток, переносимый паровым потоком, А;  $e$  – элементарный электрический заряд ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл).

Изменяя концентрацию зародышей конденсации перед зоной фазового перехода за счет изменения величины тока, можно изменять размер капель в конце процесса расширения. На рис. 12 приведена зависимость диаметра капель в конце процесса расширения от концентрации зародышей конденсации и степени влажности пара.

Применительно к условиям нашего эксперимента (рис. 4), например, когда для создания зародышей конденсации в паровом потоке использовался коронный разряд, при влажности 3,5% и концентрации ядер (зарядов) конденсации  $10^{14}$ - $10^{15}$  кг<sup>-1</sup>, необходимой для равновесного расширения [1], размер капель равен ~0,4–0,8 мкм (рис. 12).

Значение тока коронного разряда  $I_{к.р.}$  для обеспечения необходимой концентрации зародышей конденсации зависит от расхода пара, протекающего через поле коронного разряда  $G$  и удельного тока коронного разряда  $J$

$$I_{к.р.} = J \cdot G,$$

где  $J = \frac{(n_e \cdot e)}{G}$ .

Поскольку часть заряженных частиц, возникающих в зоне коронного разряда, оседает на заземленных поверхностях, при определении необходимого значения тока коронного разряда следует учитывать коэффициент использования коронного разряда  $\eta_{к.р.}$

$$I_0 = \frac{(J \cdot G)}{\eta_{к.р.}}, \quad \eta_{к.р.} = \frac{I_{п.}}{I_{к.р.}},$$

где  $I_{п.}$  – значение тока, переносимого паровым потоком.

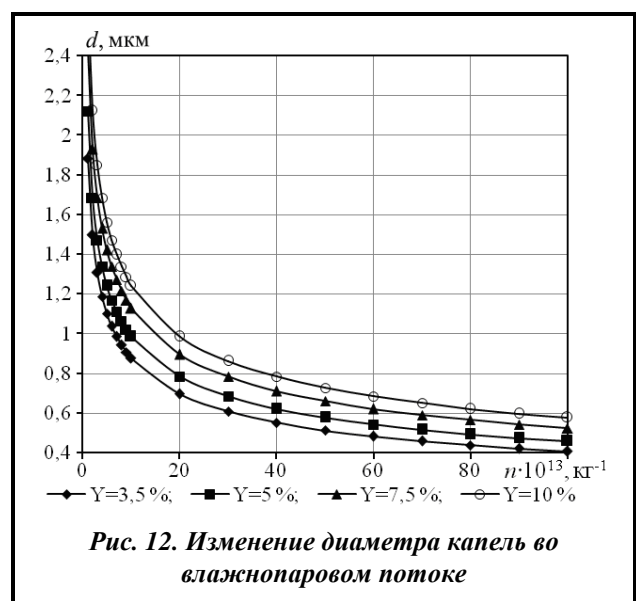


Рис. 12. Изменение диаметра капель во влажнопаровом потоке

Результаты лабораторных исследований показали, что эффективность использования тока коронного разряда может составлять  $\eta_{к.р.} \geq 0,01$ . При таком значении  $\eta_{к.р.}$  удельный ток коронного разряда должен составлять  $\sim 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ А/(кг/с)}$ , что совпадает со значением удельного тока, который применялся в нашем эксперименте (рис. 4).

Таким образом, при ионизации пара с удельным током, обеспечивающим концентрацию зарядов  $10^{14} - 10^{15} \text{ кг}^{-1}$  для условий, близких к равновесному состоянию, размеры капель не должны превышать 1 мкм.

Многочисленные эксперименты показали, что затраты энергии на ионизацию пара составляют 0,03–0,15% от энергии, выделяющейся при конденсации на ионах.

Полученные теоретические результаты образования мелкодисперсной влаги при воздействии на поток коронным разрядом были подтверждены и в процессе специально проведенных натурных испытаний (рис. 13).



**Рис. 13. Траверсирование потока за последней ступенью оптическим зондом:**

**а – оптический зонд для измерения влажности и размеров капель «МЭИ-ЦКТИ»;**

**б – изменение дисперсности и влажности от времени при изменении заряженности потока**

В этих экспериментах для измерения влажности и размеров капель применялся оптический зонд, разработанный в МЭИ-ЦКТИ (рис. 13, а), с помощью которого производились соответствующие замеры дисперсности потока непосредственно в режиме эксплуатации турбины, с использованием специализированной вакуумной камеры. Изменение дисперсности и влажности потока от времени под воздействием коронного разряда показаны на рис. 13, б. Зона включения коронирующих электродов с 21 ч 46 мин до 22 ч.

Из рис. 13, б видно, что искусственная ионизация первоначально приводит к увеличению влажности размера капель (до определенного предела  $d=0,8 \text{ мкм}$ ), с последующей стабилизацией дисперсности. Дальнейшее увеличение влажности происходит за счет увеличения количества центров конденсации с фиксированным размером капель.

Изложенные выше исследования показали, что искусственная ионизация пара приводит к увеличению влажности и снижению уровня переохлаждения, а образующаяся при этом в основном мелкодисперсная влага не может существенно повлиять на эрозию рабочих лопаток и эффективность течения потока.

Перейдем к оценке эффективности и возможных путях практической реализации предложенного подхода.

Для начала рассмотрим известный способ дозированных химических добавок типа октадециламина (ОДА) в питательную воду, что позволяет за счет снижения поверхностного натяжения жидкой фазы интенсифицировать дробление капель. При этом, первоначально на молекулах ОДА, развивается гетерогенная конденсация, а далее происходит эффект активного дробления капель на дополнительные центры, что интегрально, за счет интенсификации конденсации дает эффект снижения переохлаждения. Натурные испытания с применением ОДА были проведены на турбинах мощностью 12 МВт, ТЭЦ «Георгий Димитров» и КА-70-30 (г. Рейнсберг). Было установлено кратковременное



увеличение КПД более чем на 2% [4]. Эффект достигался за счет снижения переохлаждения и увеличения удельного объема пара, уменьшения пленочной конденсации и концентрации крупнодисперсной влаги, снижения потерь от конденсационной нестационарности, уменьшения профильных потерь и потерь на разгон крупных капель и др. Однако такая технология не получила большого распространения, так как оказалась дорогостоящей из-за необходимости непрерывного использования реагента. Кроме того, при длительном использовании ОДА продукты реагентов оказывают негативное влияние на надежность и экономичность турбины: происходит гидрофобизация поверхностей теплообмена всего котлотурбинного тракта, снижающая интенсивность теплообмена; забиваются импульсные трубки приборов контроля и защиты; при доочистке поверхностей появляются скрытые свищи и др.

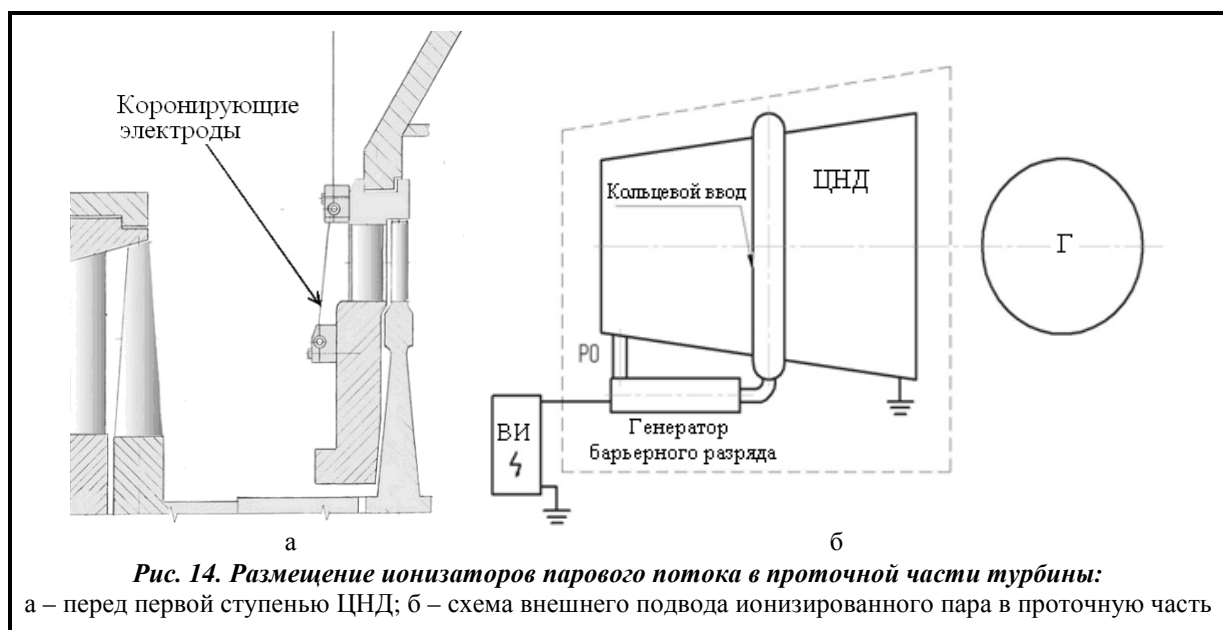
Нами предлагается, по сути, эквивалентный подход, где для интенсификации процесса конденсации используются не химические добавки, а ионизированный пар. При этом, в отличие от ОДА, активизация процесса гетерогенной конденсации происходит на ионах, а дробление крупных капель в потоке на мелкие – под действием электрического поля. Учитывая, что при ионизации пара положительные эффекты, такие, как уменьшение потерь от переохлаждения, размера капель и др., сопоставимы с применением ОДА, а в некоторых случаях и превышают эти показатели, то при применении ионизации можно ожидать такое же повышение экономичности турбинных ступеней, работающих в двухфазной области.

Наибольший эффект с использованием ионизаторов барьерного или коронного разряда может быть достигнут в том случае, если на стадии создания или модернизации турбин будет учтено место размещения ионизирующего устройства, которое зависит от термогазодинамических параметров процесса, определяющих начальную зону фазового перехода в проточной части.

Сложнее эта проблема решается для действующих турбин.

В настоящее время применение данного подхода возможно для действующих турбин геотермальных установок с температурами пара на входе 80–150 °С и давлением 180–200 кПа.

Возможные варианты использования ионизаторов представлены на рис. 14.



## Выводы

– разработанный подход позволяет: интенсифицировать процессную конденсацию пара в виде мелкодисперсной влаги (размер капель не превышает 0,4–1 мкм); уменьшить пленочную конденсацию и концентрацию крупнодисперсной влаги; снизить уровень переохлаждения и конденсационной нестационарности в проточной части;

– концентрация зародышей конденсации, при которой процесс расширения пара стремится к равновесному, составляет  $10^{14}$ – $10^{15}$  кг<sup>-1</sup>;

– при ионизации пара БИ образуется квазинейтральный влажный пар, который не вызывает электрокоррозии в проточной части турбины и не оказывает негативного влияния на поверхностную прочность лопаток. БИ более эффективен при создании ядер конденсации, и «живучесть» зародышей конденсации при его использовании выше КИ;

– из-за меньшей концентрации зарядов при ионизации КИ ее влияние на состояние парового потока прекращается несколько раньше, т.е. при меньших значениях максимальной температуры пара перед соплом  $t_{0max}$ . Однако использование КИ требует меньших материальных затрат и проще в техническом и технологическом обеспечении, что необходимо учитывать при подготовке системы ионизации пара в проточных частях турбин;

– выполненные численные исследования показали, что ионизация пара позволяет повысить КПД турбоагрегатов на 1–1,5%, например, мощность турбины К-300-23,5 может быть увеличена на ~3–4 МВт при затратах энергии на ионизацию ~ 8 кВт.

Авторы благодарны Орловскому В. П., при непосредственном участии которого был создан термогазодинамический стенд и проведен ряд экспериментальных исследований.

### Литература

1. Тарелин А. А., Скляр В. П. Паровые турбины: электрофизические явления и неравновесные процессы. СПб.: Энерготех, 2012. 292 с.
2. Палей А. А., Лапшин В. Б., Жохова Н. В., Москаленко В. В. Исследования процессов конденсации паров на электрически заряженных аэрозольных частицах [Электронный ресурс]. *Исследовано в России*: электрон. науч. журн. 2007. С. 263–274. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>
3. Тарелин А. А., Аннопольская И. Е., Сурду Н. В., Скляр В. П., Михайленко В. Г., Паршина Т. Н., Хиневич А. Е. Энерго- и ресурсосберегающие технологии в энергетике и энергомашиностроении. Киев: Наук. думка, 2016. 341 с.
4. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1987. 328 с.

Поступила в редакцию 12.04.2019

## Іонізація вологопарового потоку та перспективи практичного застосування електророзрядних пристроїв в турбоустановках

Тарелін А. О., Аннопольська І. Є.

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України,  
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

*Розглядаються експериментальні дослідження з іонізації парового потоку в надзвуковому соплі і можливості впливу штучної іонізації потоку на нерівноважні процеси в циліндрах низького тиску (ЦНТ) і підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) турбіни. Наведено результати досліджень з оцінки впливу бар'єрного та коронного іонізаторів на процес інтенсифікації дрібнодисперсної вологи в надзвуковому соплі. Показано, що іонізація дозволяє інтенсифікувати процесну конденсацію пари у вигляді дрібнодисперсної вологи, зменшити плівкову конденсацію і концентрацію великодисперсної вологи, знизити рівень переохолодження та конденсаційної нестационарності. Визначено область параметрів, за яких іонізація пари найбільш ефективна. Розглянуто переваги та недоліки використання бар'єрного та коронного іонізаторів. Наведено залежності та визначено дисперсність потоку і концентрацію зародків конденсації, за яких процес розширення пари наближається до рівноважного. Показано, що під час іонізації пари виникають позитивні ефекти, які можна порівняти із застосуванням в турбінах дозованих хімічних добавок. Водночас іонізація пари має ряд істотних переваг. Розглянуто можливі варіанти реалізації використання іонізаторів в ЦНТ вологопарових турбін як на стадії створення або модернізації турбін, так і для діючих турбоустановок. Показано, що в перспективі застосування іонізаторів дозволить підвищити ефективність і економічність турбінних ступенів, які працюють в двофазній області, і збільшити ККД турбоагрегатів на 1–1,5 %.*

**Ключові слова:** паровий потік, надзвукове сопло, іонізація, нерівноважні процеси, вологопарова турбіна, ефективність, ККД.