

А. А. Тарелин, чл.-кор.
НАН Украины
В. П. Орловский
А. С. Ковалев
А. В. Нечаев

Институт проблем
машиностроения
им. А. Н. Подгорного
НАН Украины,
г. Харьков, e-mail:
tarelin@ipmach.kharkov.ua,

Ключові слова: парова турбіна, математична модель, іонізація, нерівноважність, стрибок конденсації, експериментальний стенд, коефіцієнт корисної дії.

УДК 621.165:51.380

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИОНИЗАЦИИ ПАРА НА ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОПАРОВОГО ПОТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ

Розглянуто основні особливості розробленої математичної моделі, на базі якої створено програмний комплекс, що дозволяє виконувати розрахунки параметрів пари, що нерівноважно конденсується, в каналах із заданою геометрією з урахуванням об'ємної конденсації як на гомогенних, так і на гетерогенних зародках. Встановлено, що зміна абсолютних значень тисків уздовж проточної частини сопла, отримані розрахунковим шляхом, добре узгоджуються з експериментальними даними. Констатується, що вперше виконано ряд експериментальних досліджень з визначення впливу гетерогенних ядер конденсації, отриманих шляхом іонізації пари, на параметри парового потоку в надзвукових соплах. Показана можливість зниження втрат від переохолодження та стрибків конденсації за рахунок іонізації пари, що може сприяти підвищенню коефіцієнта корисної дії і потужності відсіків волого-парових ступенів натурних турбін.

Введение

Проблемы, возникающие в одиночных сверхзвуковых соплах и в каналах решеток влажнопаровых ступеней турбин при течении пара с переходом через линию насыщения, широко представлены в литературе. Так, известны работы Стодолы [1], Дьярмати [2], Френкеля [3], Салтанова [4, 5] и многих других авторов. Во многих из них детально рассмотрены причины скачков конденсации и конденсационной нестационарности при неравновесном расширении пара и предложены пути устранения скачков конденсации в сверхзвуковых соплах и связанных с ними потерь энергии. Одним из возможных методов решения указанных задач является введение в поток гидрофобных присадок, в частности октадециламина (ОДА) [6, 7]. Проведенные исследования на экспериментальном стенде Московского энергетического института (МЭИ) и на натурной турбине одной из станций дали положительный результат – КПД турбины увеличился. Однако это направление не получило дальнейшего развития, по-видимому, вследствие технико-экономической нецелесообразности.

Сотрудниками ИПМаш НАН Украины проводились исследования естественной электризации пара в проточной части паровых турбин. В ходе исследований был разработан метод снижения потерь от переохладения и скачков конденсации путем искусственной ионизации пара [8]. В настоящей работе излагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований в данной области.

Математическая модель. Основные положения

С целью исследования степени влияния концентрации спонтанно образовавшихся и гетерогенных зародышей конденсации в неравновесно конденсирующемся паре на параметры течения в сверхзвуковых соплах были разработаны математическая модель и программный комплекс, подробное описание которых представлено в [9].

Созданный программный комплекс предназначен для исследования гладких безотрывных течений с неравновесной конденсацией в сверхзвуковых соплах. Он позволяет выделить именно те особенности конденсации на гомогенных и гетерогенных зародышах конденсации, которые определяют параметры течения пара с неравновесной конденсацией. Поскольку кинетика неравновесной конденсации зависит исключительно от газодинамических параметров, то ее адекватность соответственно будет зависеть исключительно от адекватности применяемой вместе с ней газодинамической модели.

Отсутствие в модели влияния таких физических явлений в вязком паре, как течение и отрыв вязкого пограничного слоя, турбулентность на первом этапе исследований позволяет более отчетливо

© А. А. Тарелин, В. П. Орловский, А. С. Ковалев, А. В. Нечаев, 2016

разработаны ионизаторы пара коронного и барьерного типов, спроектированы и изготовлены конфузорно-диффузорные сверхзвуковые сопла с различными значениями чисел Маха. Некоторые результаты указанных исследований представлены ниже.

Принципиальная схема одного из экспериментальных паровых стендов, на котором проводились данные исследования, приведена на рис. 1.

Стенд состоит из следующих самостоятельных взаимосвязанных систем, которые включают составляющие элементы, указанные на схеме стенда: паровой, циркуляционной, вакуумной, конденсатной, подпитки котла, ионизации пара, системы измерения.

Одним из главных элементов экспериментального стенда является плоское конфузорно-диффузорное сверхзвуковое сопло (рис. 2). Канал сопла образован двумя профильными (п. 3) и двумя плоскими (п. 4) стеклянными пластинами. В верхней профильной пластине сопла выполнены отверстия диаметром 1,5 мм для измерения давления. На рис. 2 указанные отверстия обозначены цифрами 1, 2, 3...9. Они определяют номера точек измерения давления.

Как уже отмечалось ранее [10], снижения переохлаждения и предотвращения скачка конденсации в паре можно достичь за счет дополнительных гетерогенных ядер конденсации. В данном эксперименте для создания гетерогенных ядер конденсации использовался ионизатор коронного типа, схема которого представлена на рис. 3. Принцип действия ионизатора следующий. Пар, протекая через зону высоковольтного электрического разряда, расположенную между концом иглы электрода и входной плоскостью сопла, ионизируется, а количество создаваемых таким образом гетерогенных ядер конденсации (электрические заряды) регулируется величиной пропускаемого через ионизатор тока. Расположение ионизатора показано на схеме парового стенда (рис. 1, п. 23).

На данном стенде были проведены исследования по определению влияния ионизации на параметры потока в сопле. Одним из главных методических условий выполнения эксперимента было проведение всех испытаний при постоянном массовом расходе пара $G_n = \text{const}$.

Для оценки влияния на параметры потока полярности напряжения, подаваемого на электрод, был проведен специальный эксперимент. На режиме с начальной температурой пара, равной температуре насыщения t_s , на электрод подавалось положительное или отрицательное напряжение разной величины. При каждом значении величины и полярности напряжения производились измерения силы тока в цепи ионизатора, а также давлений в 7 и 8 точках сверхзвуковой части сопла ($\bar{l}=0,7$ и $\bar{l}=0,8$), в которых наблюдалось наибольшее влияние ионизации. Давления в этих же точках измерялись также и без подачи напряжения на электрод. На рис. 4 представлены зависимости изменения давлений Δp в ука-

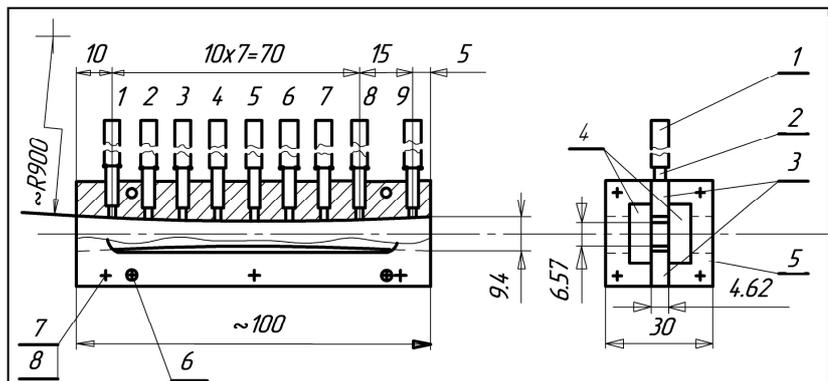


Рис. 2. Сопло:

- 1 – трубка $\varnothing 4$ мм; 2 – трубка $\varnothing 3$ мм; 3 – пластины профильные;
- 4 – пластины плоские; 5 – корпус; 6 – штифт; 7 – винт; 8 – гайка

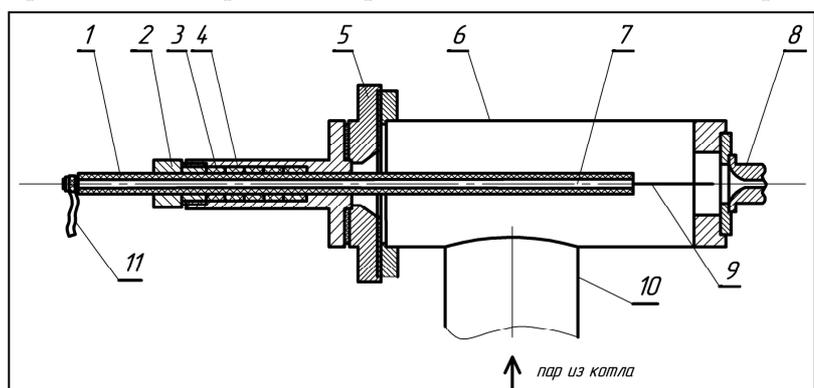
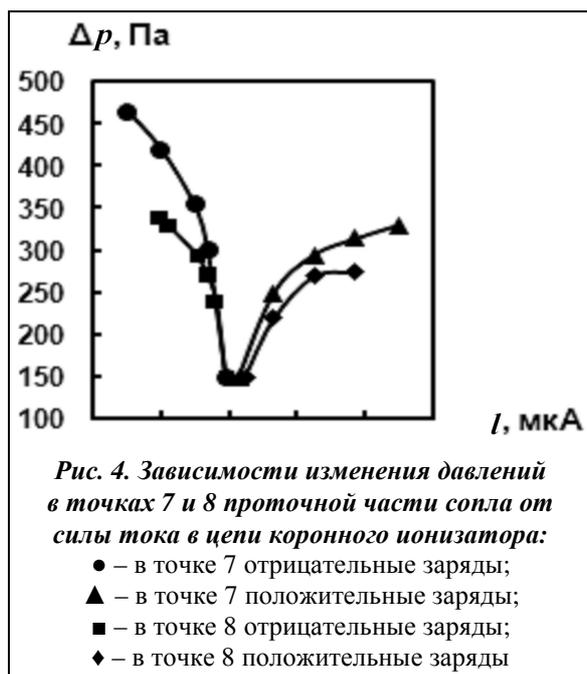


Рис. 3. Коронный ионизатор и схема его установки в камере паровпуска:

- 1 – изолятор; 2 – гайка; 3 – резиновая прокладка; 4 – корпус электрода; 5 – фланец; 6 – камера паровпуска; 7 – электрод; 8 – сопло;
- 9 – игла коронного ионизатора; 10 – пароперегреватель; 11 – кабель от источника высокого напряжения



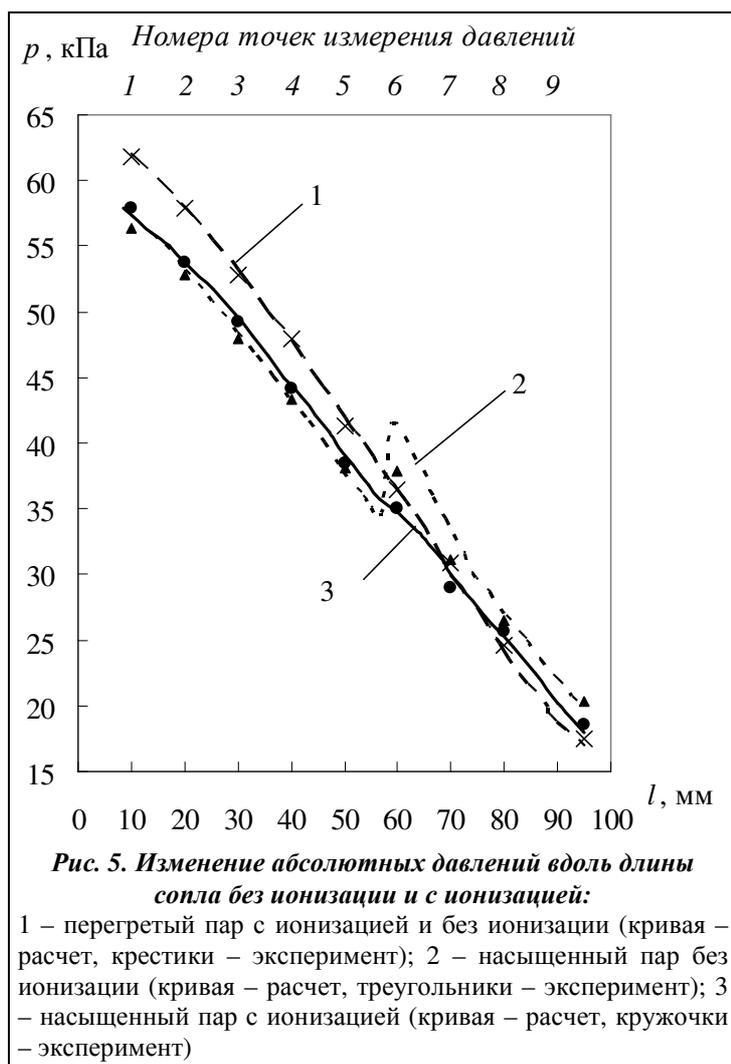
занных точках от силы тока в цепи ионизатора при разной полярности напряжения.

Сравнение изменения давлений Δp_7 и Δp_8 в точках 7 и 8 сверхзвуковой части сопла при одинаковых величинах тока показало, что влияние ионизации при отрицательном напряжении в 1,4–1,5 раза больше, чем при положительном. На этом основании последующие испытания с использованием коронного ионизатора проводились с отрицательными зарядами.

В процессе эксперимента по определению влияния ионизации на параметры парового потока выполнялись измерения давлений в девяти точках вдоль проточной части сопла (рис. 2) при разных значениях начальной температуры пара.

Начальную температуру изменяли дискретно в диапазоне от температуры 150 °С до температуры насыщения. Измерения давлений выполнялись как на режимах без ионизации, так и с ионизацией.

Экспериментально было установлено, что на режиме с перегретым паром $t_0 = 150$ °С, (рис. 5, кривая 1) ионизация не влияет на параметры в сопле.



На режимах с начальной температурой пара, близкой к температуре насыщения, видно существенное влияние ионизации. При расширении пара без ионизации (рис. 5, кривая 2) в точке 6 имеет место скачок давления. На режиме с ионизированным паром во всех точках до скачка конденсации (рис. 5, кривая 3) наблюдается некоторое увеличение давлений за счет тепла, выделившегося при конденсации переохлажденного пара на зарядах. В точках (6–9) при ионизации пара давления уменьшались. Скачок давления, наблюдавшийся в точке 6 при естественном расширении, т.е. со спонтанной конденсацией, при ионизации практически полностью нивелирован. Вследствие этого потери в сопле, связанные со скачком конденсации и переохлаждением пара, снизились. Это подтверждается уменьшением давления в конце сопла (рис. 5, точка 9,) на 2,2–2,4%. Адиабатический перепад энтальпий и полезная работа сопла при этом увеличились.

Из проведенных исследований видно (рис. 5) хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов как для спонтанной, так и для гетерогенной конденсации. Таким образом, результаты исследований показали адекват-

ность математической модели, а также заметное влияние ионизации на процесс неравновесного расширения пара.

На рис. 6 приведены данные об изменении относительных давлений вдоль проточной части сопла на режиме с ионизацией пара при $t_0 \approx t_s$ (где t_s – температура насыщения). Относительное давление рассчитывалось по формуле

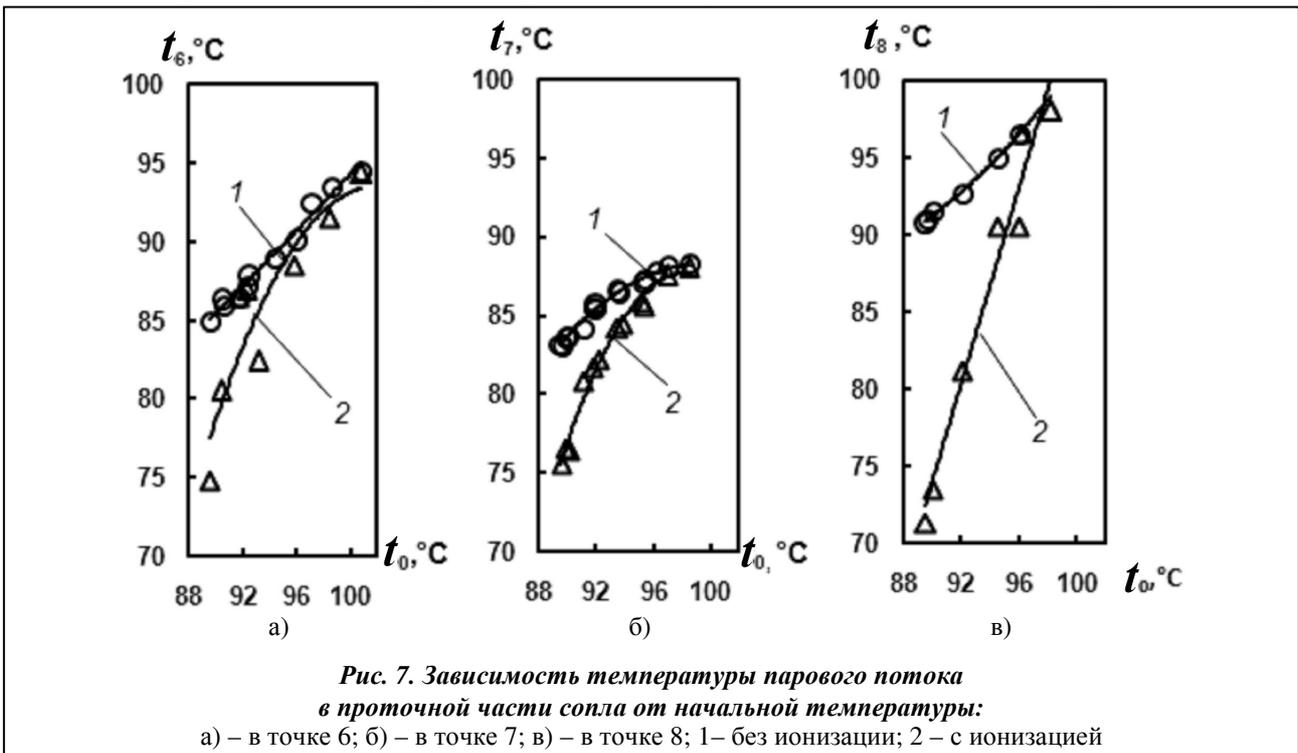
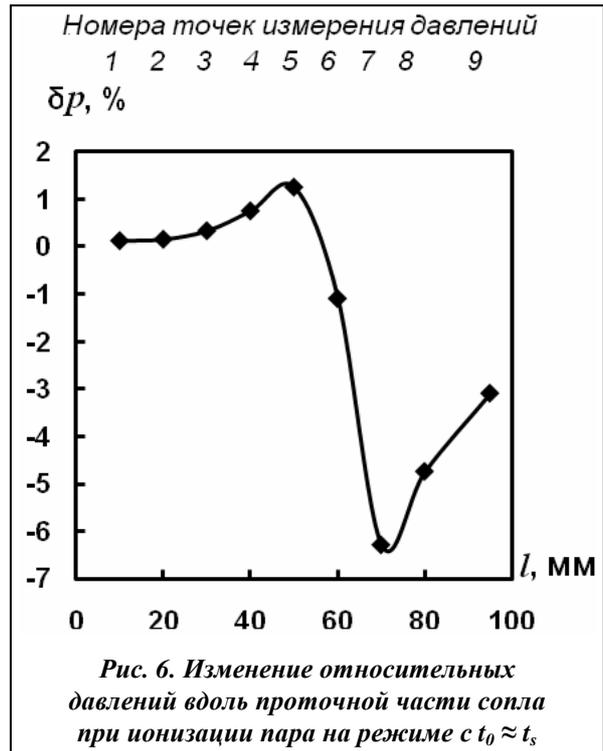
$$\delta p_i = \frac{P_i^u - P_i}{P_i} \cdot 100,$$

где P_i и P_i^u – значения давлений в данной точке без ионизации и с ионизацией соответственно.

На рис. 6 наглядно показано изменение давлений вдоль проточной части сопла вследствие ионизации пара. При этом в дозвуковой его части (точки 1–5) давления несколько увеличиваются, а в сверхзвуковой (точки 6–9) – существенно уменьшаются.

Из сказанного следует, что ионизация пара влияет как на дозвуковые, так и на сверхзвуковые течения в каналах (см. также рис. 5).

Для получения дополнительной информации, необходимой при анализе влияния ионизации на термодинамические процессы в проточной части сопла, производились измерения температур в тех же точках проточной части сопла, что и давлений (см. рис. 2) и на тех же режимах. С этой целью в отверстия, служащие для измерения давления, в точки 1–8 поочередно устанавливалась термопара с диаметром чехла 1 мм. Измерения температур парового потока в точках 1–5, расположенных в дозвуковой части сопла, показали, что при ионизации пара температура увеличивалась на $\approx 1-2^\circ\text{C}$. Повышение температур происходило вследствие выделения тепла при конденсации пара на зарядах. Поэтому и давления в этих точках на режиме с иони-



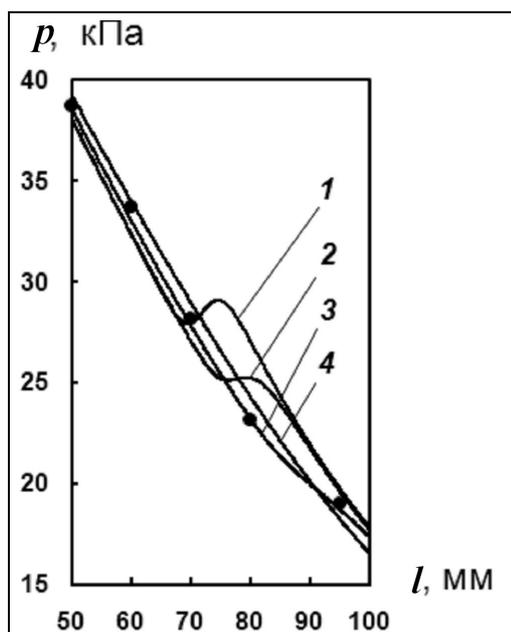


Рис. 8. Пример косвенного метода определения концентрации гетерогенных зародышей конденсации, содержащихся в паре:
 1 – $J_q = 0 \text{ кг}^{-1}$; 2 – $J_q = 1,0 \cdot 10^{14} \text{ кг}^{-1}$;
 3 – $J_q = 3,0 \cdot 10^{14} \text{ кг}^{-1}$; 4 – $J_q = 1,0 \cdot 10^{15} \text{ кг}^{-1}$;
 •••• – данные эксперимента

гетерогенных ядер конденсации.

Из рис. 8 видно, что экспериментальные данные, соответствующие расширению исследуемого пара, лучше всего совпадают с результатами расчета для концентрации гетерогенных зародышей $J_q = 3,0 \cdot 10^{14} \text{ кг}^{-1}$ (рис. 8, кривая 3). Следовательно, концентрация гетерогенных зародышей конденсации в паре на экспериментальном стенде близка к значению $J_q = 3,0 \cdot 10^{14} \text{ кг}^{-1}$.

Не представляет труда провести подобные измерения и на реальной турбине. Знание реальной концентрации гетерогенных зародышей в реальном паре может быть использовано на этапе проектирования проточной части цилиндра низкого давления (ЦНД) как дополнительная информация для уточнения термодинамических расчетов. так как от концентрации гетерогенных зародышей существенно зависит степень неравновесности процесса расширения конденсирующегося пара, его температура и давление, а также возможность возникновения скачка конденсации и его положение в проточной части [11].

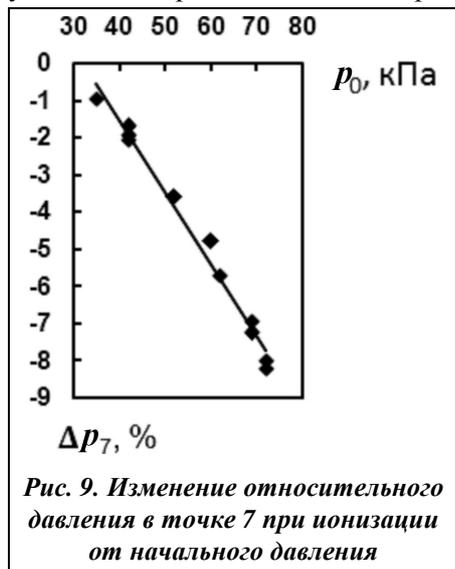


Рис. 9. Изменение относительного давления в точке 7 при ионизации от начального давления

зацией также увеличивались (рис. 6).

На рис. 7 представлены зависимости температур в точках 6, 7 и 8 проточной части сопла с ионизацией и без ионизации в зависимости от начальной температуры пара.

Так как указанные точки находятся за скачком конденсации, то температура неионизированного пара (кривая 1) выше температуры ионизированного (кривая 2) из-за подгрева его теплом фазового перехода, выделившегося в скачке конденсации. Как видно из рис.7, влияние ионизации увеличивается с понижением начальной температуры пара.

Определение концентрации гетерогенных зародышей

Использование созданного программного комплекса позволяет определить концентрацию гетерогенных зародышей в конденсирующемся паре, используемом как в экспериментальных стендах, так и в паровых турбинах. Для этого необходимо иметь данные об изменении давления конденсирующегося пара вдоль проточной части сопла известной геометрии и параметры пара перед соплом. С этой целью был выполнен расчет течения пара через сопло с заданной геометрией (рис. 2) при одинаковых начальных параметрах для различных значений концентрации гетерогенных зародышей, изменяющейся в широком диапазоне.

На рис. 8 приведены измеренные значения давлений вдоль сверхзвуковой части сопла, а также расчетные зависимости изменения давления для разных концентраций ге-

терогенных ядер конденсации.

О целесообразности использования ионизации при различных давлениях пара

Для определения влияния ионизации пара на параметры потока в проточной части сопла при переменной плотности пара выполнены исследования при различном значении начального давления перед соплом. При этом начальная температура пара выбиралась так, чтобы его начальный перегрев был постоянным для всех принятых значений давления перед соплом. Результаты исследования представлены на рис. 9 в виде зависимости относительного изменения давления в точке 7 сопла от начального давления пара при ионизации. Из рис. 9 видно, что эта зависимость имеет линейный характер в исследованном диапазоне на-

чального давления. При этом влияние ионизации тем больше, чем выше начальное давление. Так, при $p_0 = 72,3$ кПа изменение Δp_7 составляет 7–8%, а при $p_0 = 30$ кПа влияние ионизации практически отсутствует.

Из этого следует, что в случае работы влажнопаровых ступеней турбин при низкой плотности пара (давление $p_0 \leq 30$ кПа) применение ионизатора, конструкция которого представлена на рис. 3, для уменьшения потерь от переохлаждения пара может оказаться недостаточно эффективным.

Во влажнопаровых ступенях конденсационных турбин зона фазового перехода, как правило, расположена в области давлений, существенно превышающих величину 40–50 кПа, поэтому целесообразность использования ионизации пара в них очевидна. Возможные варианты ионизации пара в ЦНД паровой турбины приведены в [10, 12].

Искусственная ионизация пара улучшает энергетические характеристики потока и снижает эрозионную опасность. Так как при ионизации заряды распределены во всем объеме парового потока в сопле, то возникает объемная конденсация. В результате образуется мелкодисперсная влага, движущаяся со скоростью потока и не требующая дополнительного расхода энергии для разгона капель. Кроме того, конденсация на мелкодисперсной влаге, образующейся на зарядах, уменьшает переохлаждение и тем самым скорость роста пленочной влаги, являющейся основным источником эрозионно-опасной крупнодисперсной влаги.

Анализ возможности ионизации пара в проточной части ЦНД турбины К-300-240 показал, что при затратах энергии на ионизацию пара не более 5 кВт прирост мощности турбины на номинальном режиме составит ~1500 кВт.

Выводы

- разработан программный комплекс, позволяющий производить расчеты параметров конденсирующегося пара в сверхзвуковых соплах с учетом неравновесности процесса, объемной конденсации как на гомогенных, так и на гетерогенных зародышах. При этом концентрация капель жидкости и распределение их по размерам, энтальпия пара в неравновесном состоянии, температура жидкой фазы и влажность получаются непосредственно как результат расчета;
- изменение абсолютных значений давлений вдоль проточной части сопла, полученных расчетным путем, хорошо согласуются с экспериментальными данными как при спонтанной, так и при гетерогенной конденсации;
- возможность изменять концентрацию гетерогенных ядер конденсации за счет ионизации пара позволяет целенаправленно управлять параметрами течения влажнопарового потока;
- показана возможность определения концентрации гетерогенных зародышей в реальном паровом потоке с помощью созданной в ИПМаш НАН Украины расчетной методики;
- выполнен комплекс экспериментальных исследований, позволивших получить данные об изменении параметров потока пара в проточной части сверхзвукового сопла при ионизации пара. Показано, что эффективность ионизации пара тем выше, чем выше начальное давление и чем начальная температура ближе к температуре насыщения;
- ионизация пара снижает потери в соплах с дозвуковыми и сверхзвуковыми скоростями, что приводит к увеличению объемной конденсации и повышению КПД турбины за счет снижения переохлаждения и устранения скачка конденсации.
- выполненные расчеты показали, что ионизация пара позволяет повысить мощность турбины К-300-23,5 примерно на 1,5 МВт.

Литература

1. *Stodola, A. Dampf- und Gas- Turbinen* / A. Stodola. – Berlin: Verlag von Julius Springer, 1922. – 1114 s.
2. *Garmathy, G. Grundlagen einer Theorie der Nabdampfturbine* / G. Garmathy. – Zurich, 1962. – 284 p.
3. *Френкель, Я. И. Собрание избранных трудов: В 10 т. – Т. 3. Кинетическая теория жидкостей* / Я. И. Френкель. – М.; Л.: АН СССР, 1959. – 460 с.
4. *Салтанов, Г. А. Сверхзвуковые двухфазные течения* / Г. А. Салтанов. – Минск: Высш. шк., 1972. – 480 с.
5. *Салтанов, Г. А. Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике однофазных и двухфазных сред* / Г. А. Салтанов. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
6. *Филиппов, Г. А.. Исследование влияния гидрофобных присадок на работу турбинных ступеней влажного пара* / Г. А. Филиппов, О. А. Поваров // Теплоэнергетика. – 1979. – № 6. – С. 33–35.

7. Дейч, М. Е. Влияние присадок октадециламина (ОДА) на структурные и энергетические характеристики двухфазных потоков / М. Е. Дейч // Теплоэнергетика. – 1986. – №9. – С. 14–18.
8. Пат. 2385259 Канада, МПК6 F 01 D 25/30. Device to increase turbine efficiency by removing electric charge from steam / А. О. Tarelin, V. P. Skliarov (Украина), О. Weres (США). № 20022385259; заявл. 16.05.02 опубл. 22.11.02. Режим доступа: ru.espacenet.com.
9. Тарелин, А. А. Математическое моделирование процессов, происходящих при неравновесном расширении влажного пара / А. А. Тарелин, В. П. Скляр, А. С. Ковалев // Пробл. машиностроения. – 2008. –Т. 11, № 1. – С. 3–7.
10. Тарелин, А. А. Паровые турбины: электрофизические явления и неравновесные процессы / А. А. Тарелин, В. П. Скляр. – СПб: Энерготех, 2011. – 292 с.
11. Скляр, В. П. Разработка физических принципов определения концентрации гетерогенных зардышей конденсации в расширяющемся в двухфазной области паре / В. П. Скляр, А. С. Ковалев // Вісн. НТУ «ХП». Зб. наук. пр. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – № 7. – С. 88–96.
12. Тарелин, А. А. Электризация влажно-парового потока и ее влияние на надежность и эффективность турбин / А. А. Тарелин// Теплоэнергетика. – 2014. – № 11. – С. 21–28.

Поступила в редакцию 01.04.16

И. Н. Тертышный
С. А. Прилипко
В. П. Парафейник,
д-р техн. наук

ПАО «Сумское НПО»,
г. Сумы, e-mail:
tkm@frunze.com.ua

УДК 621.515

ВОПРОСЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДОЖИМНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ С ГАЗОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ. ЧАСТЬ II

Ключові слова: газоперекачувальний агрегат, відцентровий компресор, ексергія, ексергетичний коефіцієнт корисної дії, деструкція.

Наведені результати чисельного аналізу ефективності робочого процесу газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу типу ГПА-Ц, оснащених відцентровими компресорами (ВК) з одно- і двокаскадним стисненням. Аналіз робочого процесу агрегату розглянуто стосовно модифікації агрегату ТКА-Ц-6,3А/77-4,37 потужністю 6,3МВт, створеного на основі газотурбінного двигуна (ГТД) типу Д-336 конструкції ЗМКБ «Івченко-Прогрес» і ВК конструкції ПАТ «Сумське НВО».

Результаты термодинамического анализа эффективности рабочего процесса дожимных газоперекачивающих агрегатов

С использованием методики термодинамического анализа эффективности рабочего процесса агрегатов газовой промышленности, изложенной в первой части работы [1], выполнен сравнительный анализ эффективности двух модификаций дожимного ГПА с аналогичными начальными и конечными параметрами.

Энерготехнологическая схема первой модификации агрегата предусматривает применение мультипликатора в составе газотурбинного привода агрегата. Агрегат укомплектован ЦК с системой охлаждения газа на основе аппаратов воздушного охлаждения (АВО) и газотурбинным двигателем (ГТД) авиационного типа Д-336-2, имеющим на расчетном режиме $\eta_e = 31\%$ (ISO 2314). Однокорпусный шестиступенчатый ЦК обеспечивает $P_k=7,68$ МПа при частоте вращения 13000 об/мин; отношение давлений 4,37; массовую производительность 13,9 кг/с и имеет политропный КПД проточной части (ПЧ) 67%. Вторая модификация дожимного ГПА с ЦК двухкаскадного процесса сжатия обеспечивает те же параметры без мультипликатора в составе привода при частоте вращения 8200 об/мин. При этом в составе первого каскада сжатия компрессора (КСК-1) используется секция сжатия (ССК) с пятиступенчатой проточной частью (ПЧ) на $\pi_k = 2,45$ с политропным КПД 73,3%, АВО промежуточного охлаждения и сепаратором (С); в составе КСК-2 используется пятиступенчатая ПЧ на $\pi_k=1,84$

© И. Н. Тертышный, С. А. Прилипко, В. П. Парафейник, 2016