

УДК 621.165:51.380

**А. С. Ковалев**, канд. техн. наукИнститут проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(г. Харьков, e-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua)

## **ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЗАРОДЫШЕЙ НА КОНДЕНСАЦИОННУЮ НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ В РАЙОНЕ ГОРЛА РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ СОПЛА ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ ТЕЧЕНИИ ВЛАЖНОГО ПАРА**

*Приведены результаты расчетов для исследования влияния концентрации гетерогенных зародышей на конденсационную нестационарность в районе горла расширяющегося сопла при неравновесном течении влажного пара. Показано, что увеличение концентрации гетерогенных центров конденсации оказывает стабилизирующее влияние на течение пара и приводит к переходу течения пара в режим со стационарным скачком конденсации.*

*Наведені результати розрахунків для дослідження впливу концентрації гетерогенних зародків на конденсаційну нестационарність в районі горла сопла, що розширюється при нерівноважній течії вологої пари. Показано, що збільшення концентрації гетерогенних центрів конденсації чинить стабілізуючий вплив на течію пари та призводить до переходу течії пари в режим зі стаціонарним стрибком конденсації.*

### **Введение**

Процесс расширения пара в последних ступенях современных мощных паровых турбин проходит ниже линии насыщения. Метастабильное состояние пара, возникающее в результате неравновесного расширения, может приводить к скачкам конденсации и конденсационной нестационарности [1–3]. Существенное влияние на процесс неравновесного расширения пара оказывает наличие в нем гетерогенных центров конденсации (различных примесей, электрически заряженных частиц). Сдерживающим фактором развития исследований в области влажного пара до последнего времени являлось отсутствие реальных методов управления процессом объемной конденсации. Предпринимавшиеся попытки управлять процессом конденсации пара в зоне фазового перехода [4, 5] до настоящего времени не нашли промышленного применения.

В работах [6–7] показано, что в паровых турбинах возникает сильная электризация влажного пара. Плотность зарядов во влажном паровом потоке может на два порядка превышать плотность зарядов в грозовых облаках и существенно влиять на процессы конденсации. Наличие в паровом потоке заряженных капель стимулирует объемную конденсацию в проточной части и влияет на влажность и другие параметры потока. Поэтому весьма важно знать, насколько существенным есть влияние гетерогенных зародышей конденсации на газодинамические параметры процесса.

В данной статье приведены результаты расчетов неравновесного расширения пара в расширяющемся сопле. Показано, что наличие гетерогенных центров конденсации оказывает стабилизирующее влияние на конденсационную нестационарность потока и при достаточной их концентрации приводит к режиму течения со стационарным скачком конденсации.

### **Математическая модель**

Полную систему дифференциальных уравнений расчета течения влажного пара с учетом неравновесной спонтанной конденсации и конденсации на посторонних центрах в дивергентной форме можно записать следующим образом [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{f} + \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{F}_x + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{F}_y = \mathbf{F}_y$$

где  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{F}_x$ ,  $\mathbf{F}_y$ ,  $\mathbf{F}_r$  – вектор-столбцы

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_x \\ \rho u_y \\ E \\ (\rho \Omega_s)_0 \\ (\rho \Omega_s)_1 \\ (\rho \Omega_s)_2 \\ \rho h_s \\ (\rho \Omega_q)_0 \\ (\rho \Omega_q)_1 \\ (\rho \Omega_q)_2 \\ \rho h_q \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_x = \begin{bmatrix} \rho u_x \\ P + \rho u_x^2 \\ \rho u_x u_y \\ (P + E)u_x \\ \rho(\Omega_s)_0 u_x \\ \rho(\Omega_s)_1 u_x \\ \rho(\Omega_s)_2 u_x \\ \rho h_s u_x \\ \rho(\Omega_q)_0 u_x \\ \rho(\Omega_q)_1 u_x \\ \rho(\Omega_q)_2 u_x \\ \rho h_q u_x \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_y = \begin{bmatrix} \rho u_y \\ P + \rho u_y^2 \\ \rho u_x u_y \\ (P + E)u_y \\ \rho(\Omega_s)_0 u_y \\ \rho(\Omega_s)_1 u_y \\ \rho(\Omega_s)_2 u_y \\ \rho h_s u_y \\ \rho(\Omega_q)_0 u_y \\ \rho(\Omega_q)_1 u_y \\ \rho(\Omega_q)_2 u_y \\ \rho h_q u_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \rho(\omega_s)_0 \\ \rho(\omega_s)_1 \\ \rho(\omega_s)_2 \\ \rho \omega_s \\ \rho(\omega_q)_0 \\ \rho(\omega_q)_1 \\ \rho(\omega_q)_2 \\ \rho \omega_q \end{bmatrix}.$$

Здесь  $E = \rho(e + u_x^2/2 + u_y^2/2)$ ;  $t$  – время;  $x, y$  – координаты;  $\rho$  – плотность пароводяной смеси;  $P$  – давление пароводяной смеси;  $P_2$  – давление паровой фазы;  $P_2$  – давление жидкой фазы;  $e$  – удельная внутренняя энергия пароводяной смеси;  $u_x, u_y$  – компоненты скорости вдоль осей  $x, y$ ;  $\beta_1$  – объемная концентрация паровой фазы;  $\beta_2$  – объемная концентрация жидкой фазы;  $\gamma = 1 - h_s - h_q$  – массовая концентрация пара;  $h_s$  – массовая концентрация влаги, вызванная спонтанной конденсацией;  $h_q$  – массовая концентрация влаги, сконденсированной на гетерогенных центрах конденсации.

Первые четыре уравнения – это уравнения газодинамики, имеющие тот же вид, что и для однофазной среды. При этом, однако, следует помнить, что плотность  $\rho$  и энергия  $e$  определяются для среды в целом на основании соотношений аддитивности (8). Процесс кинетики гомогенной (спонтанной) конденсации описывается уравнениями 5–8, а кинетики конденсации на гетерогенных центрах конденсации – уравнениями 8–12.

При создании математической модели были сделаны следующие предположения:

- 1) какие бы кинетические процессы ни происходили (конденсация, испарение), скольжение фаз относительно друг друга отсутствует (односкоростная модель);
- 2) исследуются процессы в области относительно небольших влажностей ( $h < 0,3$ ), когда объемом, занимаемым каплями, по сравнению с объемом пара можно пренебречь;
- 3) капли могут конденсироваться на посторонних частицах, которые содержатся в паре. Это могут быть пылевые частицы или электрически заряженные ионы, которые служат гетерогенными центрами конденсации;
- 4) любая капля может нести в себе один элементарный электрический заряд;
- 5) может происходить как гомогенная (спонтанная) конденсация, так и конденсация на гетерогенных центрах конденсации;
- 6) гетерогенные центры конденсации в процессе расширения пара не возникают, т. е. их концентрация остается постоянной.

Система дифференциальных уравнений интегрируется с помощью явной монотонной схемы Годунова первого порядка точности. Разностные уравнения для интегрирования по схеме Годунова системы газодинамических уравнений имеют тот же вид, что и для однофазной среды.

Программный комплекс, созданный на основании данной математической модели, позволяет производить расчеты течения неравновесно конденсирующегося пара в каналах заданной конфигурации, при этом учитывается как спонтанная конденсация, так и конденсация на посторонних центрах конденсации.

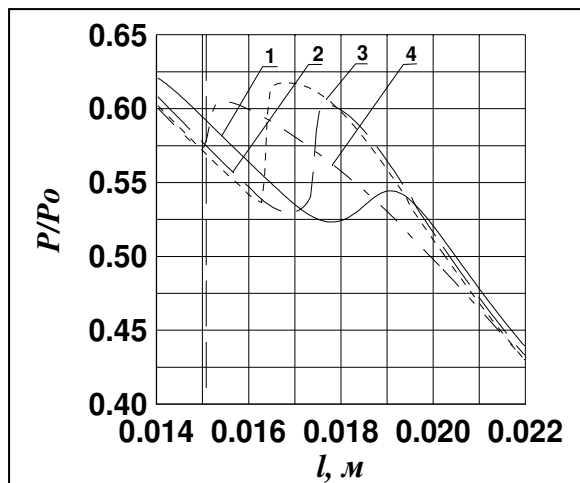
**Результаты расчетов**

Для численных исследований выбрано осесимметричное расширяющееся сопло со следующими геометрическими характеристиками: профиль дозвуковой части представляет собой сопряжение окружностей двух радиусов –  $R_1 = 3,3 \cdot 10^{-2}$  м и  $R_2 = 1,2 \cdot 10^{-2}$  м; диаметр входного сечения этого участка  $d_0 = 6,6 \cdot 10^{-2}$  м, диаметр горла сопла  $d_{кр} = 0,81 \cdot 10^{-2}$  м; сверхзвуковая часть сопла выполнена конической с углом полураствора  $\delta = 3^\circ$  и длиной  $l_{cb} = 2,68 \cdot 10^{-2}$  м. Число Маха на выходе из сопла, рассчитанное для показателя изэнтропии  $\kappa = 1,3$ , равно  $M_p = 2$  [4]. Начальное давление торможения в расчетах было задано  $P_0 = 1,1 \cdot 10^5$  Па, а температура торможения  $T_0 = 373,15$  К.

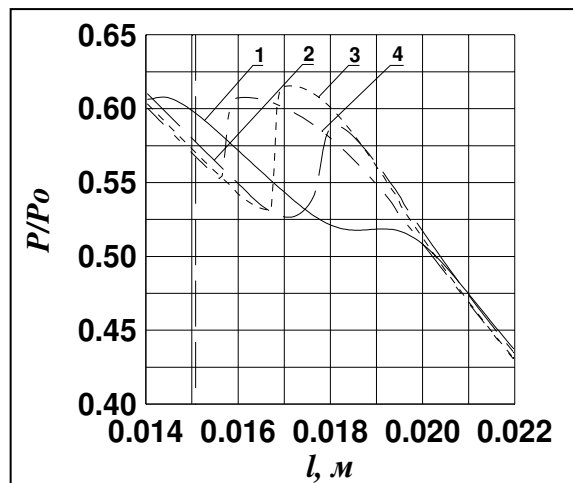
Цель исследования – определение влияния концентрации гетерогенных зародышей конденсации на процесс неравновесного расширения пара. В качестве гетерогенных зародышей могут быть посторонние примеси, всегда присутствующие в реальном паре, электрически заряженные ионы, которые сами по себе являются центрами конденсации. Концентрация ионов непосредственно зависит от показателя кислотности pH. Кроме того, можно искусственно вводить электрические заряды, применяя электрический разряд в определенной области течения пара. Пренебрежение фактом конденсации на гетерогенных зародышах может при расчетах существенно исказить картину течения пара и привести к неверным выводам.

Система дифференциальных уравнений расчета течения влажного пара интегрировалась по времени с шагом интегрирования  $\sim 1,7404 \cdot 10^{-8}$  с. Фиксация промежуточных результатов производилась каждые 1000 временных шагов.

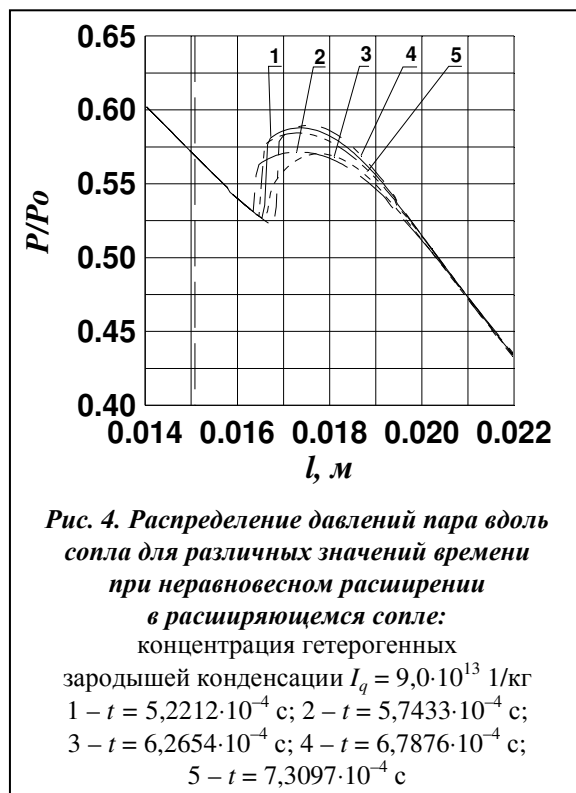
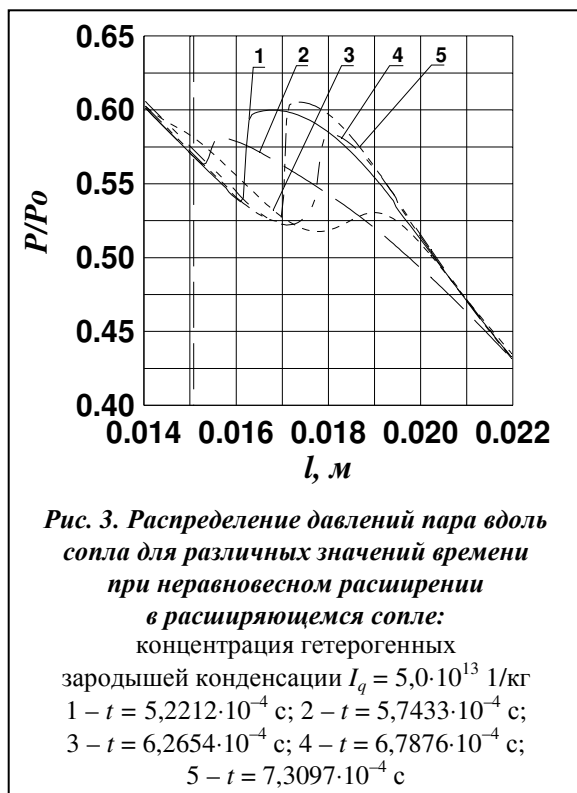
Распределение давлений пара вдоль сопла для спонтанной конденсации без гетерогенных зародышей приведено на рис. 1. Наблюдается типичное явление конденсационной нестационарности вблизи горла сопла. Фронт скачка давления перемещается вдоль сопла, меняя при этом свою амплитуду в довольно широких пределах. Период нестационарных ко-



*Рис. 1. Распределение давлений пара вдоль сопла для различных значений времени при неравновесном расширении в расширяющемся сопле: концентрация гетерогенных зародышей конденсации  $I_q = 0$  1/кг  
 1 –  $t = 5,2212 \cdot 10^{-4}$  с; 2 –  $t = 5,7433 \cdot 10^{-4}$  с;  
 3 –  $t = 6,2654 \cdot 10^{-4}$  с; 4 –  $t = 6,7876 \cdot 10^{-4}$  с*



*Рис. 2. Распределение давлений пара вдоль сопла для различных значений времени при неравновесном расширении в расширяющемся сопле: концентрация гетерогенных зародышей конденсации  $I_q = 1,0 \cdot 10^{13}$  1/кг  
 1 –  $t = 5,2212 \cdot 10^{-4}$  с; 2 –  $t = 5,7433 \cdot 10^{-4}$  с;  
 3 –  $t = 6,2654 \cdot 10^{-4}$  с; 4 –  $t = 6,7876 \cdot 10^{-4}$  с*



лебаний составляет  $T \approx 2,09 \cdot 10^{-4} \pm 1,0 \cdot 10^{-5}$  с.

Концентрация гетерогенных зародышей  $I_q = 1,0 \cdot 10^{13}$  1/кг слабо повлияла на режим течения пара (рис. 2). Следует, однако, заметить, что период нестационарных колебаний несколько возрос и стал равным  $T \approx 2,26 \cdot 10^{-4} \pm 1,0 \cdot 10^{-5}$  с.

Концентрация гетерогенных зародышей  $I_q = 5,0 \cdot 10^{13}$  1/кг уже более заметно повлияла на режим течения пара (рис. 3). Период нестационарных колебаний еще больше увеличился и составил  $T \approx 2,78 \cdot 10^{-4} \pm 1,0 \cdot 10^{-5}$  с. При этом область нестационарных явлений несколько сузилась по длине сопла.

При концентрации гетерогенных зародышей  $I_q = 9,0 \cdot 10^{13}$  1/кг (рис. 4) область нестационарных явлений уменьшилась еще больше, а период колебаний увеличился до  $T \approx 2,96 \cdot 10^{-4} \pm 1,0 \cdot 10^{-5}$  с. Фронт давления в скачке почти не перемещается по длине сопла. Амплитуда давления в скачке тоже мало изменяется.

Если концентрация гетерогенных зародышей увеличивается до  $I_q = 1,0 \cdot 10^{14}$  1/кг нестационарность на графике давлений уже довольно сложно зафиксировать. Амплитуда нестационарных колебаний становится минимальной.

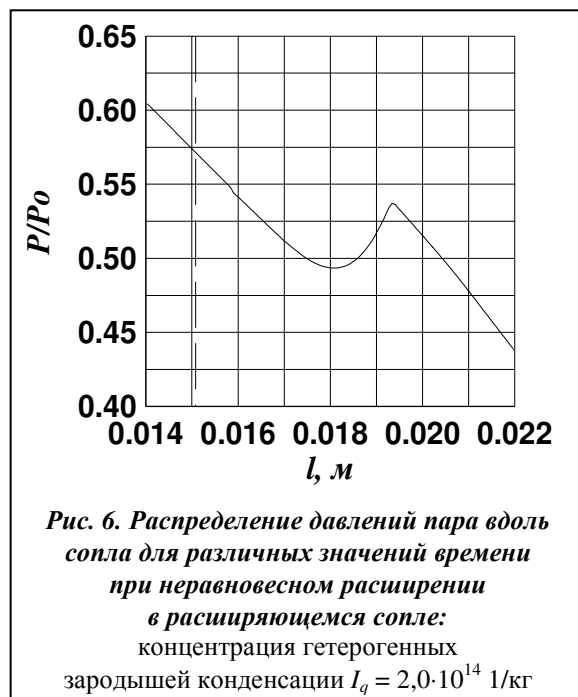
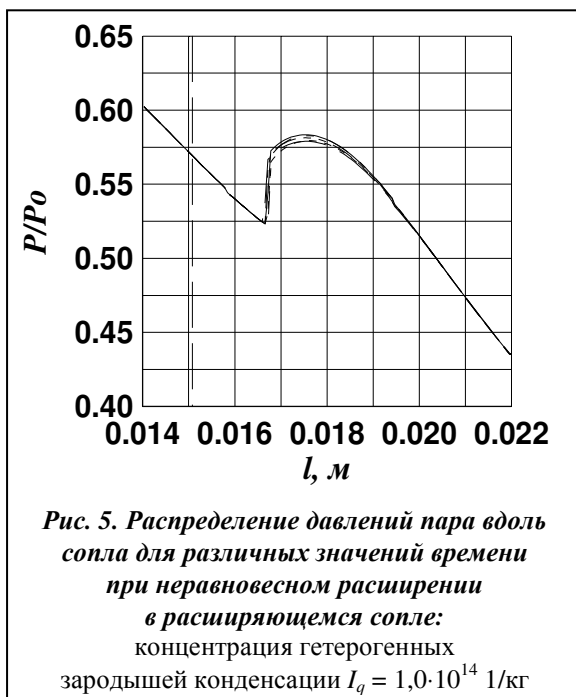
При увеличении концентрации гетерогенных зародышей до  $I_q = 2,0 \cdot 10^{14}$  1/кг, расширение пара в сопле переходит в стационарный режим с ярко выраженным увеличением давления на скачке конденсации. Место скачка конденсации при этом сместилось вниз по потоку. Это можно объяснить тем, что в стационарном скачке конденсации достигается стабильно максимальное переохлаждение, что и сдвигает скачок вниз по потоку.

### Выводы

Изменение концентрации гетерогенных центров конденсации  $I_q$  может оказать заметное влияние на режим течения неравновесно конденсирующегося пара.

Увеличение концентрации гетерогенных зародышей снижает частоту нестационарных процессов и уменьшает их амплитуду, а также сужает область нестационарных колебаний по длине сопла.

При достаточной концентрации гетерогенных зародышей скачок конденсации переходит в стационарный режим и сдвигается вниз по потоку. При дальнейшем увеличении



концентрации гетерогенных зародышей течение пара все ближе приближается к равносному [9].

Таким образом, изменение концентрации гетерогенных зародышей конденсации может служить достаточно мощным механизмом влияния на режим течения неравновесно конденсирующегося влажного пара, что позволит увеличить экономичность и надежность энергетических машин, работающих в области влажного пара.

**Литература**

1. Дейч М. Е. Газодинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. – М.: Энергия, 1968. – 424 с.
2. Салтанов Г. А. Сверхзвуковые двухфазные течения / Г. А. Салтанов / Под ред. М. Е. Дейча, В. Ф. Степанчука. – Минск: Высш. шк., 1972. – 480 с.
3. Качуринер Ю. Я. Комплекс программ «Влажный пар» / Ю. Я. Качуринер // Тр. НПО Центр. котлотурбин. ин-та. Основные физико-технические проблемы энергооборудования. – СПб, 2003. – 186 с.
4. патент , публ. , ,
5. Украина, . пособ увеличения паровых турбин . . Сляров, . . тарелин Украина. аявлено . публ. . л.
6. Тарелин А. А. Электрофизические явления в паровых турбинах / А. А. Тарелин, В. П. Сляров, О. Верес, Н. В. Сурду // Пром. теплотехника. – 1999. – № 4–5. – С. 98 – 102.
7. Тарелин А. А. Особенности измерения объемной плотности зарядов во влажном паровом потоке турбины / А. А. Тарелин, В. П. Сляров, В. П. Крыженко // Пробл. машиностроения. – 2000. – Т. 3, № 1.2. – С. 11 – 16.
8. Тарелин А. А. Математическое моделирование процессов, происходящих при неравновесном расширении влажного пара / А. А. Тарелин, В. П. Сляров, А. С. Ковалев // Пробл. машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 3 – 7.
9. Тарелин А. А. Влияние искусственных центров конденсации на выпадение влаги / А. А. Тарелин, В. П. Сляров, А. С. Ковалев // Пробл. машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 2. – С. 3 – 9.

Поступила в редакцию  
10.07.13