

ВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА СМЕШАННЫХ  
ПЕРИОДИЧЕСКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ  
СПОНТАННО КОНДЕНСИРУЮЩЕГОСЯ ПАРА

Г. А. САЛТАНОВ, Г. А. ФИЛИПНОВ, А. Л. ХОХЛОВ

(Москва)

Исследуется динамика смешанных течений конденсирующегося пара с неравномерными фазовыми превращениями, содержащих газодинамические разрывы в каналах переменной площади при наличии периодически нестационарных граничных условий на входе. Представлены результаты численного исследования течений перегретого и спонтанно конденсирующегося водяного пара в сверхзвуковом сопле. Показано, что периодическая нестационарность потока на входе может приводить к качественной перестройке структуры потока при наличии спонтанной конденсации. Встречаются течения с периодической нестационарностью во многих энергетических и транспортных устройствах, например в ступенях турбомашин, причем прохождение лопаток рабочего колеса вблизи выходного сечения соплового аппарата приводит к периодическому изменению давления за его срезом [1, 2].

Периодическая нестационарность, обусловленная наличием кромочных следов, приводит к интенсивным пульсациям параметров на входе в последующую сопловую или рабочую решетку, что сопровождается возникновением и распространением по потоку волн сжатия и разрежения [1].

Основной тип входной нестационарности — периодическое прохождение кромочных следов предыдущей решетки — достаточно подробно описан в литературе. Теоретический анализ взаимного влияния двух движущихся относительно друг друга решеток в квазистационарном потенциальном потоке приведен в [3, 4]. Все эти исследования проводились в основном в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости.

Теоретическое исследование периодически нестационарных течений сжимаемых сред с переходом через скорость звука с учетом возникновения и взаимодействия ударных волн практически отсутствует.

Для численного исследования и анализа таких сложных в газодинамическом плане течений весьма эффективны методы сквозного счета, основанного на схеме Годунова [5, 6], которая успешно использовалась в работах [7, 8] для исследования внутренней неустойчивости трансзвуковых течений со спонтанной конденсацией. В [2] численно исследовались нестационарные дозвуковые течения переохлажденного пара в суживающихся соплах с переменными условиями на выходе. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что в таких условиях даже в дозвуковых потоках могут образовываться нестационарные ударные волны, движущиеся против потока и приводящие к дополнительной диссипации энергии и снижению интенсивности процессов неравновесной конденсации. Влагообразование в данных конкретных примерах в пределах сопла не происходило, так как переохлаждение потока не достигало критического значения, соответствующего началу спонтанной конденсации. Однако при других условиях (например, при больших начальных давлениях) обратное воздействие рабочего колеса может оказывать большое влияние на процессы влагообразования и течения влажного пара.

1. Рассмотрим квазиодномерное течение двухфазной среды в рамках модели, приведенной в [7, 8]. Предполагается, что конденсированная фаза образуется в результате спонтанной гомогенной конденсации перенасыщенного пара. Возникающие при этом капли малы по размеру ( $r_k < 10^{-6} M$ ), так что относительным скольжением капель и пара можно пренебречь. Рассматриваются течения как с конденсацией, так и с испарением капель (т. е. возможно температурное рассогласование) при умеренных массовых концентрациях конденсированной фазы  $y \leq 0.3$  и давлениях, в термо-

динамическом смысле достаточно далеких от критических. Течение является внешне адиабатическим, т. е. отсутствует подвод тепла через границу исследуемой области. В этом случае уравнения сохранения для среды в целом имеют вид, аналогичный виду законов сохранения для однофазной среды (идеального газа) [8]. Они дополняются кинетическими уравнениями, описывающими неравновесные фазовые превращения. Разностная схема течения с учетом кинетики спонтанной конденсации и неравновесного межфазового теплообмена и способ ее получения для квазиодномерного нестационарного потока приведены в [7, 8], для двухмерного — в [9]. Там же дан анализ расчета при наличии исследуемых релаксационных процессов.

Рассмотрим граничные условия, используемые в данной работе. На выходе из сопла использовались обобщенные граничные условия. Если в выходном сечении реализуется поток со сверхзвуковой скоростью, то все параметры течения полагаются равными параметрам прилегающих слева ячеек. Если же реализуется дозвуковой поток, необходимо задавать распределение давлений на выходе [10].

На входе в сопло принималась постоянной полная энтальпия потока:

$$(1.1) \quad i_0 = e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} = \text{const}$$

$p$  — давление,  $\rho = \rho_1(1-y)^{-1}$  — плотность среды,  $\rho_1$  — плотность пара,  $u$  — скорость потока на входе в сопло,  $e$  — внутренняя энергия среды. Величина  $i_0$  находится в начале расчета и остается неизменной в течение всего счета.

Известно, что в решетках турбомашин эпюра скоростей на входе существенно неравномерна из-за наличия кромочных следов предыдущей решетки. Вследствие этого скорость на входе в решетку периодически изменяется. Поэтому в качестве второго граничного условия на входе выбрано периодическое изменение скорости по синусоидальному закону. Такой закон изменения скорости не совсем точно описывает реальный кромочный след, но вполне пригоден для качественного анализа возникающих явлений

$$(1.2) \quad \begin{aligned} u &= u_0 + \Delta u \sin [2\pi f(t-t_0)] & (t \geq t_0) \\ u &= u_0 & (t < t_0) \end{aligned}$$

Здесь  $u_0$  — первоначальная скорость на входе,  $\Delta u$  — амплитуда изменения скорости,  $f$  — частота периодического процесса,  $t$  — физическое время процесса,  $t_0$  — момент времени, начиная с которого задавалось периодическое изменение скорости. Наличие  $t_0$  в формуле (1.2) связано с тем, что к данному моменту времени в сопле устанавливалось стационарное распределение параметров.

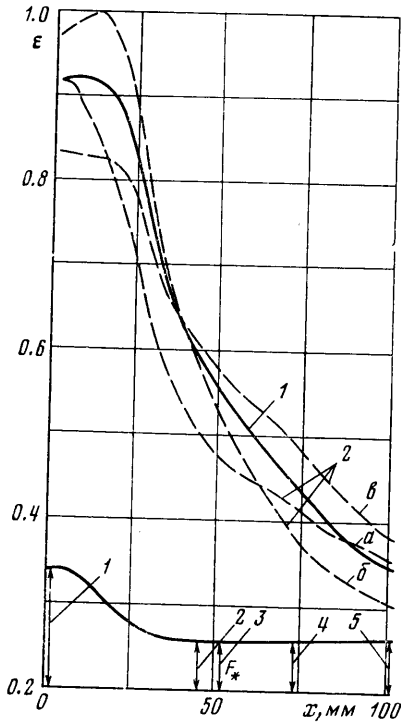
Следует отметить, что используемые в расчете соотношения Френкеля — Зельдовича справедливы для стационарной нуклеации. Учет отличия скорости ядрообразования необходим только для быстропротекающих нестационарных процессов, проходящих за время, меньшее чем  $10^{-5}$  сек. Следовательно, используя данную методику, можно рассчитывать периодически нестационарные процессы с частотой, не превышающей 10 кгц.

2. В этой постановке численно решалась задача о периодически нестационарном течении перегретого, конденсирующегося и влажного пара в сопле Лавала.

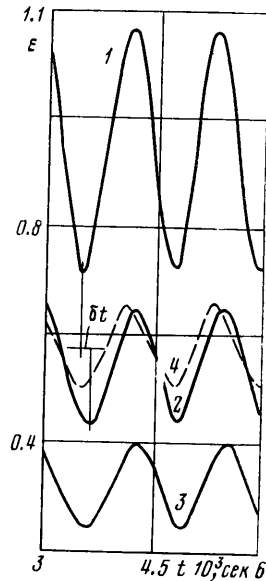
Профиль сопла приведен на фиг. 1. Сопло плоское с высотами критического выходного сечения  $h_* = 1.5 \cdot 10^{-2}$  м и  $h_a = 1.65 \cdot 10^{-2}$  м, ширина  $b = 5 \cdot 10^{-2}$  м. На входе в сопло задавались следующие параметры: давление  $p = 0.1$  МПа, температура  $T = 373.15^\circ$  К, скорость потока  $u_0 = 100$  м/сек,

частота периодического процесса  $f=5$  кГц, амплитуда возмущений скорости  $\Delta u=100$  м/сек. На выходе из сопла задавалось давление, равное  $p_a=0.025$  МПа.

С целью выявления особенностей процесса спонтанной конденсации в нестационарных потоках первоначально был рассчитан режим для однофазной среды (пара) без спонтанной конденсации («замороженное» те-



Фиг. 1



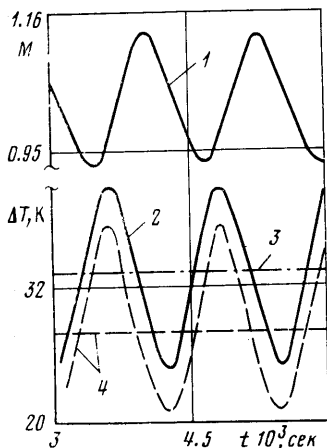
Фиг. 2

чение). На фиг. 1 приведено распределение давлений по длине сопла в различные промежутки времени (кривые 2, а —  $t'=0.04$ , б —  $0.305$ , в —  $0.63$ , где  $t'=f(t-t_0)$  — часть периода изменения скорости на входе), а также стационарное распределение давления без наличия периодической нестационарности (кривая 1).

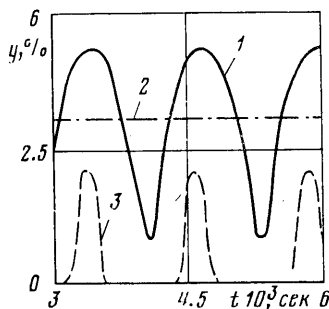
На фиг. 2 приведены «осциллограммы» давления в различных сечениях сопла 1, 3, 5. Как видно из этих графиков, амплитуда пульсации убывает по длине сопла и на выходе из сопла в 3 раза меньше, чем в начале, оставаясь значительной по отношению к местному давлению ( $\Delta \epsilon/\epsilon \geq 25\%$ ). Форма кривых практически не изменяется по длине сопла. Кривые пульсаций для различных сечений сопла сдвинуты по фазе, что объясняется конечной скоростью распространения возмущений. Кроме того, для сравнения приведена кривая 4, относящаяся к расчету со спонтанной конденсацией пара. Следует отметить, что при примерно равной амплитуде пульсаций на выходе амплитуда пульсаций в критическом сечении существенно меньше для двухфазного потока по сравнению с однофазным. Это, по-видимому, вызвано тем, что наличие влаги (скачок конденсации) демпфирует возмущение давления (так, например, если возмущение, приходящее от входа, приводит к такому падению давления и температуры, что начинается конденсация, то выделение тепла конденсации приводит к обратному эффекту — росту  $T$  и  $p$ ). Результирующее отклоне-

ние параметров от стационарных вследствие этого падает. Эта аномалия характерна лишь для областей течения, близких к  $\Delta T = \Delta T_k$ .

На фиг. 3 приведены «осциллограммы» числа Маха (кривая 1) в критическом сечении 3, а также переохлаждения потока (кривые 2—4) в сечениях 2, 3, 4. По изменению числа Маха видно, что для нестационарных



Фиг. 3

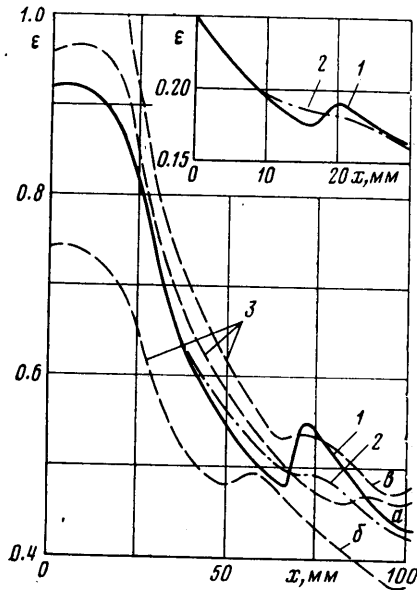


Фиг. 4

течений переход через скорость звука может осуществляться как до критического сечения, так и после него. Штрихпунктирная и пунктирная линии на графике  $\Delta T = \Phi(t)$  соответствуют стационарному процессу расширения в данном сопле с наличием спонтанной конденсации. Штрихпунктирная линия 3 соответствует переохлаждению в зоне скачка конденсации в сечении 4 (распределение давления для этого случая (фиг. 5 (кривая 1)), а пунктирная линия 4 соответствует сечению 2, находящемуся на расстоянии 45 мм от входа в сопло (данное сечение находится в дозвуковой зоне сопла). Отметим, что при нестационарных граничных условиях на входе в критическом сечении 3 сопла (кривая 2) периодически возникает переохлаждение потока, большее, чем  $\Delta T = \Delta T_k$ , необходимое для начала интенсивной (скачкообразной) конденсации. Даже в дозвуковой области сопла на расстоянии 45 мм от входа переохлаждение потока (кривая 4) может превышать критическую величину  $\Delta T_k$ . Причем время существования «избытка» переохлаждения  $\delta T = \Delta T - \Delta T_m > 0$  существенно превышает время релаксации процесса конденсации  $\tau_{pk}$  при этих значениях  $\Delta T$  ( $\tau_{pk} \leq 10^{-5}$  сек). Из этого можно предположить, что процесс конденсации при наличии периодической нестационарности перед соплом будет приводить к образованию влаги выше по потоку по сравнению со стационарным случаем. Такое предположение полностью подтверждается численным расчетом, проведенным для случая периодической нестационарности на входе при течении спонтанно конденсирующей среды.

На фиг. 4 приведены кривые изменения во времени степени влажности  $y$  для сечения 5 на выходе (кривая 1) и в критическом сечении 3 (кривая 3). Важно отметить, что уже в критическом сечении наблюдается значительное влагообразование ( $y_m \approx 2.5\%$ ), т. е. поток почти равновесен. Степень неравновесности в критическом сечении  $d = (y_0 - y) / y_0 \approx 0.17$ . При стационарном течении поток полностью переохлажден  $d = 1$  и скачок конденсации возникает только за критическим сечением.

На фиг. 5 показано распределение давлений по длине сопла. Кривая 1 соответствует стационарному расширению насыщенного пара со спонтанной конденсацией. На этой кривой виден ярко выраженный скачок конденсации. Кривая 3 соответствует различным моментам времени в случае нестационарных граничных условий на входе ( $a - t' = 0.175$ ,  $b - 0.38$ ,  $c - 0.63$ ). Кривая 2 — это усредненное во времени распределение давления при переменной скорости на входе. Такое же «размазывание» зоны интенсивной спонтанной конденсации и некоторое ее смещение против потока было получено экспериментально [11]. В эксперименте периодическая входная нестационарность моделировалась следующим образом. Перед соплом Лавала с площадью горла  $F_* = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  вращался диск с цилиндрическими стержнями диаметром  $D = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Частота пульсаций параметров в сопле от прохождения стержней перед ним изменялась в диапазоне  $f = 0.3 - 1.1 \text{ кгц}$  (на фиг. 5 в правом верхнем углу  $f = 0.8 \text{ кгц}$ ). Измерение частоты и амплитуды пульсаций статического давления производилось тензодатчиками, встроенными в плоскую стенку сопла. По опытным данным, амплитуда пульсаций давления в горле сопла составляла 20% от среднего статического давления (сравнить с расчетной кривой фиг. 2, где  $\Delta \epsilon / \epsilon \approx 25\%$ ). Местоположение «скачка» конденсации определялось с помощью зонда статического давления, перемещаемого вдоль оси сопла. При измерении зонд осреднял давление, вследствие чего «скачок» конденсации представлялся сглаженным.



Фиг. 5

Таким образом, как результаты экспериментов, так и их объяснение, приведенное в [11], находятся в согласии с результатами достаточно общей теории нестационарных течений с неравновесными фазовыми превращениями, представленными на фиг. 5.

Отметим, что теоретические результаты в данном случае не учитывают возможность возникновения гетерогенной конденсации. Это можно сделать, если известно число гетерогенных центров конденсации  $n_0$ , добавляя соответствующие «источниковые» члены в правые части кинетических уравнений, описывающих фазовые превращения.

Поступила 28 VI 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов И. И., Ласкин А. С. Нестационарные процессы в межлопаточных каналах турбомашин. «Энергомашиностроение», 1972, № 5.
2. Дейч М. Е., Филиппов Г. А., Салтанов Г. А., Кукушкин А. Н. Влияние периодических возмущений на характер течения пара в конфузорных каналах. Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1976, № 5.
3. Самойлович Г. С. Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин. М., «Наука», 1969.
4. Kazimirski Z. Płaski przepływ przez osiowy stopień maszyny przepływowej o dowolnych parametrach geometrycznych. Arch. Budowy maszyn, 1966, t. 13, No. 2.

5. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М., «Наука», 1976.
  6. Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной. Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1961, т. 1, № 6.
  7. Салганов Г. А. Нестационарные течения перегретого и конденсирующегося пара. 3 konferencja Naukowa Turbiny Parowe Wieckiej Mocy. Gdansk, 1974. Prace Inst. Maszyn Przeplywowych., 1976, No. 70—72.
  8. Салганов Г. А., Ткаленко Р. А. Исследование трансзвукового нестационарного течения при наличии фазовых превращений. ПМТФ, 1975, № 6.
  9. Салганов Г. А., Симановский Г. П. Двумерные смешанные течения пересыщенной и двухфазной среды с неравновесными фазовыми превращениями. Изв. АН СССР, МЖГ, 1978, № 4.
  10. Дорфман Л. А. Численные методы в газодинамике турбомашин. Л., «Энергия», 1974.
  11. Кириллов И. И., Ташпулатов А. Ш. Процессы конденсации в турбинных ступенях при нестационарном течении пара. «Энергомашиностроение», 1975.
-