

А.Р. Аветисян¹, Л.И. Зайчик², Г.А. Филиппов¹

ФГУП Всероссийский научно-исследовательский и проектно конструкторский институт
атомного энергетического машиностроения, Россия (1)

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия (2)

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА СТАЦИОНАРНЫЕ И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ СПОНТАННО КОНДЕНСИРУЮЩЕГО ПАРА В ТРАНСЗВУКОВЫХ СОПЛАХ

АННОТАЦИЯ

Целью работы является анализ эффектов турбулентности на процессы тепломассообмена в течениях переохлажденного пара со спонтанной конденсацией. Представлены результаты расчетов стационарных и нестационарных турбулентных течений спонтанно конденсирующего пара в трансзвуковых соплах Лавала. Приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

1. ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные течения, содержащие жидкие капельки, встречаются в различных технических установках и в атмосферных явлениях. К таким течениям относятся конденсационные течения пара в проточных частях паровых турбин, формирование конденсационных следов от выхлопов двигателей самолетов, горение жидких струй и т.д. Традиционно двухфазные околозвуковые течения в соплах Лавала и в турбинных решетках моделируются в газодинамическом приближении, игнорирующем эффекты вязкости, теплопроводности, и турбулентности (например, см. [1–4]). Пренебрежение молекулярными эффектами вязкости и теплопроводности обусловлено большими скоростями течения, при которых молекулярные механизмы переноса импульса и тепла действительно являются второстепенными по сравнению с турбулентными механизмами переноса. Напротив, турбулентность оказывает существенное влияние не только на процессы трения и теплообмена в пограничных слоях вблизи стенок сопла (в частности, на возможное осаждение капель), но может также играть значительную роль в формировании скачка спонтанной конденсации при течении переохлажденного пара. Поэтому целью настоящей работы является анализ влияния турбулентности потока на процесс спонтанной конденсации переохлажденного пара.

В работе рассматриваются эффекты турбулентности на процесс зародышеобразования и роста капель в трансзвуковых соплах Лавала. Скорость зародышеобразования при спонтанной конденсации определяется по классической теории Волмера–Френкеля–Зельдовича. Скорость роста капель вычисляется по теории Герца–Кнудсена. Эволюция спектра капель во времени и по пространству описывается кинетическим уравнением для функции плотности вероятности распределения масс. Кине-

тическое уравнение решается методом моментов. Турбулентные характеристики двухфазного потока рассчитываются на основе двухпараметрической модели турбулентности, включающей уравнение для турбулентной энергии k и скорости ее диссипации ϵ . Используемая модель турбулентности (МТ) отличается от стандартной $k-\epsilon$ модели (СТ) в двух аспектах. Во-первых, вместо стандартного выражения для коэффициента турбулентной вязкости вводится модифицированный, который является функцией отношения "порождение/диссипация". Во-вторых, учитывается модуляция турбулентности из-за капелек. Для этой цели уравнения для k и ϵ дополнены соответствующими источниковыми членами, которые учитывают дополнительное рассеяние и подавление турбулентности капельками. Уравнения для моментов функции плотности вероятности распределения масс, описывающие процессы зародышеобразования и динамику образовавшейся влаги, интегрируются совместно с решением уравнений сохранения для турбулентного сжимаемого течения пара.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Были выполнены двухмерные расчеты для режимов течений, соответствующих экспериментальным исследованиям, описанным в [5] и [6], без начальной влажности на входе в сопло, когда капельки формируются только из-за спонтанной конденсации. Особое внимание уделялось условиям возникновения стационарных или нестационарных течений за счет спонтанной конденсации и эффектов турбулентности. Для этой цели варьировались полное давление p_0 и полная температура T_0 на входе в сопло. Также варьировалась входная интенсивность турбулентности $\chi_0 = (k^{1/2}/W)_0$, где W_0 средняя скорость потока на входе. Сухой пар, в состоянии близком к линии насыщения, расширяясь в сопле, может достигнуть переохлаждения 30–40 К в сверхзвуковой части течения. При таких значениях переохлаждения начинается спонтанная конденсация, приводящая к росту давления и температуры пара. Такой рост может быть очень резким, поэтому часто это явление называют «скачком конденсации». На рис. 1–3 представлены результаты вычислений для режимов $p_0 = 78100$ Па, $T_0 = 376$ К, опи-

санного в [5], и $p_0=36700$ Па, $T_0=353$ К, приведенного в [6], соответственно. При этих параметрах процесс конденсации является стационарным. Из рис. 1, где приведены контуры числа Маха, можно увидеть общий характер течения. Рис. 2, а и 3, а показывают распределение давления по оси сопла. Здесь давление отнесено к полному давлению на входе в сопло p_0 , а ось абсцисс – к длине сопла L . На рис. 2, б и 3, б приведены осевые распределения турбулентной энергии, отнесенной к скорости на оси сопла. Сравнение вычисленного давления по модели МТ при низкой степени турбулентности на входе в сопло ($\chi_0=0.02$) и экспериментального значения показывает их хорошее соответствие как по месту, так и по значению скачка конденсации. В то же время результаты, полученные по СТ модели для низкой степени турбулентности и по модели МТ при высокой ($\chi_0=0.2$) степени турбулентности, существенно далеки от экспериментов. За счет больших значений турбулентной вязкости вблизи оси сопла при высокой степени входной турбулентности скачок конденсации исчезает и давление, а также другие параметры течения становятся гладкими. Как видно из рис. 2, б и 3, б (кривая 3), стандартная $k-\epsilon$ модель (СТ) дает слишком высокий уровень турбулентной энергии, что тоже ведет к исчезновению скачка конденсации.

При уменьшении начального перегрева стационарный скачок конденсации перемещается против потока к критическому сечению сопла. Это заканчивается, в конечном счете, кризисом стационарного течения, вследствие чего устанавливается нестационарный автоколебательный режим течения. Автоколебания возникают за счет механизма обратной связи, который реализуется при взаимодействии газодинамических скачков уплотнения с подводом тепла за счет интенсивного ядрообразования вследствие спонтанной конденсации в околосзвуковой области течения [7]. На рис. 4, а и 4, б представлены результаты расчетов нестационарных режимов течений со спонтанной конденсацией при начальных параметрах $p_0=93400$ Па, $T_0=376$ К и $p_0=35100$ Па, $T_0=348$ К, описанных в экспериментальных исследованиях [5] и [6] соответственно.

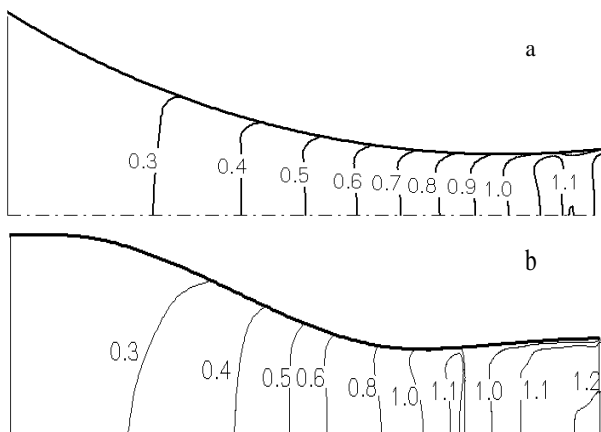


Рис. 1. Контурсы числа Маха: а – сопло [5], б – сопло [6]

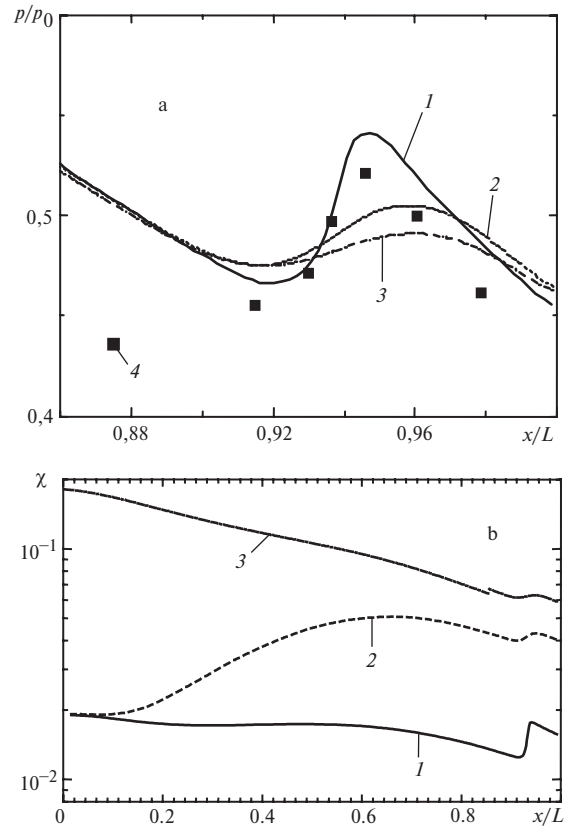


Рис. 2. Распределение давления (а) и интенсивности турбулентности (б) вдоль оси сопла: 1 – модель МТ при $\chi_0=0.02$; 2 – модель МТ при $\chi_0=0.2$; 3 – модель СТ при $\chi_0=0.02$; 4 – эксперимент [5]

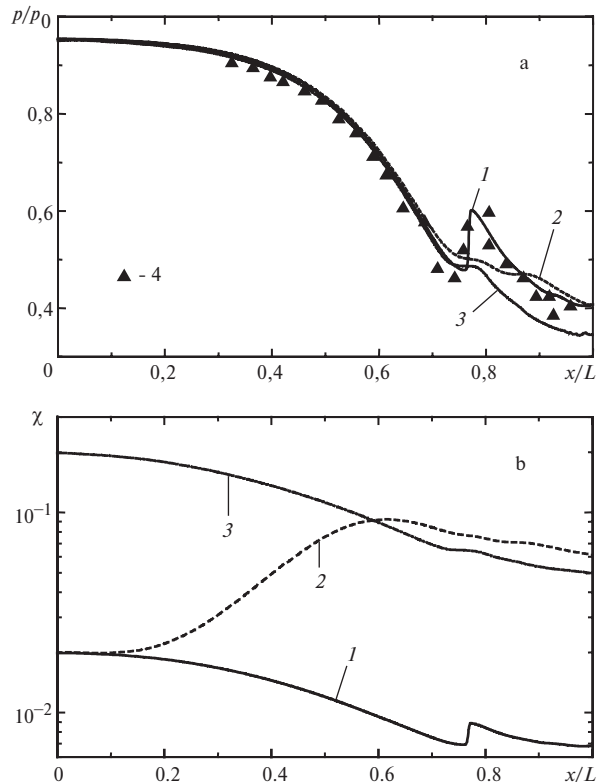


Рис. 3. Распределение давления (а) и интенсивности турбулентности (б) вдоль оси сопла: 1 – модель МТ при $\chi_0=0.02$; 2 – модель МТ при $\chi_0=0.2$; 3 – модель СТ при $\chi_0=0.02$; 4 – эксперимент [6]

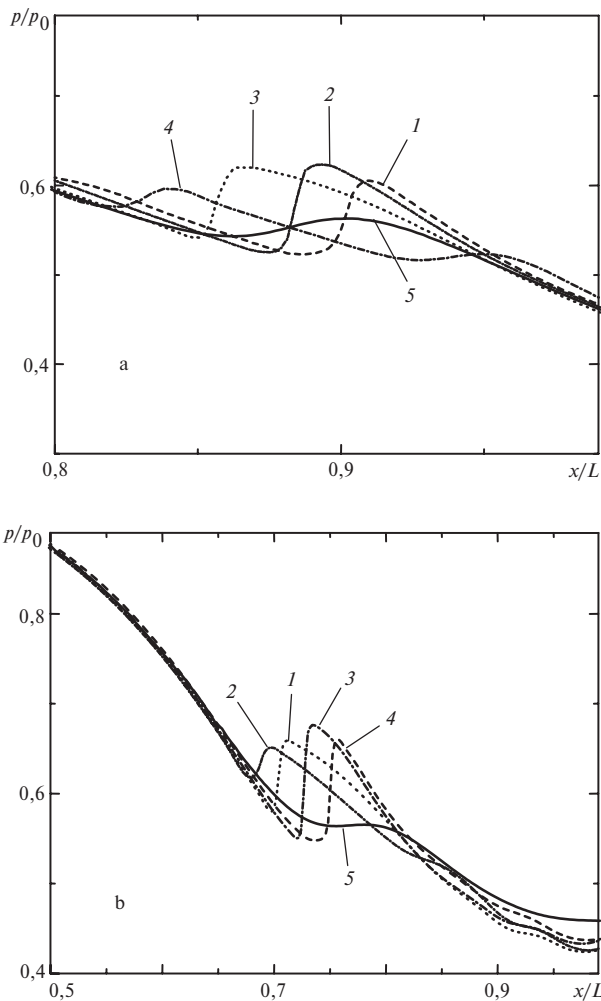


Рис. 4. Распределение давления вдоль оси сопла в различные моменты времени: а – сопло [5]; б – сопло [6]; 1–4 – модель МТ; 5 – модель СТ

На этих рисунках кривые 1–4 представляют собой распределения давления вдоль оси сопла в различные моменты времени. Указанные кривые получены с помощью МТ модели низкой степени турбулентности на входе в сопло ($\chi_0 = 0.02$). Получены частоты пульсации давления 840 и 410 Г при экспериментальных значениях 810 и 380 Г соответственно. Как видно из рис. 4 (кривые 5), применение стандартной $k-\epsilon$ модели при расчетах автоколебательных процессов в соплах дает неадекватные результаты. Похожие результаты получаются при

расчетах с высоким уровнем турбулентности на входе в сопло. В этом случае вместо переменного по пространству и времени скачка спонтанной конденсации мы имеем стационарный скачок небольшой величины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы из проведенной работы можно сформулировать следующим образом.

Стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности не пригодна для расчета как стационарных, так и нестационарных течений со спонтанной конденсацией.

Модифицированная турбулентная вязкость в рамках $k-\epsilon$ модели может быть успешно применена для моделирования рассматриваемых течений и дает адекватные результаты как при стационарном, так и при нестационарном процессе спонтанной конденсации.

Предложенный метод дает адекватное описание сверхзвуковых течений со спонтанной конденсацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Skillings S. A. and Jackson R.** A robust time -marching solver for one-dimensional nucleating steam flows // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 1987. 8. P. 139–144.
2. **Delale F., Schnerr G. H. and Zierep J.** Asymptotic solution of transonic nozzle flows with homogeneous condensation. I. Subcritical flows // *Phys. Fluids A*. 1993. 5: 2969–2981.
3. **White J. and Young J. B.** Time-marching method for the prediction of two-dimensional, unsteady flows of condensing steam // *J. Propulsion and Power*. 1993. 9. 579–587.
4. **Аветисян А.Р., Алипченков В.М., Зайчик Л.И.** Моделирование течения спонтанно конденсирующегося влажного пара в соплах Лавала // *ТВТ*. 2002. Т. 40. № 6. С. 938–946.
5. **Barschdorff D.** Droplet formation, influence of shock waves and instationary flow patterns by condensation phenomena at supersonic speeds // *In Int. Conference of Rain Erosion and Associated Phenomena*. Farnborough. 1970. P. 691–705.
6. **Skillings S. A., Walters P. T and Moore M. J.** A study of supercritical heat addition as potential loss mechanism in condensing steam turbines // *In I. Mech. Eng. Conf.* 1987. C259/87. P. 125–134.
7. **Дейч М.Е., Филиппов Г.А.** Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоатомиздат, 1981.