

Э.Э. Шпильрайн², С.И. Вайнштейн³, А.П. Севастьянов¹, Ю.А. Севастьянов¹

Московский энергетический институт (технический университет), Россия (1)

Институт высоких температур РАН, Москва, Россия (2)

Московский государственный университет инженерной экологии, Россия (3)

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СВЕРХЗВУКОВОГО ДВУХФАЗНОГО ДИФфуЗОРА КОНДЕНСИРУЮЩЕГО ИНЖЕКТОРА

АННОТАЦИЯ

Процессы в камере смешения (КС) конденсирующего инжектора (КИ) завершаются переходом к сверхзвуковому потоку пенной или пузырьковой структуры. При наличии противодействия (достаточной интенсивности) пузырьковое течение скачком преобразуется в однофазное жидкое течение.

Повышение давления в двухфазном потоке большой влажности при течении в диффузоре происходит в два этапа: 1) в скачке; 2) при торможении несжимаемой жидкости в расширяющемся канале. Поэтому возникает вопрос о наиболее выгодном сочетании этих двух этапов, при котором обеспечивается максимально возможное повышение давления в диффузоре.

В работе проанализирована модель течения в двухфазном диффузоре, построенная на экспериментально обоснованных допущениях, проведена оценка влияния на выходное противодействие объёмного влагосодержания и представлена формула, определяющая оптимальное влагосодержание, соответствующее максимальному противодействию

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерения скорости жидкой фазы в конце камеры смешения и диффузоре, проведённые авторами, показывают, что скорость потока в двухфазной зоне (равная скорости жидкости из-за малого скольжения) на всех режимах больше равновесной (термодинамической) скорости звука a_l , но существенно меньше замороженной скорости звука a_f . Следовательно, по отношению к a_l поток является сверхзвуковым и поэтому должны проявляться эффекты, характерные для сверхзвукового режима течения. В этих условиях при повышении давления P_d в диффузоре появляется полностью размытая ударная волна, перемещающаяся по мере увеличения P_d к горлу диффузора. Её интенсивность при этом увеличивается и возрастает число Маха M_l , рассчитанное по значению равновесной скорости звука a_l . Вдоль камеры смешения, начиная с сечения структурного перехода, M_l немонотонно возрастает, так что в горле диффузора имеется максимум M_l , связанный с устойчивостью положения скачка в горле диффузора [2]. Из опытов также следует, что при повышении значений P_d давление в камере смешения не изменяется, т.е. течение в конце камеры смешения и диффузоре остаётся сверхзвуковым

и по отношению к возмущениям, возникающим в диффузоре конденсирующего инжектора.

2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СВЕРХЗВУКОВОГО ДВУХФАЗНОГО ДИФфуЗОРА

Опытные данные показывают, что при скоростях двухфазного потока большой влажности, превосходящих местную термодинамическую скорость звука, процесс восстановления в диффузоре существенным образом отличается от восстановления давления в однофазных потоках. Это различие связано с наличием зоны весьма больших положительных градиентов давления и плотности (далее эта зона называется просто скачком), в которой происходит конденсация паровой фазы.

Изменение давления за диффузором (противодействие) приводит к перемещению скачка в продольном направлении, не оказывая влияния на участок течения, расположенный перед скачком. При изобарической конденсации в КС КИ, что наблюдается в экспериментах при значениях $\bar{F}_{гд} > 0,7$, максимальному значению противодействия, при котором ещё возможно установившееся течение, соответствует расположение скачка в устье (горловине) диффузора. При этом фронт скачка достаточно близок к прямому. В этом случае модель течения может быть представлена следующим образом: на входе в диффузор поток двухфазный, одномерный, равновесный термодинамически, течение установившееся, скольжение фаз отсутствует; в цилиндрической части (горле) диффузора расположен прямой скачок, в котором происходит полная конденсация пара. Протяжённость скачка полагается нулевой; при этом допускается, что потерями трения в зоне скачка можно пренебречь.

Восстановление давления определяется на основании законов сохранения количества движения и массы в следующем виде:

$$\Delta p = p_d - p_1 = \frac{1}{2} \rho_{ж} [2C_2(C_1 - C_2) + (C_2^2 - C_0^2) \times (1 - \xi_d)] = \rho_{ж} [C_2 C_1 - 0,5 C_2^2 (2 - \eta_d)], \quad (1)$$

где $\eta_d = 1 - \xi_d = (p_d - p_2) / (0,5 \rho_{ж} C_2^2)$ – КПД диффузора; ξ_d – коэффициент диссипативных потерь в расходящейся части диффузора; C – скорость по-

тока; индексы «1», «2» и «д» относятся к сечениям перед скачком, за ним и на выходе из диффузора.

Величина ξ_d в общем случае зависит от формы диффузора и условий на входе в него. В первом приближении можно полагать, что для диффузора данной геометрии в каждом рассматриваемом случае величина ξ_d может быть задана.

Введя масштаб, который имеет физический смысл динамического напора в предельном случае полной конденсации паровой составляющей перед скачком, и преобразуя (1) к удобному для анализа виду, получаем

$$\Delta\bar{p} = \Delta p / (0,5\rho_{ж}C_1^2) = 2[\varphi_{ж}(1-\bar{p}) + \rho] + (1-\varphi_{ж})(1-\bar{p}) + (1+\xi_d)[\varphi_{ж}(1-\bar{p}) + \bar{p}]^2, \quad (2)$$

где $\varphi_{ж}$ – доля сечения перед скачком, занятая жидкостью, которая при отсутствии скольжения численно совпадает с объемным влагосодержанием; $\bar{p} = \rho_{п} / \rho_{ж}$.

Построенный таким образом безразмерный перепад давления $\Delta\bar{p}$, хотя численно и не совпадает с КПД двухфазного диффузора, все же является некоторой мерой эффективности процесса восстановления в системе скачок – диффузор.

Анализ (2) показывает, что в случае $\bar{p} = const$, соответствующем постоянству давления (температуры) двухфазного потока перед скачком, зависимость $\Delta\bar{p}(\varphi)$ имеет максимум:

$$\varphi_{ж\ opt} = \left(1 - \frac{\bar{p}}{1+\bar{p}}\xi_d\right)(1+\xi_d). \quad (3)$$

При этом в области низких давлений, характерных для органических рабочих тел (ОРТ), $\bar{p} \ll 1$. Это позволяет при $\varphi_{ж} \gg \bar{p}$ упростить выражения (2) и (3):

$$\Delta\bar{p} = 2\varphi_{ж} - (1+\xi_d)\varphi_{ж}^2; \quad (4)$$

$$\varphi_{ж\ opt} = 1/(1+\xi_d). \quad (5)$$

Графическое изображение зависимости (4) представлено на рис.1. На линии $\xi_d = 1$ давление на выходе из диффузора равно давлению непосредственно за скачком вследствие того, что все количество движения за скачком затрачивается на преодоление потерь в диффузоре $\Delta p = \Delta p_{ск}$. Следовательно, эта кривая одновременно отображает восстановление давления собственно в скачке (для всех значений ξ_d). С увеличением объемного влагосодержания сжимаемость потока уменьшается, что влечет за собой уменьшение потерь в скачке, заканчивающееся полной конденсацией, но при этом одновременно уменьшается используемая для повышения давления в скачке разность количества движения $C_1/C_2 = 1/\varphi$. Наличием двух действующих в противоположных направлениях эффектов объясняется существование максимума $\Delta\bar{p}$ по $\varphi_{ж}$.

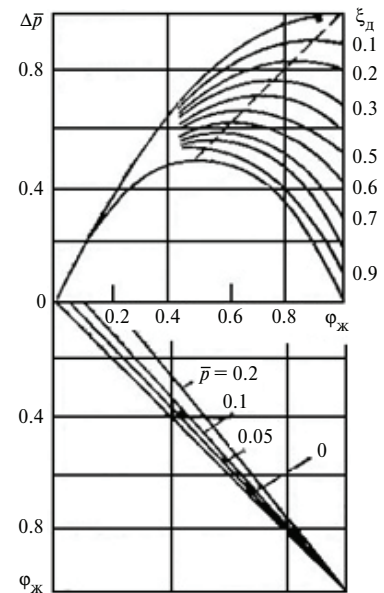


Рис. 1. Графики относительного восстановления давления в двухфазном диффузоре

При $\xi_d = 1$ максимальное восстановление давления имеет место при $\varphi_{ж} = 0,5$, а после подстановки $\varphi_{ж\ opt} = 0,5$ в (2) находим $\Delta\bar{p}_{max} = 0,25\rho_{ж}C_1^2$.

При $\xi_d = 0$ $(\varphi_{ж\ opt})_{\xi_d=0} = 1$. Это значит, что для достижения наибольшей эффективности двухфазного диффузора, при условии $\xi_d = 0$ все восстановление давления следовало бы проводить в диффузоре без скачка (что осуществимо для потока, объемное паросодержание которого практически равно нулю).

Из (2) видно, что влияние ξ_d , если его рассматривать как независимый параметр, является линейным и проявляется почти прямо пропорционально величине $\varphi_{ж}^2$:

$$\partial\Delta\bar{p} / \partial\xi_d = -[\varphi_{ж}(1-\bar{p}) + \bar{p}]^2.$$

Очевидно, что $\Delta\bar{p}$ совершенно одинаковым образом зависит от $\varphi_{ж}$ (при условии, что $\varphi_{ж} \gg \bar{p}$) и от $\bar{C} = C_2/C_1$ (независимо от характера изменения \bar{p} и $\varphi_{ж}$). Поэтому кривые $\Delta\bar{p}(\varphi_{ж})$ при ξ_d как параметре на рис.1 тождественно совпадают с кривыми $\Delta\bar{p}(\bar{C})$ при ξ_d как параметре. Для удобства представления в таком виде в нижней половине рис.1 построена зависимость $\varphi_{ж}(\bar{C})$ (при \bar{p} как параметре), представляющая собой семейство прямых, проходящих через точку $\bar{C} = 1, \varphi_{ж} = 1$ и точки $\bar{C} = \bar{p}$ при $\varphi_{ж} = 0$. Поэтому можно, установив значение \bar{C} , затем определять φ (по заданному \bar{p} или наоборот). Рассмотрение семейства прямых $\varphi(\bar{C})$ еще раз подтверждает, что при $\Delta\bar{p}(\bar{C})$ $\bar{p} \ll \varphi_{ж}$, $\varphi_{ж} \approx \bar{C}$ и ось абсцисс можно рассматри-

вать как ось \bar{C} и $\varphi_{ж}$ одновременно. При таком представлении зависимости (1) безразмерное восстановление давления является функцией только двух аргументов, один из которых определяет интенсивность скачка, а другой – диссипативные потери в дозвуковом потоке за скачком, т.е. достигается предельная простота связей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При повышении давления в КИ в два этапа, при принятых допущениях и изобарической КС получена формула, определяющая оптимальное влагосохранение, соответствующее максимальному противодействию. Уменьшение проходного сечения горла диффузора ведет к неизобаричности КС, появлению больших градиентов давления в конце КС (в сверхзвуковом потоке), что создает условия для неизбежного возникновения скачков уплотнения. Перемещение начала скачка в КС, увеличение его глубины вызывают заметное повышение потерь в скачке и в КС, которое ослабляет заметным образом выигрыш в эффективности, ожидаемой от уменьшения $\bar{F}_{гд}$. Расположение скачка в зоне площади

КС, большей, чем площадь горловины диффузора, соответствует значению $\varphi_{ж}$, отличному от $\varphi_{ж\text{opt}}$.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- p – давление, Н/м²;
 C – скорость, м/с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 φ – объемное соотношение;
 ξ – коэффициент диссипативных потерь;
 η – коэффициент полезного действия;
 Δ – разность.
Индексы:
п, ж – пар, жидкость;
1 – состояние до скачка;
2 – состояние после скачка;
д – диффузор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ эффективности работы однокомпонентного конденсационного инжектора с малым горлом диффузора / Э.Э. Шпильрайн, И.В. Ан, С.И. Вайнштейн, А.П. Севастьянов и др. // Теплоэнергетика. 1976. № 5. С. 62–70.