

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 (3)

ТЕЧЕНИЕ ДВУХФАЗНОГО КОНДЕНСИРУЮЩЕГОСЯ ПОТОКА В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ КОНДЕНСИРУЮЩЕГО ИНЖЕКТОРА

АННОТАЦИЯ

Основные процессы взаимодействия спутных струй пара и жидкости, превращения энергии и конденсации пара происходят в камере смешения (КС) конденсирующего инжектора (КИ), и их правильное понимание и описание являются ключевым моментом для расчета аппарата.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования КИ с центральным подводом пара. Они позволили выявить основные процессы взаимодействия смешивающихся потоков, структуру двухфазного потока в проточной части и влияние площади выходного сечения КС на эти процессы.

1. ВВЕДЕНИЕ

В конденсирующем инжекторе энтальпия термодинамического рабочего тела (пара) при взаимодействии с охлаждающей жидкостью преобразуется в кинетическую энергию смешанного жидкостного потока, давление торможения которого может быть больше давления торможения любого из потоков, входящих в аппарат. Принцип действия КИ можно представить следующим образом.

В паровом сопле Лавала (рис. 1) происходит превращение энтальпии рабочего тела в кинетическую энергию потока пара, с которой он поступает в камеру смешения 3. Через суживающееся жидкостное сопло 2 в камеру подается холодная жидкость. В камере смешения происходит обмен импульсом между паром и жидкостью и конденсация пара на жидкости. Коэффициенты теплоотдачи при конденсации смешением на порядок и более превышают коэффициенты теплоотдачи в случае поверхностной конденсации. По длине камеры смешения паросодержание падает. На коротких длинах структура потока меняется от капельного до пузырькового или пенного, где скорость звука резко уменьшается. Поток при умеренных скоростях становится сверхзвуковым, и процесс конденсации заканчивается в диффузоре 5. При наличии нагрузки-сопротивления на выходе из инжектора конденсация завершается в совмещенном скачке уплотнения – конденсации, в котором двухфазный поток быстро переходит в однофазное течение жидкости.

За скачком в инжекторе поток имеет однородную структуру (жидкая фаза практически лишена паровых пузырьков). В диффузоре кинетическая энергия потока несжимаемой жидкости превращается в потенциальную энергию давления. Преобразование осуществляется в два этапа: 1) в скачке уплотнения-конденсации; 2) при торможении чисто жидкостного потока в диффузоре.

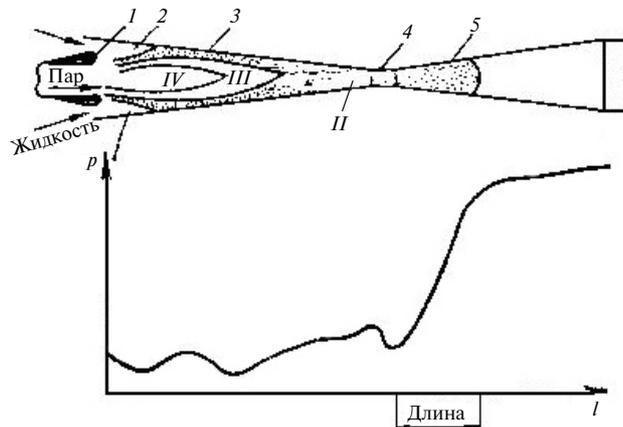


Рис. 1. Режимы течения и распределения статического давления по длине инжектора: I – однофазный жидкостный поток; II – пенно-пузырьковый; III – парокapельный; IV – паровой; 1 – паровое сопло; 2 – жидкостное сопло; 3 – камера смешения; 4 – горловина диффузора; 5 – диффузор

2. ПРОЦЕССЫ В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ

Пар и жидкость поступают в КС в виде спутных струй с различными температурами и скоростями. По этой причине течение в КС имеет ряд специфических особенностей. Эксперименты, проведенные на плоских оптических моделях, показали, что течение в КС расслоенное: на начальном участке существует чисто паровой слой (факел) и жидкостный слой (при впрыске жидкости через периферийную щель большой высоты); затем следует слой смешения (двухфазный парокapельный поток, начальная высота которого определяется высотой кромки на срезе парового сопла) [1]. По мере удаления от среза сопел исчезает жидкостный слой, затем – паровой факел. В конце камеры при малых значениях $\bar{F}_{гд}$ и достаточно больших значениях U происходит структурный переход от капельного потока к пенному (квазипузырьковому) без возникновения скачков уплотнения.

В КС можно выделить три границы между зонами (слоями) течения (рис.1): паровым факелом (слой IV) и парокapельным потоком с малым содержанием капель (слой III); слоем III и потоком с большим содержанием капель (слой II), оптически непрозрачным для проходящего света; слоем II и чистой жидкостью (слой I).

В диффузоре режим течения изменяется в зависимости от давления на выходе из аппарата p_d .

Давление на большей части КС определяется паровой фазой, так как объемное содержание пара в ней, за исключением небольшой области вблизи горла диффузора, велико и лежит в пределах 0,99...0,85. Движение сверхзвукового потока в КС происходит под влиянием геометрического, теплового и расходного воздействий, причем геометрическое и расходно-тепловое воздействия разного знака.

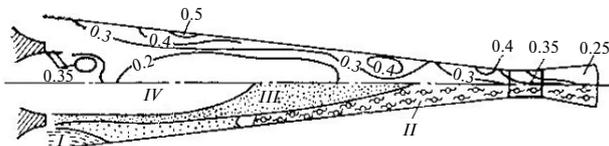


Рис. 2. Схема распределения относительного давления и зоны характерных течений в камере смешения

Результаты замеров статического давления в КС представлены на рис. 2. Они показывают, что поле давления существенно неоднородно, особенно на начальном участке и в конце КС, включая горло диффузора. В то же время в центральной части КС имеется достаточно большая область течения, где статическое давление практически постоянно и имеет минимальное значение. Необходимо указать также на снижение давления на оси канал на начальном участке КС и наличие зон постоянного давления в областях, расположенных недалеко от срезов жидкостных сопел. Значительные градиенты давления имеются перед горлом диффузора и в пристеночных областях на расстоянии 30...60 мм от срезов сопел.

Обращает на себя внимание большое отличие измеренного давления вдоль образующих профиль камеры смешения стенок от распределения давления на оси КС и параллельных ей линиях. Незабывчивость КС вызвана: несовпадением давления на срезе сопла с давлением насыщения в конце КС, рассчитанного по возрастающей по мере конденсации пара среднемаассовой температуре жидкой фазы; а также натеканием двухфазного слоя смешения и парового факела на стенки суживающейся КС; инерционностью капель и несовпадением траектории капель с осью камеры; инерционностью жидкой фазы в радиальном движении при пульсациях пузырьков в конце камеры, горловине диффузора и начальных сечениях диффузора.

Особый интерес представляет анализ влияния на распределение статического давления вдоль проточной части КС $p_{КС}$ (особенно вблизи горла диффузора) геометрического воздействия, одной из характеристик которого служит относительная площадь горла диффузора $\bar{F}_{ГД} = F_{ГД} / F_{ПС}^{кр}$. При анализе целесообразно пользоваться относительным статическим давлением $\bar{p}_к$. При его расчете в качестве масштаба применяется давление насыщения, соответствующее температуре жидкости на выходе из конденсирующего инжектора $T_{см}$. Это давление характеризует некоторым образом уровень давления в КС и принимается в качестве расчетного $p_{КС,расч}$. Локальные значения $p_{КС}$ могут отличаться

не только от $p_{КС,расч} = p_s(T_{см})$, но и от местных значений p_s в меру суммарного воздействия на предшествующем участке канала.

Опытные данные по распределению $p_{КС}$ вдоль камеры смешения при $p_{оп} = 0,16$ МПа, $U = 14,0$, скорости жидкостного потока $C_{ж} \leq 8$ м/с и разных значениях $\bar{F}_{ГД}$ представлены на рис.3.

Анализ графиков изменения $p_{КС}$ позволяет выделить три характерные области. Во входной части КС наблюдается интенсивное падение давления вследствие продолжающегося за срезом парового сопла разгона сверхзвуковой струи и последующее столь же интенсивное восстановление его, которое обычно наблюдается при перерасширении сверхзвуковой струи ниже давления в окружающей среде. Эти процессы осложнены интенсивной конденсацией на границах струи, приводящей к заметному изменению по длине температуры поверхности раздела фаз и, следовательно, к увеличению давления насыщения. В этой области влияние $\bar{F}_{ГД}$ сказывается слабо, однако тенденция к смещению кривых вверх по мере уменьшения $\bar{F}_{ГД}$ все же имеет место.

В средней части КС наблюдается некоторое уменьшение статического давления вдоль течения, однако градиенты давления столь малы, что в первом приближении кривые на этом участке можно считать горизонтальными.

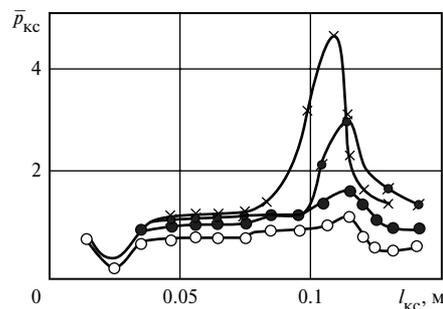


Рис. 3. Графики распределения относительного давления по длине камеры смешения:

○ — при $\bar{F}_{ГД} = 0,606$; ● — при $\bar{F}_{ГД} = 0,440$;
 * — при $\bar{F}_{ГД} = 0,25$; × — при $\bar{F}_{ГД} = 0,15$

При этом интенсивность процессов обмена количеством движения и конденсации уменьшается и давление приближается к равновесному. Начинает более заметно сказываться влияние проходного сечения горла. При уменьшении значений $\bar{F}_{ГД}$ в четыре раза давление $\bar{p}_к$ на этом участке увеличивается приблизительно на 20...25%.

Область, прилегающая к горлу диффузора, характеризуется наличием положительного градиента давления. Влияние размера горла является здесь уже весьма существенным. Чем меньше $\bar{F}_{ГД}$, тем больше значение $\bar{p}_к$ в точке максимума и тем больше смещается он вверх по потоку; кроме того,

положительный градиент возрастает, а начало интенсивного подъема давления смещается в глубь камеры смешения.

Опытные данные, представленные на рис. 3, получены при противодавлении, равном атмосферному. По этой причине в горле диффузора вслед за участком с положительным градиентом давления сначала наблюдается падение давления \bar{p}_k , а затем – последующие пики давления, что свидетельствует о наличии системы скачков. По мере повышения противодействия завершающий скачок смещается вверх по диффузору к горлу, пока не сольется с первым скачком, начинающимся в камере смешения перед горлом. При этом распределение давления в камере смешения остается неизменным и аппарат работает устойчиво. Дальнейшее повышение противодействия способствует восстановлению давления в объединенном скачке с уменьшением его глубины, но это изменение не затрагивает начальную зону скачка (до первого максимума \bar{p}_k), кривая давления на этом участке практически не изменяется вплоть до срыва.

Таким образом, анализ опытных данных показывает, что уменьшение проходного сечения горла диффузора вызывает развитие глубины скачка и смещение его начальной зоны в камеру смешения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение площади горла приводит к возникновению градиента давления в конце КС, конденсация в КС становится неизобаричной. Скачок уплотнения – конденсации, существовавший при больших $\bar{F}_{гд}$ только в диффузоре, теперь при увеличении противодействия может переместиться в КС и слиться с существующим в КС градиентом давле-

ния. Все это свидетельствует о том, что применявшаяся ранее многими авторами при расчете КИ модель изобаричной КС неприемлема при малых $\bar{F}_{гд}$, что максимальному противодействию соответствует расположение скачка не в горловине диффузора, а в суживающейся КС и необходимо искать другие способы определения скорости на выходе из КС.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

T, t – температура, К, °С;

p – давление, Н/м²;

F – площадь, м²;

G – расход, кг/с;

$U = G_{ж}/G_{п}$ – коэффициент инжекции;

C – скорость, м/с;

$\bar{F}_{гд} = \frac{F_{гд}}{F_{пс}}$ – безразмерная (относительная) площадь;

l – длина, м.

Индексы:

п, ж, см – пар, жидкость, смесь;

пс, жс, кс, ки, д, гд, – паровое сопло, жидкостное сопло,

камера смешения, конденсирующий инжектор, диффузор, горло диффузора;

кр – критическое сечение;

S – состояние насыщения;

о – состояние торможения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнштейн С.И., Севастьянов А.П. Оптимальная площадь горла диффузора конденсационного инжектора. М.: Изд-во МЭИ, 1992. Препринт № 05-21.