

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА В ПАРОВОЗДУШНОЙ СТРУЕ

Г. Н. АБРАМОВИЧ, А. А. БУЗОВ, Ю. В. ЗУЕВ, И. А. ЛЕПЕШИНСКИЙ,
В. И. ЭПШТЕЙН

(Москва)

Выполнен расчет паро-воздушной осесимметричной затопленной струи для различных условий внешней среды и ряда значений концентрации пара и температуры паро-воздушной смеси в начальном сечении струи. Проведено экспериментальное исследование процесса конденсации в паро-воздушной струе с использованием лазерно-оптического метода измерения дисперсности и концентрации капель конденсата.

При проведении расчета предполагалось, что конденсация не влияет на характер течения в струе. Сначала по методике, изложенной в [1], рассчитывалась гомотенная струя в предположении отсутствия массообмена; в результате этого расчета определялись границы струи (радиус r), поля скоростей u , температур T и концентраций пара κ (под концентрацией пара здесь понимается отношение веса пара к весу паро-воздушной смеси, заключенной в некотором объеме). Затем велся расчет полей пересыщения пара δ (пересыщение пара — отношение парциального давления пара к давлению насыщения) с целью определения границ возможной зоны конденсации, т. е. зоны $\delta \geq 1$. Кроме того, определялось максимально возможное количество скопившегося пара (расход конденсата) в струе. За максимальный расход конденсата в струе принимался наибольший из соответствующих расходов, подсчитанных в ряде сечений струи по теории равновесной конденсации. Количество пара, способное скопиться в каком-либо сечении струи, находилось как разность между всем расходом пара через площадку рассматриваемого сечения, занятую зоной $\delta \geq 1$, и расходом насыщенного пара через эту же площадку. Наилучшего совпадения результатов расчета с экспериментом при принятом допущении следует ожидать при малых начальных значениях концентрации пара κ_a .

Результаты расчета представлены на фиг. 1–5. На фиг. 1 даны результаты расчета паро-воздушной струи без массообмена при $T_a = 398^\circ \text{K}$, $T_l = 288^\circ \text{K}$, $\kappa_a = 1$, $\kappa_l = 0,007$. (Здесь и ниже индекс a относится к параметрам струи на срезе сопла, а индекс l — к параметрам окружающей струю среды.) В верхней части этой фигуры приведено сечение струи, расположенное выше оси симметрии. Здесь показаны: граница струи — 1, граница зоны возможной конденсации ($\delta = 1$) — 2 и поля пересыщений пара в трех сечениях струи — 3 (значения δ могут быть определены по масштабной сетке безразмерной длины X^* путем введения масштабного коэффициента 10^{-1}). На этом режиме в струе может протекать конденсация, причем зона возможной конденсации (зона с $\delta \geq 1$) начинается на срезе сопла и по мере удаления от сопла расширяется. В пределах зоны конденсации существует поверхность вращения (на фигуре ее образующая обозначена кривой 4), на которой лежат точки с максимальным пересыщением пара. На некотором расстоянии от сопла (зависающем от T_a , T_l , κ_a и κ_l) эта поверхность вырождается в прямую, совпадающую с осью струи. Расчет показывает, что пересыщение пара на указанной поверхности постоянно до ее вырождения в линию. Далее пересыщение начинает резко уменьшаться.

В нижней части фиг. 1 показано изменение пересыщения пара вдоль оси струи (кривая 5).

Уменьшение начального подогрева струи $\theta = T_a/T_l$ и увеличение начального отношения концентраций пара $\gamma = \kappa_a/\kappa_l$ приводит к расширению зоны конденсации и увеличению максимального пересыщения пара в струе δ_{\max} .

Зависимость максимального относительного пересыщения пара $\delta_{\max}^* = \delta_{\max}/\delta_l$ от начального отношения концентраций пара γ и степени подогрева струи θ представлена на фиг. 2. Линии на графике соответствуют следующим постоянным начальным подогревам: 1 — 1.05, 2 — 1.4, 3 — 1.8, 4 — 2.2, 5 — 2.6, 6 — 3.0. Пользуясь этим графиком, можно определить максимальное пересыщение пара в струе, которое будет достигнуто при заданных γ и θ .

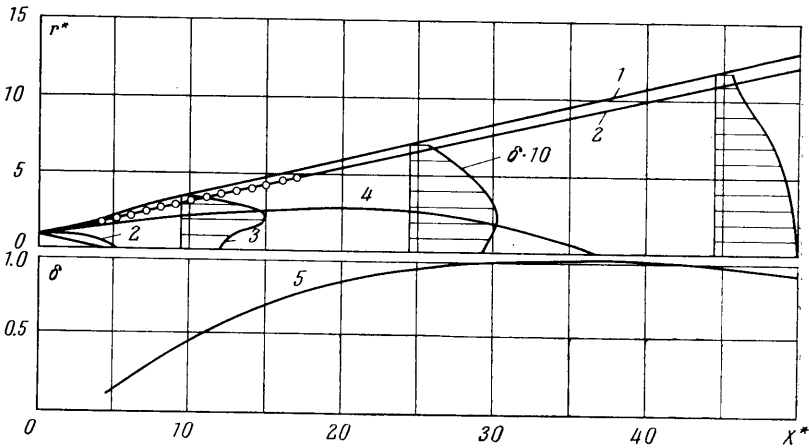
Результаты расчета расхода конденсата в струе даны на фиг. 3, где представлена зависимость относительного расхода конденсата G^* (расхода конденсата, отнесенного к расходу пара через сопло) от начального отношения концентраций пара γ для ряда начальных подогревов струи θ (1 — 1.04, 2 — 1.11, 3 — 1.18, 4 — 1.25, 5 — 1.4, 6 — 1.8, 7 — 2.2, 8 — 2.6, 9 — 3.0).

На графике линия А соответствует насыщению пара на срезе сопла. Ниже этой линии лежит область параметров струи, при которых из сопла истекает ненасыщен-

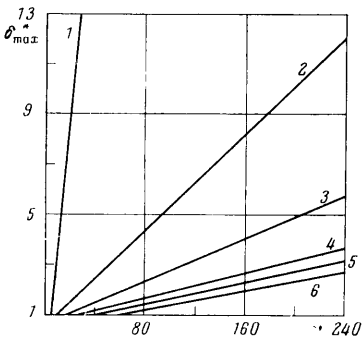
ный пар, а выше — смесь конденсата с насыщенным паром. Линией *B* на графике ограничен минимальный расход конденсата в струе; эта линия построена из условия достижения в какой-либо точке струи пересыщения пара, равного единице, т. е. из условия $\delta_{\max}=1$.

Наряду с расчетом проводилось экспериментальное исследование осесимметричной струи с конденсацией — найдено пересыщение пара, при котором начинается конденсация, измерены дисперсность и концентрация капель конденсата, а также поля температур в струе.

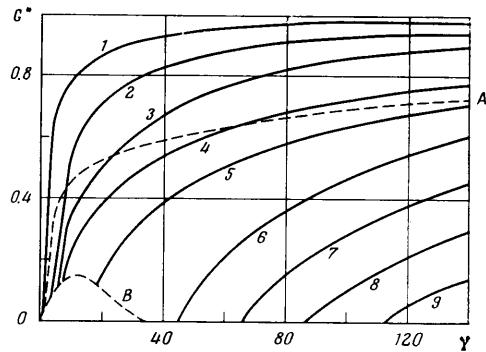
В первом приближении пересыщение пара, соответствующее началу конденсации δ_k , находилось путем сопоставления границ зоны конденсации, зафиксирован-



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

ной на фотографии, с данными теоретического расчета. При фотографировании струя освещалась узким лучом лазера, перемещаемым вдоль струи.

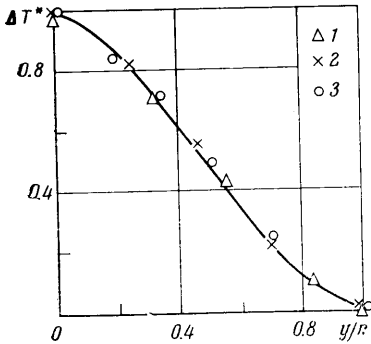
Сопоставление экспериментальных и теоретических данных приведено на фиг. 1, где граница зоны конденсации, полученная экспериментально, отмечена кружочками. Совпадения экспериментально полученной границы с линией $\delta=1$ позволило предположить, что в исследуемой струе конденсация начинается при значении δ , близком к единице.

Уточнение величины δ_k было сделано расчетным путем по формуле, связывающей пересыщение пара с радиусом капель в месте образования конденсата [2]

$$(1) \quad \delta_k = \exp(2\sigma/RT\rho r_*)$$

Здесь r_* — радиус зародышевых капель; σ — коэффициент поверхностного натяжения воды; R — газовая постоянная пара; T — температура паро-воздушной смеси в месте образования конденсата; δ_k — пересыщение пара, при котором начинается конденсация; ρ — плотность жидкой фазы. В качестве размера капель, входящего в эту формулу, брался радиус частиц, находящихся на внешней границе зоны конденсации, являющейся местом образования конденсата. Измерения показали, что этот радиус равен $0.8 \cdot 10^{-7}$ м (0.08 мкм).

Для вычисления δ_k по формуле (1) надо знать не только радиус капель, но и температуру в месте конденсации. Поэтому в эксперименте было проведено измерение температуры в ряде сечений струи ($1 - X^*=10$, $2 - X^*=14$, $3 - X^*=19$). Полученные поля температур в дальнейшем были перестроены в относительных координатах ΔT^* и y/r ($\Delta T^* = (T - T_l) / (T_m - T_l)$); T_m — температура на оси струи; y — расстояние от рассматриваемой точки струи до ее оси; r — радиус струи) (фиг. 4). Из



Фиг. 4

фиг. 4 видно, что экспериментальные точки ложатся вдоль сплошной кривой, являющейся профилем Шлихтинга [1]. Это позволяет сделать предварительный вывод о возможной автомодельности полей температур в поперечных сечениях основного участка паро-воздушной струи с конденсацией.

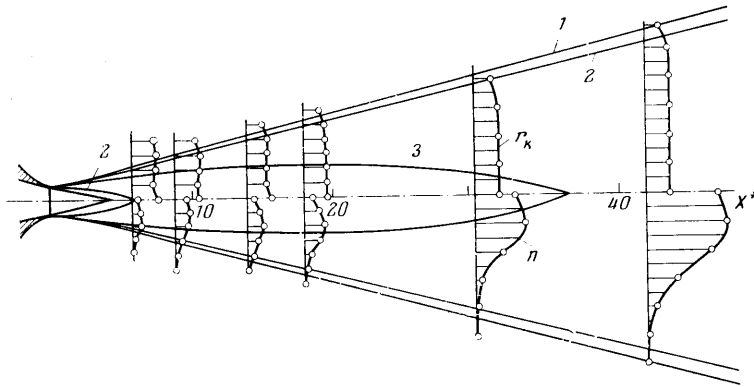
Расчет по формуле (1), подтвердил сделанный ранее вывод о том, что конденсация начинается при пересыщении пара, близком к единице, и позволил получить уточненное значение $\delta_k \approx 1.007$.

Дисперсность r_k и концентрация n капель конденсата измерялись лазерно-оптическим методом (методом асимметрии индикатрисы рассеяния света), описанным в [3].

Результаты измерения дисперсности и концентрации капель конденсата при $T_a = 398^\circ \text{K}$, $T_l = 288^\circ \text{K}$, $\kappa_a = 1$ и $\kappa_l = 0.007$ приведены на фиг. 5, где показаны поля дисперсности и кон-

центрации конденсата, полученные в шести сечениях струи (поля концентрации построены в относительных единицах, а поля размеров капель, выраженные в микронах, — в масштабе относительного расстояния X^* , уменьшенном в 10 раз).

Как видно из фиг. 5, поля концентраций капель в сечениях струи имеют ярко выраженный максимум, приходящийся на точки, где $\delta = \delta_{\text{max}}$. По длине струи наблю-



Фиг. 5

дается заметный рост числа капель. Вместе с этим радиус капель как вдоль, так и поперек струи остается примерно постоянным ($r_k = 0.16 \cdot 10^{-6} \text{ м}$). Отсутствие роста капель с одновременным увеличением их числа по длине струи указывает на то, что работа, затрачиваемая на образование новых капель, намного меньше работы, идущей на увеличение размеров уже имеющихся капель. Это может быть в том случае, когда конденсация пара протекает на поверхности твердых частиц, непрерывно поступающих с воздухом в зону конденсации, т. е. при гетерогенной конденсации. Внешне это проявляется в протекании конденсации пара при $\delta \approx 1$.

Поступила 8 VII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
2. Амелин А. Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. М., «Химия», 1972.
3. Салганов Г. А. Сверхзвуковые двухфазные течения. Минск, «Вышэйшая школа», 1972.