

ОБ ЭНЕРГОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВАХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ

А. А. СТОЛЯРОВ

(Москва)

Обнаружен новый существенно недиссипативный эффект энергоразделения в двухфазных течениях. Исследовались смеси воздуха с водой, керосином и водным раствором диэтиленгликоля при начальных давлениях 3—20 бар. При истечении водовоздушных смесей из сверхзвукового сопла наблюдалось льдообразование, а у смесей воздуха с незамерзающим раствором диэтиленгликоля получены отрицательные температуры неравновесно отсепарированной жидкости. Показана возможность эффективного вымораживания влаги на твердых неохлаждаемых поверхностях, обдуваемых из сверхзвукового сопла влажным воздухом.

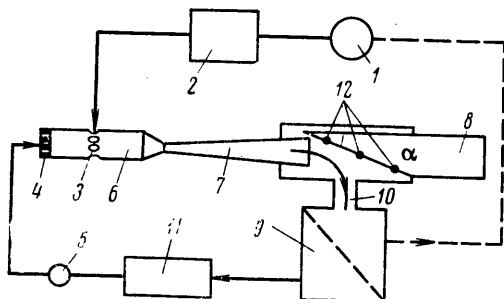
Одну из принципиальных особенностей двухфазных течений составляет возможность обмена механической и тепловой энергиями между фазами во всем поле течения. Результатом внутреннего энергообмена является возникновение разности температур между фазами. Основные исследования в этой области относятся к суспензиям газа с твердыми частицами [1, 2]. С помощью оптических методов удалось экспериментально зарегистрировать разность температур твердых частиц и газа при течении суспензии в соплах [1]. Однако ранее не ставилась задача о практическом разделении фаз с различными температурами на выходе из сопла.

Ниже излагаются экспериментальные результаты, относящиеся к исследованию энергоразделения в двухфазных газожидкостных средах, движущихся в трубах с большими скоростями, заключающегося в том, что после полного торможения и разделения температуры обеих фаз оказываются неодинаковыми, причем жидкая фаза заметно охлаждается.

Из уравнения теплосодержания для адиабатического потока идеального газа $T = T_0 - w^2 / 2C_p$, где T , T_0 — статическая и полная абсолютные температуры, w — скорость, C_p — теплоемкость при постоянном давлении, следует, что чем больше скорость течения, тем ниже статическая температура в потоке. Значительное охлаждение газа в потоке достигается преимущественно при сверхзвуковых скоростях, хотя менее заметное охлаждение имеет место также и на дозвуковых скоростях.

Если в охлажденный, например путем адиабатического расширения в сопле Лавая, поток газа ввести жидкие частицы с начальной температурой T^0 , то из-за обмена тепловой и механической энергиями между частицами и газом будет наблюдаться либо охлаждение частиц и нагревание газа, либо обратное явление в зависимости от соотношения температур T и T^0 . Если $T^0 < T$, то частицы будут нагреваться, а газ охлаждаться до тех пор, пока не будет достигнуто условие $T^0 = T$, и тогда, если газ продолжает ускоряться, при $T^0 > T$ наступит инверсия и газ снова начнет нагреваться. При наличии массообменных процессов, обусловленных испарением, конденсацией и замерзанием, явление заметно усложняется, однако до тех пор, пока поток остается двухфазным, сущность его не меняется. Реали-

зую теперь достаточно быстрое торможение и разделение двухфазного потока на отдельные фазы, можно обнаружить, что полные температуры обеих фаз оказываются неодинаковыми. Поскольку принципиально в сверхзвуковых соплах достижима очень высокая степень расширения газового потока и, следовательно, достижимы очень низкие температуры, ока-



Фиг. 1

зывается возможным таким способом получить очень низкие температуры жидких частиц после разделения. В зависимости от соотношения начальных параметров обеих фаз представляется возможным не только сильно охладить частицы, но и по мере необходимости очень сильно нагреть газобразную фазу с помощью горячей жидкости. Высокая полная температура газа может быть получена, например, путем совместного расширения в сверхзвуковом сопле сильно нагретых вначале жидкого металла и инертного газа. Отметим, что вводить жидкие частицы непосредственно в сверхзвуковой поток газа нельзя, поскольку в этом случае перед частицами вверх по потоку образуются ударные волны, снижающие скорость течения и повышающие статическую температуру вниз по потоку в зоне нахождения частиц. Поэтому двухфазная смесь должна образовываться при достаточно малых дозвуковых скоростях еще до входа в горло сопла.

Схема экспериментальной установки изображена на фиг. 1. Сжатый воздух из компрессора 1 через теплообменник 2 и шесть отверстий 3 диаметром 6 мм подавался перпендикулярно струйкам жидкости, которая нагнеталась насосом 5 вдоль оси сопла через десять отверстий 4 диаметром 0,8 и длиной 4 мм. Образовавшаяся в смесителе 6 при низких скоростях однородная по температурам и давлениям двухфазная крупнодисперсная смесь далее разогналась в сверхзвуковом сопле 7, где осуществлялось дополнительное диспергирование и охлаждение жидкости вследствие внутреннего теплообмена с газом. За соплом устанавливались сменные отбойники 8 из нержавеющей стали с различными углами наклона α полированного плоского среза ($\alpha = 20, 30$ и 40°). Двухфазная смесь с помощью отбойника направлялась в теплоизолированный сеточный сепаратор 9 через соединительный патрубок 10. Отсепарированная жидкость сливалась в емкость 11, а воздух выходил в атмосферу. На плоских срезах отбойников в отверстиях диаметром 2 мм размещались заподлицо пять ХК-термопар 12. Размеры конической расширяющейся части сопла: диаметры горла и выходного сечений 10 и 25 мм, длина 150 мм. Длина сужающейся части сопла 20 мм. Размеры цилиндрического смесителя: диаметр 25 и длина 113 мм. Расстояние от отверстий для впуска воздуха до сужающейся части сопла равно 60 мм.

Установка допускала возможность работы как с открытым сбросом отработанного воздуха и жидкости в атмосферу, так и со сбросом смеси под противодавлением. Жидкость по мере необходимости подогревалась водяным паром. Расход воздуха измерялся стандартной диафрагмой, расход жидкости — объемным способом. Температуры воздуха и жидкости при входе в смеситель, а также температура пленки жидкости на отбойнике и внутри сепаратора измерялись ХК-термопарами, выведенными на электронный автоматический потенциометр ЭПП-09МЗ. Показания термопар записывались на диаграмму в течении всего эксперимента. Давления определялись пружинными образцовыми манометрами.

Предварительными опытами было установлено, что устойчивый распыл жидкости достигался при перепадах давления на отверстиях свыше 0,3 бар. В экспериментах этот перепад в зависимости от природы жидкости находился в пределах 0,5—1 бар. При меньших перепадах давлений наблюдались автоколебательные процессы с попеременным выбросом из сопла двухфазной смеси и чистого воздуха с частотой порядка 1—2 гц.

Особенность исследованного сопла заключалась в том, что расчетный перепад давлений для него (в пренебрежении влиянием жидкой фазы) составлял $p_{01}/p_2=68$, где p_{01} , p_2 — давления на входе и на срезе сопла, а в экспериментах эта величина находилась в пределах 3—20. Поэтому расширяющаяся часть сопла выполняла одновременно роль сверхзвукового сопла и дозвукового диффузора со скачком уплотнения на входе. В зависимости от режима работы разгонная сверхзвуковая часть составляла от $1/4$ до $1/2$ длины расширяющейся части сопла, а оставшиеся соответственно $3/4$ и $1/2$ длины осуществляли торможение двухфазного потока, ввиду чего жидкие частицы, проходя последовательно зоны до скачка и за ним, вначале охлаждались, а затем нагревались.

Средневременная термодинамически равновесная температура T_m , определяемая из формулы

$$T_m = \frac{1}{\tau} \int T d\tau$$

где τ — время, при отношении $T_m/T_{01}=0.95-0.928$, полученном из опытов. и полной температуре воздуха на входе в сопло $T_{01}=290^\circ\text{K}$ указывает на расчетное равновесное снижение температуры жидких частиц на выходе из сопла примерно на 14—21° С.

Экспериментальное исследование энергоразделительных свойств двухфазных течений выполнялось на смесях воздух — керосин, воздух — вода и воздух — водный раствор диэтиленгликоля. Полные давления воздуха и жидкости находились в пределах 3—20 бар и различались лишь на величину потери напора жидкости в отверстиях 4 смесителя 6. В первой серии

Номера опытов	p_{01} , бар	t_{01} , °С	t_1 , °С	t_2 , °С	n	Номера опытов	p_{01} , бар	t_{01} , °С	t_1 , °С	t_2 , °С	n
1	3	8	17	4	0.595	6	6	13	19	9	0.15
2	5	14	15	2	0.196	7	8	11	20	3	0.1
3	7	6.5	33	0	0.1	8	7	11	16	-5	0.34
4	20	19	17	0	0.21	9	11	9	12.5	-15	0.222
5	6	13	19	8	0.15	10	20	6	15	-11	0.12

опытов сеточный сепаратор был снят и выброс двухфазной смеси осуществлялся либо в атмосферу, либо с противодавлением, создаваемым сменными пробками с калиброванными отверстиями. Результаты этой серии экспериментов для отбойника с углом наклона среза $\alpha=20^\circ$ представлены в таблице в виде зависимостей температуры t_2° отсепарированной пленки жидкости от полного давления p_{01} воздуха на входе в сопло, полных температур воздуха t_{01} и жидкости t_1° на входе в смеситель и от отношения $n=m^\circ/m$ массовых расходов воздуха m и жидкости m° .

Здесь 1—4 — водовоздушные смеси (1 — сброс незамерзающей смеси в атмосферу, 2 — то же с противодавлением, 3, 4 — сброс смеси в атмосферу с образованием льда и тумана); 5—7 — незамерзающие воздушно-керосиновые смеси (5,7 — сброс смеси в атмосферу, 6 — то же с противодавле-

нием); 8—10 — незамерзающие смеси воздуха с водным раствором диэтиленгликоля (8, 9 — сброс смеси в атмосферу, 10 — то же с противодавлением).

Анализ приведенных данных показывает, что во всех случаях имеет место заметное охлаждение жидкости на выходе из сопла, причем, как видно, вода, керосин и водный раствор диэтиленгликоля обладают не одинаковыми энергоразделительными свойствами. Из указанных жидкостей худшими свойствами обладает керосин, имеющий наименьшую теплоемкость.

Отметим, что охлаждение жидкостей в сопле значительно больше, чем можно было бы ожидать для температуры смеси t_g , найденной из теплового баланса изобарического процесса смешения воздуха и жидкости

$$t_g = \frac{m^\circ C^\circ t_1^\circ + m C_p t_{01}}{m^\circ C^\circ + m C_p}$$

где C° — теплоемкость жидкости.

Например, фактическая температура пленки керосина на 8—10° С меньше расчетной температуры смеси t_g и на 5—8° С меньше полной температуры воздуха на входе в сопло. Фактическая температура воды на отбойнике на 12—17° меньше расчетной температуры смеси, а в опытах с водным раствором диэтиленгликоля температура отсепарированной пленки на 17—24° ниже расчетной температуры смеси.

В специальных экспериментах, выполненных с закрытым выбросом двухфазной смеси из области отбойника под противодавлением, снижение температуры отсепарированной пленки жидкости было на 1—2° меньше по сравнению с открытым выбросом в атмосферу. В опытах с незамерзающим раствором диэтиленгликоля были получены отрицательные температуры жидкости до —15° С. Для водовоздушных смесей уже при сравнительно небольших перепадах давлений имеет место заметное охлаждение воды. Например, при начальном давлении воздуха $p_{01}=3$ бар вода охлаждается на 13° С.

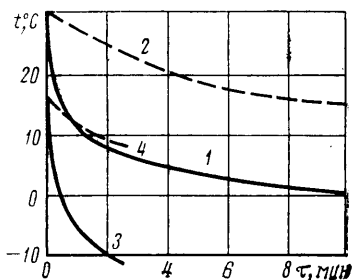
Особенность экспериментов с водой заключалась в том, что достижение определенной температуры жидкости на входе в смеситель, когда задано давление (или при определенном давлении, если задана температура), сопровождалось льдообразованием на выходе из сопла. Количество льда по мере дальнейшего охлаждения воды на входе в смеситель непрерывно увеличивалось. В этих опытах вода предварительно подогревалась паром. Интересно отметить, что при давлении воздуха 7 бар и температуре воды на входе в смеситель 85—65° С имело место интенсивное парообразование на выходе из сопла. Снижение температуры воды до 65° С сопровождалось полным прекращением парообразования. Температура воздуха на входе в смеситель составляла 6—8° С. При давлении $p_{01}=20$ бар жидкость полностью вымораживалась и на выходе наблюдался поток льдинок и тумана, состоящего из мельчайших зародышевых частиц льда.

Если принять, что минимальное статическое давление в расширяющейся части сверхзвукового сопла перед скачком уплотнения было равно давлению насыщенных водяных паров в конце парообразования (т. е. при температуре 65° С, а именно 0.25 бар), то скачок уплотнения располагался примерно на середине ее длины. Это соответствует сделанным выше газодинамическим оценкам.

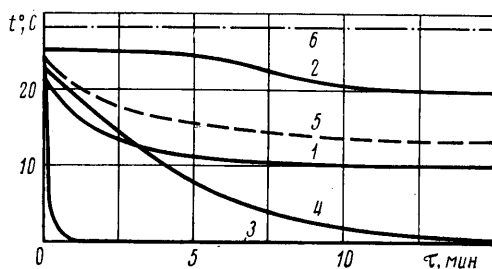
На фиг. 2 приведены данные, относящиеся к исследованию вымораживания влаги путем обдува плоскости отбойника из сверхзвукового сопла влажным воздухом с достаточно высоким начальным парциальным давлением водяных паров (кривым 1 и 2 соответствует $p_{01}=6$ бар, кривым 3

и $4 - p_{01} = 20 \text{ бар}$), когда в сопле происходила конденсация без подачи дополнительного количества жидкости в смеситель. Как видно, с изменением времени τ температура на поверхности отбойника (кривые 1 и 3) плавно уменьшается в соответствии с температурой поступающего в сопло воздуха (кривые 2 и 4) до нуля, после чего на отбойнике в результате вымораживания влаги начинает образовываться растущая ледяная корка, причем, при $p_{01} = 20 \text{ бар}$ (кривые 3 и 4) ледяная корка переохлаждалась на $10-12^\circ \text{C}$ ниже нуля.

При работе на достаточно сухом воздухе, когда начальное парциальное давление водяных паров невелико и влага в сопле не выпадает, была обнаружена аномальная адсорбция водяных паров поверхностью стального



Фиг. 2



Фиг. 3

отбойника из сверхзвукового потока. После прекращения подачи воздуха в сопло в течении $1-2 \text{ мин}$ наблюдалось обильное отделение с поверхности отбойника густого водяного тумана, количество которого было прямо пропорционально давлению и времени обдува, составляющему в данных опытах $5-10 \text{ мин}$.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что охлаждение жидкости нельзя объяснить лишь эффектом смешения воздуха с жидкостью или наличием дроссель-эффекта, поскольку в исследованной области давлений и температур воздуха последний не превышает 3°C , и позволяет сделать вывод о том, что обнаруженный эффект существенного охлаждения жидкости связан с энергоразделением в двухфазном потоке.

Отметим также, что эффект энергоразделения в двухфазных течениях весьма ощутим, поскольку имеет место не только значительное охлаждение жидкости, но и отвод скрытой теплоты фазового перехода, связанного с льдообразованием.

Во второй серии опытов за отбойником был установлен теплоизолированный сеточный сепаратор. Длина соединительного патрубка диаметром 45 мм составляла 100 мм . На фиг. 3 представлены экспериментальные зависимости температуры воздуха (кривая 1) и воды (2) на входе в смеситель и отсепарированной пленки воды (3) на отбойнике и в сепараторе (4) от продолжительности эксперимента (кривая 5 — расчетная температура смеси, 6 — комнатная температура, $p_{01} = 20 \text{ бар}$, $n = 0.128$).

Нулевая температура на отбойнике устанавливается примерно через минуту, температура же жидкости в сепараторе достигает равновесного значения лишь через $15-20 \text{ мин}$, что связано с охлаждением массы сепаратора. Температура воды на сливе из сепаратора, измеренная ртутным термометром, составляла $0.5-0.8^\circ \text{C}$.

Таким образом показано, что принципиально возможно осуществить полное неравновесное по температурам отделение мелкодисперсной охлажденной жидкости от газа за двухфазным соплом. Отметим, что на процесс

сепарации жидкости оказывает существенное влияние угол наклона плоскости среза отбойника к оси сопла. В случаях замерзания воды температура поверхности отбойника из-за образования ледяной корки близка к нулю и мало изменяется от точки к точке. Если же жидкость не замерзает, распределение температур жидкой пленки по поверхности отбойника может быть довольно неравномерным и зависит как от угла наклона плоскости отбойника, так и от режима работы сопла в системе сепаратора. Например, на отбойнике с углом 20° при работе со сбросом в атмосферу на воде с давлением 3 бар максимальная разность температур пленки составляла 6°C , причем наименьшая температура была в центре плоскости. На том же отбойнике со сбросом в атмосферу на керосине с давлением 6 бар получена разность температур в 11°C , причем наименьшая температура фиксировалась в конце плоскости вниз по потоку. Аналогичное распределение температур наблюдалось и при работе с водным раствором диэтиленгликоля при давлениях 7 и 11 бар. Разность температур здесь достигала уже $8-15^\circ\text{C}$. Отметим, что при работе на сухом воздухе в различных точках плоскости отбойника наблюдаются полные температуры больше и меньше таковой на входе в сопло. Противодавление изменяет картину распределения температур на плоскости. Например, при давлении 20 бар наименьшая температура раствора диэтиленгликоля наблюдалась в крайней точке плоскости вверх по течению.

Основой для создания нового существенно недиссипативного метода охлаждения и нагревания является отсутствие временной симметрии в процессах теплообмена между фазами при расширении, торможении и разделении двухфазной смеси на отдельные фазы, приводящее к появлению значительного перепада полных температур.

Появление временной несимметрии можно объяснить, рассматривая, например, задачу о теплопроводности сферических жидких частиц (что допустимо ввиду малости их абсолютных размеров) и пренебрегая внутренними конвективными эффектами. Считая, что в процессах охлаждения и нагревания достигаются одинаковые средние температуры частиц, из решения задачи о теплопроводности сферы [3] можно в первом приближении найти, что времена охлаждения τ_- и нагревания τ_+ двух частиц пропорциональны квадратам их радиусов R_- и R_+ и обратно пропорциональны коэффициентам теплопроводности a_- и a_+

$$\tau_+/\tau_- \sim (a_-/a_+) (R_+/R_-)^2$$

где индексы плюс и минус характеризуют соответственно параметры, отнесенные к процессам нагревания и охлаждения частиц.

Например, если принять, что радиус жидких частиц в сверхзвуковой зоне сопла $R_- = 10$ мкм, а в дозвуковой зоне торможения в сопле в результате коалесценции размеры частиц увеличиваются до $R_+ = 150$ мкм, то при $a_- = a_+$ имеем $\tau_+/\tau_- \sim 225$. Кроме того, в случае замерзания воды $a_- = 0.00144$ см²/сек для воды и $a_+ = 0.0115$ см²/сек для льда. Следовательно, при $R_- = R_+$ получим $\tau_+ \sim 0.125\tau_-$.

Учитывая одновременное изменение a и R , найдем, что время прогрева частиц больше чем на порядок отличается от времени их охлаждения. Численные значения времен равны $\tau_- = 0.058$ и $\tau_+ = 1.62$ мсек. Соответствующие времена пролета частиц через сверхзвуковую и дозвуковую зоны сопла по оценкам составляют: $\tau^- = 0.093-0.16$ мсек и $\tau^+ = 0.94-0.8$ мсек (первые числа относятся к $p_{01} = 10$ бар, вторые — к $p_{01} = 20$ бар). Отсюда следует, что $\tau^- > \tau_-$, $\tau^+ < \tau_+$ и частицы, успевшие охладиться в сверхзвуковой зоне, не успевают прогреться в зоне торможения в сопле. В этом одна из вероятных причин временной несимметрии в процессах охлаждения и

нагревания жидких частиц. Другая причина заключается в несимметричности граничных условий, зависящих от времени, в сверхзвуковой и дозвуковой областях течения двухфазной смеси.

Поступила 1 VII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Соу С. Л. Гидродинамика многофазных систем. М., «Мир», 1971.
 2. Хелфрич, Густафсон. Двухтемпературная суспензия газа с твердыми частицами как рабочее тело МГД-генераторов электроэнергии. Тр. Америк. о-ва инж.-механ., Энергетические машины и установки, 1974, т. 96, № 3.
 3. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М., «Наука», 1964.
-