

## ЛИТЕРАТУРА

1. Eichelberger R. I., Hauver G. E. Solid State Transducers for Recording of Intense Pressure Pulses. Colloq. Internat. Centre nat. rech. scient., 1962, No. 109.
2. Hauver G. E. Shock-Induced Polarization in plastics. II. Experimental study of plexiglas and polystyrene. J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, No. 7.
3. Иванов А. Г., Минеев В. Н., Новицкий Е. З., Янов В. А., Безруков Г. И. Об аномальной поляризации хлористого натрия при ударном нагружении. ЖЭТФ, Письма в редакцию, 1965, т. 2, вып. 8.
4. Linde R. K., Murri W. J., Dogan D. G. Shock-Induced Electrical Polarization of Alkali Halides. J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, No. 7.
5. Иванов А. Г., Новицкий Е. З., Минеев В. Н., Лисицын Ю. В., Тюняев Ю. Н., Безруков Г. И. Поляризация щелочно-галогидных кристаллов при ударном нагружении, I. ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 1.
6. Минеев В. Н., Тюняев Ю. Н., Иванов А. Г., Новицкий Е. З., Лисицын Ю. В. Поляризация щелочно-галогидных кристаллов при ударном нагружении. II. ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 4.
7. Allison F. E. Shock-Induced Polarization in Plastics. I Theory. J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, No. 7.
8. Зельдович Я. Б. Э. д. с., возникающая при распространении ударной волны по диэлектрику. ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 1.
9. Якушев В. В., Розанов О. К., Дремин А. Н. Об измерении времени релаксации поляризации в ударной волне. ЖЭТФ, 1968, т. 54, № 2.
10. Якушев В. В., Розанов О. К., Дремин А. Н. Поляризация  $\text{CCl}_4$  в отраженных ударных волнах. ЖЭТФ, Письма в редакцию, 1968, т. 7, вып. 5.
11. Compendium of shock wave data. Univ. Calif. 1966, vol. 2.
12. Duff R. E., Gust W. H., Rousse E. B., Mitchell A. C., Keeler R. N., Hoover W. G. Shock—Wave Studies in Condensed Media. Symposium High Dynamic Pressure, Paris, 1967.
13. Ильхин В. С., Кологривов В. Н. Электродвижущая сила пары металлов, сжатых ударной волной. ПМТФ, 1962, № 5, стр. 175—176.
14. Минеев В. Н., Иванов А. Г., Новицкий Е. З., Тюняев Ю. Н., Лисицын Ю. В. Поляризация кремния и германия при ударном нагружении. ЖЭТФ, Письма в редакцию, 1967, т. 5, вып. 9.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
НА ТЕПЛОБМЕН ПОТОКА ПЛАЗМЫ АРГОНА СО СТЕНКАМИ КАНАЛА**

*В. И. Рождественский*

(Москва)

Проведено экспериментальное исследование влияния внешнего поперечного магнитного поля на теплообмен потока низкотемпературной плазмы аргона со стенками канала в ламинарной и переходной области изменения чисел Рейнольдса. Показано, что магнитное поле слабо влияет на теплообмен в исследованных диапазонах изменяемых параметров. При наложении магнитного поля теплообмен уменьшается.

Из общих положений магнитной гидродинамики известно [1], что внешнее магнитное поле может оказывать существенное влияние на течение электропроводящей среды, а в случае неизотермического течения и на теплообмен с окружающим пространством или со стенками канала. Характер влияния магнитного поля на теплообмен определяется разными факторами, наиболее существенными из которых являются: относительная ориентация векторов магнитной индукции и осредненной скорости потока, режим течения, специфические свойства проводящей среды, величина индукции магнитного поля, а также электропроводность стенок канала.

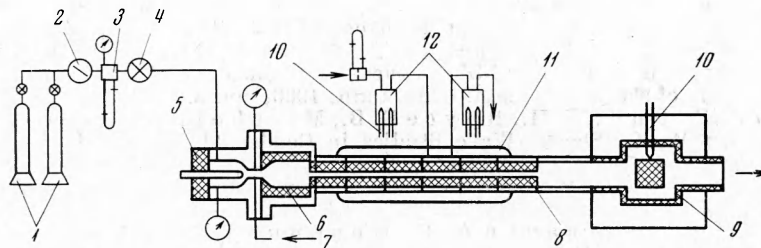
Большинство теоретических и экспериментальных исследований теплообмена в магнитном поле относится к течению в каналах электропроводящих жидкостей (жидких металлов и электролитов). Наиболее полный обзор достижений в этом направлении содержится в работе [2].

Теплообмен при течении низкотемпературной плазмы в магнитном поле обладает целым рядом специфических особенностей, например: наличием существенных градиентов температуры и проводимости потока в поперечном сечении, а также по продольной оси канала, наличием эффекта Холла и рекомбинации ионов.

Использование методов приближенного физического моделирования теплообмена плазменных потоков проводящими жидкостями позволяет лишь в некоторых известных пределах исследовать теплообмен плазменных потоков.

Экспериментальному исследованию влияния магнитного поля на теплообмен при течении в канале низкотемпературной плазмы посвящено небольшое число работ [3-4], касающихся в основном качественного определения характера влияния магнитного поля в турбулентной области чисел Рейнольдса.

Целью данной работы было определение характера и степени влияния поперечного магнитного поля на теплообмен в начальном участке канала при изменении средней скорости потока, температуры стенки канала, ориентации поперечного сечения прямоугольного канала относительно направления магнитного поля. Исследовалось также влияние ввода в поток легкоионизирующейся присадки на изменение теплообмена при наложении магнитного поля.



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки  
1 — баллоны с аргоном, 2 — редуктор, 3 — расходомерное устройство, 4 — регулирующий вентиль, 5 — плазмотрон, 6 — смесительная камера, 7 — дозатор для подачи присадки, 8 — измерительный канал, 9 — задняя камера, 10 — термопары, 11 — электромагнит, 12 — смесители воды.  
Направление магнитного поля перпендикулярно плоскости фигуры

1. Экспериментальная установка в основном состояла из плазмотрона, смесительной камеры, измерительного канала, задней камеры и электромагнита (фиг. 1). Нагрев аргона осуществлялся в плазмотроне постоянного тока, куда аргон поступал из стандартных баллонов через редуктор и расходомерное устройство. Расход аргона измерялся по перепаду давления на двойной мерной диафрагме с максимальной случайной погрешностью  $\pm 3\%$  при изменении расхода от 0,8 до 2,2 г/сек (для всех проведенных экспериментов). Плазмотрон имел два коаксиально расположенных охлаждаемых водой электрода: вольфрамовый стержень — катод и медное цилиндрическое сопло — анод с внутренним диаметром 5 и длиной 8 мм. Питание плазмотрона осуществлялось двумя генераторами постоянного тока с независимым возбуждением. В цепь плазмотрона было включено балластное сопротивление со ступенчатым регулированием от 0,15 до 3 Ом. Запуск плазмотрона производился разрядом высоковольтной конденсаторной батареи. В экспериментах измерялись ток и напряжение на электродах плазмотрона, а также непосредственно мощность, выделяемая в электрической дуге. Для повышения электропроводности в поток на выходе из сопла плазмотрона при помощи специального дозирующего устройства постоянно расходовался в количестве 0,2% от расхода аргона сплав щелочных металлов (K — 80%, Na — 20%) в количестве 0,2% от расхода аргона. За плазмотроном была установлена охлаждаемая смесительная камера, внутрь которой была вставлена цилиндрическая втулка из карбонитрида бора (БНЦ) с внутренним диаметром 18 и длиной 55 мм. Смесительная камера обеспечивала перемешивание аргона с парами щелочных металлов и частично гасила колебания, генерируемые в струе дуги плазмотрона. Смесительная камера на выходе имела небольшой цилиндрический участок ( $l = 14$  мм) с внутренним диаметром 12 мм. начало которого принималось за начало канала. Из смесительной камеры поток плазмы поступал в измерительный канал. В проведенных экспериментах использовались три различные модификации измерительного канала, чему соответствовали три серии экспериментов.

1) Эксперименты при малой средней скорости потока проводились с круглым каналом, состоящим из восьми отдельных охлаждаемых водой медных цилиндрических секций, отделенных друг от друга паранитовыми прокладками толщиной 0,5—0,8 мм. В целом канал представлял собой охлаждаемую цилиндрическую круглую трубу с внутренним диаметром 12, наружным диаметром 20 и общей длиной 380 мм. Длина

секций вдоль оси канала составляла:

|  |    |    |    |    |    |    |    |     |
|--|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Порядковый номер секции от начала канала . . . . . | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8   |
| Длина, мм . . . . .                                | 30 | 20 | 20 | 20 | 20 | 35 | 80 | 130 |

Суммарная относительная длина — 30 диаметров, из которых 10 находились в магнитном поле.

2) Эксперименты с большей средней скоростью потока при низкой температуре стенки проводились с каналом первой серии экспериментов, в первые шесть секций которого были вставлены цилиндрические втулки из БНЦ, материала, отличающегося хорошими электроизоляционными свойствами при высоких температурах. Внутри каждой втулки имелся канал прямоугольного поперечного сечения размером  $6 \times 3$  мм<sup>2</sup>. Аналогичная втулка вставлялась в выходном патрубке смесительной камеры. Поворотом втулок на 90° могла осуществляться различная ориентация поперечного сечения прямоугольного канала относительно направления магнитного поля. Суммарная относительная длина прямоугольного канала составляла 36 эквивалентных гидравлических диаметров канала, из которых 30 находилось в магнитном поле.

3) В третьей серии экспериментов втулки из БНЦ во второй — пятой секциях были заменены такими же втулками из жароупорного высокоглиноземистого бетона (ВГБ), отличающегося от БНЦ меньшей теплопроводностью и большей механической твердостью. Таким образом, третья серия экспериментов отличалась повышенной температурой поверхности прямоугольного канала при сохранении хороших электроизоляционных свойств стенок.

В задней камере, располагавшейся за экспериментальным каналом, находился многоканальный смеситель (из БНЦ), который предназначался для измерения температуры потока. В смесителе поток распределялся по шести каналам, на выходе из которых были установлены хромель-алюмелевые ( $\varnothing 0.35$ ) термопары. Оси каналов были смещены параллельно оси экспериментального канала для уменьшения влияния излучения дуги плазматрона и столба плазмы в экспериментальном канале на измерение температуры. ТЭДС термопар измерялась электронным потенциометром типа ЭПП-09. Для уменьшения радиационных потерь термоприемников термопар смеситель со всех сторон был окружен большим количеством экранов из молибденовой фольги. Наружная поверхность задней камеры была теплоизолирована асбестовой тканью. Из задней камеры аргон при атмосферном давлении направлялся в патрубок вытяжной вентиляции.

Охлаждение плазматрона, смесительной камеры и экспериментального канала производилось обычной водой, подаваемой из бака постоянного напора. Бак обеспечивал постоянный напор воды (около 0.5 *атм*) на входе в водомерное устройство. От распределительного коллектора вода (отдельно для каждого теплообменника) проходила через водомерное устройство, первый смесительный бачок, теплообменник, второй смесительный бачок и подавалась на слив. Расход воды через каждый теплообменник измерялся по перепаду давления на мерной шайбе П-образным дифманометром. Все водомерные устройства были расположены на водомерном щите и показания их фотографировались. Каждый водомер имел индивидуальную градуировку, произведенную объемным способом.

Разность температур воды в смесительных бачках (объемом около 500 см<sup>3</sup>) измерялась четырехспайными дифференциальными хромель-копелевыми термопарами (термобатарейми) с регистрацией показаний 12-точечным электронным самопишущим потенциометром ЭПП-09 или прибором УПИП-60М.

Поперечное магнитное поле создавалось электромагнитом. Рабочая площадь каждого наконечника электромагнита  $120 \times 25$  мм<sup>2</sup>. Максимальная величина магнитной индукции в середине зазора при межполюсном расстоянии 21 мм составляла 2 тл.

Измерение всех параметров установки производилось на стационарном режиме. Время выхода на стационарный режим 15—20 мин. Правильность измерения тепловых потоков оценивалась по тепловому балансу установки.

2. Обработка экспериментальных данных. Средняя величина плотности теплового потока на стенке измерительного канала для каждой секции определялась по формуле

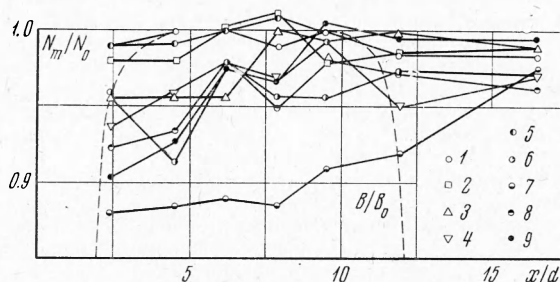
$$q = \frac{cG\Delta t}{\pi dl}$$

Здесь  $c$ ,  $G$ ,  $\Delta t$  — удельная теплоемкость, расход и разность температур воды, измеряемая в смесителях, установленных на входе и выходе из каждой секции;  $d$  — диаметр трубы или эквивалентный гидравлический диаметр прямоугольного канала, равный отношению учетверенной площади поперечного сечения к смачиваемому периметру;  $l$  — длина секции в направлении оси канала.

Температура внутренней поверхности стенки круглого канала из-за высокой теплопроводности меди и небольшой толщины стенки очень мало отличается от температуры охлаждающей воды и поэтому изменяется в относительно узких пределах (290—370° К) по сравнению с изменением среднemasсовой температуры потока. Поэтому для расчета коэффициента теплоотдачи в круглом канале температура стенки принималась постоянной и равной 340° К.

Так как теплопроводность БНЦ достаточно высока (в пять раз выше, чем у ВГБ), то температура внутренней поверхности стенки канала, образованного втулками из БНЦ, также принималась постоянной и равной 340° К.

Температура внутренней поверхности стенки канала прямоугольного сечения, образованного втулками из ВГБ, рассчитывалась по величине теплового потока и температуре наружной поверхности втулки. Для этого использовалась зависимость теплопроводности необожженного ВГБ от температуры [5].



Фиг. 2. Относительное изменение теплоотдачи при ламинарном течении в горизонтальной круглой трубе для различных режимов. Каждый режим определяется указанными соответственно среднemasсовой температурой потока в К и числом Рейнольдса в первой секции канала 1—3200, 860; 2—3300, 1600; 3—3400, 650; 4—3700, 600; 5—3700, 1600; 6—3800—1300; 7—4200, 530; 8—4300, 500; 9—4600, 490

При этом использовалась формула для теплопередачи через цилиндрическую стенку, внутренний диаметр которой равен эквивалентному диаметру прямоугольного канала. Температура наружной поверхности втулки принималась постоянной и равной 340° К.

Определенное таким образом значение температуры стенки канала из ВГБ изменялось от 600 до 1300° К.

Для оценки достоверности измерений тепловых потоков на всех режимах производилась проверка теплового баланса установки. Оказалось, что разбаланс по отношению к мощности, выделяемой в дуге плазматрона, не превышал 5% для круглого канала и 10% для прямоугольного канала.

Среднemasсовая температура потока для различных сечений канала рассчитывалась по тепловому балансу участка канала, расположенного вниз по потоку от рассматриваемого сечения до задней камеры, где производится непосредственное измерение температуры потока. При этом на входе в каждую секцию канала среднemasсовая температура определялась по формуле

$$T = T_- + \frac{c}{c_p G_{Ar}} \sum \Delta t G$$

Здесь  $T_-$  — температура потока в задней камере.

Оценка возможных погрешностей в определении среднemasсовой температуры потока показала, что такой способ определения температуры более точен, чем другой часто используемый способ определения температуры по тепловому балансу плазматрона, смесительной камеры и участка канала, расположенного до рассматриваемого сечения.

Температурные зависимости теплофизических параметров аргона принимались по данным [6].

Среднее для каждой секции канала число Нуссельта  $N$  определялось по формуле

$$N = \frac{qd}{(T_+ - T_c) \lambda}$$

Здесь  $T_+$  — среднemasсовая температура потока в середине секции,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности аргона при температуре  $T_+$ .

Полученные экспериментальные данные для вязкостно-гравитационного ламинарного течения в горизонтальной круглой трубе с проводящими стенками представлены на фиг. 2, где  $N_m$  — число Нуссельта, определенное в режиме с приложенным магнитным полем, а  $N_0$  — в режиме без поля.

Анализ полученных данных для указанного случая показывает:

1) при наложении внешнего поперечного магнитного поля теплообмен уменьшается, что, вероятно, является следствием влияния магнитного поля на движение газа под влиянием сил свободной конвекции; снижение теплообмена происходит именно на участке канала, находящемся в зоне сильного магнитного поля;

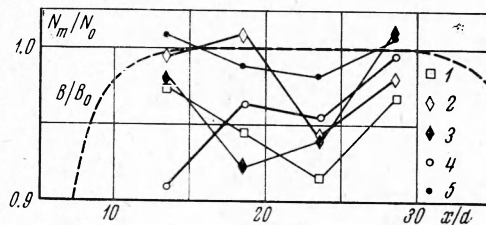
2) максимальное снижение теплообмена не превышает 15% и соответствует температуре на входе в трубу, равной 4200° К, при числе Рейнольдса

$$R = \frac{4G_{\text{Ar}}}{\pi d \mu} = 530$$

с дальнейшим увеличением температуры (что при данном расходе аргона соответствует меньшим числам Рейнольдса) наблюдалось уменьшение снижения теплообмена;

3) с увеличением скорости потока (от  $R = 600$  до 1600) при  $T = 3700^\circ \text{К}$  влияние магнитного поля уменьшается. Как показали проведенные эксперименты, с вводом в поток присадки щелочных металлов наблюдалась их конденсация на холодной поверхности трубы. При этом отмечено некоторое небольшое увеличение теплоотдачи и уменьшение влияния магнитного поля.

На фиг. 3 представлены экспериментальные данные для течения в прямоугольном канале при числах Рейнольдса, соответствующих переходной области. Наличие поперечного магнитного поля и в этом случае приводит к уменьшению теплообмена (до 10%); при этом с вводом в поток присадки также не было замечено увеличения влияния магнитного поля на теплообмен. В экспериментах, проведенных при различной ориентации поперечного сечения канала относительно направления магнитного поля, не было обнаружено существенной разницы в степени влияния магнитного поля на теплообмен. Необходимо отметить, что струя плазмы аргона, генерируемая плазматроном, обладает некоторой неравновесной электропроводностью, которая при данной температуре сравнима с величиной равновесной электропроводности аргона, содержащего легкоионизируемую присадку. Измерение величины неравновесной проводимости аргона в данных условиях крайне сложно; поэтому полученные экспериментальные данные не могут быть представлены в зависимости от числа Гартмана, как это принято в магнитной теплофизике электропроводящих жидкостей.



Фиг. 3. Относительное изменение теплоотдачи в прямоугольном канале с непроводящими стенками для различных режимов. Каждый режим соответствует указанным соответственно среднемаассовой температуре потока в °К и числу Рейнольдса в первой секции канала: 1—2400, 3600; 2—3300, 4200; 3—3400, 4100; 4—3700, 4000; 5—4000, 3900

Поступила 15 VI 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

- Куликовский А. Г., Любимов Г. А. Магнитная гидродинамика. М., Физматгиз, 1962.
- Блум Э. Я., Заке М. В., Иванов У. К., Михайлов Ю. А. Тепло- и массообмен в электромагнитном поле. Рига, «Зинатне», 1967.
- Блекман В. Х. Исследование стационарного магнитогидродинамического потока. В сб.: «Ионные, плазменные и дуговые ракетные двигатели». М., Госатомиздат, 1961.
- Raelson V. J., Dickerman P. J. Heat transfer from partially ionized gases in the presence of an axial magnetic field. Trans. ASME, Ser. C. J. Heat Transf., 1962, vol. 84, No. 2. (Рус. перев.: Тр. америк. о-ва инж.-механ. «Теплопередача», Сер. С. 1962, т. 84, № 2.)
- Чеховский В. Я., Романов А. И., Кауленас А. А., Ставровский Г. И. Теплопроводность жароупорного высокоглиноземистого бетона в интервале температур 200—1500° С. Теплофизика высоких температур, 1967, т. 5, № 5.
- Греков Л. И., Москвин Ю. В., Романычев В. С., Фаворский О. Н. Основные свойства некоторых газов при высоких температурах. Справочник, М., «Машиностроение», 1964.