

## ОБ ОСРЕДНЕНИИ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ И ПРИМЕНИМОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ

Г. А. ЛЮБИМОВ

(Москва)

В настоящее время для расчета магнитогидродинамических течений в каналах широко используются уравнения гидравлического приближения. Несколько лет тому назад на эти решения смотрели как на способ расширения наших представлений относительно качественного влияния различных факторов на магнитогидродинамическое течение в канале МГД-устройства. Сейчас же методы гидравлического расчета начинают использоваться для расчета конкретных устройств. При этом выбор того или другого конструктивного решения часто делается на основе анализа их суммарных характеристик (к. п. д., мощность на внешней нагрузке и т. д.), полученных из гидравлического расчета, причем в расчет принимаются уже не десятки, а единицы процентов.

С другой стороны, известно [1], что в газовой динамике для одного и того же конкретного неравномерного потока результаты гидравлического расчета могут отличаться на величины порядка десятка процентов в зависимости от того, какой принят метод осреднения, причем величина этого отличия зависит от степени неоднородности действительного потока.

Можно ожидать, что неоднородность магнитогидродинамических потоков будет гораздо более сильной, чем газодинамических, за счет неоднородностей силового и теплового воздействия токов, текущих в потоке. Эти неоднородности могут быть связаны, например, с неравномерным распределением токов в поперечном сечении канала за счет неоднородной электропроводности, которая может оказаться существенной, несмотря на слабую неоднородность в распределении температуры; или с наличием в поперечном сечении сил, связанных с индуцированной продольной компонентой магнитного поля, наличием анизотропии электропроводности, и т. д.

Кроме того, в отличие от газовой динамики при расчете различных МГД-устройств имеет большое значение ряд характеристик (мощность на внешней нагрузке, различные к. п. д. и т. д.), вычисляемых через средние значения газодинамических параметров.

В связи с этим кажется вероятным, что вопросы применимости гидравлического приближения к расчету магнитогидродинамических течений в каналах, рационального выбора способа осреднения действительных потоков, сопоставления результатов гидравлических расчетов с экспериментальными данными и т. д. могут оказаться гораздо более существенными, чем это было при исследовании газодинамических потоков.

1. Гидравлический подход к расчету течения в канале заключается по-существу в том, что действительному неравномерному потоку ставится в соответствие некоторый идеальный, канонический поток, которому предписываются вполне определенные распределения параметров в поперечном сечении канала. При этом задача сводится к вычислению только изменений этих параметров вдоль канала (пространственная задача сводится тем самым к одномерной).

Такое сопоставление действительного и канонического потоков предполагает некоторое мысленное осреднение параметров действительного потока в плоскости поперечного сечения канала.

В магнитной гидродинамике обычно в качестве канонического потока выбирается поток с однородным распределением параметров в поперечном сечении.

Система магнитогидродинамических уравнений гидравлического приближения при однородном по всем параметрам каноническом потоке име-

ет следующий вид (для упрощения рассуждений трение, теплообмен и индуцированные магнитные поля учитывать не будем):

$$\begin{aligned} \rho u \Sigma &= G, & \rho u \frac{\partial u}{\partial x} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\sigma}{c} \left( E - \frac{u}{c} H \right) H = -\frac{\partial p}{\partial x} + F_x. \\ \rho u \frac{\partial}{\partial x} \left( i + \frac{u^2}{2} \right) &= \sigma \left( E - \frac{u}{c} H \right) E = N, & p &= R\rho T \end{aligned} \quad (1.1)$$

Здесь  $\Sigma$  — площадь поперечного сечения канала,  $i$  — теплосодержание единицы массы, остальные обозначения общеприняты. Система координат выбрана так, что ось  $x$  направлена вдоль канала, магнитное поле  $H$  — вдоль оси  $z$ , электрическое поле  $E$  — вдоль оси  $y$ .

Система уравнений (1.1) может быть получена из общей системы уравнений магнитной гидродинамики при ряде дополнительных предположений, основное из которых заключается в том, что средние по сечению от произведения двух газодинамических величин предполагаются равными произведению средних от этих величин

$$\langle ab \rangle = \langle a \rangle \langle b \rangle \quad (\langle a \rangle = \frac{1}{\Sigma} \int a d\Sigma) \quad (1.2)$$

При этом в уравнениях (1.1) фигурируют средние по сечению значения соответствующих газодинамических величин<sup>1</sup>.

Уравнения (1.1) соответствуют каноническому потоку с однородным распределением не только газодинамических, но и электродинамических величин. При введении однородных канонических распределений для электродинамических величин автоматически вводится в рассмотрение канал прямоугольного сечения той же площади поперечного сечения, что и действительный канал.

Для канала прямоугольного сечения  $E$  представляет собой среднее значение  $y$  — компоненты электрического поля, т. е.  $E = \langle E_y \rangle$ , а величина  $H$  — в некотором смысле средний поток магнитной индукции в направлении оси  $z$ .

Под величиной  $\sigma$  по существу всегда понимают электропроводность канонического потока, которую задают в виде определенной функции газодинамических параметров канонического потока

$$\sigma = \sigma(p, T) \quad (1.3)$$

При конкретных расчетах зависимость (1.3) задается, причем часто стремятся задать (1.3) в виде, хорошо аппроксимирующем действительную зависимость электропроводности от температуры и давления<sup>2</sup>.

Очевидно, что введенный выше канонический поток представляет собой простейшую модель канонического потока. Возможно введение

<sup>1</sup> В уравнениях (1.1) фигурируют средние по сечению значения всех параметров. Возможно введение других средних величин (например, средних по расходу, средних от произведений и т. д.). В последнем случае система (1.1) должна быть дополнена соотношениями между различными средними величинами, полученными на основе дополнительных соображений. В магнитной гидродинамике до сих пор всегда использовалась система (1.1), при этом роль дополнительных связей между различными средними величинами играют соотношения (1.2).

<sup>2</sup> Подчеркнем, и это будет существенно для дальнейшего, что  $\sigma$ , определенная по (1.3) через параметры канонического потока, может сильно отличаться от среднего значения  $\sigma$ , определяющего внутреннее сопротивление действительного потока. Это объясняется тем, что зависимость  $\sigma$  от температуры очень сильная, и, следовательно, даже при очень малой неоднородности в распределении температуры величина  $\sigma$ , подсчитанная по среднему значению температуры, может сильно отличаться от величины  $\sigma = 2h/r$  (где  $r$  — внутреннее сопротивление канала,  $2h$  — расстояние между электродами).

канонических потоков с неоднородным распределением параметров в плоскости поперечного сечения. Естественно, что при этом требуется сделать определенные предположения для построения модели канонического потока. Такой подход известен в газовой динамике [2,3], но фактически не использовался до сих пор в задачах магнитной гидродинамики. В ряде задач при необходимости учета неоднородностей в распределении электродинамических величин возможно введение канонических потоков с однородным распределением газодинамических и неоднородным (заданным определенным образом) распределением электродинамических величин [4,5].

Естественно, что соответствие того или другого канонического потока (соответствие принимаемых при его введении предположений) тому или другому действительному течению в канале должно в конечном итоге проверяться либо на экспериментальных данных, либо на результатах более точных решений пространственных задач.

С другой стороны, ясно, что любой канонический поток (так как он соответствует некоторому осреднению параметров действительного потока) не может сохранить, а следовательно, и описывать все свойства действительного потока. При любом способе осреднения (мысленного или действительного) часть свойств действительного потока (который может быть реализован на практике и параметры которого можно в принципе измерить) теряется.

2. Практический смысл всякого осреднения, в частности — введение гидравлического приближения посредством определенного канонического потока, заключается в том, чтобы на основе расчета получить некоторые сведения об изменении средних характеристик действительного потока. Естественно при этом, что практическое использование результатов гидравлического расчета связано с определением законов соответствия (правил пересчета) между выбранным каноническим потоком и определенным классом действительных течений, причем экспериментальная проверка выводов гидравлической теории должна опираться на эти правила пересчета.

Правила пересчета заключаются в том, что требуют совпадения определенных средних характеристик действительного и канонического потоков. Очевидно, что требование совпадения всех средних характеристик не может быть удовлетворено, так как его удовлетворение означало бы тождественность действительного и канонического потоков, что возможно только в идеальных условиях (например, тождественность однородного канонического и действительного потоков означала бы, что в последнем отсутствуют вязкие пограничные слои), практически неосуществимых.

Так как требование тождественности всех средних характеристик действительного и канонического потоков неосуществимо (такое соответствие в принципе невозможно), то обычно требуют тождественности (совпадения) лишь некоторых средних характеристик. При этом выбор характеристик, по которым осуществляется отождествление потоков, диктуется постановкой задачи<sup>1</sup>. Действительно, в ряде задач газовой динамики (в частности, при расчете элементов двигателя) существенно знание расхода газа  $G$ , величины среднего потока полного теплосодержания  $I_0$  и среднего потока энтропии  $S$ , так как эти величины позволяют правильно оценить расход газа, подвод энергии к потоку и потери. В этом случае требуется, чтобы у действительного и канонического потоков в выбран-

<sup>1</sup> Вопрос о выборе принципов осреднения и зависимости результатов расчета от этого выбора подробно обсужден и проиллюстрирован примерами из газовой динамики в работе [1]. Ниже излагаются основные идеи этой работы в применении к магнитогидродинамическим задачам.

ных определенным образом сечениях<sup>1</sup> величины  $G, I_0, S$  совпадали (сопоставление с сохранением  $G, I_0, S$ ). В других задачах могут быть существенны другие параметры, например, поток импульса  $J$  (в задачах о вычислении тяги), среднее давление  $p$  (при расчетах на прочность), электрическая мощность, снимаемая с канала  $N$ , и т. д.

Выбор способа сопоставления связан с указанием конкретных параметров, по которым производится отождествление действительного и канонического потоков. Число этих параметров может быть различным, но не должно быть очень большим, чтобы эта система параметров для канонического потока не была бы переопределенной. Например, нельзя при однородном каноническом потоке произвести сопоставление с сохранением  $G, I_0, S$  и  $T$ , так как при заданных  $G, I_0, S$  средняя температура в каноническом потоке определяется этими величинами и, следовательно, не может быть независимым параметром, по которому производится сопоставление.

Точно так же нельзя, например, произвести сопоставление с сохранением одновременно температуры  $T$ , давления  $p$  и внутреннего электрического сопротивления  $r$ , так как последнее для канонического потока есть величина, определяемая через  $p$  и  $T$ .

Таким образом, может оказаться, что сопоставление действительного и канонического потоков с сохранением всех интересующих параметров в принципе невозможно в рамках принятого канонического потока.

Если система параметров, с сохранением которых производится сопоставление, задана, то все остальные характеристики канонического потока вычисляются через них по известным газодинамическим и электродинамическим формулам.

Так как для действительного потока предположение (1.2), имеющее место для канонического потока, не выполняется и так как формулы газовой динамики и электродинамики нелинейны, то ясно, что численные значения какого-либо параметра (газодинамического или электродинамического) в данном сечении, полученные при задании различных систем, определяющих сопоставление параметров, будут различаться между собой и отличаться, вообще говоря, от истинного среднего значения данного параметра в действительном потоке (которое может быть в принципе измерено). Например, в работе [1] показано, что вычисленное значение среднего давления торможения для потока с одной и той же относительно небольшой неоднородностью в распределении скорости и температуры по сечению канала может различаться на несколько процентов в зависимости от того, производится ли сопоставление с сохранением  $G, I_0, S$  или с сохранением  $G, J, S$ . Естественно, что величина этого различия зависит от того, насколько неоднороден действительный поток.

Выше обсуждался вопрос о сопоставлении параметров действительного и канонического потока в определенном сечении канала. В ряде случаев знания значений определенных параметров в некоторых сечениях достаточно для решения задачи.

Например, для вычисления подвода энергии к потоку между двумя сечениями канала достаточно знать величину потока полного тепло-содержания в этих сечениях.

В других задачах, например, при расчете течения по заданным начальным данным (значениям параметров в начальном сечении) от гидрав-

<sup>1</sup> В данном случае имеется в виду сопоставление параметров в определенных сечениях, но не их распределение вдоль канала. При этом отличие расчетных значений параметров, полученных при разных способах сопоставления, зависит от того, насколько хорошо выбранная модель канонического потока соответствует действительному распределению параметров в поперечном сечении канала.

лического расчета требуется описание распределений различных параметров по длине канала.

В последнем случае, наряду с задачей сопоставления параметров действительного и канонического потоков, в каждом сечении, требуется, чтобы распределение выбранных для сопоставления параметров канонического потока по длине канала было бы близко к их распределению в действительном потоке.

Очевидно, что получение близких к действительным распределений параметров в каноническом потоке связано с правильным осреднением правых частей основных интегральных уравнений механики, т. е. в конечном итоге — с выбором модели канонического потока.

В задачах магнитной гидродинамики силовое и тепловое воздействия на поток со стороны электромагнитного поля зависят от газодинамических параметров в данном сечении канала, поэтому осреднение источников воздействия (силовых и тепловых) зависит от осреднения газодинамических параметров.

В принятой здесь модели канонического потока распределение электродинамических параметров по сечению канала считается однородным и для них, так же как для газодинамических параметров, принимаются соотношения (1.2). В связи с этим при сопоставлении действительного и канонического потоков необходимо (если иметь в виду расчет распределений параметров по длине канала) требовать соответствия  $F_x$  и  $N$  в каждом сечении канала.

Приведенные выше соображения надо учитывать при попытке сравнения расчетных и экспериментальных данных относительно распределений различных средних величин вдоль канала. Очевидно, что такое сравнение может производиться только по параметрам, по которым производится сопоставление потоков. Распределения остальных средних величин, измененные в эксперименте, могут отличаться (правда, это отличие в некоторых случаях может оказаться небольшим) от соответствующих расчетных распределений.

Проиллюстрируем сказанное выше на примере магнитогидродинамического течения в канале МГД-генератора.

Пусть электропроводный газ движется в плоском канале во внешнем магнитном поле, параллельном стенкам канала, которые представляют собой секционированные электроды, соединенные через внешнюю нагрузку (МГД-генератор). Пусть внешняя нагрузка  $R(x)$ , сечение канала  $2h(x)$  и магнитное поле  $H(x)$  заданы. Пусть, кроме того, электропроводность газа определяется в зависимости от температуры формулой [6]

$$\sigma = A \exp(-\beta/T), \quad \beta = 7.5 \cdot 3000 \quad (2.1)$$

Покажем, к каким результатам может привести различное сопоставление в том случае, если поток имеет слабую неоднородность в плоскости поперечного сечения.

При расчете МГД-генераторов одной из основных величин является мощность, выделяемая на внешней нагрузке. Если рассматривать элемент канала, прилегающий к рассматриваемому сечению изолированно от других элементов (что возможно, если пренебречь пространственными эффектами растекания тока и считать электроды идеально секционированными), то удельную мощность на внешней нагрузке (на единицу ширины канала), связанную с данным сечением, можно вычислить по формуле

$$N = \frac{R}{(R+r)^2} \mathcal{E}^2 \quad (2.2)$$

Плотность электромагнитной силы в каждом сечении вычисляется при принятых предположениях по формуле

$$F_x = \frac{H}{c} \frac{\mathcal{E}}{(R+r)} \quad (2.3)$$

В формулах (2.2) и (2.3) величина  $\mathcal{E}$  — э.д.с. генератора,  $r$  — его внутреннее сопротивление

$$\mathcal{E} = 2h \frac{\langle u \rangle H}{c}, \quad r = \frac{2h}{\langle \sigma \rangle} = \int_{-h}^h \frac{dy}{\sigma(y)} \quad (2.4)$$

Таким образом, при заданных  $H$  и  $R$  мощность на внешней нагрузке и электромагнитная сила, связанные с данным сечением канала, определяются э. д. с. и внутренним сопротивлением генератора (2.4).

При сопоставлении действительного и канонического потоков естественно требовать совпадения  $\mathcal{E}$  и  $r$ , так как эти величины определяют электрические характеристики генератора и, кроме того, правые части уравнений (1.1). Если требовать дополнительно соответствия по расходу, то можно проводить сопоставление потоков с сохранением  $\mathcal{E}$ ,  $r$ ,  $G$ . При таком сопоставлении температура в каноническом потоке определяется формулой

$$T = \frac{\beta}{\ln(2h/Ar)} \quad (2.5)$$



Фиг. 1

где  $r$  — истинное внутреннее сопротивление действительного потока. Остальные величины в каноническом потоке рассчитываются через  $\mathcal{E}$ ,  $r$ ,  $G$ ,  $T$ ,  $H$ ,  $R$ ,  $h$  по обычным формулам.

С другой стороны, часто для вычисления  $\langle \sigma \rangle$  в формуле (2.4) используют формулу (2.1), подставляя в нее среднее значение температуры  $\langle T \rangle$ . Такой подход соответствует сопоставлению потоков с сохранением температуры (температура канонического потока принимается равной средней температуре действительного потока). Если требовать, кроме того, совпадения  $\mathcal{E}$  и  $G$ , то это соответствует сопоставлению<sup>1</sup> потоков с сохранением  $\mathcal{E}$ ,  $T$ ,  $G$ .

Внутреннее сопротивление при этом рассчитывается по формуле

$$r = \frac{2h}{\langle \sigma \rangle} = \frac{2h}{A} \exp \frac{\beta}{\langle T \rangle} \quad (2.6)$$

Для того чтобы проиллюстрировать влияние способа сопоставления на результаты расчета, на фиг. 1 представлена зависимость отношения мощностей  $N$  (рассчитанной при сопоставлении с сохранением  $\mathcal{E}$ ,  $r$ ,  $G$ ) и  $N^*$  (сопоставление с сохранением  $\mathcal{E}$ ,  $T$ ,  $G$ ) от величины внешней нагрузки. При расчете принято для примера, что течение в канале описывается решением работы [8] при  $L/2h = 10$  ( $L$  — длина канала),  $T_w/T_0^* = 0.5$  ( $T_w$  — температура стенки-электрода,  $T_0^*$  — температура на входе в канал), число Рейнольдса и параметр нагрузки, подсчитанные по параметрам на входе в канал, приняты равными  $N_{Re} = 10^6$ ,  $k = 0.5$ . Пара-

<sup>1</sup> До последнего времени на практике при расчете магнитогидродинамических течений в каналах на основе гидравлической теории пользовались по существу сопоставлением с сохранением  $T$ ,  $u$ ,  $\rho$ , что дает близкие результаты с рассматриваемым осреднением и точно совпадает с ним при однородном распределении плотности по сечению канала.

метр  $x/L$  характеризует расстояние рассматриваемого сечения от начального сечения канала.

Расчеты работы [8] относятся к начальному гидродинамическому участку канала постоянного сечения, когда в основной части потока (ядре) распределение всех параметров однородно, и только в узких пограничных слоях вблизи стенки-электрода параметры потока меняются от их значений в ядре ( $T_0, u_0, \dots$ ) до значений на стенке ( $T_w, u = 0, \dots$ ), т. е. к потоку с очень небольшой степенью неоднородности в распределении параметров по сечению. Для того чтобы характеризовать степень неоднородности потока в данном случае, укажем, что для сечения  $x/L = 0.4$  отношения средней скорости и температуры к их значениям в ядре потока соответственно равны

$$\langle u \rangle / u_0 = 0.993, \quad \langle T \rangle / T_0 = 0.994$$

Для расчета к. п. д. генератора иногда используется величина полного теплосодержания. Зависимость отношения полных теплосодержаний, рассчитанных при различных способах сопоставления потоков, от числа Маха представлена на фиг. 2.

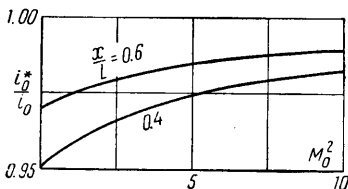
Приведенный пример показывает, что результаты расчета при различных способах сопоставления могут существенно различаться между собой. Это обстоятельство объясняется тем, что в задаче присутствует очень «сильная» функция осредняемых параметров — внутреннее сопротивление. При этом очевидно, что сопоставление с сохранением температуры — некорректно, гораздо более правильные результаты, с точки зрения внешних характеристик генератора, будет давать сопоставление с сохранением  $r$ .

Но, с другой стороны, сопоставление с сохранением  $r$  дает заниженное, по сравнению со средним, значение температуры, что может привести к ошибкам при расчете, например, к.п.д. генератора.

Кроме того, при сопоставлении с сохранением  $\mathcal{E}, r, G$  теряется возможность правильно описать изменение параметров вдоль канала на основе принятой модели канонического потока (хотя правые части в уравнениях (1.1) вычисляются точно при таком подходе), так как получающееся по формуле (2.5) значение температуры ниже средней температуры, что приведет к ошибкам при вычислении распределения давления.

Из приведенного сравнения следует, что если неоднородность, хотя и слабая, в распределении температуры по сечению канала существенно влияет на внутреннее сопротивление генератора, то сопоставление потоков ни по одной из указанных выше методик невозможно, с практической точки зрения. В данном случае для получения расчетных данных необходимо развивать другие гидравлические методы, основанные на использовании неоднородного канонического потока<sup>1</sup>.

С другой стороны, в ряде случаев внутреннее сопротивление магнетогидродинамического канала можно считать заданным и не связанным с другими гидродинамическими параметрами задачи. Например, при исследовании течений жидких металлов  $\sigma = \text{const}$ . В других случаях эта зависимость, в силу постановки задачи, может оказаться известной. Например, если вид распределения температур в сечении задан или известно, что в силу больших размеров канала электрическое сопротивление



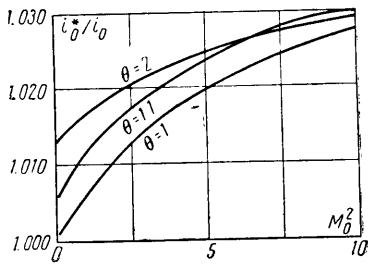
Фиг. 2

<sup>1</sup> В частности, по-видимому, при сопоставлении с сохранением  $\mathcal{E}, r, G$  целесообразно отказаться от обычной формулы уравнения состояния. Но этот вопрос нуждается в дополнительном исследовании.

холодных пограничных слоев мало по сравнению с сопротивлением ядра потока, в котором температура практически постоянна в данном сечении канала. Наконец, в том случае, когда электропроводность определяется нетермической ионизацией газа, а плотностью протекающего в канале тока [7].

Во всех этих случаях внутреннее сопротивление канала не является определяющей величиной при сопоставлении потоков (оно либо точно известно, либо его вычисление по известным формулам по средним значениям параметров дает результат, близкий к действительности). В этих случаях возможности гидравлического метода расчета, использующего однородный канонический поток, сильно расширяются. Тем не менее, и в этом случае способ сопоставления может влиять на результаты расчета.

Для иллюстрации этого вывода примем, что распределения скорости, температуры и давления в поперечном сечении канала описываются формулами



Фиг. 3

$$\frac{u}{u_0(x)} = \frac{T - T_w(x)}{T_0(x) - T_w(x)} = \left(1 - \frac{|y|}{h}\right)^{1/2}$$

$$p = \text{const} \quad (2.7)$$

В выбранном сечении канала средние значения скорости и температуры вычисляются при этом по формулам

$$\langle u \rangle = u_0 I, \quad \langle T \rangle = T_w [1 + (\theta - 1) I]$$

$$\theta = T_0 / T_w, \quad I = 7/8$$

Рассмотрим сопоставление потоков с распределением параметров (2.7) с сохранением  $\mathcal{E}$ ,  $G$ ,  $i_0^*$  ( $i_0^* = I_0 / G$  — удельный поток полного тепло-содержания) и с сохранением  $\mathcal{E}$ ,  $G$ ,  $T$ . При первом способе сопоставления представляется возможность правильно оценить по результатам расчета расход газа, величину потери энергии газового потока и э.д.с. генератора. Во втором случае имеется возможность правильно оценить э.д.с., расход и температуру потока, которая может быть существенна, если, например, внутреннее сопротивление задано как функция средней температуры. Фиг. 3 показывает, насколько вычисленный при втором способе осреднения поток полного теплосодержания  $i_0$  может отличаться от его истинного значения  $i_0^*$ , принятого при первом способе осреднения.

Различие между  $i_0^*$  и  $i_0$  сохраняется и в том случае, когда  $\theta = 1$  (равномерное распределение температуры) за счет неравномерного распределения скорости по сечению канала.

Отметим, что при исследовании магнитогидродинамических течений, по-видимому, всегда необходимо проводить сопоставление с сохранением  $\mathcal{E}$ , так как эта величина определяет электрические характеристики канала, и, следовательно, существенно влияет на все течение. В качестве других величин, сохраняемых при сопоставлении (в том случае, когда  $r$  не является определяющим сопоставлением параметром), можно выбирать различные параметры. Например, при сопоставлении с сохранением  $\mathcal{E}$ ,  $i_0$ ,  $S$  ( $S$  — поток энтропии) возможно правильно учесть потери между двумя сечениями потока и суммарный отвод энергии от него.

В работе [1] показано, что сопоставление потоков с сохранением  $G$ ,  $i_0$ ,  $S$  всегда возможно. Другие способы сопоставления могут оказаться невозможными при заданной конфигурации канала. Действительно, при сопоставлении, например, с сохранением  $\mathcal{E}$ ,  $G$ ,  $i_0$  энтропии в каноническом и действительном потоках могут отличаться друг от друга. При этом



канонический поток может не проходить через заданное сечение канала в силу того, что критические сечения у этих потоков будут различны.

Рассмотренные примеры и общие соображения показывают, что результаты гидравлического расчета имеют ограниченный характер.

Если на практике создан, например, неравномерный поток, у которого расход, э.д.с. и внутреннее сопротивление совпадают с расчетными значениями этих величин в соответствующем каноническом потоке, то в этом потоке распределение полного теплосодержания, например, будет отличаться от расчетного распределения. Очевидно, что у данного действительного потока будут те же значения мощности, выделяемой на внешней нагрузке, и коэффициента нагрузки, но внутренний к.п.д. такого генератора будет отличаться от расчетного. Величина различия расчетного и истинного значений какого-либо параметра будет зависеть от степени неоднородности действительного потока.

Указанные выше обстоятельства необходимо иметь в виду при построении гидравлических методов расчета и сравнительной оценке различных решений. Представляется очевидным, что эти методы должны быть определенным образом унифицированы для получения сравнимых результатов. Это особенно необходимо при экспериментальной проверке тех или иных решений.

Представляется необходимой разработка гидравлических методов расчета, основанных на неоднородных (в гидродинамическом и электродинамическом смысле) канонических потоках, так как в ряде случаев, по-видимому, такие методы окажутся единственно возможными для практических расчетов МГД-устройств.

Поступила 10 II 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Седов Л. И., Черный Г. Г. Об осреднении неравномерных потоков газа в каналах. Теоретическая гидромеханика, Сб. статей № 12, Оборонгиз, 1954.
2. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика, изд. 2-е. Гостехиздат, 1953.
3. Гинзбург И. П. Прикладная гидроаэродинамика. Изд. Ленингр. ун-та, 1958.
4. Лобанова Л. Ф. Задача о входе сжимаемого газа в однородное магнитное поле. ПМТФ, 1964, № 6.
5. Любимов Г. А., Семенова И. П. Постановка задачи о вязком пограничном слое на холодном электроде. Магнитная гидродинамика, 1965, № 4.
6. Kerrebrock J. Electrode boundary layers in direct-current plasma accelerators. J. Aero Space Sci., 1961, vol. 28, No. 8.
7. Kerrebrock J., Hoffman M. Nonequilibrium ionization due to electron heating. AIAAJ, 1964, vol. 2, No. 6.
8. Пасконов В. М., Якубенко А. Е. Расчет пограничного слоя на электропроводящей стенке плоского канала. МЖГ, 1966, № 3.