

8. Жирников Б. Л., Петров К. И. Исследование взаимодействия со встречным потоком струй, вытекающих из лобовой поверхности тела вращения // Современные проблемы аэромеханики. — М.: Машиностроение, 1987.
9. Брагинский С. И. Явления переноса в плазме // Вопросы теории плазмы. — М.: Госатомиздат, 1963. — Вып. 1.

г. Днепропетровск

Поступила 15/V 1989 г.,
в окончательном варианте — 10/VII 1989 г.

УДК 538.323 : 531.551

Т. Г. Власова, С. Р. Петров

КПД И НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ В МНОГОКАСКАДНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Известный способ получения высоких скоростей для макротел — разгон проводников в электромагнитных ускорителях: контактных (рельсовых) и бесконтактных (индукционных). В последнее время возрос интерес к многокаскадным индукционным ускорителям с ускоряющими катушками в виде соленоидов, которые позволяют эффективно разгонять тела относительно большой массы при ограниченных токах в цепях ускорителя и механических нагрузках. Благодаря отсутствию силовоточных скользящих контактов индукционные ускорители обладают относительно высоким КПД, большим ресурсом работы и позволяют разгонять тела как из обычных проводниковых материалов [1], так и сверхпроводниковых [2]. Авторами [3] проведены расчеты электромагнитного ускорителя в виде линейного асинхронного двигателя с соленоидными обмотками, питаемыми от трехфазной сети переменного тока, с помощью которого тела массой 1 кг предполагается разгонять до 10 км/с. Для этого, однако, потребуется источник трехфазного тока мощностью 100 ГВт. В [4] разработана математическая модель многокаскадного индукционного ускорителя с ускоряющими катушками, питаемыми от конденсаторных батарей, и экспериментально исследован физический макет.

В настоящей работе проанализированы электромагнитные процессы, энергетические соотношения и нагрев проводников в многокаскадном ускорителе с магнитосвязанными катушками, питаемыми от конденсаторов, определены оптимальные параметры ускорителя и достижимые скорости метания.

1. «Коэффициент идеальности» электромагнитного ускорителя. При анализе процессов в электромагнитных ускорителях особый интерес представляют вопросы достижения максимального КПД, определяемого отношением приращения кинетической энергии проводника W к начальной энергии, накопленной в источнике питания W_0 :

$$(1) \quad \eta = W/W_0,$$

и максимальной предельной скорости метания, соответствующей плавлению проводника в результате разогрева вихревыми токами. Очевидно, что наибольшие предельные скорости могут быть достигнуты в том случае, если используемый способ ускорения обеспечивает максимальное отношение кинетической энергии проводника W по окончании разгона к выделившейся в нем тепловой энергии Q или, если рассматривается отрезок ускорителя, отношение приращения этих величин dW/dQ .

Остановимся на идеальном случае разгона плоской магнитной вслойной «тонкого» листа с электропроводностью при нормальной температуре σ_0 . Можно показать, используя, например, методы вариационного исчисления, что наибольшая величина dW/dQ достигается при равномерном распределении плотности тока по толщине листа и составляет

$$(2) \quad \frac{dW}{dQ} = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \Delta \sigma v \frac{1 + H_1/H_0}{1 - H_1/H_0}.$$

Здесь H_0 , H_1 — напряженность магнитного поля перед и за листом соответственно; v , σ — скорость движения листа и его электропроводность при этой скорости.

Характер зависимости dW/dQ от v подтверждает известный эмпирический вывод о том, что электромагнитный способ ускорения наиболее

эффективен при доразгоне проводников, предварительно ускоренных другим способом. Интегрируя (2) при $H_1 = 0$ (когда ускоряющая сила максимальна) с учетом соотношения $\sigma = \sigma_0/(1 + \beta q)$ (β — тепловой коэффициент электропроводности, q — удельное теплосодержание), найдем

$$(3) \quad \frac{W}{Q} = \frac{1}{2} \beta v^2 [\exp(2\beta v/\Delta \sigma_0 \mu_0) - 1]^{-1}.$$

Введем величины, равные отношению достигаемых значений dW/dQ , W/Q в рассматриваемом типе ускорителя к соответствующим значениям, определенным по (2) при $H_1 = 0$ и по (3):

$$(4) \quad \kappa = \frac{2}{\mu_0 \sigma v \Delta} \frac{dW}{dQ};$$

$$(5) \quad K = \frac{2}{\beta v^2} [\exp(2\beta v/\sigma_0 \mu_0 \Delta) - 1] \frac{W}{Q},$$

которые в дальнейшем будем называть дифференциальным (4) и интегральным (5) «коэффициентами идеальности» электромагнитного ускорителя. Коэффициенты κ , K связаны простыми соотношениями с предельной скоростью v_* , отвечающей плавлению проводника:

$$(6) \quad v_* \simeq \frac{\sigma_0 \mu_0 \Delta}{2\beta} \ln(1 + \beta q_* K),$$

или, если κ остается в процессе ускорения постоянной,

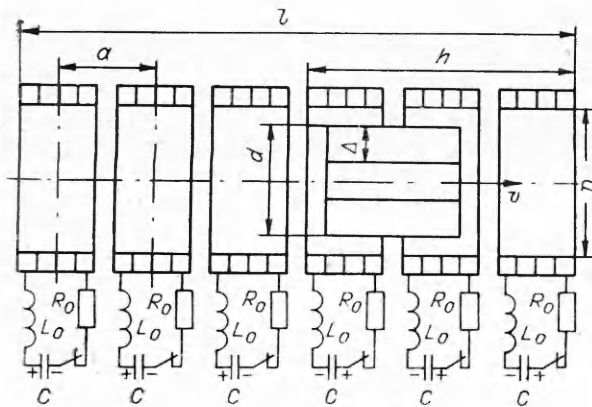
$$(7) \quad v_* \simeq \kappa \frac{\sigma_0 \mu_0 \Delta}{2\beta} \ln(1 + \beta q_*).$$

(q_* — теплосодержание проводника при переходе в жидкую фазу). Равенства (6), (7) точные при равномерном распределении плотности тока по сечению проводника и приближенные при неравномерном. В любом случае в ускорителе, имеющем более высокий «коэффициент идеальности», плавление проводника будет иметь место при более высоких скоростях движения. Например, для случая разгона в простейшем рельсовом ускорителе с шириной рельсов b_1 и расстоянием между ними b_2 пластины с равномерно распределенной по сечению плотностью тока и без учета тепловыделения в контактах получим

$$(8) \quad \kappa = \frac{\alpha}{\pi} \left[\ln \frac{1}{\alpha} + \frac{\alpha^2 - 1}{2\alpha^2} \ln(1 + \alpha^2) + \frac{2}{\alpha} \operatorname{arctg} \alpha \right] \quad (\alpha = b_1/b_2).$$

При $\alpha = 0,2 \div 1,0$ из (8) следует $\kappa = 0,2 \div 0,5$. Для коаксиального рельсового ускорителя с цилиндрическими внешним и внутренним электродами при тех же допущениях $\kappa = 1,0$. Учет неравномерности распределения плотности тока приводит к уменьшению «коэффициента идеальности».

Например, близкий к идеальному способ металлизации реализуется при разгоне плоских кольцевых проводников в магнитном поле кольцевого индуктора. Используя результаты расчетов процесса ускорения с учетом реального распределения плотности тока в проводнике [5], даже для достаточно тонких проводников ($\Delta = 10^{-3}$ м) $K = 0,5 \div 0,6$. Для ускорителя в виде линейного асинхронного двигателя из результатов [3] $K = 0,03 \div 0,04$.



Р и с. 1

2. Численный анализ электромагнитных процессов в многокаскадном индукционном ускорителе. Расчетная схема ускорителя с катушками в виде соленоидов, подключаемых к конденсаторным батареям, изображена на рис. 1. При достаточно близком расположении катушек такой ускоритель удобно рассматривать в виде линии с распределенными параметрами, элементы которой (LC -контур) связаны индуктивно. Это позволяет ввести погонные (на единицу длины) индуктивность L^0 и емкость C^0 ускорителя [4]: $C^0 = C/a$, $L^0 = (\pi\mu_0/4)(DN/a)^2$ (N — число витков катушки). Рассмотрим отрезок ускорителя длиной l , в котором параметры каждого из каскадов, содержащих ускоряющую катушку, присоединенную через коммутатор к конденсаторной батарее, одинаковы. Все конденсаторы заряжены до равного по абсолютной величине напряжения U . Для получения общих результатов используем безразмерные параметры, введенные в [4]:

$$\begin{aligned} l^* &= l/D, a^* = a/D, h^* = h/D, d^* = d/D, R^* = R_0 \sqrt{C^0/L^0}, \\ L^* &= L_0/L^0 D, v^* = v \sqrt{L^0 C^0}, \sigma^* = \sigma D \sqrt{L^0/C^0}, \\ \beta^* &= \beta C^0 U^2 / 2D^2, m^* = m / (DL^0 (C^0 U)^2), t^* = t / (D \sqrt{C^0 L^0}), \\ i^* &= (i/U) \sqrt{L^0/C^0}, j^* = j(D^2/U) \sqrt{L^0/C^0}, \end{aligned}$$

где R_0 , L_0 — активное сопротивление и индуктивность соединительных проводов и коммутатора; i , j — ток и плотность тока. Значение остальных параметров поясняет рис. 1. В случаях, не оговоренных особо, расчеты проводились при $l^* = 24$, $R^* = 0,1$, $L^* = 0,3$, $\sigma^* = 5 \cdot 10^4$, $\beta^* = 0,1$, $m^* = 10$, $d^* = 0,95$, $\Delta/D = 0,75$ (Δ — толщина стенки ускоряемого проводника, представляющего собой полый металлический цилиндр). Численный анализ проводился с помощью математической модели на основе метода интегральных уравнений [4]. Сечение проводника разбивалось на $6 \times 6 = 36$ расчетных контуров. КПД отрезка ускорителя определялся по (1), а «коэффициент идеальности» — по (4), где дифференциалы dW , dQ заменялись соответствующими приращениями ΔW , ΔQ за время пролета проводником отрезка ускорителя. Анализировалось влияние на КПД и «коэффициент идеальности» относительных значений скорости влета проводника в отрезок ускорителя v_0^* , длины отдельного каскада a^* , диаметра проводника d^* и длины участка ускорителя h^* , на котором конденсаторные батареи заряжены с одинаковой поляризованностью.

На рис. 2 изображены зависимости КПД η и κ от v_0^* и a^* при $h^* = 3$. Характер зависимостей КПД от скорости влета проводника качественно аналогичен полученным в [6] при анализе однокаскадного ускорителя. Максимальный КПД достигается при $v_0^* = 0,5 \div 1,0$ и может превышать 0,2. Зависимости «коэффициента идеальности» от v_0^* также имеют максимум, но более пологий и достигаемый при существенно больших скоростях влета ($v_0^* = 1,2 \div 1,6$). Характер электромагнитных процессов в ускорителе в указанных двух режимах поясняют рис. 3, 4.

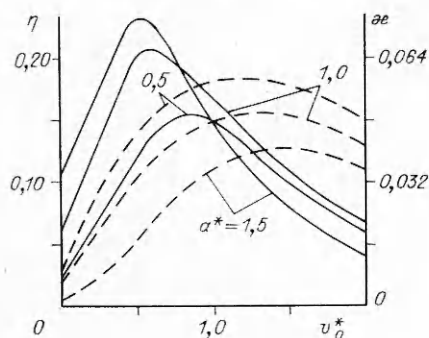


Рис. 2

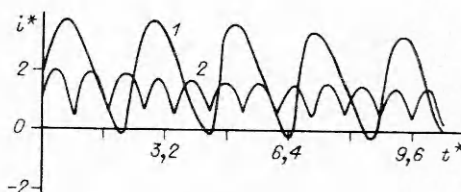
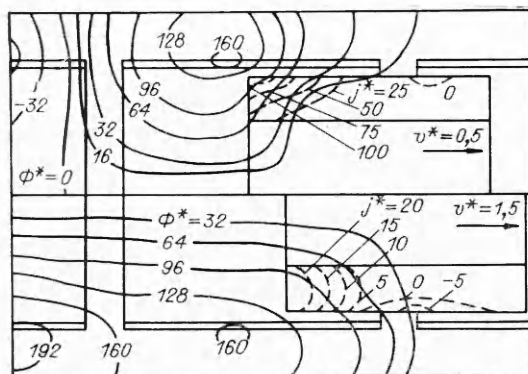


Рис. 3



Р и с. 4

по сравнению с амплитудным значением. Шунтирование конденсаторных батарей диодами для предотвращения их перезаряда не приводит к заметному изменению характера электромагнитных процессов. Быстрое уменьшение тока в предшествующей катушке происходит и в этом случае за счет ЭДС, индуцируемой в ней при нарастании тока в очередной катушке, подключаемой к конденсаторной батарее. Таким образом, в создании ускоряющего магнитного поля в любой момент времени принимает участие катушка одного каскада (см. рис. 4). Ток в ускоряемом проводнике имеет вид отдельных коротких импульсов, что определяет наличие резкого скин-эффекта, высоких плотностей тока и интенсивного нагрева проводника. С другой стороны, незначительное проникновение магнитного поля в проводник определяет высокий КПД. При $v_0^* = 1,2 \div 1,6$, соответствующих максимуму «коэффициента идеальности», в создании ускоряющего поля участвуют одновременно несколько катушек, образуя своего рода длинный соленоид, который за счет коммутаций «перемещается» синхронно с ускоряемым проводником. В результате воздействия на проводник пульсирующего магнитного поля ток в проводнике принимает вид кривой однополярного характера с постоянной составляющей, распределение плотности тока по толщине стенки проводника приближается к равномерному (см. рис. 4), плотность тока и интенсивность нагрева снижаются. При более высоких скоростях влета ($v_0^* > 1,6$) «коэффициент идеальности» уменьшается за счет значительного снижения прироста кинетической энергии проводника, поскольку последний пролетает очередную катушку раньше, чем ток в ней достигнет амплитудного значения. С учетом соотношения (7) из анализа зависимостей на рис. 2 следует, что условия достижения максимального КПД и максимальной предельной скорости существенно отличаются. Наивысшие предельные скорости метания могут быть достигнуты при КПД примерно вдвое меньшем максимально возможного.

Рассмотрим влияние на эффективность работы ускорителя длины отдельного каскада a^* . При неизменных L^0 , C^0 более короткий каскад имеет меньшие индуктивность катушки и емкость конденсаторной батареи, следовательно, более высокую частоту разрядного контура, в связи с чем наибольший КПД достигается при более высоких скоростях движения проводника, а максимальный КПД снижается в связи с возрастанием доли магнитной энергии, теряемой в индуктивностях L_0 (см. рис. 2). С другой стороны, «коэффициент идеальности» в ускорителе с короткими каскадами существенно выше. Расчеты показывают, что при уменьшении a^* от 1,0 до 0,5 за счет сильной магнитной связи между катушками амплитудное значение тока в проводнике снижается примерно вдвое, что обуславливает значительное уменьшение интенсивности нагрева. В то же время ускоряющая сила остается достаточно высокой, поскольку в короткой катушке преобладает доля усилий, действующих на проводник в осевом направлении. Следствием снижения тока в проводнике при $a^* < 1$ и $v_0^* > 1$

На рис. 3 изображены зависимости от времени суммарного тока в проводнике i^* при $v_0^* = 0,5$ и $1,5$ (кривые 1 и 2 соответственно). На рис. 4 даны кривые распределения магнитного потока $\Phi^* = \Phi/DU\sqrt{L^0C^0}$ и плотности тока j^* по сечению проводника, отвечающие этим же скоростям влета. В случае малых скоростей влета ($v_0^* < 0,5$) в момент влета проводника в очередную катушку ток в катушке предшествующего каскада уменьшается в несколько раз

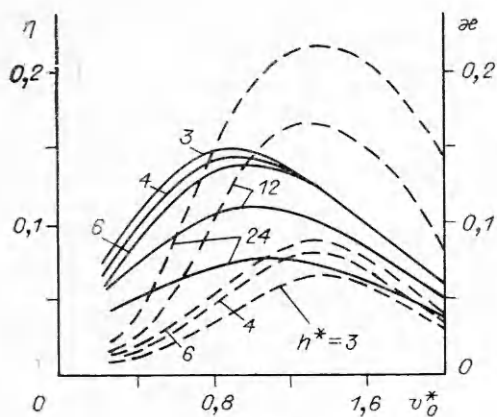


Рис. 5

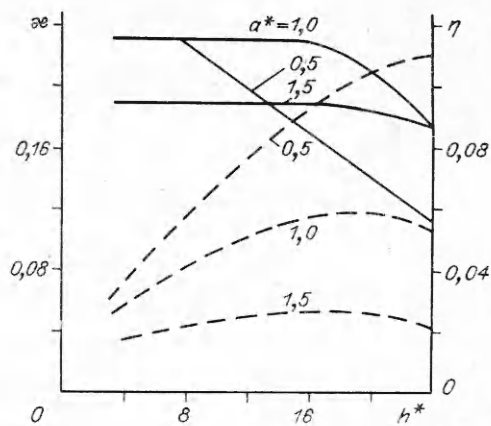


Рис. 6

является также уменьшение обжимающих проводник механических усилий.

Проанализируем влияние на эффективность работы ускорителя смены полярности подключения конденсаторных батарей к катушкам по его длине. Из расчетов вытекает, что при одинаковой полярности подключения батарей амплитуда суммарного тока в ускоряемом проводнике постепенно уменьшается в результате затухания постоянной составляющей (см. рис. 3). Деление анализируемого отрезка ускорителя, например, на два участка с разноименной полярностью подключения батарей позволяет увеличить амплитуду тока в проводнике на 15—20 %, а приращение скорости на отрезке — на 30 ÷ 40 %. Однако при быстром изменении направления тока в проводнике возникает резкий скин-эффект, возрастает интенсивность нагрева и снижается «коэффициент идеальности». На рис. 5 изображены зависимости КПД и «коэффициента идеальности» (сплошные и штриховые кривые соответственно) отрезка ускорителя от скорости влета проводника v_0^* и относительной длины участков h^* с одноименной полярностью подключения батарей. Зависимости рассчитаны при $a^* = 0,5$. Из анализа зависимостей видно, что при увеличении h^* от 3 до 24 значение κ возрастает почти вчетверо, а КПД снижается примерно вдвое. На рис. 6 приведены зависимости максимального значения κ (штриховые кривые) и достигаемого при этом КПД (сплошные) от h^* . Характер кривых существенно зависит от a^* . В режимах, отвечающих максимальному «коэффициенту идеальности», КПД ускорителя лежит в пределах $\eta = 0,06 \div 0,12$. При уменьшении a^* с 1,0 до 0,5 значение κ вырастет почти вдвое. В ускорителе с короткими каскадами с ростом $h^* > 8 \div 10$ КПД быстро падает.

Эффективность преобразования энергии в ускорителе существенно зависит от отношения диаметров проводника и ускоряющих катушек: $d^* = d/D$. С увеличением d^* растут КПД и «коэффициент идеальности». Расчеты показывают, что эти зависимости могут быть выражены приближенными соотношениями $\eta \sim (d^*)^{2,4 \div 2,6}$, $\kappa \sim (d^*)^{1,3 \div 1,4}$.

Из полученных результатов следует, что «коэффициент идеальности» многокаскадного индукционного ускорителя в зависимости от его параметров и скорости движения проводника может изменяться в пределах $\kappa = 0,06 \div 0,20$, но оставаться существенно меньше единицы. Причина состоит в неравномерном распределении плотности тока по сечению проводника. В режимах, соответствующих максимальному КПД, ток распределяется резко неравномерно как по длине проводника, так и по толщине его стенки. При реализации режимов с максимальным «коэффициентом идеальности» распределение плотности тока по толщине проводника близко к равномерному, однако и в этом случае ток сосредоточивается в задней торцевой части проводника (см. рис. 4). В результате возрастают

активное сопротивление токового контура в проводнике и интенсивность его нагрева.

В заключение, используя соотношение (7), оценим достижимые по условию плавления скорости метания алюминиевого проводника с толщиной стенки $\Delta = 0,01$ м ($\sigma_0 = 3,8 \cdot 10^7$ (Ом·м) $^{-1}$, $\beta = 4,42 \cdot 10^{-6}$ кг/Дж, $q_* = 1,02 \cdot 10^6$ Дж/кг). В режиме максимального КПД ($\kappa = 0,06 \div 0,08$) $v_* = 5 \div 7$ км/с. В режиме максимального «коэффициента идеальности» ($\kappa = 0,16 \div 0,20$) $v_* = 14 \div 16$ км/с.

Итак, предложен критерий («коэффициент идеальности»), позволяющий оценивать эффективность электромагнитного ускорителя проводников или режима его работы с точки зрения достижимых предельных по условию плавления скоростей. Показано, что наибольший КПД достигается в ускорителе с относительной длиной каскадов $a^* = 1,0 \div 1,5$, длиной участков одноименной полярности подключения батарей $h^* \leq \leq 3 \div 6$, относительной скоростью движения проводника $v^* = 0,4 \div 0,8$; максимальные предельные по условию плавления скорости метания достигаются в ускорителе с параметрами $a^* \leq 0,5$, $h^* > 10$, $v^* = 1,2 \div 1,6$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chilton F., Hibbs B., Kolm H. et al. Electromagnetic mass drivers // Progr. in Astronaut. and Aeronaut.— 1977.— V. 57, N 2.
2. O'Neil G. K., Kolm H. High-acceleration mass drivers // Acta Astronaut.— 1980.— V. 7, N 11.
3. Driga M. D., Weldon W. F., Woodson H. H. Electromagnetic induction launchers // IEEE Trans. on Magnetics.— 1986.— V. 22, N 6.
4. Васильев И. А., Петров С. Р. Численное и экспериментальное исследование многокаскадного индукционного ускорителя проводников // ПМТФ.— 1989.— № 6.
5. Балтаханов А. М., Иванов Е. Н. О тепловом ограничении скорости кольцевых проводников при индукционном аксальном ускорении // ПМТФ.— 1982.— № 6.
6. Бондалетов В. Н., Иванов Е. Н., Петров С. Р., Тютюкин В. А. Исследование эффективности ускорения проводников в импульсном магнитном поле соленоида // ПМТФ.— 1983.— № 2.

г. Истра
Московской области

Поступила 28/IV 1989 г.,
в окончательном варианте — 28/VIII 1989 г.

УДК 551.466

В. В. Булатов, Ю. В. Владимиров

БЛИЖНЕЕ ПОЛЕ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИСТОЧНИКОМ В ПОТОКЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Рассматривается задача о возбуждении внутренних гравитационных волн (ВВ) источником, находящимся в потоке стратифицированной жидкости с произвольным распределением частоты Брента — Вейселя $N^2(z)$. Поле ВВ на больших расстояниях от источника есть сумма мод, распространяющихся независимо друг от друга [1]. Асимптотики отдельной моды для различных распределений $N^2(z)$ исследованы в [1—3]. В ближней зоне, когда разделения мод еще не произошло, для получения поля ВВ необходимо суммировать значительное число мод, каждая из которых может иметь определенную особенность, например логарифмическую [4]. Поэтому важно исследовать асимптотику поля ВВ вблизи источника возмущений.

В настоящей работе изучается поле ВВ вблизи источника, построены асимптотики как вертикальной, так и горизонтальной компонент скорости ВВ; проведенные численные расчеты показали хорошее совпадение асимптотического и точного решений на расстояниях, сравнимых с толщиной слоя жидкости, в котором распространяются колебания.

Пусть стратифицированная жидкость течет со скоростью V в слое $0 < z < H$, тогда вертикальная скорость w ВВ, возбуждаемых источником, включенным в момент времени $t = 0$ и находящимся в потоке,