

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ТЕПЛОБМЕН В ИМПАКТНЫХ СТРУЯХ

В.И. Терехов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

Импактные струи находят чрезвычайно широкое распространение в различных областях техники и технологий – авиационно – космической, энергетике, пищевой, легкой и химической промышленности. Относительно простые в конструктивном отношении системы струйного охлаждения дают высокие эффекты интенсификации теплоотдачи (до 3-5 раз) по сравнению с пленочным охлаждением и конвективным течением в каналах. Особенно остро проблема теплосъема больших удельных тепловых потоков от высокотемпературных газовых сред стоит при создании лопаток газовых турбин и камер сгорания реактивных двигателей. По этой причине вопросы оптимизации систем импактного охлаждения проработаны к настоящему времени наиболее досконально и полно.

Однако исследования в области совершенствования характеристик импактного охлаждения имеют тенденцию к расширению. Об этом говорит не только возрастающий поток численных и экспериментальных исследований, проводимых преимущественно за рубежом, но и большое число специализированных научных форумов, посвященных проблемам охлаждения.

Новый импульс данная задача получила в связи с бурным ростом устройств микроэлектроники, где уровень удельных тепловых потоков может значительно превышать традиционные высоконапряженные узлы двигательных установках летательных аппаратов. Для микроэлектронного оборудования принципиальным отличием является малый масштаб объектов охлаждения, что требует решения проблемы на совершенно ином уровне экспериментальной техники.

К настоящему времени накоплен огромный материал по результатам теоретических и экспериментальных исследований структуры течения и тепломассообмену при импактном взаимодействии струй с преградами, часть из которых изложена в большом числе монографий и обзоров [1-5], как классических, так и совсем недавних.

В докладе будут рассмотрены наиболее интересные и в тоже время слабо изученные проблемы струйного охлаждения. Одной из них является разработка и совершенствование методов управления процессами переноса, конечной целью которых является интенсификация теплообмена, снижение шумности струй, достижение более равномерного распределения коэффициентов теплоотдачи и других параметров. Основное внимание будет уделено анализу процессов локального и интегрального тепломассопереноса, отдавая при этом отчет, что определяющий вклад вносит гидродинамическая структура течения. Причем наиболее пристальное внимание уделяется работам последнего десятилетия.

Важным вопросом для инженерных приложений является изучение влияния формы сопла и состояние его кроки (скругленная, острая, с фаской и т.д.) на характеристики теплообмена. Эта задача рассматривалась в большом числе экспериментальных работ, в которых форма сопла была различной - квадратной, прямоугольной, эллиптической и др. Поскольку подробный анализ результатов измерений занимает много времени, то отметим здесь наиболее характерные особенности. Наибольшее влияние формы имеет место в окрестности точки торможения.

Если площадь сопел и расход газа одинаковы, то интенсивность теплообмена сни-

жается в такой последовательности - прямоугольник, квадрат, эллипс, круг. Однако эффект формы для интегрального теплообмена невелик ($\sim 20\div 30\%$) и он снижается по мере удаления сопла от преграды. Механизм интенсификации теплообмена в основном состоит в потере устойчивости и дополнительной генерацией крупномасштабных структур, как это имеет место при искусственной турбулизации струи за счет внесения периодических возмущений [6]. Эта проблема также заслуживает отдельного рассмотрения и в настоящее время получает новое развитие.

При струйном обтекании криволинейных поверхностей Физика процесса значительно усложняется [7,8]. Искривление поверхности приводит к образованию разномасштабных вихревых структур за счет кривизны линий тока. Помимо вихрей Гертлера малого масштаба сильное влияние на течение оказывает торообразный вихрь, занимающий большое пространство внутри каверны. Выброс отработанного воздуха из каверны осуществляется по ее периферии, поэтому для углублений сферической формы с острыми кромками возможно возвратное движение газа и его подмешивание в натекающую струю. Это в значительной мере может ухудшить теплообмен.

Локальные тепловые потоки на поверхности каверн значительно (в 2-3 раза) ниже, чем на плоской поверхности. В то же время интегральный теплообмен от всей каверны за счет более развитой ее поверхности примерно соответствует случаю обтекания плоской стенки. Это делает конкурентоспособным использование каверн в системах охлаждения, положительной стороной которых является снижение теплонапряженности поверхности. Кроме того, важную роль в реальных устройствах, использующих систему струй, играют участки вне каверн, на которых уровень теплообмена выше, чем на плоской стенке. Более подробную информацию о преимуществах и недостатках использования луночных поверхностей в системах охлаждения можно найти в работах [9-11].

Проблема закрученных импактных струй давно вызывает пристальный интерес, как у исследователей, так и инженеров. Это связано с возможностью использования тангенциальной компоненты скорости для интенсификации процессов обмена, а также их подавления. Примеры реализации воздействия центробежных сил на турбулентность и теплоперенос в закрученных потоках в трубах и, особенно в вихревых камерах, свидетельствуют об эффективности такого метода управления [12,13].

Общим выводом практически всех работ является снижение теплоотдачи с ростом параметра закрутки струи [14-16]. Это вызвано интенсификацией смешения струи с окружающим потоком. Струя быстро размывается, что особенно ярко наблюдается на больших ($H/d_0 > 2$) удалениях сопла от преграды. При этом распределение локальных коэффициентов теплообмена в зависимости от числа Рейнольдса, интенсивности закрутки и H/d_0 может настолько разнообразным (с максимумом на оси, на периферии, два максимума или обширное плато с практически постоянным уровнем теплообмена и т.д.), что заранее предсказать его не представляется возможным.

Еще более сложным является случай взаимодействия вихревых струй с поверхностями сложных форм [16]. Изменяя размеры сопла и кривизны импактной поверхности, степень закрутки, расстояние между соплом и преградой, можно добиться требуемого распределения тепловых потоков на поверхности.

Наряду с акустическим воздействием и закруткой потока одним из методов управления структурой течения и теплообменом является импульсная подача однофазного или двухфазного потоков [17-19]. Установлено, что основными особенностями импульсных импактных струй являются значительно более тонкие гидродинамический и тепловой пограничные слои по сравнению со стационарным течением, повышенный уровень турбулентности газовой фазы и возникающая при этом неустойчивость течения. Данные различных авторов для импульсных струй зачастую противоречат друг другу. Наблюда-

ется как увеличение теплообмена по сравнению со стационарным потоком, так и его понижение или же отсутствие влияния. Увеличение теплообмена может изменяться от 10 до 100% в районе точки торможения и до 40–50% в области пристенной струи. Интенсификация теплоотдачи происходит при высоких частотах следования импульсов, которая объясняется эффектом «обновления» поверхности [17-19]. Понижение теплообмена, которое имеет место при низких частотах, варьируется в диапазоне 10–30% по всей импактной поверхности. При этом ее значение приближается к квазистационарному пределу, зависящему от формы импульса и его длительности.

Для кольцевых импактных струй ранее была обнаружена высокая степень интенсификации теплообмена [20]. Детальные исследования структуры течения и локального теплообмена [21] позволили объяснить механизм усиления теплоотдачи за счет формирования торообразного вихря и сильной турбулизации пристенного потока.

В последнее время возрос интерес к изучению микроструй [22-24], в том числе и для импактного охлаждения микроэлектроники [25-28]. Недавние экспериментальные работы по мини и - микроструям [23-24] показали, что область ламинарного течения для круглой струи может распространяться на значительные расстояния от сопла, достигающие $L/d_0 \approx 1000$ калибров, а число Рейнольдса перехода примерно соответствует значению в трубе. Плоские микроструи менее устойчивы и их дальнобойность может уменьшаться практически на порядок.

Таким образом, импактные микроструи, как правило, являются ламинарными. Их большая дальнобойность упрощает организацию процесса охлаждения, поскольку уровень теплообмена не критичен к расстоянию между соплом и преградой. Важной особенностью импактных струй при малых числах Re является достаточно обширная (5-10 калибров) область постоянного коэффициента теплоотдачи. Эти, а также и другие свойства микроструй используются в ряде инженерных предложений. Возрастает интерес к работам по струйному охлаждению изделий, имитирующих микрочипы - цилиндры, обдуваемые с торца (пины), плоские параллелепипеды различных конфигураций и др.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант ОНГ №14-19-00402).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дыбан Е.П., Мазур А.И.** Конвективный теплообмен при струйном охлаждении тел. Киев. - «Наукова думка».-1982, 304 с.
2. **Юдаев Б.М., Михайлов М.С., Савин В.К.** Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. - М.: Машиностроение, 1977.-248 с.
3. **Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П.** Турбулентное смешение газовых струй. -М.: Наука, 1974.-272 с.
4. **Martin H.**, Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces // Adv. Heat Transfer, 1977.-V. 13, pp. 1-60.
5. **Jambunathan J., Lai E., Moss M.A., Button B.L.** A review of heat transfer data for single circular jet impingement // Int. J. Heat and Fluid Flow.-1992, Vol. 13, No. 2, pp. 106-115.
6. **Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Yu.S., Markovich D.M.** Experimental study of swirling turbulent jets with different inflow conditions. // Int. J. Heat and Fluid Flow.- 2008. p.123–128.
7. **Терехов В.И., Калинина С.В.** Подавление теплообмена при взаимодействии импактной струи с полусферической каверной // Письма в ЖТФ. – 2011. - Т. 37, № 20, с. 87-94.
8. **Терехов В.И., Барсанов В.Л., Калинина С.В., Мшвидобадзе Ю.М.** Экспериментальное исследование структуры течения и теплоотдачи при струйном обтекании преграды в форме сферической каверны // ИФЖ. – 2006. –Т. 79, № 4. – С. 29 – 37.
9. **Kanokjaruvijit K., Martinez-Botas R.F.** Jet impingement on a dimpled surface with different crossflow schemes // Int. J. of Heat and Mass Transfer.- 2005. V. 48, pp. 16-170.
10. **Ekkad S.V., Kontrovitz D.** Jet impingement heat transfer on dimpled target surfaces // Int. J. of Heat and Fluid Flow.- 2002, v. 23, p. 22-28.

11. **Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu.M., Sharov K.A.** Impingement of an impact jet onto a spherical cavity: Flow structure and heat transfer // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2009. - Vol. 52, No. 11-12. - P. 2498-2506.
12. **Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И.** Аэродинамика и тепло -массообмен в ограниченных вихревых потоках, Новосибирск, ИТФ, 1987, 272 с.
13. **Гупта А., Лили Д., Сайред И.** Закрученные потоки-М.: Мир, 1987, 590с.
14. **Лукашов В.В., Попов С.В., Семенов С.В.** Анализ результатов исследований теплообмена закрученной и незакрученной импактных струй // *Изв. СО АН СССР.*- 1989. Вып. 6. с. 133-142.
15. **Volchkov E.P., Lukashov V.V., Semenov S.V., Terekhov V.I.** Friction and heat transfer in a spatial boundary layer forming by interaction of a swirling flow on a plane // *Proc. 2nd World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mech. and Thermodynamics*, 1991. Dubrovnik. P.112-117.
16. **Terekhov V.I., Mshvidobadze Yu.M.** Fluid flow and heat transfer at interaction impinging swirling jet with a dimple // *Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2010, 2010, Cincinnati, Ohio USA*, 6 p.
17. **Herwig H., Middelberg G.** The physics of unsteady jet impingement and its heat transfer performance // *Acta Mech.* 2008, v. 201, Pp. 171–184.
18. **Пахомов М.А., Терехов В.И.** Влияние частоты импульсов на теплообмен в точке торможения импактной турбулентной струи // *ТВТ.*- 2013, т. 51, № 2, с. 287–293.
19. **Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И.** Структура импульсной распыленной струи при изменении ее частотных характеристик // *ТВТ.* – 2011. – Т. 49, № 1. – С. 116-121.
20. **Мазур А.И., Юшина Л.Е.** Теплообмен в импактной кольцевой струе// *Промышленная теплотехника.* 1980. Т. 2. № 2. С. 35 – 38.
21. **Калинина С.В., Терехов В.И., Шаров К.А.** Особенности течения кольцевой импактной струи вблизи преграды // *МЖГ*, 2015.- №5. с.
22. **Gau C., Shen C.H., Wang Z.B.** Peculiar phenomenon of micro-free-jet flow // *Phys. Fluids.*- 2009, v. 21, No 092001, 14 p.
23. **Фомин В. М., Анискин В. М., Маслов А. А., Миронов С. Г., Цырюльников И. С.** Газодинамическая структура течения и развитие возмущений в микроструях // *ДАН*, 2010, том 433, № 5, с. 635–638.
24. **Леманов В.В., Терехов В.И., Шаров К.А., Шумейко А.А.** Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // *Письма в ЖТФ.*- 2013, том 39, вып. 9, с. 34-41.
25. **Vae J.R.** Study on the Effects of Reynolds number, nozzle size and nozzle-to-plate distance on heat transfer in the mini-scaled laminar confined impinging slot jet// *Master's Deg. Thesis, Graduate Sch., Inje Univ.*,2009, 89 p.
26. **Lee D.H., Park H.J., Ligrani P.** Milliscale confined impinging slot jets: Laminar heat transfer characteristics for an isothermal flat plate // *Int. J. Heat and Mass Transfer.*- 2012, v. 55, pp. 2249–2260.
27. **Chang C.J., Shen C.H., Gau C.,** Flow and heat transfer of a micro jet impinging on a thermal chip: Part I - Micro impinging jet flow // *Nanoscale and Microscale Thermoph. Eng.*- 2013, Vol. 17, No. 1, pp. 50–68.
28. **Chang C.J., Shen C.H., Gau C.,** Flow and heat transfer of a micro jet impinging on a thermal chip: Part II — Heat transfer // *Nanoscale and Microscale Thermoph. Eng.*- 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 92-111.