
**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

**ОХЛАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАСПЫЛЕНИЕМ:
ПРОГРЕСС В МЕХАНИЗМАХ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ (ОБЗОР)**

© 2023 г. М. Jena^a, P. C. Mishra^{a, *}, S. S. Sahoo^b

^aЛаборатория тепловых исследований, Институт промышленных технологий Калинга,
Бхубанешвар, 751024 Индия

^bТехнологический и исследовательский университет Одиша,
Бхубанешвар, 751003 Индия

*e-mail: pcmishrafme@kiit.ac.in

Поступила в редакцию 04.06.2022 г.

После доработки 25.08.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

Представлены последние достижения в области теплоотдачи струйным способом (распылением). Рассмотрено влияние различных параметров на эффективность распылительного охлаждения. Исследование посвящено разработкам в области такого охлаждения, влиянию изменений параметров процесса на его эффективность. Обзор доступной литературы показывает, что изучение охлаждения распылением ведется с позиций его практического применения, но оно не способствует пониманию того, каким образом его можно усовершенствовать. Существует множество способов улучшить характеристики распылительного охлаждения, например чередованием видов применяемой жидкости, изменением схемы потока и управлением такими параметрами, как давление воздуха и воды, расстояние между соплом и поверхностью. В некоторых более ранних работах для повышения эффективности теплоотдачи при охлаждении поверхности металла был использован также струйно-инжекционный метод. Однако такая технология все еще нуждается в дальнейшем изучении, что и обсуждается в рамках настоящей статьи.

Ключевые слова: охлаждение распылением (струйное), давление, оборудование, импульсный метод, технические приложения, экономические факторы, теплоотдача, рабочая жидкость, хладагент

DOI: 10.56304/S0040363623080052

Необходимость в более быстром охлаждении сильно нагретых металлических деталей обычно возникает при работе различных механических устройств, например при обработке металлов, при авариях с потерей охлаждающей жидкости и т.д. В начале такого процесса температура нагретых деталей составляет примерно 800–1000°C. Для мелких деталей может применяться и воздушное охлаждение, но для более крупных требуется охлаждение с помощью жидкой среды, которая кипит при высоких температурах. Для управления процессом кипения и, следовательно, скоростью охлаждения используют различные конфигурации потока. В металлообрабатывающей промышленности для достижения экстремального охлаждения прибегают к технологии ударных струй, в то время как распыление хорошо подходит для умеренного и равномерного охлаждения.

Именно способ распыления широко распространен при производстве электронных гаджетов, а также в лазерных и космических технологиях. Благодаря преимуществам равномерного

распределения температуры на охлаждаемой поверхности, меньшему массовому расходу и более высокой эффективности, охлаждение распылением можно считать наиболее предпочтительным методом тогда, когда необходимо отвести тепловые потоки с высокой плотностью энергии. Охлаждение распылением рассматривается как сложная процедура, которая включает в себя пузырьковое кипение, вторичную нуклеацию, вынужденную конвекцию, а также испарение тонкой пленки жидкости. Интенсификация этих процессов приводит к повышению эффективности охлаждения распылением.

По сравнению с обычным методом охлаждения распылением, существенным преимуществом обладает процесс охлаждения прерывистым распылением, достоинством которого является снижение энергопотребления. Оптимизация производительности процесса охлаждения прерывистым распылением может быть осуществлена путем изменения длительности импульса и частоты повторения при минимальном расходе жидкой фазы.

МЕХАНИЗМ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЫЛЕНИЕМ

Охлаждение распылением вызывает значительный интерес у специалистов, особенно тех, что работают в области электроники, а также в других областях, связанных с передачей большого теплового потока при минимальном расходе жидкости. Механизм распыления в однофазном и двухфазном режимах представляется весьма сложным для понимания в связи с зависимостью его от различных параметров. Для таких особых вариантов, как плоское или полноконусное распыление, прогностических возможностей не много. Однако усовершенствованные методы измерения коэффициента теплоотдачи, толщины пленки и параметров распыления будут способствовать правильному пониманию механизма теплоотдачи и прогнозированию возможностей его использования [1].

Переход от схем воздушного охлаждения и однофазного жидкостного охлаждения к двухфазному объясняется потребностью в его применении (как показано на рис. 1) в компьютерной, медицинской, транспортной, энергетической, аэрокосмической и оборонной областях, например в компьютеризированных центрах обработки данных, частях силовой электроники электромобилей, радарх, лазерном оборудовании, ракетных соплах, спутниковой электронике и др., т.е. там, где необходимо поддерживать высокую скорость отвода тепла [2].

Механизм теплоотдачи основан на том, чтобы передать не только явную, но и скрытую теплоту парообразования охлаждающей жидкости в целях достижения более высокого коэффициента теплоотдачи. Наиболее подходящие конфигурации потоков, отвечающие требованиям в вышеуказанных областях техники, включают в себя охлаждение распылением, инъекционное охлаждение и принудительное охлаждение в мини- и микроканалах. Новая концепция гибридного охлаждения объединяет в себе преимущества микроканального потока, струйно-ударного охлаждения, сильно переохлажденного кипения и развитой поверхности, что в значительной степени увеличивает критический тепловой поток (КТП). Было доказано, что данный подход наиболее эффективен для достижения лучшей плотности теплового потока, а также для выравнивания температуры поверхности.

Охлаждение распылением воды – важная инновация, используемая в промышленности для снижения температуры материалов примерно с 1800 К. Плотность потока воды оказывает существенное влияние на коэффициент теплоотдачи в режиме установившегося пленочного кипения [3]. Теплоотдача в режиме двухфазного кипения характеризуется сильной температурной зависимо-

стью коэффициента теплоотдачи (эффект Лейденфроста) при температуре поверхности ниже определенного значения. Также наблюдается зависимость от температуры при высоких ее значениях. Экспериментальное исследование позволило бы аналитически обосновать зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности потока воды и разницы температур распыляемой воды и поверхности. При распылении, осуществляемом с помощью полноконусных форсунок, был измерен коэффициент теплоотдачи при температуре воды около 291 К, температурах поверхности от 473 до 1373 К (т.е. при разнице температур более 180 К) и плотности потока воды от 3 до 30 кг/(м² · с). В режиме стабильного пленочного кипения наблюдается тенденция к уменьшению коэффициента теплоотдачи при снижении разницы между температурами распыляемой воды и охлаждаемой поверхности.

При проектировании системы охлаждения распылением необходимо учитывать различные факторы, оказывающие существенное влияние на ее производительность [2], такие как тип форсунки, вид хладагента, угол распыления, положение форсунок, расстояние от сопла форсунки до охлаждаемой поверхности, размер и скорость капель. Первоначально применение системы охлаждения распылением ограничивалось высокотемпературными процессами в металлообрабатывающей промышленности, позже ее стали использовать и в других технологических операциях (см. рис. 1), осуществляемых при более низких температурах. Однако данный процесс охлаждения имеет недостатки: узкие проточные каналы распылительного сопла подвергаются эрозии и коррозии. Механизм охлаждения распылением следующий: жидкость разбивается на мельчайшие капли, которые рассеиваются по нагретой поверхности по множеству траекторий, охватывая большую ее площадь, при этом используется небольшой объем жидкости. Краткое описание различных механизмов охлаждения распылением представлено на рис. 2.

Распылительное охлаждение – метод, наиболее подходящий для устройств, чувствительных к изменению температуры и применяемых в процессах с большими тепловыми потоками. Использование скрытой теплоты парообразования жидкости при охлаждении распылением рассматривалось как реальный способ отведения большого теплового потока от поверхностей мощных электронных устройств [4]. При этом особое внимание уделялось использованию нескольких форсунок для эффективного управления температурным режимом на большой нагреваемой поверхности.

На протяжении многих лет проводились научные исследования, которые показали, что спрей –

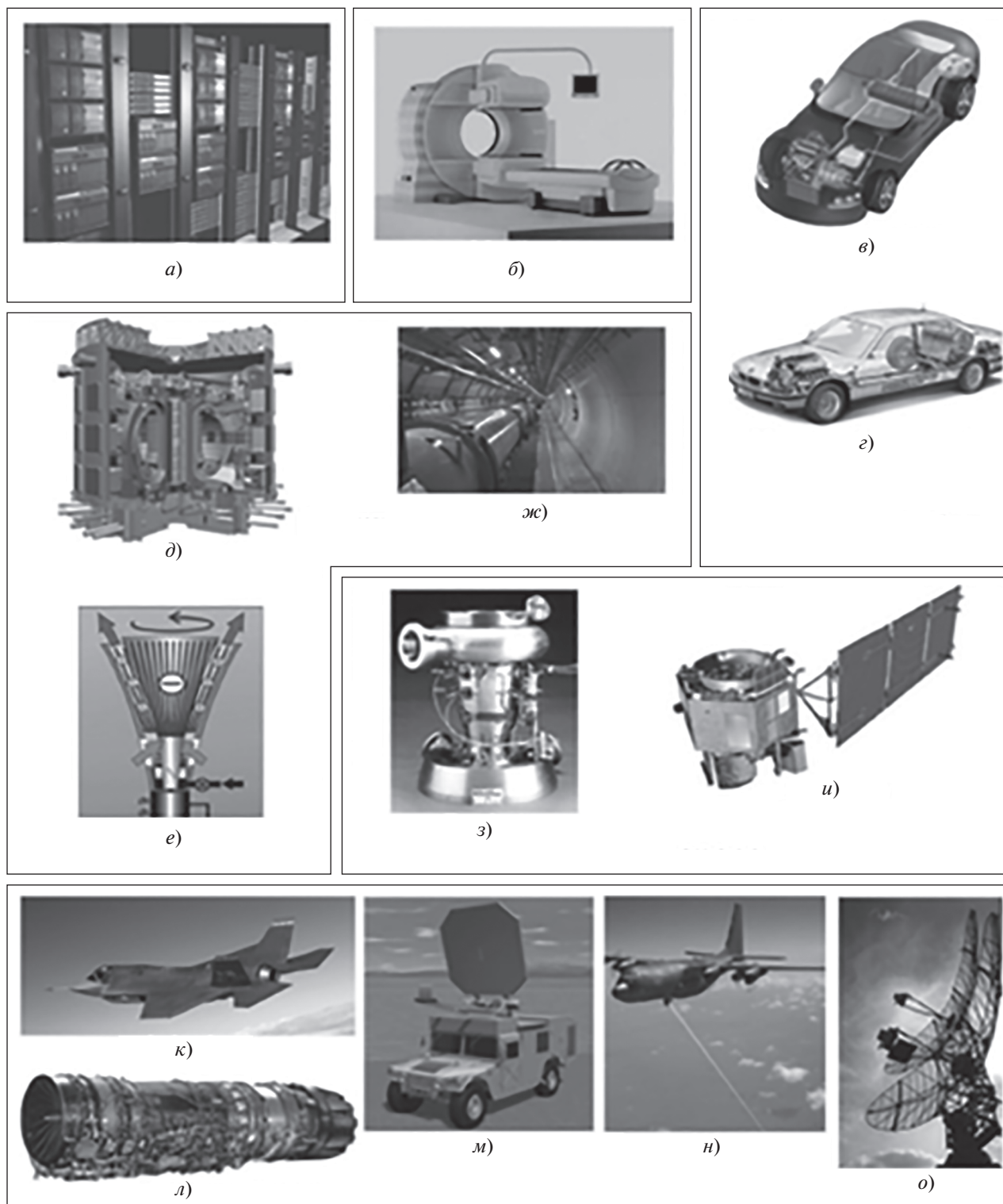


Рис. 1. Примеры применения схем охлаждения с отведением больших тепловых потоков в различных областях жизнедеятельности.

а – компьютерная электроника и центры обработки данных; *б* – медицина: рентгеновские системы; транспорт: *в* – силовая электроника гибридного транспортного средства; *г* – теплообменники для хранения и транспортировки водорода; энергетика: *д* – синтез термоядерного реактора; *е* – магнетогидродинамический электрод (magneto hydrodynamic – МНД-электрод); *ж* – мишень ускорителя энергии частиц; аэрокосмическая область: *з* – сопло ракеты; *и* – электроника спутника; оборонная область: *к* – авионика; *л* – лопатки турбинного двигателя и воздушно-топливные теплообменники; *м* – микроволновое оружие; *н* – лазерное оружие; *о* – радары

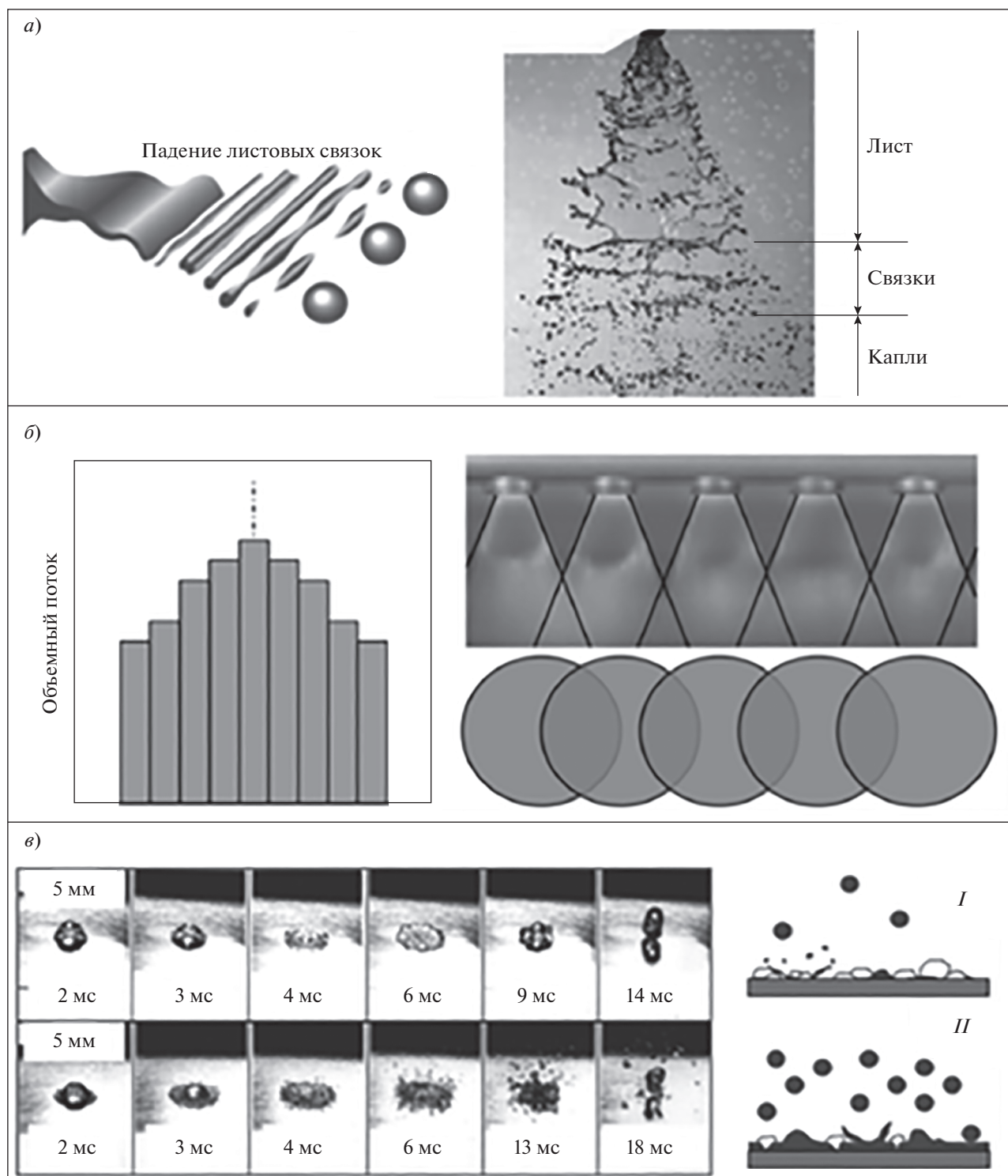


Рис. 2. Физическое объяснение явления охлаждения распылением [2].

a – область сопла: физика разрушения капель; область поверхности: *b* – физика глобального воздействия; *в* – физика локального воздействия.

Спрей: *I* – легкий; *II* – плотный

удачное и эффективное решение для образования и испарения микрокапель. Получение высококачественного микроспрея зависит от правильного выбора рабочей жидкости, микропри-

водов, форсунок и механизма управления [5]. Распространенность технологий, основанных на использовании методов микрораспыления, в промышленности, а также в повседневной жиз-

ни объясняется механизмом охлаждения капельным испарением.

Охлаждение распылением — один из перспективных способов охлаждения, предназначенный для передачи большого теплового потока. Он заключается в выходе жидкого теплоносителя из форсунки под большим давлением в виде мельчайших капель, которые воздействуют на нагретую поверхность. Охлаждение осуществляется при конвективном режиме теплообмена с нагретой поверхностью [6]. Обзор технологии охлаждения распылением был проведен с двух точек зрения: на уровне распыления и на уровне капель. В концепции уровня распыления акцент делается на свойствах распыления, например его характеристиках, расположении сопла, изменении фазы жидкости и увеличенной поверхности, в качестве факторов, способствующих повышению эффективности охлаждения. Подход на уровне капель объясняется с помощью локальной теплоотдачи, связанной с условиями воздействия капли жидкости, а именно: одиночная капля, неподвижная или текучая пленка, цепочка капель и их разрыв.

Было установлено, что средняя скорость капля — доминирующий параметр, влияющий на критический тепловой поток, за которым (по значимости) следует средний поток капель. Также это было соотнесено с объемным потоком распыления и средним диаметром капли.

При однофазном охлаждении распылением локальная толщина пленки, создаваемой распылителями, остается постоянной в том случае, когда в механизме теплоотдачи преобладает однофазная конвекция. За пределами зоны воздействия брызг области высыхания проявлялись даже тогда, когда не был достигнут КТП. В режиме пузырькового кипения площадь высыхания характеризовалась длиной линии трехфазного контакта и измерялась методом полного внутреннего отражения. Было выявлено, что тепловой поток от стенки тесно связан с длиной контактной линии. Этот механизм теплоотдачи в контактной линии рассматривался как один из основных механизмов теплообмена в двухфазном режиме.

Расположение распылителя, характеризующееся двумя параметрами (расстоянием от сопла до поверхности металла и углом наклона), может влиять на эффективность охлаждения. Есть три причины, по которым делается противоречивый вывод о наклоне форсунки для распыления. Одна из них связана с расположением сопла, другая — с предположением об одномерной стационарной проводимости для расчета поверхностного теплового потока. Третья причина основана на выборе места измерения температуры поверхности, поскольку разные радиальные местоположения обеспечивают различное измерение температуры.

Теплоперенос при распылительном охлаждении можно разделить на четыре режима: однофазный, пузырьковый, переходный и режим пленочного кипения. При первом режиме тепловой поток линейно возрастает с увеличением разности температур нагретой поверхности и охлаждающей жидкости. Вынужденная конвекция за счет радиально движущейся пленки и испарение на нестационарной границе раздела тонкопленочного слоя играют доминирующую роль в однофазном режиме. В режиме пузырькового кипения при охлаждении распылением тепловой поток увеличивается с температурой поверхности быстрее, чем в однофазном режиме. Эффективность теплообмена на поверхности нагрева существенно снижается при достижении критического теплового потока и переходного состояния кипения. В режиме пленочного кипения от нагретой поверхности выделяется большое количество тепла и радиационный теплообмен становится ключевым механизмом теплоотдачи между нагретой поверхностью и жидкостью, поэтому тепловой поток имеет тенденцию к увеличению.

Интенсификация охлаждения распылением путем изменения структуры поверхности является одним из эффективных и малозатратных подходов, который обеспечивает оптимальное управление потоком жидкости и повышает эффективность локального охлаждения. В зависимости от размера структурных изменений модифицированную поверхность можно отнести к одной из четырех категорий: мини-, микро-, нано- или гибридно-структурированная. Результаты испытаний показали, что охлаждающая способность в режиме кипения у гибридной поверхности лучше, чем у микроструктурированной, вследствие ее большей смачивающей способности и меньшей площади высыхающей области.

При соударении капель с поверхностью при охлаждении распылением происходят такие физические процессы, как растекание, удаление, разбрызгивание, столкновение капель, образование неподвижной и радиально текущей пленки, а также затопление жидкостью. Все эти процессы возникают в результате соударения потока капель и потока пленки на поверхности. Поток капель подразделяется на три типа по способу их образования: одиночная капля, цепочка капель (непрерывно следующие одна за другой капли, образующиеся в результате разрыва струи) и разрыв струи (части цепочки капель, отрывающиеся с определенной частотой). Аналогично, условия протекания пленки включают в себя сухую поверхность (без пленки), неподвижную пленку, радиально текущую пленку или их комбинацию на охлаждающей поверхности.

Капельное и пленочное течения — это два вида потока, непосредственно определяющих меха-

низ теплоотдачи при охлаждении распылением. При движении жидкости при соударении ее с поверхностью происходит локальная теплоотдача конвекцией. Быстротекущая пленка передает больше тепла нижестоящему потоку. Толщина тонкой пленки уменьшает тепловой пограничный слой и способствует испарению с поверхности раздела жидкости.

Автор [7] разработал численную модель теплообмена при охлаждении распылением, рассматривая концепции отскока, растекания и разбрызгивания в соответствии с числами Вебера и Лапласа падающей капли для широкого диапазона температур поверхности. Для исследования теплового потока, образующегося на выходе из сопел различного диаметра (0.61–1.70 мм) при разных давлениях жидкости на входе в сопло (0.69–2.08 МПа), использовался стержень из низкоуглеродистой стали диаметром 40 мм, температура на поверхности которого составляла от 100 до 1000°C. Был составлен прогноз теплообмена при трех режимах кипения: пузырьковом, переходном и пленочном, что довольно хорошо согласуется с данными, полученными в ходе эксперимента. Авторы [7] опытным путем сравнили тепловой поток при распылении жидкости через сопло диаметром 0.94 мм при давлении 2.07 МПа на входе в него с тепловым потоком при сопле диаметром 1.19 мм и давлении 0.69 МПа на входе в это сопло при одинаковом массовом расходе жидкости (0.03 кг/с). Сообщалось, что тепловой поток в первом случае по сравнению со вторым был на 65% больше при температуре поверхности 385 К и на 40% больше при 970 К. Результаты численного моделирования были примерно одинаковыми для двух случаев при равных температурах, что позволило сделать вывод, что влияние скорости столкновения не столь существенно, как влияние массового расхода жидкости.

Выявить различие между стационарным и нестационарным поведением струи можно, оценив время, через которое капли занимают определенное положение. Авторы [8] изучили неустойчивость распыления, рассмотрев два различных распылителя и выявив зависимость распределения капель от пространственного расположения сопла и условий его эксплуатации.

Механизм процесса охлаждения распылением был изучен при взаимодействии капель аэрозоля с пузырьком, при этом важным параметром считалось количество центров парообразования, приходящихся на одну каплю [9]. Переход зародышей в пузыри автор объяснил явлением теплового баланса в процессе испарения. Если при испарении не удается отвести достаточное количество тепла, то зародыши начинают расти из-за повышения температуры. Следовательно, скорость роста пузырька оказывает существенное влияние на скорость теплообмена.

Механизм теплообмена при охлаждении распылением был объяснен авторами [10] при изучении эффективности использования односопловой и многосопловой систем для охлаждения приборов электронной техники с большим тепловым потоком с применением насыщенного азотом FC-72. В результате исследования авторы разделили режим теплообмена на три стадии: однофазная вокруг зоны удара капли, двухфазная пленка жидкости, кипящая вблизи удаленных от области удара углов, и однофазный дренажный поток от форсунки с несколькими соплами. Полученные результаты свидетельствуют о преобладании механизма однофазного переноса энергии над механизмом изменения фазы. Авторы предположили, что 45–50% общего отвода тепла при пузырьковом кипении приходится на вторичное пузырьковое кипение. Был сделан вывод, что вклад двухфазного механизма составляет 25–30% при односопловом и 10–20% при четырехсопловом охлаждении.

Струйно-ударное охлаждение – важный метод, применяемый в металлургической промышленности. При закалке стали охлаждение начинается с температуры обработки металла 845–870°C и продолжается до достижения твердой мартенситной структуры [11]. Преимущества, заключающиеся в большем рассеивании тепла, меньшем расходе жидкости и эффективном отводе тепла, делают струйное и распылительное охлаждение наиболее популярными в производстве стали и сплавов. Эффективность охлаждения этими методами зависит от скорости отведения тепла через зону между потоком воды и нагретой поверхностью.

Соударение струи жидкости с поверхностью – наиболее предпочтительный способ достижения высокой скорости отвода тепла, особенно при фазовом переходе охлаждающей жидкости [2]. Метод заключается в выпуске струи жидкости через круглое отверстие форсунки, которая устанавливается перпендикулярно охлаждаемой поверхности. Это приводит к более высокой скорости теплоотдачи непосредственно под зоной соударения с постепенным ее снижением по мере удаления от данной зоны. Чтобы избежать неравномерности температуры поверхности, предпочтительнее использовать несколько конфигураций струй, даже если существует потребность в повышенном расходе охлаждающей жидкости. Это наглядно показано на рис. 3.

Механизм закалки горячих стальных листов при ударно-струйном охлаждении [12] объясняется следующим образом: расширяющаяся круговая область смачивания, ограниченная периферийным фронтом, скорость изменения которого уменьшается при увеличении его диаметра. Рост скорости струи и переохлаждения приводит к

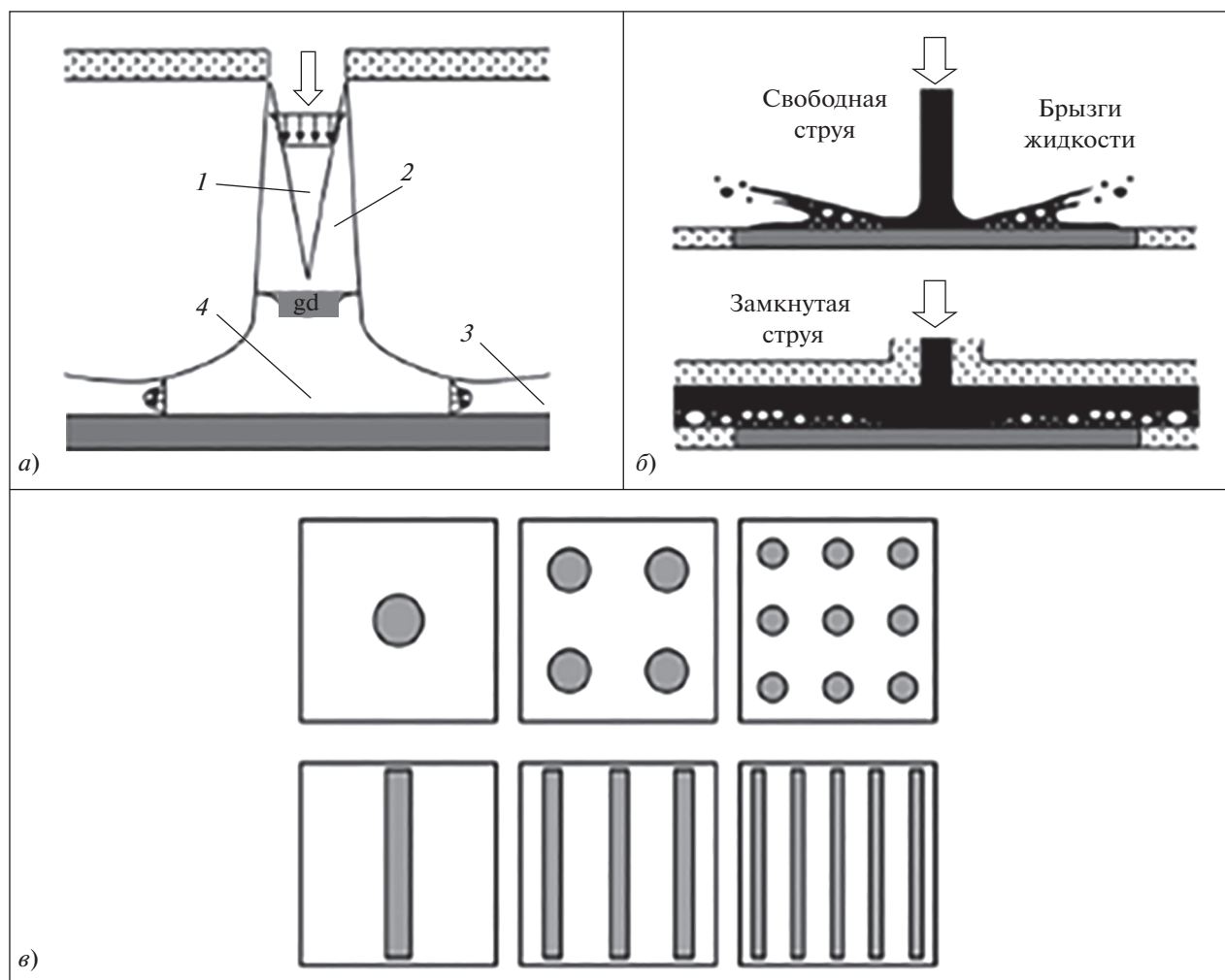


Рис. 3. Объяснение физики струйно-ударного охлаждения [2].

a – сопло и области застоя: физика перемешивания и формирования пристенной струи; *б* – физика разбрызгивания при кипении; *в* – взаимодействие нескольких струй.

1 – потенциальное ядро; *2* – зона свободной струи; *3* – зона пристенной струи; *4* – застойная зона

возрастанию теплового потока и скорости смачивания. Повышенная скорость движения пленки и переохлаждение способствуют увеличению скорости теплоотдачи с поверхности стального листа. Распределение теплового потока в момент времени 1.0 с при скорости струи 2.5 м/с сравнивали с распределением в момент времени 0.2 с при скорости струи 10.0 м/с на том же радиальном расстоянии, в результате чего было замечено возрастание локального максимального теплового потока с увеличением скорости струи.

Для объяснения процесса охлаждения распылением было предложено несколько механизмов теплоотдачи:

испарение с поверхности пленки жидкости;

вынужденная конвекция, возникающая при столкновении капель жидкости с нагретой поверхностью;

увеличение числа центров парообразования на нагретой поверхности;

образование вторичных центров парообразования в каплях распыленной на поверхность жидкости.

Испарение молекул жидкости с поверхности пленки жидкости – один из ключевых факторов процесса теплообмена при охлаждении распылением. При организации охлаждения распылением на нагретой поверхности образуется очень тонкая (толщиной 300–500 мкм) пленка жидкости. Столкновение капель аэрозоля может вызвать дополнительное перемешивание, которое снижает и без того небольшое эффективное тепловое сопротивление, возникающее из-за тонкой пленки жидкости, и значительно повышает общую эффективность теплоотдачи.

При охлаждении распылением воды, когда капли падают на такую пленку жидкости, набегающие капли приводят к интенсификации вынужденной конвекции в пленке жидкости, скорость охлаждения которых достигает 200 Вт/см^2 , а температура поверхности составляет 99°C . При этой температуре зародышеобразование отсутствует, большая часть теплового потока отводится путем вынужденной конвекции при столкновении капель на поверхности при однофазном аэрозольном охлаждении.

Углубления (шероховатость) на нагретой поверхности вызывают рост пузырьков из фиксированных центров парообразования в связи с поглощением теплового потока и достижением температуры насыщения локальными центрами зародышей. Это приводит к изменению фазы жидкости и падению температуры поверхности. При охлаждении распылением капля жидкости движется с большой скоростью, позволяющей ей проникать сквозь пленку жидкости и ударяться о нагретую поверхность, что влечет за собой разрушение пузырьков в местах зарождения. Это способствует быстрому удалению пузырьков из мест их зарождения и сокращению времени для роста новых пузырьков.

Другой возможный сценарий заключается в том, что в процессе рассмотренной ранее вынужденной конвекции при столкновении капель пузырьки “уносятся” с поверхности, что провоцирует увеличение числа новых зарождающихся пузырьков и сокращение продолжительности закрепления пузырьков на нагретой поверхности. В связи с тем что зарождающиеся пузырьки имеют меньшие размеры, на поверхности образуется большее их количество с более высокой скоростью. Таким образом, сам механизм охлаждения распылением способствует испарению и полному использованию скрытой теплоты парообразования.

Было высказано предположение, что значительное количество вторичных центров зародышеобразования, увлекаемых каплями аэрозоля, являются основной причиной отвода большего теплового потока с нагретой поверхности при охлаждении распылением [12]. При исследовании кипения в объеме было установлено, что верхняя поверхность пузырька разбивалась на мелкие капли, которые падали обратно на пленку жидкости, когда пузырьки ударялись об нее. Эти мелкие капли могли захватывать пар, образовавшийся вокруг них, и переносить его в пленку жидкости. Наконец, небольшие пузырьки пара, возможно, действовали как зародыши, когда они приближались к нагретой поверхности, и в результате способствовали переносу тепла при кипении. По аналогии, и при охлаждении распылением верхняя поверхность пузырька распадалась на мелкие капли, которые падали на пленку жид-

кости. Капли распыления смешивались с окружающим паром и захватывали его пузырьки. Когда капли оказывались на пленке жидкости, захваченные пузырьки пара действовали как вторичные зародыши для роста новых пузырьков. Следовательно, охлаждение распылением может привести к образованию гораздо большего числа пузырьков, и эти дополнительные места их зарождения очень важны для механизма теплоотдачи.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМА ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЫЛЕНИЕМ

Несмотря на сложность такого явления, как теплоотдача, преимущества успешной реализации механизма распылительного охлаждения и развитие данной технологии сделали его пригодным для применения в космосе [13]. Электронные компоненты и модули, используемые в космических программах, требуют высокой интенсивности отвода теплового потока ($P = 100 \text{ Вт/см}^2$), жесткого контроля температуры (около $\pm 2^\circ\text{C}$), чего нельзя было бы достичь с помощью устаревших технологий терморегулирования. Но охлаждение распылением может обеспечить отвод тепла и более 100 Вт/см^2 .

Охлаждение распылением широко применяется и в аэрокосмической области [14] во время экологических испытаний космических аппаратов ввиду большого коэффициента теплоотдачи, приемлемой однородности температуры и низкой степени перегрева, малой циркуляции потока и высокого уровня критического потока.

Метод аэрозольного охлаждения был использован для жилого здания в Шанхае во время Всемирной выставки в 2010 г. Экспериментальные исследования по влиянию давления и расхода воды на эффективность охлаждения показали, что температура воздуха в каждой точке измерения может быть снижена максимум на $5\text{--}7^\circ\text{C}$ [15] при температуре окружающей среды 35°C и относительной влажности около 45%. Сначала с увеличением давления воды наблюдался быстрый рост ее расхода, затем он замедлялся.

Испарение капель и создание высококачественного микрораспыления [5] зависят от различных факторов, например от выбора подходящей охлаждающей жидкости, работы привода и контроля распыления.

Схема охлаждения распылением была выбрана для использования в электронике гибридных автомобилей [16], где можно достичь интенсивного теплосъема $150\text{--}200 \text{ Вт/см}^2$ и обеспечивать при этом температуру чипа ниже 125°C . Экспериментальная проверка этих результатов показала, что аэрозольное охлаждение хорошо подходит для системы управления температурным режимом в электронных устройствах гибридных транспортных средств.

В работе [17] эффективность охлаждения распылением с использованием жидкого хладагента R134a оценивается с позиций поиска пределов отводимого теплового потока и коэффициента теплоотдачи для электронных микросхем и плат, интенсивность теплосъема с которых составляет примерно 200–250 Вт/см².

В [18] представлены результаты экспериментов, проведенных с использованием кольцевого струйного охлаждения синтетической жидкостью поверхностей электронных приборов с большой тепловой нагрузкой.

Внимание исследователей привлекло криогенное аэрозольное охлаждение [19] как эффективная технология, применяемая для защиты здоровых участков кожи во время лазерной хирургии. Попадание на кожу капель (диаметром 5–20 мкм), вылетающих из сопла, имеющего довольно простую конструкцию, со скоростью менее 60 м/с, приводит к интенсивной передаче тепла теплопроводностью, ударной конвекцией, пузырьковому кипению и высокоскоростному испарению с охлаждаемой поверхности. Это способствует быстрому снижению температуры поверхности, а следовательно, отводу тепла от эпидермиса.

В [20] отмечено существенное влияние числа Вебера на эффективность отвода тепла при охлаждении распылением с помощью криогенных аппаратов для предотвращения повреждения эпидермиса во время лазерной терапии.

Численный анализ охлаждения многоимпульсным криогенным спреем был проведен для защиты кожи во время лазерного липолиза [21]. Было установлено, что многоимпульсный криогенный спрей значительно эффективнее (по степени и глубине охлаждения), чем непрерывное распыление охлаждающего вещества.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЫЛЕНИЕМ

В работе [12] были представлены результаты экспериментальных исследований струйно-ударного охлаждения как промышленного способа быстрого снижения температуры нагретых стальных листов. Для этого осуществляли их равномерный нагрев до 900°C, затем для охлаждения направляли струю деионизированной воды на их поверхность. Диаметр струйного сопла и расстояние между ним и поверхностью оставались постоянными при изменении скорости набегающей струи (2.5–10.0 м/с) и ее температуры (13–40°C). Наблюдения показали, что при увеличении скорости струи и недогрева локальная скорость пленки возросла. Это привело к максимизации локального теплового потока перед фронтом сма-

чивания и более высокой скорости теплоотдачи от поверхности стального листа.

Для изучения влияния угла конуса распыления на механизм теплообмена [22] были проведены опыты по аэрозольному охлаждению с использованием в качестве рабочей жидкости хладагента R134a. Было отмечено, что начало режима пузырькового кипения задерживалось при уменьшении угла конуса распыления, что приводило к ухудшению тепловых характеристик. Однако при уменьшении угла конуса толщина пленки становилась больше. В результате экспериментального исследования был сделан вывод, что объемный расход хладагента играет важную роль в режиме пузырькового кипения, который повышает интенсивность теплообмена.

Влияние изменения параметров распыления (массового расхода, давления на входе в сопло, расстояния между наконечником сопла и поверхностью мишени, толщины плоской поверхности) на тепловой поток изучалось авторами [23] при охлаждении стальных листов, нагретых до температуры 850°C, в условиях окружающей среды. Максимальное значение теплового потока, достигнутое на поверхности, составило 4895.525 кВт/м² при толщине листа 4 мм, входных давлениях воды и воздуха 0.4 и 0.3 МПа соответственно и высоте установки сопла 120 мм. Наблюдалось снижение теплового потока при увеличении расстояния между поверхностью листа и соплом из-за высокой интенсивности распыления. Было замечено, что температура поверхности очень быстро снижается при одновременном охлаждении водой, распыляемой под большим давлением, и воздухом низкого давления.

С помощью численного моделирования изучалось влияние на охлаждение пластины, выполненной из бериллиево-медного сплава, изменения давления распыления жидкости при фиксированном расстоянии между соплом определенного типа и поверхностью пластины [24]. Согласно результатам моделирования критический тепловой поток может достигать 1700 Вт/см² с коэффициентом теплоотдачи от 9000 до 39000 Вт/(м² · К) при температуре поверхности образца от 100 до 815°C.

Авторы работы [25] провели эксперименты по изучению эффективности охлаждения распылением при изменении угла наклона распылителя в режиме без кипения. В качестве рабочей среды (охлаждающей жидкости) для распыления через полутвердое вихревое сопло с различными углами наклона принималась дистиллированная вода массовым расходом 15.7–24.9 кг/м² и переохлаждением 80°C. Чтобы достичь наилучших показателей теплообмена при фиксированных углах наклона, углах конуса распыления и размерах испытуемого образца, необходимо определить

оптимальное расстояние от сопла до охлаждаемой поверхности. При изменении угла наклона струи от 0 до 49° теплообмен и эффективность охлаждения повышались.

В [26] была экспериментально изучена зависимость критического теплового потока и коэффициента теплоотдачи от размера, плотности потока и скорости аэрозольных капель. Воздействие каждого параметра капель рассматривалось при неизменности остальных параметров. Влияние скорости капель было исследовано при ее изменении от 4.64 до 24.10 м/с при фиксированных диаметре капель 68 мкм (с допустимой погрешностью 2%) и плотности их потока $15 \times 10^6 / (\text{см}^2 \cdot \text{с})$ (с погрешностью 10%). Выявлено, что значение критического теплового потока увеличилось с 636.7 до 945.9 Вт/см², т.е. почти на 50%. Аналогичным образом было изучено влияние расхода жидкости на охлаждение горячей поверхности при двух значениях плотности массового потока: 0.0021 и 0.0049 кг/(см² · с) – и неизменных других параметрах. Критические тепловые потоки для них оказались очень близкими по значению – 653 и 668 Вт/см² соответственно. Опыты, проведенные авторами [26], подтверждают то, что обсуждалось при определении критического теплового потока: наибольшее влияние на него, по сравнению с другими параметрами, оказывает скорость капель. Для повышения КТП при фиксированном значении массового расхода поток разбавленного аэрозоля, капли которого имеют большую скорость, предпочтительнее, чем плотный аэрозоль с низкой скоростью капель.

Для исследования локальных и средних характеристик теплоотдачи авторами [27] были поставлены эксперименты по охлаждению распылением с использованием форсунок полноконусного типа и трихлортрифторэтана (фреон-113) с переохлаждением 40°C при различных размерах капель (от 200 до 1250 мкм) и скоростях их движения (от 5 до 29 м/с). В ходе опытов удалось установить прямую зависимость коэффициента теплоотдачи от расстояния между поверхностью мишени и осевой линией форсунки, если распыление фреона-113 осуществляется вниз на поверхность с постоянным тепловым потоком.

Авторы [11] проанализировали виды охлаждения распылением и струйно-ударным способом, используемые в сталелитейной промышленности на выходных рольгангах для передвижения горячекатаных металлических полос, и пришли к выводу, что существует зависимость эффективности охлаждения распылением от скорости теплового потока, проходящего между нагретой поверхностью и рабочей жидкостью (водой).

С помощью численной модели были определены продолжительность и скорость охлаждения образцов из нержавеющей стали цилиндрической

формы при изменении параметров распыления, а также проведена оценка того, каким должен быть критический диаметр капли, чтобы достичь сверхвысокой скорости охлаждения 300°C/с [28]. Исследование показало, что для рассеяния больших тепловых потоков от нагретой поверхности в сталелитейной промышленности и достижения скорости охлаждения, близкой к сверхвысокой, охлаждение распылением было более эффективным, чем струйное охлаждение. Время охлаждения было сокращено при увеличении давления жидкости на входе в форсунку. Эффективность капель меньшего размера оказалась выше, благодаря чему была достигнута более высокая скорость охлаждения толстого образца.

Авторы работы [29] изучили явление отвода тепла методом струйного воздействия на стальную полосу, нагретую до высокой температуры. К основным факторам, влияющим на скорость теплоотдачи, относятся скорость удара струи по охлаждаемой поверхности, начальная температура стальной полосы, состояние охлаждаемой поверхности, разница температур поверхности и охлаждающей воды и т.д. Полученные кадры визуализации потока подтверждают, что площадь охлаждаемой поверхности, смоченная при натекании струи, имеет круглую форму. На поверхности охлаждения имеются две зоны теплообмена: ламинарного течения (или зона застоя) и радиального течения (в том числе зона гидравлического скачка и однофазная зона с турбулентным переходом между ними). Скорость охлаждения в застойной зоне зависит от скорости набегания струи – с увеличением последней она возрастает. При этом никакого влияния на скорость охлаждения изменения расстояния от сопла до поверхности не наблюдалось.

Влияние парциальных давлений окружающей среды и пара на характеристики распылительного охлаждения было экспериментально изучено в [30]. Результаты исследований показали, что при увеличении расхода струи монотонно возрастает мощность распыления и снижается эффективность охлаждения.

Принимая во внимание необходимость охлаждения электронных компонентов автомобильных устройств при заданных граничных условиях, авторы [31] провели экспериментальное исследование для выявления зависимости характеристик охлаждения распылением от свойств применяемой жидкости. Для изучения изменения вязкости и других характеристик рабочих жидкостей использовали воду и две водно-глицериновые смеси при разных температурах. Установили, что изменение температуры в большей степени сказывается на вязкости, чем на теплопроводности и удельной теплоемкости, что приводит к значительному влиянию вязкости жидкости на процесс охлаждения распылением.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЫЛЕНИЕМ

С помощью гибридной обратной схемы была проведена оценка температуры поверхности и теплового потока при охлаждении распылением [32]. Полученные расчетные данные о температуре поверхности совпали с экспериментальными. При этом значения теплового потока с поверхности, определенные при проведении расчетов, существенно отличались от экспериментальных.

Последние достижения в области теплоотдачи позволяют использовать не только тепло для нагрева жидкости в однофазном состоянии, но и скрытую теплоту парообразования [2] при охлаждении с помощью мини- и микроканальных, аэрозольных и струйных методов. При реализации концепции гибридного охлаждения можно добиться большей однородности температуры охлаждаемой поверхности. При струйно-ударном охлаждении наибольший коэффициент теплоотдачи наблюдается непосредственно под зоной столкновения струи с поверхностью; по мере удаления от нее он снижается, что приводит к неравномерности температуры поверхности. Чтобы избежать этого и повысить коэффициент теплоотдачи, применяют несколько форсунок. Разработка конфигурации системы охлаждения распылением является довольно сложной задачей, решение которой зависит от различных факторов: типа сопла и вида охлаждающей жидкости, размера и скорости капель, объемного расхода, угла распыления, угла установки форсунки, расстояния между поверхностью и соплом. Чтобы система охлаждения была эффективной, необходимы высокое качество ее исполнения и постоянный контроль параметров. Охлаждение распылением применяется не только при высоких, но и при низких температурах поверхности.

Авторы [33] выполнили расчетные исследования, используя основные уравнения сохранения импульса, неразрывности и энергии, однако они не смогли описать такие сложные явления, как взаимодействия между жидкостью, паром и ударом капли.

В работе [34] были экспериментально изучены характеристики столкновения капель воды с шероховатой поверхностью и проведено сравнение полученных данных с теоретическими. Было установлено, что шероховатость поверхности не оказывает существенного влияния на процесс растекания капли. Измеренные значения диаметра растекания хорошо соотносились с теоретическими данными, но максимальное время растекания при столкновении капель не соответствовало результатам предыдущих теоретических изысканий как для нагретых, так и для ненагретых поверхностей.

Экспериментальное исследование, моделирующее теплообмен при охлаждении нагретой стальной пластины струей воды, было выполнено в [29], однако авторами публикации не были отражены некоторые весьма важные факторы, такие как широкий диапазон скоростей струи, движение стальной пластины, массив струй воды, конструкция для нагрева пластины на испытательном стенде, обеспечивающая потери тепла при перемещении пластины от нагревателя на стенд, а также прямая визуализация парового слоя между пластиной и водой.

В [35] было критически освещено использование трех вариантов охлаждения: распылением, струйно-ударное и микроканальное – для отвода большого теплового потока от микроэлектронных чипов. Использование однофазного микроканала было признано наиболее удачным вариантом. Прямое микроканальное охлаждение интегральной схемы можно было бы сделать более привлекательным и эффективным, если провести дополнительные исследования с усовершенствованными поверхностями и системой регулирования потоков тепла.

Коэффициент теплоотдачи в процессе охлаждения распылением непрерывнолитых слябов экспериментально и численно определялся в [36] с помощью обратной задачи. Авторы применяли экспоненциальную функцию затухания для пространственной области, ступенчатые и треугольные вариации во временной области. При использовании этого метода анализа могут быть получены точные оценки даже для функций, имеющих острые углы и разрывы.

В [37] была выбрана модель теплоотдачи, основанная на инженерном принципе суперпозиции и коррелирующая данные о переходном теплообмене и поведении капель при ударе о нагретые поверхности. Такая модель предсказывала передачу тепла от горячей поверхности к струе в стационарных условиях, и эти прогнозы были намного ближе к данным, полученным в ходе экспериментов. Было установлено, что коэффициент теплоотдачи зависит от давления жидкости при распылении, а массовый поток через форсунку, воздействующий на нагретую поверхность, имеет первостепенное значение. Точность модели могла бы быть повышена, если бы было проведено детальное моделирование массового расхода потока из распылительной форсунки вместо выдвинутого предположения о равномерной структуре потока, оказавшегося неверным.

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЫЛЕНИЕМ

В [38] в целях изучения параметров процесса охлаждения, а именно коэффициента теплоотда-

чи, температуры охлаждаемой поверхности и критического теплового потока, было выполнено экспериментальное исследование эффективности фазового перехода хладагента (R22) в установке охлаждения распылением с замкнутым контуром. При низкотемпературных режимах скорость отвода теплового потока была выше, тогда как температура охлаждаемой поверхности и коэффициент теплоотдачи при различных давлениях на входе в сопло в условиях малого теплового потока изменялись незначительно. Тем не менее, существенное изменение этих параметров наблюдалось при низком давлении на входе в сопло и незначительное – при высоком. Повышение давления на входе в сопло сверх оптимального значения не способствовало увеличению КТП и, скорее всего, привело бы к росту массового расхода охлаждающей жидкости. Максимум КТП 276.1 Вт/см^2 был достигнут при оптимальном значении давления на входе в сопло (0.8 МПа) и температуре охлаждающей среды 26.8°C .

В работе [23] проведено исследование зависимости эффективности охлаждения посредством двухфазного (воздух и вода) распыления от толщины пластины и параметров распыления (скорости потока, массового расхода потока, давления на входе в сопло, расстояния между соплом и поверхностью пластины). Максимальное значение поверхностного теплового потока было получено для стальной пластины толщиной 4 мм при давлении воды на входе в сопло 0.4 МПа, давлении воздуха 0.3 МПа и высоте установки сопла 120 мм при начальной температуре нагретой пластины 850°C . Перепад температуры поверхности был более высоким (от 60 до 150°C) при сочетании низкого давления воздуха и высокого давления воды. Максимальное значение скорости охлаждения составило 305.109°C/с . Наблюдалось снижение теплового потока при увеличении расстояния между соплом и поверхностью пластины из-за повышения интенсивности распыления. В [39] было установлено, что охлаждение при водовоздушном распылении является более эффективным, поскольку происходит с более высокой скоростью, несмотря на это, оно может служить альтернативой процессу охлаждения однофазным распылением. Результаты экспериментов показали, что скорость охлаждения возрастала при увеличении давления воздуха при неизменном давлении воды.

Эффективность охлаждения можно было бы улучшить, применив испарительное охлаждение распылением вместо обычного метода охлаждения с ламинарным ударом струи для достижения сверхбыстрого охлаждения нагретой стальной полосы на выходном рольганге. В [40] авторы придерживались аналитического подхода к этой концепции и смогли получить сверхвысокую

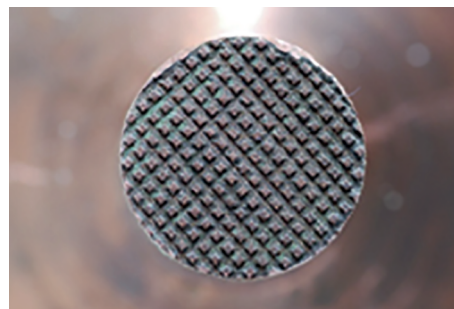


Рис. 4. Микроструктура развитой поверхности [41]

скорость охлаждения (около 300°C/с) для стальной полосы толщиной 4 мм. При этом время испарения капли оценивалось как функция ее диаметра. Было замечено, что при воздействии капель меньшего диаметра скорость охлаждения даже более толстых стальных полос увеличивается. В работе [28] также было рассмотрено сверхбыстрое охлаждение распылением стальных полос различной толщины с целью изучить влияние параметров процесса на скорость и время охлаждения при изменении давления воды (охлаждающей жидкости) на входе в сопло.

Авторы [41] провели экспериментальные исследования охлаждения распылением как на плоской, так и на развитой поверхности (рис. 4) при различных расходах деионизированной воды, разных расстояниях между нагретой поверхностью и отверстием распылителя и углах наклона распылителя. Такие же исследования были выполнены для шероховатой и гладкой поверхностей с целью изучить явление теплоотдачи при разной степени шероховатости. Было замечено, что характеристики теплоотдачи оказываются лучше на развитой поверхности, нежели на плоской. Также было установлено, что оптимальный расход распыляемой жидкости на развитых поверхностях больше, чем на плоских. Обнаружено, что при больших углах наклона распыления теплоотдача на плоских поверхностях ускоряется, тогда как при меньших углах распыления достигается более высокая скорость теплоотдачи на развитых поверхностях. Теплоотдача увеличивалась с повышением шероховатости поверхности.

Авторы [42] использовали модель, имитирующую нестационарный теплообмен, для изучения практических параметров процесса производства стальных полос на металлообрабатывающих заводах: скорости охлаждения стального листа, скорости рабочей жидкости и температуры охлаждающей воды. Исследование проводилось с целью подобрать эффективные параметры охлаждения на столе выдачи полосовой стали в процессе горячей прокатки. Двумерная модель нестационарного теплообмена была выбрана та-

ким образом, чтобы определить соответствующие параметры охлаждения рабочего стола.

В [43] экспериментальным путем изучали, как с помощью синтетических струйных приводов улучшить параметры охлаждения распылением. Активация одиночной синтетической струи привела к значительному усилению распространения брызг вдоль плоскости синтетической струи, но не вдоль плоскости, ей перпендикулярной. Также было исследовано влияние встречных струй и управления потоком на эффективность теплоотдачи. Ее улучшение анализировалось в сравнении с базовым вариантом при изменении различных параметров, например режима управления, распыления и расстояния между точкой распыления и нагретой поверхностью, приводящих к интенсификации охлаждения.

Параметры распыления, такие как расход, плотность потока распыляемых капель, их размер и скорость, варьировали, используя форсунки разных производителей, с целью определить, как они влияют на критический тепловой поток и интенсивность теплоотдачи [26]. Наиболее значимая характеристика – скорость падения капели, повышение которой приводило к росту критического теплового потока и коэффициента теплоотдачи при изменении остальных параметров охлаждения распылением в ограниченном диапазоне значений. Увеличение потока капели ведет к росту коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока. Был сделан вывод, что разбавленный аэрозоль, распыляемый с большей скоростью, будет предпочтительнее для сохранения постоянного потока капели и увеличения КТП, чем плотный аэрозоль, капли которого имеют более низкую скорость.

Авторы [44] изучили возможность применения струйно-ударного метода для охлаждения микроканала и, следуя методу отклика поверхности, оптимизировали параметры процесса. Было обнаружено, что полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами более раннего исследования. Улучшен отвод теплового потока при меньшем расходе охлаждающей жидкости. Анализ результатов показал, что с увеличением выходной мощности повышается коэффициент теплоотдачи.

Положение и ориентация распылительной форсунки оказывают существенное влияние на эффективность теплоотдачи, что было доказано опытным путем. В [45] было показано, что распылитель с низким расходом воды должен быть направлен на самые горячие точки, тогда как самые холодные места следует обрабатывать распылением воды с большим расходом.

Для исследования эффективности охлаждения распылением микроструктурированных поверхностей были поставлены эксперименты [46],

в процессе которых нагреваемые поверхности были модифицированы – на них были нанесены микромасштабные углубления и выступы. Для дальнейшего сравнения поверхностей была создана информационная база путем повторения испытаний на гладкой поверхности. Их проводили при распылении паров аммиака через форсунки в системе с замкнутым контуром. Образцы как с гладкой, так и с микроструктурированной поверхностью (с углублениями и выступами) подвергали воздействию максимального теплового потока 500 Вт/см^2 . Для поверхностей микро-*i* и микро-*p* эффективность охлаждения повысилась на 112 и 49% соответственно по сравнению с гладкой поверхностью. Это можно объяснить увеличением площади поверхности и различными механизмами фазового перехода.

Влияние изменения параметров распыления (высоты установки сопла, угла его конуса, давления на входе в сопло и угла распыления) на теплоотдачу было экспериментально изучено авторами [47]. Показано, что на теплообмен влияет изменение поля потока над нагретой поверхностью. При этом рассматривались две конические вихревые форсунки с углом распыления 30° и 60° . Было установлено, что без изменения высоты распыления и давления на входе в сопло характеристики теплоотдачи лучше при использовании форсунки с углом распыления 30° , нежели 60° . Для охлаждения поверхности, находящейся на небольшом расстоянии от сопла, наблюдалось улучшение теплоотдачи при угле распыления 30° при использовании сопла с углом конуса 60° по сравнению с соплом, угол конуса которого составлял 30° . Анализ характеристик теплообмена также проводился путем оптимизации параметров распыления.

Принимая во внимание преимущества охлаждения распылением, с целью улучшить характеристики охлаждения авторы [48] исследовали их путем оптимизации параметров при сочетании более высоких скорости рассеяния тепла и эффективности охлаждения, низкого расхода жидкости, равномерности отвода тепла и однородной температуры поверхности.

Чтобы контролировать характеристики теплообмена, в работе [49] сделали акцент на измерении отводимого от горячей поверхности теплового потока. Для этого были объединены устройство индукционного нагрева и двумерная осесимметричная вычислительная модель для количественной оценки отвода тепла во время охлаждения распылением. Этот метод использовался для измерения локальной скорости теплоотдачи при стационарном охлаждении воздушно-туманным распылением с использованием стандартных форсунок, применяемых в сталелитейной промышленности при непрерывной разливке стали.

УЛУЧШЕНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЫЛЕНИЕМ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ

Для изучения механизма теплоотдачи при охлаждении распылением авторы [50] провели эксперименты на различных структурированных поверхностях (например, микроструктурированных, макроструктурированных и многомасштабных структурированных), описание характеристик которых представлено в табл. 1. Согласно полученным результатам, скорость теплоотдачи на макроструктурированной поверхности определяется не увеличенной смачиваемой площадью, а расположением ребер, тогда как пузырьковое кипение при фиксированных местах зародышеобразования способствует повышению теплоотдачи на микроструктурированной поверхности. Теплоотдача улучшилась на 32 и 36% на микро- и макроструктурированных поверхностях соответственно, однако дальнейшее улучшение теплоотдачи до 65% наблюдалось на многомасштабных структурированных поверхностях.

В [51] был изучен механизм теплообмена при охлаждении распылением и подтверждена связь между теплоотдачей и длиной контактной линии стенок, подвергнутых охлаждению. Улучшить отвод теплового потока стало возможным благодаря контролю длины линии соприкосновения с горячей поверхностью.

Авторы использовали несколько микронагревателей для измерения теплоотдачи стенки во время охлаждения распылением и метод полного внутреннего отражения для визуализации границы раздела жидкость – пар. Измерения показали, что присутствие неконденсирующегося газа вызывает сдвиг температуры насыщения жидкости и увеличивает переохлаждение жидкости, распыляемой на поверхность. В условиях эксперимента тепловой поток от стенки не зависел от доли жидкости на поверхности, но существенно зависел от длины линии контакта.

Авторы [52] провели эксперименты с тремя различными распылительными форсунками для сравнения охлаждения распылением и подачей струи жидкости, чтобы определить, как параметры капель и распределения массового потока влияют на эффективность охлаждения. Более равномерный и эффективный отвод теплового потока, по сравнению со струйным охлаждением, наблюдался при охлаждении распылением с помощью различных форсунок. Для струйного охлаждения потребовалось большее количество жидкости и более продолжительное время.

В работе [53] с использованием опытных данных рассчитывалось контактное термическое сопротивление для определения скорости охлаждения распылением на поверхности, имеющей комнатную температуру, а также на поверхностях, подвергнутых предварительному нагреву. Поверхность образца Inconel 625 обрабатывали плазменным напылением частиц диоксида циркония, стабилизированных молибденом и иттрием, и выдерживали при комнатной температуре. Также несколько образцов Inconel 625 нагревали в течение 3 ч с последующим охлаждением на воздухе до комнатной температуры перед распылением. Контактное тепловое сопротивление для всех образцов определяли аналитическим методом. В результате был сделан вывод, что сопротивление предварительно нагретых поверхностей существенно выше, чем ненагретых поверхностей, выдерживаемых при комнатной температуре. Эффективность охлаждения нагретых и подвергнутых предварительному нагреву поверхностей была значительно выше, чем тех, что хранились при комнатной температуре.

В [54] авторы разработали методологический подход к анализу процесса охлаждения в системе впрыска топлива путем изучения влияния параметров распыления на теплоотдачу. Модель была использована для оптимизации системы впрыска топлива, чтобы избежать образования жидких пленок, а также чтобы ускорить испарение влаги

Таблица 1. Характеристики поверхности в экспериментах [50]

Нагреватель	Увеличение площади*, разы	Состояние поверхности
Smooth-Flat	1.00	Гладкая, плоская (0.5 мм)
Micro-Flat	1.00	Микроструктурированная, плоская (3.00 мм)
Ma-Straight.f-H	2.00	Макропрямое ребро, горизонтальное расположение (0.5 мм)
Ma-Straight.f-V	2.00	Макропрямое ребро, горизонтальное расположение
Ma-Square.p	2.00	Макроквадратный штифт (0.6 мм)
Шрив	2.00	Многомасштабное прямое ребро, вертикальное расположение (3 мм)
MI-Square.p	2.00	Многомасштабный квадратный штифт (3.00 мм)
MI-Triangle.f-V	1.75	Многомасштабное треугольное ребро, расположенное вертикально (3 мм)

* Отношение общей площади теплообмена к проектируемой.

из топлива и улучшить подготовку топливовоздушной смеси. С помощью интегрального метода, примененного авторами, можно было бы объяснить тепловое поведение впускных клапанов при воздействии брызг топлива. Согласно результатам исследования, различные факторы, а именно теплофизические свойства жидкости, температура поверхности, параметры капель жидкости (размер, масса и скорость), влияют на перенос тепла с поверхности при попадании на нее брызг. Определение различных режимов теплообмена [пленочное испарение, пузырьковое кипение, переходное кипение и пленочное кипение (рис. 5)] было связано с теплофизическими свойствами жидкости и температурой поверхности, тогда как скорость и размер капель при разбрызгивании обуславливают результат столкновения капель с поверхностью, т.е. прилипание капли, отскок, распад капель на брызги или растекание, а также время контакта для теплового взаимодействия.

Согласно экспериментальным данным, отвод теплового потока с поверхности увеличивается с ростом частоты впрыска, но уменьшается при большей эффективности процесса охлаждения из-за накопления избыточной массы жидкости на поверхности между двумя последовательными впрысками.

Исследования теплообмена при охлаждении распылением в режиме без кипения [55] показали, что в этом процессе может отводиться большой тепловой поток с поверхностей, выдерживаемых при низкой температуре. Увеличение объемного расхода жидкости или снижение ее температуры на входе в сопло приводит к значительному росту коэффициента теплоотдачи. Его максимальное значение может быть получено при оптимальном расстоянии между охлаждаемой поверхностью и соплом. Дальнейшее улучшение теплоотдачи может быть достигнуто путем добавления в рабочую жидкость поверхностно-активного вещества (ПАВ) соответствующей концентрации.

Опыты по охлаждению распылением внутри испытательной установки с замкнутым контуром проводились с использованием нескольких форсунок и метанола, FC-72, FC-87 и воды в качестве рабочих жидкостей [56]. На рис. 6 представлена принципиальная схема экспериментальной установки.

Пузырьковое кипение наблюдалось при проведении всех испытаний, тогда как конвективный и испарительный теплообмен начинался на поверхности пленки жидкости. Была отмечена сильная взаимосвязь между окружающей (разбрызгиваемой) жидкостью и конусом форсунки при охлаждении распылением, причем данная связь при использовании нескольких сопел была

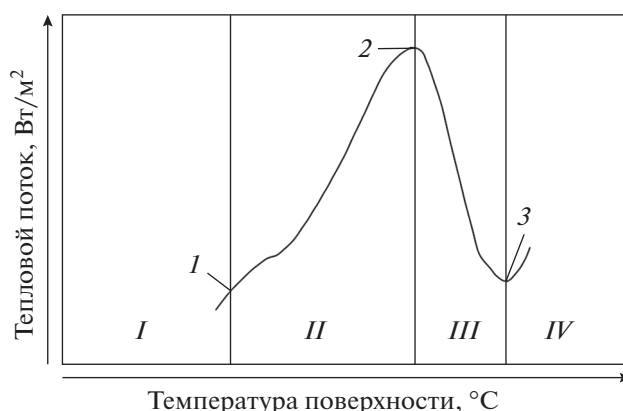


Рис. 5. Типичная кривая кипения с режимами теплоотдачи [54].

I – испарение пленки; *II* – образование зародышей/кипение; *III* – переходная область; *IV* – кипение пленки.

Температура: *1* – насыщенной жидкости T_{sat} ; *2* – критического теплового потока $T_{Nukiyama}$; *3* – в Лейденфроста $T_{Leidenfrost}$

сильнее по сравнению со струйным охлаждением через одно сопло. Увеличение перепада давления и объемного потока привело к росту критического теплового потока при фиксированном перегреве поверхности. Наличие неконденсирующегося газа в замкнутой системе охлаждения распылением из-за более высокого термического сопротивления теплоотдаче при конденсации оказало существенное влияние на общую теплоотдачу при сравнительно меньшем тепловом потоке, чем критический.

Жесткие требования к поддержанию повышенной скорости рассеяния тепла в современном промышленном оборудовании привели к тому, что двухфазное охлаждение стало предпочтительнее схемы однофазного жидкостного охлаждения, так как скрытая теплота в дополнение к отводимой охлаждающей жидкостью теплоте играет важную роль в увеличении скорости теплосъема. Согласно исследованию, проведенному авторами [2], двухфазная система охлаждения, а именно распылительного, струйного, мини- и микроканального, оказалась более подходящей для современных устройств. Также был изучен новый класс гибридных схем охлаждения, которые обеспечивают лучшую равномерность температуры поверхности по сравнению с базовыми системами охлаждения.

Авторы работы [57] изучали характеристики теплоотдачи при падении капель воды на наноструктурированные поверхности. Выявлена повышенная интенсивность теплоотдачи вблизи зоны удара капель вследствие однородного температурного профиля поверхности. Концепция наноструктурированной поверхности и возмож-

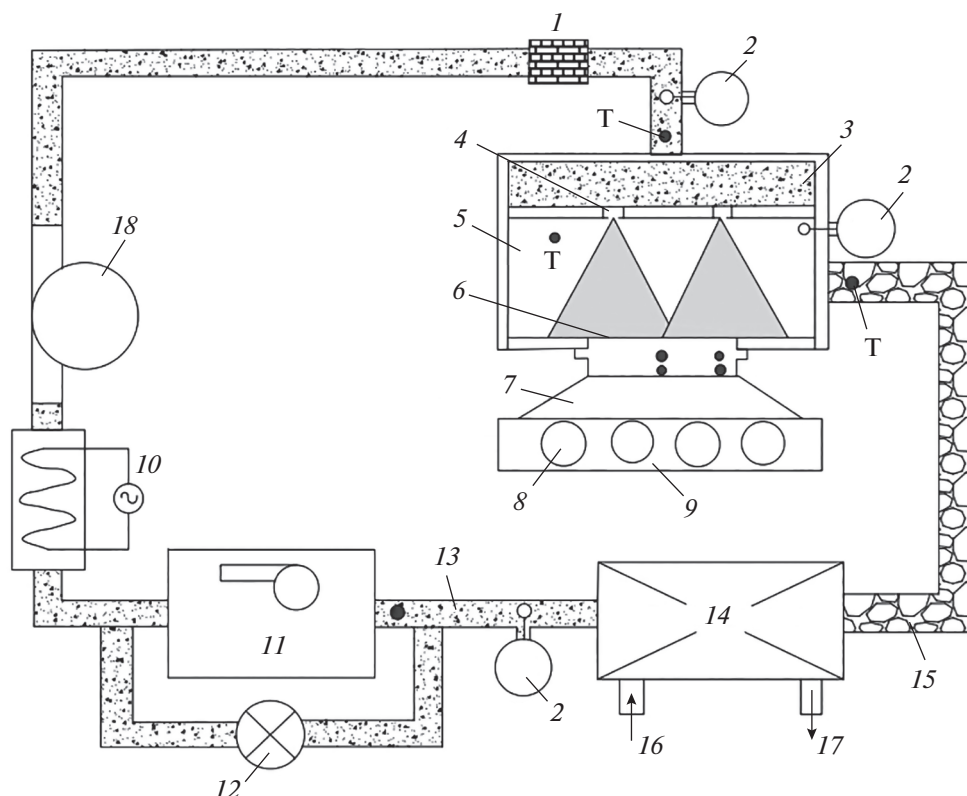


Рис. 6. Схематическое изображение экспериментальной установки с несколькими распылительными форсунками [56]. 1 – фильтр; 2 – датчик давления; 3 – жидкостная камера; 4 – сопло; 5 – распылительная камера; 6 – горячая поверхность (1 × 2 см); 7 – блок тепловой фокусировки; 8 – блок предварительного подогрева; 9 – источник тепла; 10 – паяльные нагреватели; 11 – насос с магнитной муфтой; 12 – перепускной клапан; 13 – жидкость; 14 – коаксиальный конденсатор; 15 – двухфазная жидкость; 16, 17 – датчики давления охлаждающей жидкости на входе в сопло и на выходе из него; 18 – расходомер; Т – термометры

ности капиллярной прокачки в тепловых системах базируется на применении микрожидкостей.

Явление теплоотдачи, основанное на визуализации области контакта твердого тела с жидкостью, было описано в работе [58] при использовании одной и двух форсунок для охлаждения распылением. Более равномерный тепловой поток наблюдался при увеличении расстояния между охлаждаемой поверхностью и соплом, тогда как при фиксированном расстоянии между поверхностью и одной или двумя форсунками тепловой поток оставался неизменным. Однако может существовать лишь одно оптимальное расстояние, при котором достигается максимальное значение скорости отвода тепла.

Авторы [18] провели опыты с кольцевыми падающими синтетическими струями, в том числе с визуализацией дыма и измерением массопереноса методом сублимации нафталина, что позволило в дальнейшем использовать полученные результаты в промышленности, особенно для охлаждения термически нагруженных поверхностей.

Экспериментальное исследование влияния ориентации (вертикальной и горизонтальной)

охлаждающей поверхности на характеристики теплообмена было описано в [59]. Испытание проводилось на стальной пластине толщиной 1.5 мм путем перемещения ее как вертикально, так и горизонтально со скоростью 3 м/с под распылительными соплами в установке охлаждения. В ходе опытов было определено, что в режимах пленочного (700–900°C) и пузырькового (100–300°C) кипения коэффициент теплоотдачи при вертикально ориентированных соплах больше по сравнению с горизонтально ориентированными соплами. Также было обнаружено, что критический тепловой поток выше при вертикальной ориентации сопел.

Устройство распылительного охлаждения с двойным синтетическим струйным приводом, оснащенный пьезоэлектрическим распылителем (dual synthetic jet actuator equipped with a piezoelectric atomizer – DSJAPA), было разработано авторами [60] для решения проблем рассеяния тепла в электронных компонентах приборов. По результатам эксперимента был сделан вывод, что благодаря DSJAPA можно повысить охлаждающую способность распыления и снизить неравномерность температуры поверхности до 18°C (в отли-

чие от традиционного охлаждения распылением, при использовании которого температуру можно было уменьшить лишь до 32°C).

Влияние изменения потока (с учетом кавитации и турбулентности) внутри сопла на процесс распыления представлено в работе [61], где описаны результаты измерения поля скоростей и интенсивности турбулентности для трех различных прозрачных сопел. Был разработан удобный метод затравки потока (генерации пузырьков), основанный на образовании при электролизе микропузырьков воды. В результате экспериментов авторы пришли к выводу, что для распыления более важным фактором является кавитация, а не турбулентность.

Внедрение процесса распыления для повышения эффективности охлаждения сухой градирни с естественной тягой (improving the cooling efficiency of natural draft dry cooling tower – NDDCT) было рассмотрено в [62]. Система охлаждения распылением позволила увеличить теплоотдачу путем естественной конвекции, что привело к интенсификации рассеяния тепла в NDDCT и повышению эффективности охлаждения.

ЗАМЕНА ЖИДКОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЫЛЕНИЕМ

Влияние различных поверхностно-активных веществ на эффективность охлаждения было экспериментально исследовано авторами [63] при распылении на стальной лист (AISI 304) водовоздушной смеси. Расстояние между распылительной форсункой и нагретой поверхностью составляло 60 мм, а расход воды и воздуха поддерживался на уровне 10 дм³/мин и 30 м³/ч. Для повышения скорости охлаждения использовались три вида поверхностно-активных веществ с различными концентрациями – катионные, анионные и неионогенные. Каждый опыт проводился при начальной температуре поверхности 900°C. На рис. 7 показано, как изменение концентрации поверхностно-активного вещества влияет на скорость охлаждения. Смещение скорости охлаждения в сторону более высоких значений концентраций ПАВ четко прослеживается для всех трех вариантов.

Лучшую скорость охлаждения показали катионные и неионные ПАВ. Преимущество использования неионного ПАВ заключалось в меньшем его расходе для получения низких значений поверхностного натяжения. Основываясь на опытных данных, авторы пришли к выводу, что возможно добиться более высоких скоростей охлаждения при воздушном распылении для эффективного его применения на выходном рольганге при производстве высокопрочных стальных полос.

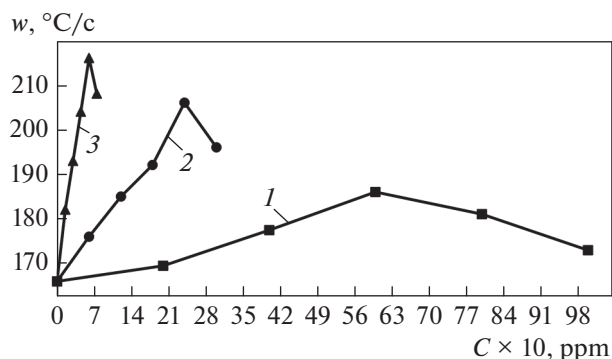


Рис. 7. Изменение сверхвысокой скорости w охлаждения в зависимости от концентраций C поверхностно-активных веществ различных типов [63]. ПАВ: 1 – анионное; 2 – катионное; 3 – неионогенное

Для изучения влияния охлаждающих сред и их перемешивания на теплоотдачу авторы [64] провели эксперимент с закалкой двух стальных образцов (AISI 1040) разных размеров (диаметр/высота 28/56 и 44/88 мм). В качестве охлаждающей среды использовали воду, соляной раствор, пальмовое и минеральное масла. Нестационарный тепловой поток определяли с помощью обратного моделирования теплоотдачи посредством теплопроводности. Более высокий тепловой поток был получен для образца диаметром 28 мм при закалке водой. Тепловой поток увеличивался при перемешивании всех охлаждающих сред. Большая твердость была отмечена на поверхности образцов, а также у образца меньшего диаметра.

Для исследования механизма теплообмена и динамики движения капель жидкости при охлаждении распылением авторы работы [65] провели эксперименты, используя в качестве рабочей жидкости чистую воду и раствор со 100 ppm ПАВ. Для измерения параметров капель применялась усовершенствованная система PDA (phase doppler anemometry – фазовая доплеровская анемометрия). Преимущества добавления ПАВ в стационарных условиях теплообмена при охлаждении распылением показаны на рис. 8.

Добавление ПАВ привело к снижению перегрева и более широкому диапазону температур при стабильном критическом тепловом потоке, что способствовало защите устройства передачи тепла и предотвращению перегорания.

Экспериментальное исследование охлаждения распылением воды с добавлением небольшого количества спирта было проведено авторами [66] для изучения характеристик процесса. Согласно полученным результатам, из-за содержания небольшого количества спирта в воде при охлаждении распылением уменьшаются поверхностное натяжение и угол контакта, тем самым улучшается отвод тепла. С ростом концентрации

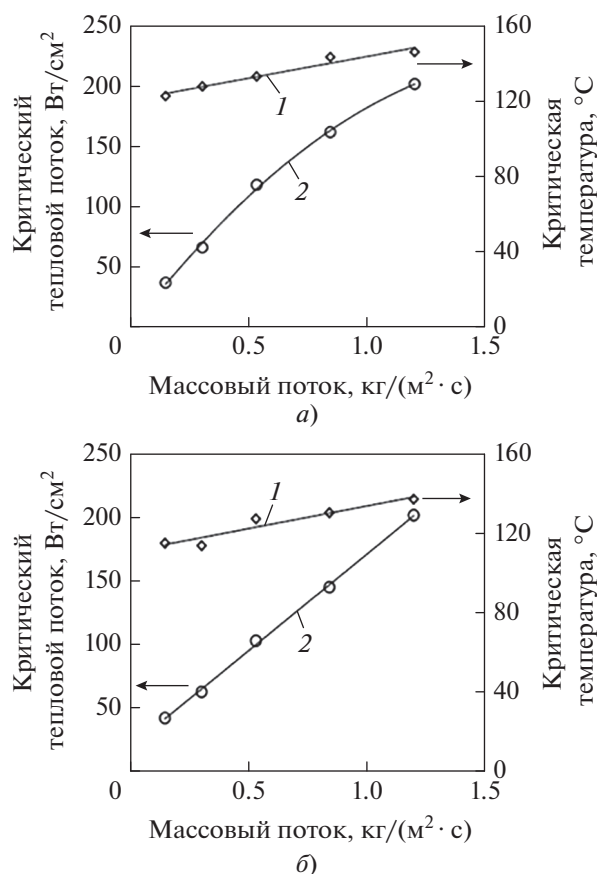


Рис. 8. Критический тепловой поток (1) и критическая температура (2) рабочей жидкости в зависимости от ее массового расхода в процессе охлаждения распылением [65].
а – чистая вода; б – раствор поверхностно-активного вещества

спирта интенсивность теплообмена сначала увеличивалась, а затем несколько ослабевала.

Авторы [67] также изучили эффект добавления ПАВ для улучшения охлаждения распылением. Они взяли медную пластину, нагретую до 240°C, и подвергли ее быстрому охлаждению распылением раствора воды и ПАВ (100 ppm додецилсульфата натрия), а также чистой воды. Тепловой поток пузырькового кипения увеличился на 300% при добавлении в охлаждающую жидкость ПАВ. Наблюдалось также незначительное снижение теплоотдачи из-за переходного кипения и уменьшения температуры смачивания поверхности каплями жидкости.

Авторы [68] исследовали теплоотдачу при охлаждении распылением, уделив особое внимание влиянию неконденсирующегося газа на критический тепловой поток и сравнив его с влиянием термического переохлаждения жидкости перед распылением. Согласно наблюдениям, основное воздействие растворенного газа на аэрозоли заклю-

чается в смещении кривых коэффициентов теплоотдачи в сторону более высоких температур ввиду повышения температуры насыщения жидкости и в увеличении уровня критического теплового потока. Было обнаружено, что эффективность распыления и КТП повышаются, даже несмотря на ухудшение теплоотдачи при более низкой температуре стенки в присутствии растворенного газа.

В [69] авторы рассматривали рост теплоотдачи при охлаждении распылением при использовании наножидкостей и развитых поверхностей. Экспериментальные исследования процессов кипения в объеме показали, что увеличение концентрации наночастиц приводит к возрастанию КТП. Однако результаты экспериментов зависели от параметров смачивания при комбинировании рабочей жидкости и подложки. Для систем с хорошей смачиваемостью (например, этанол на стекле) роста теплоотдачи не наблюдалось, тогда как при применении наножидкости характеристики теплообмена улучшились даже в системе с плохой смачиваемостью (например, вода на меди). Установлено, что добавление наночастиц плохо влияет на процесс охлаждения распылением из-за изменения теплотехнических свойств жидкости и засорения сопла распылителя оседающими наночастицами.

ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД РАСПЫЛЕНИЯ

Авторы [70] исследовали влияние добавления поверхностно-активных веществ на эффективность теплоотдачи при охлаждении распылением импульсным методом. При фиксированном цикле распыления 450 мс и коэффициенте заполнения ПАВ FS-31 60% (при концентрации 100 ppm) средняя температура поверхности составляла 50.01°C, а коэффициент теплоотдачи достигал 1.55 Вт/(см²·К). Для изучения эффектов смешивания различных ПАВ были поставлены опыты на катионных, анионных и неионогенных поверхностно-активных веществах в оптимальных концентрациях. Добавление бинарного соединения анионных, а также катионных ПАВ к рабочей жидкости для охлаждения распылением импульсным методом привело к снижению эффективности процесса, однако коэффициент теплоотдачи достиг 1.75 Вт/(см²·К), а температура поверхности – 48.03°C. Эксперименты проводились в вакууме на плоской поверхности с деионизированной водой в качестве рабочей среды для семи различных рабочих циклов (табл. 2) с целью изучить влияние параметров импульса на эффективность охлаждения.

Эффективность теплоотдачи при рабочем цикле распыления 60% и 450 мс оказалась выше, чем при цикле 50% и 300 мс. Для оптимальных

Таблица 2. Характеристики теплоотдачи при оптимальных рабочих циклах

Цикл распыления, мс	Оптимальная продолжительность, %	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(см ² · К)	Средняя температура поверхности, °С
Непрерывный	100	1.19	87.38
200	50	1.03	73.45
300	50	1.23	73.20
400	75	0.89	77.56
450	60	1.26	70.70
500	50	1.03	76.53
600	75	1.08	74.37

условий распыления самая низкая средняя температура поверхности составила 70.70°С, тогда как более высокий коэффициент теплоотдачи был равен 1.26 Вт/(см² · К), что на 5.88% больше, чем при непрерывном охлаждении распылением.

Для изучения тепловых и гидродинамических аспектов процесса распыления импульсным методом струйное охлаждение было выполнено с помощью канальной топливной форсунки (port fuel injector – PFI), поток из которой ударяет по нагретой плоской поверхности. Этот эксперимент был эквивалентен системе PFI, впрыскивающей топливо во время такта сжатия при частоте вращения 1800–3600 мин⁻¹. Авторы работы [71] проанализировали динамику изменения температуры поверхности под влиянием параметров закачки (давления, продолжительности и частоты). Увеличение давления впрыска привело к уменьшению теплового потока. Было установлено, что изменение времени теплообмена на протяжении всего периода впрыска в большей степени зависит от массового расхода жидкости, чем от размера капель и осевой скорости.

Одно из прикладных применений данной технологии – лазерная дерматология. При удалении темных пигментированных участков кожи человека требуется защита здоровой кожи от возможных термических повреждений. Чтобы улучшить характеристики теплоотдачи в этом процессе, авторы [72] провели исследование охлаждения импульсным распылением рабочей жидкости R404A при изменении расстояния распыления (5–50 мм) и противодавления (1–100 кПа). Данные представлены на рис. 9.

Как показали результаты экспериментов, минимальная температура поверхности снизилась на 50°С, а максимальный тепловой поток увеличился в 1.9 раза при наименьшем расстоянии распыления (5 мм). При увеличении расстояния распыления (более 20 мм) наблюдались дальнейшее снижение минимальной температуры поверхности и начальный рост теплового потока с последующим его уменьшением при давлении

выше 20 кПа. Хладагент R404a, имеющий более низкую температуру кипения, чем R134a, был предпочтительнее в использовании для лучшей защиты кожи во время ее лазерной обработки. Для эффективного охлаждения поверхности необходимо обеспечить надлежащее сочетание противодавления и расстояния распыления.

Авторы [73] также провели опыты по изучению характеристик и динамики охлаждения распылением хладагента R404a импульсным методом. На рис. 10 показана схема экспериментальной установки. Параметрами, которые учитывались в процессе охлаждения импульсным распылением, были форма распыления, скорость, диаметр и температура капель, а также динамика теплоотдачи. Высокая концентрация хладагента и капли большего размера наблюдались вблизи выхода из сопла, распространение брызг происходило вширь от выхода из сопла. Для распыления импульсным методом было характерно динамичное изменение коэффициента теплоотдачи, температуры и теплового потока на охлаждаемой поверхности в зависимости от времени проведения распыления. Было установлено, что расстояние от форсунки до поверхности оказывает большее влияние на параметры импульсного распыления, тогда как его (распыления) продолжительность незначительно сказывается на характеристиках охлаждения.

Эффективность внедрения струйного охлаждения импульсным методом в лазерной дерматологии была рассмотрена в работе [74]. Для изучения изменения коэффициента теплоотдачи с поверхности использовали специальное сопло, оснащенное расширительной камерой. В процессе экспериментов определяли температуру поверхности и характер распыления, а также коэффициенты теплоотдачи при охлаждении распылением хладагента R404a. По сравнению с R134a, этот хладагент может улучшить защиту эпидермиса благодаря более низкой температуре кипения и меньшей дисперсности распыления. Эксперименты показали, что максимальный тепловой поток увеличился на 19% при использовании

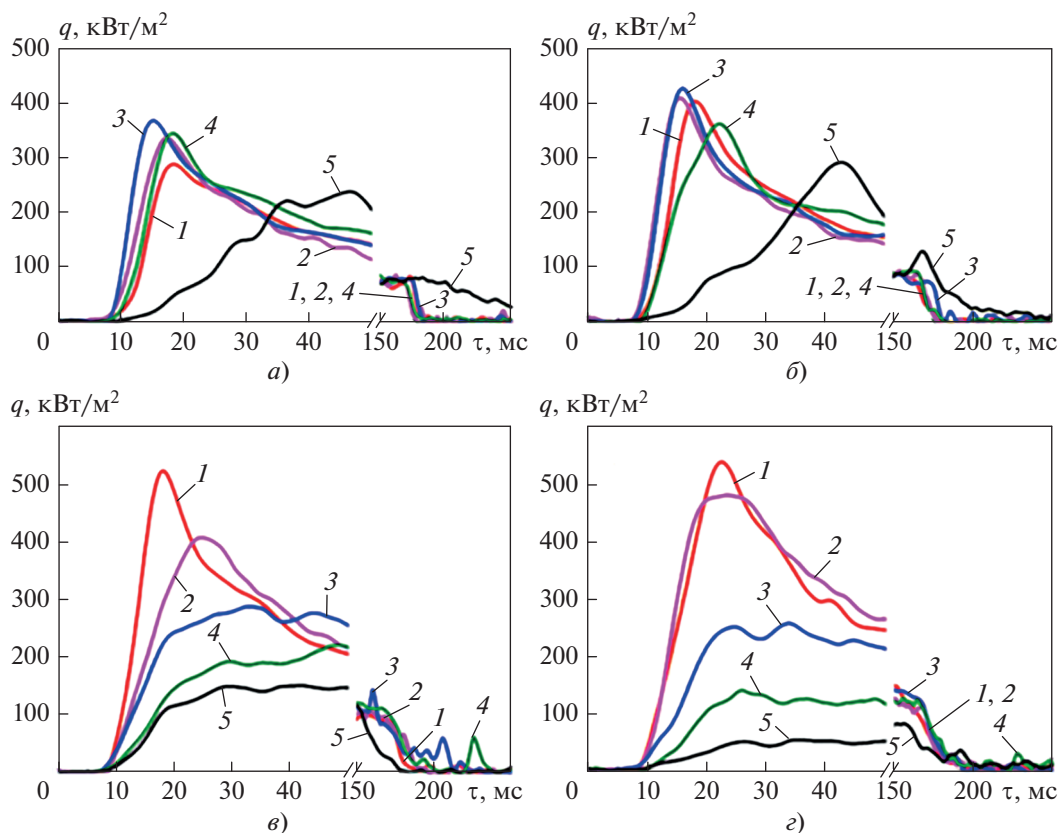


Рис. 9. Изменение поверхностного теплового потока во времени τ при различных расстояниях распыления и противо-давлениях p .

p , кПа: а – 100; б – 50; в – 10; з – 1.

Расстояние, мм: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 50

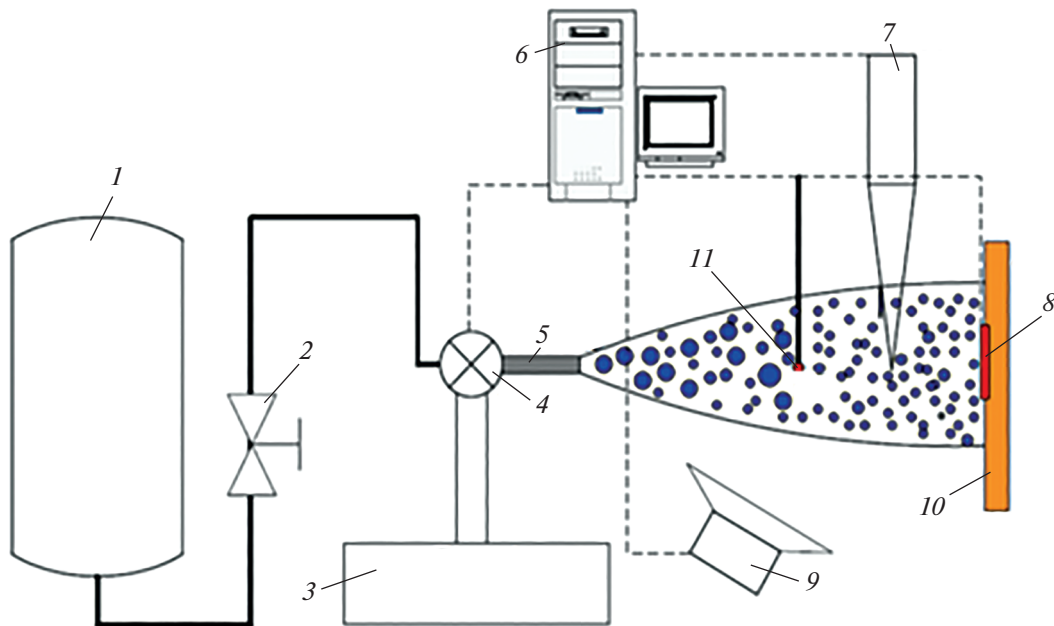


Рис. 10. Схема экспериментальной установки [73].

1 – контейнер с R404a; 2 – клапан; 3 – электрический клапанный позиционер; 4 – электрический клапан; 5 – сопло; 6 – система сбора данных (DAQ); 7 – фазовый доплеровский анализатор частиц (PDPA); 8 – термопара тонкопленочного типа (TFTC); 9 – устройство с зарядовой связью (CCD); 10 – эпоксидная смола; 11 – термопара

R404a вместо R134a, при установке расширительной камеры он повысился еще на 18%. Вокруг центра зоны распыления появилась область равномерного охлаждения радиусом 2 мм с переходным тепловым потоком 300 кВт/м^2 . Это положительно скажется на работе врачей, поскольку даст им возможность контролировать расположение зоны, в которой фокусируется лазерный луч.

Авторы [75] экспериментально исследовали испарительное охлаждение импульсно-струйным методом. Для этого использовали многосопловую установку и водный раствор этанола в качестве рабочей жидкости (при концентрациях 0–96%) с импульсами распыления длительностью 2, 4 и 10 мс при частоте 10 Гц. При концентрации раствора этанола 50–60% был получен максимальный коэффициент теплоотдачи. При увеличении концентрации этанола и уменьшении длительности импульса наблюдалось повышение эффективности охлаждения.

В [76] авторы рассмотрели влияние интенсивности режима охлаждения на вторичное охлаждение в процессе непрерывного литья металлов и сплавов путем изменения скорости потока воды с целью получить желаемую температуру поверхности. Для процесса непрерывного литья была разработана тепловая имитационная модель. Как показали результаты ее использования, колебания температуры при охлаждении распылением импульсным методом меньше, чем при охлаждении туманом, несмотря на то что при охлаждении импульсным методом требовался больший расход воды. Однако в итоге эксплуатационные расходы оказались ниже, так как расход воздуха был меньше по сравнению с его расходом на охлаждение туманом.

Авторами [21] для исследования охлаждения распылением многоимпульсным методом, применяемым для защиты кожи от холода при лазерном липолизе, был проведен численный анализ. Определяли показатели эффективности охлаждения как при непрерывном, так и при многоимпульсном распылении R134a и лазерном облучении. Было установлено, что требования к охлаждающему эффекту и его глубине для защиты кожи от холода могут быть выполнены при многоимпульсном, но не при непрерывном распылении хладагента.

Авторы [77] также исследовали параметры теплоотдачи при охлаждении распылением импульсным методом с помощью разработанной трехмерной имитационной модели. Результаты моделирования показали, что оптимизированный цикл распыления и коэффициент заполнения могут быть достигнуты при более низкой скорости потока. При сокращении цикла распыления воздействием двух последовательных импульсов усилилось, что привело к более высокой интенсивности

теплообмена. Наблюдалось повышение охлаждающего эффекта при увеличении скорости потока. С учетом условий моделирования авторами [77] было установлено, что импульсное охлаждение распылением обеспечивает такой же охлаждающий эффект, что и непрерывное струйное охлаждение, при коэффициенте заполнения 0.75. Охлаждение импульсным методом позволит улучшить коэффициент теплоотдачи, сэкономить охлаждающую жидкость и снизить потребление энергии.

В работе [78] для исследования тепломассопереноса были проведены испытания распылителей с периодической подачей капель жидкости путем изменения длительности импульсов распыления и их частоты. Теплоотдача увеличилась вследствие охлаждения испарением первичных и вторичных капель жидкости с нагретой сухой поверхности в промежутки времени между двумя последовательными импульсами распыления.

РАСХОД ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Для определения эффективности охлаждения водяным туманом железнодорожных туннелей авторами [79] был проведен теоретический анализ данных по уравнениям сохранения массы, импульса и энергии для испаряющейся капли жидкости. Было обнаружено, что расстояние между каплями уменьшалось, время их жизни увеличивалось с ростом их диаметров. Для большей эффективности системы необходимо обеспечивать испарение водяной взвеси до попадания капель жидкости на окружающие поверхности.

При определении эффективности метода охлаждения водяным туманом в [79] был сделан вывод, что затраты на разработку и внедрение установки водяного тумана будут меньше, чем на обычную систему охлаждения с водовоздушным теплообменником.

Авторами работы [2] были проведены эксперименты по струйно-ударному охлаждению с использованием нескольких потоков для получения более равномерного распределения температуры поверхности и повышения среднего коэффициента теплоотдачи. Однако для реализации этого метода охлаждения требуется значительно больший расход охлаждающей жидкости, чем при охлаждении распылением и мини- и микроканальном охлаждении.

В работе [80] описаны опыты по оптимизации метода охлаждения распылением с целью точно определить количество охлаждающей жидкости, необходимое для отвода теплового потока от нагретой поверхности и поддержания ее температуры в нужном диапазоне. Авторы заключили, что охлаждение распылением импульсным методом полностью соответствует требованиям оптимизации

ции и механизм распыления активируется, когда температура превышает заданное предельное значение. Эксперимент проводился с использованием имеющейся в продаже (не спроектированной специально) форсунки с небольшим расходом, деионизированной воды в качестве охлаждающей жидкости и микроэлектромагнитного клапана для создания импульсного распыления. Мишенью (охлаждаемой поверхностью) служил термотестовый чип. Было изучено влияние на температуру поверхности и коэффициент теплоотдачи таких параметров, как плотность теплового потока, скорость и температура охлаждающей жидкости.

ВЫВОДЫ

1. Охлаждение распылением представляет собой весьма сложный процесс, который благодаря своим достоинствам в последнее время вызывает все больший интерес. Его применяют в медицине, в обрабатывающей, металлургической, электронной промышленности, в энергетике, при проведении технологических исследований, т.е. там, где требуется обеспечить отвод больших тепловых потоков.

2. При струйном охлаждении может быть получена гораздо большая интенсивность теплосъема по сравнению с другими существующими методами при меньшем расходе жидкости.

3. В большинстве экспериментальных исследований использовались нагретые поверхности, которые позволяют получать только усредненные по пространству и времени тепловой поток и температуру.

4. Механизмы струйного охлаждения как в однофазном, так и в двухфазном режиме еще предстоит изучить, основываясь на данных более ранних исследований. Результаты, полученные к настоящему времени, ограничены информацией о плоском и полноконусном распылении.

5. По-прежнему существует множество способов совершенствования механизма охлаждения распылением — это и применение различных жидкостей и их смесей, и модификация конструкций и схем. Кроме того, недавние достижения в области охлаждения с помощью струйно-ударных аппаратов требуют более глубокого изучения характеристик теплообмена, толщины образующейся пленки, напряжения сдвига, давления и параметров управления распылением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kim J.** Spray cooling heat transfer: The state of the art // *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2007. V. 28. Is. 4. P. 753–767. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.09.003>
2. **Mudawar I.** Recent advances in high-flux, two-phase thermal management // *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 2013.

- V. 5. Is. 2. P. 021012. <https://doi.org/10.1115/HT2013-17046>
3. **Wendelstorf J., Spitzer K.-H., Wendelstorf R.** Spray water cooling heat transfer at high temperatures and liquid mass fluxes // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2008. V. 51. Is. 19–20. P. 4902–4910. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.01.032>
4. **Spray cooling** / Z. Yan, R. Zhao, F. Duan, T.N. Wong, K.C. Toh, K.F. Choo, P.K. Chan, Y.S. Chua // *Two phase flow, Phase Change Numer. Modell.* 2011. P. 285–310. <https://doi.org/10.5772/21076>
5. **Chin T.-C.** Generation and evaporation of microsprays // *Adv. Microfluidics – New Appl. Biology, Energy, Mater. Sci.* / Ed. by Y. Xiao-Ying. IntechOpen, 2016. P. 315–334. <https://doi.org/10.5772/64756>
6. **Gao X., Li R.** Spray impingement cooling: The state of the art // *Adv. Cooling Technol. Appl.* / Ed. by S.M. Sohel Murshed. IntechOpen, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80256>
7. **Aamir M.A., Watkins A.P.** Modelling of spray impingement heat transfer // *ILASS-Europe*. 2000. V. 7. P. 1–6.
8. **Heinlein J., Fritsching U.** Droplet clustering in sprays // *Exp. Fluids*. 2006. V. 40. Is. 3. P. 464–472. <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0087-4>
9. **Simulation** of spray cooling systems with phase change / S.W. Tan, K.C. Lin, L. Chow, R.H. Chen, A. Griffin, D. Rini // *Summer Computer Simulation Conf.* 2001. P. 428–433. Society for Computer Simulation International, 1998.
10. **Shedd T.A., Pautsch A.G.** Spray impingement cooling with single- and multiple-nozzle arrays. Part II: Visualization and empirical models // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2005. V. 48. Is. 15. P. 3176–3184. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.02.013>
11. **Impingement** cooling of hot metal strips in runout table — A review / P.C. Mishra, S.K. Nayak, P. Pradhan, D.P. Ghosh // *Interfacial Phenom. Heat Transfer*. 2015. V. 3. Is. P. 117–137. <https://doi.org/10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2014010574>
12. **Karwa N., Stephan P.** Experimental investigation of free-surface jet impingement quenching process // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2013. V. 64. Is. 1118–1126. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.014>
13. **Silk E.A., Gollither E.L., Selvam R.P.** Spray cooling heat transfer: technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application // *Energy Convers. Manage.* 2008. V. 49. Is. 3. P. 453–468. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.046>
14. **Liu R., Zhang L., Zhang X.** Applications of spray cooling technology in aerospace field // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. V. 470. No. 1. P. 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/470/1/012020>
15. **The research** and application of spray cooling technology in Shanghai / C. Huang, D. Ye, H. Zhao, T. Liang, Z. Lin, H. Yin, Y. Yang // *Appl. Therm. Eng.* 2011. V. 31. Is. 17–18. P. 3726–3735. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.039>
16. **Two-phase** spray cooling of hybrid vehicle electronics / I. Mudawar, D. Bharathan, K. Kelly, S. Narumanchi //

- IEEE Transactions on Components and Packaging Technol. 2009. V. 32. Is. 2. P. 501–512.
<https://doi.org/10.1109/TCAPT.2008.2006907>
17. **Bharathan D., Hassani V.** Spray cooling: An assessment for use with automotive power electronics applications. Milestone Report for Freedom CAR, 2005.
18. **Trávníček Z., Tesař V.** Annular synthetic jet used for impinging flow mass-transfer // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2003. V. 46. Is. 17. P. 3291–3297.
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00119-4)
19. **Zhou Z.-F., Chen B.** The fundamental and application of transient flashing spray cooling in laser dermatology // *Adv. Cooling Technol. Appl.* / Ed. by S.M. Sohel Murshed. IntechOpen, 2018.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.79462>
20. **Effects** of droplet velocity, diameter, and film height on heat removal during cryogen spray cooling / B.M. Pikkula, J.W. Tunnell, D.W. Chang, B. Anvari // *Ann. Biomed. Eng.* 2004. V. 32. Is. 8. P. 1133–1142.
<https://doi.org/10.1114/B:ABME.0000036649.80421.60>
21. **Numerical** investigation of multi-pulsed cryogen spray cooling for skin cold protection in laser lipolysis / H. Xin, B. Chen, Z. Zhou, D. Li, J. Tian // *Numer. Heat Transfer. Part A: Appl.* 2020. V. 77. Is. 7. P. 730–742.
<https://doi.org/10.1080/10407782.2020.1714354>
22. **Effect** of the spray cone angle in the spray cooling with R134a / E. Martínez-Galván, R. Antón, J.C. Ramos, R. Khodabandeh // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2013. V. 50. Is. 127–138.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.05.012>
23. **Nayak S.K., Mishra P.C., Parashar S.K.S.** Influence of spray characteristics on heat flux in dual phase spray impingement cooling of hot surface // *Alexandria Eng. J.* 2016. V. 55. Is. 3. P. 1995–2004.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.015>
24. **Mzad H., Khelif R.** Effect of spraying pressure on spray cooling enhancement of beryllium-copper alloy plate // *Proc. Eng.* 2016. V. 157. P. 106–113.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.344>
25. **Experimental** study on the effects of spray inclination on water spray cooling performance in non-boiling regime / Y. Wang, M. Liu, D. Liu, K. Xu, Y. Chen // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2010. V. 34. Is. 7. P. 933–942.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.02.010>
26. **Chen R.H., Chow L.C., Navedo J.E.** Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2002. V. 45. Is. 19. P. 4033–4043.
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00113-8)
27. **Kendall C.M., Holman J.P.** Spray cooling heat-transfer with subcooled trichlorotrifluoroethane (freon-113) for vertical constant heat flux surfaces // *Proc. of the Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Atlanta, Georgia, 18–20 Nov. 1996.
28. **Ultra** fast spray cooling and critical droplet diameter estimation from cooling rate / M. Aamir, L. Qiang, Z. Xun, W. Hong, M. Zubair // *J. Power Energy Eng.* 2014. V. 2. No. 4. P. 259–270.
<https://doi.org/10.4236/jpee.2014.24037>
29. **Zhao Y.** The cooling of a hot steel plate by an impinging water jet. School of Mechanical, Materials and Mechatronics – Faculty of Engineering, 2005.
30. **Experimental** study on spray cooling under reduced pressures / C. Peng, X. Xu, Y. Li, Y. Li, X. Liang // *Sci. China Technol. Sci.* 2019. V. 62. Is. 2. P. 349–355.
<https://doi.org/10.1007/s11431-018-9370-y>
31. **Experimental** investigation of the influences of fluid properties on heat transfer for spray cooling / J. Kansy, T. Kalmbach, A. Loges, T. Wetzel, A. Wiebelt // *Proc. of the 5th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'20)*. Lisbon, Portugal Virtual Congress, Oct. 2020. No. ENFHT 122.
<https://doi.org/10.11159/enfht20.122>
32. **Chen H.-T., Lee H.-C.** Estimation of spray cooling characteristics on a hot surface using the hybrid inverse scheme // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2007. V. 50. Is. 13–14. P. 2503–2513.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.12.021>
33. **Modeling** and experimental research on spray cooling / J.-Y. Jia, Y.-X. Guo, W.-D. Wang, S.-R. Zhou // *Proc. of the 24th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. San Jose, CA, USA, 16–20 March 2008. P. 118–123.
<https://doi.org/10.1109/STHERM.2008.4509377>
34. **Tran C.** Experimental study of water droplets impinging upon a hot surface: Thesis // *Dissertation Collection*. Rochester Institute of Technology, 2000.
35. **Kandlikar S.G., Bapat A.V.** Evaluation of jet impingement, spray and microchannel chip cooling options for high heat flux removal // *Heat Transfer Eng.* 2007. V. 28. Is. 11. P. 911–923.
<https://doi.org/10.1080/01457630701421703>
36. **Orlande H.R., Colaço M.J., Malta A.A.** Estimation of the heat transfer coefficient in the spray cooling of continuously cast slabs // *ASME-PUBLICATIONS-HTD*. 1997. V. 340. P. 109–116.
37. **Landero J.C., Watkins A.P.** Modelling of spray impingement heat transfer for spray cooling. 2000. https://www.researchgate.net/profile/A-Watkins/publication/268363486_Modelling_of_Spray_Impingement_Heat_Transfer_for_Spray_Cooling/links/54fed5320cf2741b69f175db/Modelling-of-Spray-Impingement-Heat-Transfer-for-Spray-Cooling.pdf
38. **Experimental** study on phase change spray cooling / Y. Hou, X. Liu, J. Liu, M. Li, L. Pu // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2013. V. 46. P. 84–88.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.11.023>
39. **Experimental** result on heat transfer during quenching of hot steel plate by spray impingement / S.K. Nayak, P.C., Mishra, M. Ukamanal, R. Chaini // *Heat Transfer Eng.* 2018. V. 39. Is. 9. P. 739–749.
<https://doi.org/10.1080/01457632.2017.1341193>
40. **Bhattacharya P., Samanta A.N., Chakraborty S.** Spray evaporative cooling to achieve ultra fast cooling in runout table // *Int. J. Therm. Sci.* 2009. V. 48. Is. 9. P. 1741–1747.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.01.015>
41. **Zhang Z., Li J., Jiang P.-X.** Experimental investigation of spray cooling on flat and enhanced surfaces // *Appl. Therm. Eng.* 2013. V. 51. Is. 1–2. P. 102–111.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.08.057>

42. **Suebomran A., Butdee S.** Cooling process on a run-out table by the simulation method // *Case Stud. Therm. Eng.* 2013. V. 1. Is. 1. P. 51–56.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2013.07.002>
43. **Pavlova A.A., Otani K., Amitay M.** Active performance enhancement of spray cooling // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2008. V. 29. Is. 4. P. 985–1000.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.02.006>
44. **Bal S., Mishra P.C., Satapathy A.K.** Optimization of spray parameters for effective microchannel cooling using surface response methodology // *Int. J. Heat Technol.* 2018. V. 36. Is. 3. P. 973–980.
<https://doi.org/10.18280/ijht.360325>
45. **Influence** of position and orientation of water spraying on the efficiency of a heat exchanger / S. Lacour, P.-E. Vende, F. Trinquet, A. Delahaye, L. Fournaison // *Proc. of the 4th Intern. Conf. on Contemporary Problems of Thermal Engineering (CPOTE)*. Katowice, Poland, Sept. 2016. V. 1.
46. **Spray** cooling with ammonia on microstructured surfaces: performance enhancement and hysteresis effect / H. Bostanci, D.P. Rini, J.P. Kizito, L.C. Chow // *J. Heat Transfer.* 2009. V. 131. Is. 7. P. 071401.
<https://doi.org/10.1115/1.3089553>
47. **Experimental** investigation of parameters effect on heat transfer of spray cooling / W.-L. Cheng, Q.-N. Liu, R. Zhao, H.-L. Fan // *Heat Mass Transfer.* 2010. V. 46. Is. 8. P. 911–921.
<https://doi.org/10.1007/s00231-010-0631-5>
48. **Wang Y.Q., Liu N., Xu X.J.** Research developments on improvement of spray cooling performance // *Adv. Mater. Res.* 2012. V. 588. P. 1735–1739.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.588-589.1735>
49. **Measuring** heat transfer during spray cooling using controlled induction-heating experiments and computational models / X. Zhou, B.G. Thomas, C.A.B. Hernandez, A.H.E. Castillejos, F.A.G. Acosta // *Appl. Math. Modell.* 2013. V. 37. Is. 5. P. 3181–3192.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.07.039>
50. **Study** of heat transfer enhancement for structured surfaces in spray cooling / J.L. Xie, Y.B. Tan, F. Duan, K. Ranjith, T.N. Wong, K.C. Toh, K.F. Choo, P.K. Chan // *Appl. Therm. Eng.* 2013. V. 59. Is. 1–2. P. 464–472.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.05.047>
51. **Horacek B., Kiger K.T., Kim J.** Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2005. V. 48. Is. 8. P. 1425–1438.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.026>
52. **Labergue A., Gradeck M., Lemoine F.** Comparative study of the cooling of a hot temperature surface using sprays and liquid jets // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2015. V. 81. P. 889–900.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.018>
53. **McDonald A., Moreau C., Chandra S.** Thermal contact resistance between plasma-sprayed particles and flat surfaces // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2007. V. 50. Is. 9–10. P. 1737–1749.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.022>
54. **Moreira A.L., Carvalho J., Pano M.R.** An experimental methodology to quantify the spray cooling event at intermittent spray impact // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2007. V. 28. Is. 2. P. 191–202.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.004>
55. **Experimental** characterization of heat transfer in non-boiling spray cooling with two nozzles / Y. Tao, X. Huai, L. Wang, Z. Guo // *Appl. Therm. Eng.* 2011. V. 31. Is. 10. P. 1790–1797.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.02.025>
56. **Lin L., Ponnappan R.** Heat transfer characteristics of spray cooling in a closed loop // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2003. V. 46. Is. 20. P. 3737–3746.
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00217-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00217-5)
57. **Lin C.** Droplet impact and evaporation on nanotextured surface for high efficient spray cooling // *An Overview of Heat Transfer Phenomena* / Ed. by Salim N. Kazi. IntechOpen, 2012.
<https://doi.org/10.5772/51826>
58. **Horacek B., Kim J., Kiger K.T.** Spray cooling using multiple nozzles: visualization and wall heat transfer measurements // *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability.* 2004. V. 4. No. 4. P. 614–625.
59. **Chabičovský M., Raudenský M.** Experimental investigation of spray cooling of horizontally and vertically oriented surfaces // *Metal.* 2013. P. 198–204.
60. **A novel** spray cooling device based on a dual synthetic jet actuator integrated with a piezoelectric atomizer / W. He, Z. Luo, X. Deng, Z. Xia // *Heat Mass Transfer.* 2020. V. 56. No. 5. P. 1551–1563.
<https://doi.org/10.1007/s00231-019-02804-w>
61. **Ochoterena R., Andersson S.** Flow in nozzles and its influence on spray behaviour. Institute for Liquefied Atomization and Spray Systems, 2004.
62. **Spray** cooling system design and optimization for cooling performance enhancement of natural draft dry cooling tower in concentrated solar power plants / Y. Sun, Z. Guan, H. Gurgenci, J. Wang, P. Dong, K. Hooman // *Energy.* 2019. V. 168. P. 273–284.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.111>
63. **Achievement** of ultrafast cooling rate in a hot steel plate by air-atomized spray with different surfactant additives / S.V. Ravikumar, J.M. Jha, I. Sarkar, S.S. Mohapatra, S.K. Pal, S. Chakraborty // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2013. V. 50. P. 79–89.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.05.007>
64. **Fernandes P., Prabhu K.N.** Effect of section size and agitation on heat transfer during quenching of AISI 1040 steel // *J. Mater. Processing Technol.* 2007. V. 183. Is. 1. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.08.028>
65. **Jia W., Qiu H.-H.** Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2003. V. 27. Is. 7. P. 829–838.
[https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(03\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(03)00015-3)
66. **Experimental** investigation on spray cooling with low-alcohol additives / H. Liu, C. Cai, M. Jia, J. Gao, H. Yin, H. Chen // *Appl. Therm. Eng.* 2019. V. 146. P. 921–930.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.054>
67. **Qiao Y.M., Chandra S.** Spray cooling enhancement by addition of a surfactant // *J. Heat Transfer.* 1998. V. 120. Is. 1. P. 92–98.
<https://doi.org/10.1115/1.2830070>

68. **Horacek B., Kim J., Kiger K.T.** Effects of noncondensable gas and subcooling on the spray cooling of an isothermal surface // ASME Intern Mechanical and Engineering Congress and Exposition. Washington, DC, USA. 15–21 Nov. 2003. P. 69–77.
https://doi.org/10.1115/IMECE2003-41680
69. **Coursey J.S.** Enhancement of spray cooling heat transfer using extended surfaces and nanofluids. University of Maryland, College Park, 2007.
70. **Effects** of mixed surfactants on heat transfer performance of pulsed spray cooling / N. Liu, Z. Yu, Y. Liang, H. Zhang // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 144. P. 118593.
https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118593
71. **Panão M.R.O., Moreira A.L.N.** Thermo- and fluid dynamics characterization of spray cooling with pulsed sprays // Exp. Therm. Fluid Sci. 2005. V. 30. Is. 2. P. 79–96.
https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2005.03.020
72. **Heat** transfer characteristics during pulsed spray cooling with R404A at different spray distances and back pressures / Z.F. Zhou, R. Wang, B. Chen, T. Yang, G.X. Wang // Appl. Therm. Eng. 2016. V. 102. P. 813–821.
https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.004
73. **An experimental** study on pulsed spray cooling with refrigerant R-404a in laser surgery / Z. Zhou, B. Chen, Y. Wang, L. Guo, G Wang // Appl. Therm. Eng. 2012. V. 39. P. 29–36.
https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.028
74. **Surface** heat transfer characteristics of R404A pulsed spray cooling with an expansion-chambered nozzle for laser dermatology / R. Wang, Z. Zhou, B. Chen, F. Bai, G. Wang // Int. J. Refrig. 2015. V. 60. P. 206–216.
https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.08.016
75. **Evaporative** cooling by a pulsed jet spray of binary ethanol-water mixture / P.N. Karpov, A.D. Nazarov, A.F. Serov, V.I. Terekhov // Tech. Phys. Lett. 2015. V. 41. Is. 7. P. 668–671.
https://doi.org/10.1134/S1063785015070238
76. **Javurek M., Hauser K.** Secondary cooling with pulsed sprays: enhanced cooling range and lower operating costs // Proc. of the 9th European Continuous Casting Conf. (ECCC). Vienna, Austria. 26–29 June 2017. P. 12–18.
77. **Han F., Dong H., Ma F.** Research on simulation of heat transfer characteristics of intermittent spray cooling // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. V. 647. No. 1. P. 012060.
https://doi.org/10.1088/1755-1315/647/1/012060
78. **Heat** and mass transfer are in the interaction of multipulsed spray with vertical surfaces in the regime of evaporative cooling / P.N. Karpov, A.D. Nazarov, A.F. Serov, V.I. Terekhov // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. No. 1. P. 012031.
https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012031
79. **Barrow H., Pope C.W.** Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling // Appl. Energy. 2007. V. 84. Is. 4. P. 404–412.
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.09.007
80. **Somasundaram S., Tay A.A.O.** Intermittent spray cooling – Solution to optimize spray cooling // Proc. of the 14th Electronics Packaging Technological Conf. (EPTC). Singapore. 5–7 Dec. 2012. P. 588–593.
https://doi.org/10.1109/EPTC.2012.6507150

Spray Impingement Cooling of Metal Surfaces: a Review on Progressing Mechanisms (Review)

M. Jena^a, P. C. Mishra^{a, *}, and S. S. Sahoo^b

^a Thermal Research Laboratory (TRL), School of Mechanical Engineering, KIIT University, Bhubaneswar, Odisha, 751024 India

^b Department of Mechanical Engineering, Odisha University of Technology and Research (OUTR), Bhubaneswar, India
*e-mail: pcmishrafme@kiit.ac.in

Abstract—In this paper, we present a review of the recent progresses in spray impingement heat transfer mechanisms and influences of various controlling parameters on spray impingement cooling performance. This paper focuses on the developments in spray cooling effectiveness achieved by modifying the flow processes and parameters. The open literature reveals that spray impingement cooling processes studies explore practical applications but not full understanding that can help to further improvement. There are many possibilities of improving the performance of spray cooling by alternating the fluid types, flow pattern and controlling parameters such as air/water pressure and to distance from nozzle to heated plate. Some of the earlier researchers have also tried pulsed spray impingement technique to enhance the heat transfer effectiveness during metal surface cooling. However, there remains a need for further examination and the present review discusses several such possibilities.

Keywords: Spray impingement cooling, pressure, mechanisms, pulsed spray method, economic factors, technical applications, working liquid, coolant