Дарын Рашитулы Байжан – старший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск; докторант, Shakarim University, Семей, Казахстан; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129.

Нурбол Ерболулы Бердимуратов – младший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: nurbol.ber@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6880-6439.

Балым Алибековна Алибекова* – инженер научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7644-4527.

Received 08.04.2026
Revised 18.08.2026
Accepted 25.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-65

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 29.17.19

А.А. Ахметов*, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ОРОСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РАСПЫЛЕНИЯ: ОБЗОР

Аннотация: *В статье представлен обзор современных исследований, посвящённых гидродинамическим и теплофизическим аспектам работы оросительных и распылительных устройств в технических системах. Цель работы заключается в систематизации научных представлений о влиянии конструктивных, режимных и теплофизических параметров сопел на формирование распылённого потока, равномерность орошения и эффективность тепло- и массообмена. Рассмотрены основные типы оросительных устройств, включая струйные, веерные, конусные, центробежные и пневматические распылители. Проанализировано влияние рабочего давления, расхода жидкости, геометрии проточной части, размера и скорости капель, угла раскрытия факела, плотности орошения и свойств рабочей среды на структуру капельного потока. Показано, что эффективность оросительных устройств определяется не только расходной характеристикой и давлением, но и рациональным сочетанием дисперсности распыла, устойчивости факела, равномерности распределения жидкости и условий взаимодействия капель с газовой средой, насадкой или теплообменной поверхностью. Особое внимание уделено распылительному охлаждению, где ключевое значение имеют капельный спектр, положение сопла, состояние поверхности, режим кипения и критический тепловой поток. Для градирен и испарительных систем выделена роль равномерного водораспределения как одного из определяющих факторов эффективности тепло- и массообмена. Рассмотрены возможности CFD-моделирования для анализа внутреннего течения в соплах, закручивания потока, формирования жидкой плёнки и структуры факела распыла. Сделан вывод о необходимости комплексного учёта гидродинамических, теплофизических и эксплуатационных параметров при проектировании и оптимизации оросительных устройств для градирен, испарительных охладителей, аппаратов газоочистки и установок распылительного охлаждения.*

Ключевые слова: *оросительные устройства; атомизация жидкости; тепло- и массообмен; распылительное охлаждение; CFD-моделирование.*

Введение

Оросительные и распылительные устройства широко применяются в технических системах, где требуется обеспечить эффективный контакт жидкости с газовой средой, нагретой поверхностью или зоной тепло- и массообмена. К таким системам относятся

©А.А. Ахметов, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова, 2026

градирни, испарительные охладители, аппараты газоочистки, установки распылительного охлаждения, системы увлажнения воздуха, а также различные энергетические, климатические и промышленные аппараты. Несмотря на различие конструкций и условий эксплуатации, работа таких устройств основана на общем физическом процессе преобразовании сплошного потока жидкости в струю, плёнку или капельный факел.

В научной литературе данный процесс обычно рассматривается через понятие атомизации жидкости. Атомизация представляет собой разрушение струи или жидкой плёнки на отдельные капли под действием инерционных, вязкостных, поверхностных и аэродинамических сил. На характер распыления влияют давление перед соплом, расход жидкости, геометрия проточной части, свойства рабочей среды, а также условия взаимодействия факела с окружающим воздухом, насадкой или теплообменной поверхностью [1-6]. Поэтому оросительное устройство нельзя рассматривать только как элемент подачи воды или другой жидкости. Оно формирует структуру потока, от которой зависят последующие процессы тепло- и массообмена.

С теплофизической точки зрения особенно важны размер и скорость капель, угол раскрытия факела, плотность орошения и равномерность распределения жидкости. Уменьшение среднего размера капель увеличивает суммарную площадь межфазного контакта и может способствовать интенсификации испарения, теплоотдачи и массообмена. Однако чрезмерно мелкие капли легче уносятся воздушным потоком, быстрее теряют скорость и не всегда достигают расчётной зоны контакта. Следовательно, эффективность распыла определяется не минимальным размером капель как самоцелью, а рациональным сочетанием дисперсности, устойчивости факела и равномерности орошения.

Особое значение имеет взаимодействие капель с поверхностью. В системах распылительного охлаждения результат зависит не только от параметров истечения из сопла, но и от поведения капель после удара о нагретую стенку. Капля может растекаться, отскакивать, разрушаться или формировать жидкую плёнку, что влияет на смачивание поверхности и интенсивность отвода теплоты [7, 8]. В градирнях и испарительных охладителях, напротив, основную роль играет равномерное распределение воды по рабочему объёму аппарата и поверхности насадки. При неравномерном орошении часть зоны тепло- и массообмена используется неполностью, что снижает фактическую эффективность оборудования.

На практике параметры работы сопла тесно связаны между собой. Увеличение давления обычно повышает скорость истечения и способствует более интенсивному распаду струи или жидкой плёнки. Вместе с тем рост давления сопровождается увеличением гидравлических потерь, энергозатрат на перекачивание жидкости и риска уноса мелкодисперсных капель. Геометрия сопла, форма выходного отверстия и особенности внутреннего течения также существенно влияют на угол факела, коэффициент расхода, капельный спектр и распределение жидкости в рабочей зоне [9-12]. Следовательно, выбор и оптимизация оросительного устройства должны учитывать не один отдельный параметр, а совокупность гидродинамических, теплофизических и эксплуатационных характеристик.

В связи с этим актуальной задачей является систематизация современных исследований, посвящённых связи между конструкцией распылительных устройств, параметрами факела и эффективностью тепло- и массообмена. Такой подход позволяет перейти от простого подбора сопла по расходу или давлению к более обоснованной оценке его работы в конкретной технической системе.

Целью данной обзорной статьи является систематизация и анализ современных исследований, посвящённых влиянию конструктивных, гидродинамических и теплофизических параметров оросительных и распылительных устройств на формирование капельного потока, равномерность орошения и эффективность тепло- и массообмена в технических системах.

Для достижения поставленной цели в работе рассмотрены основные типы оросительных и распылительных устройств, проанализированы характеристики сопел и распылённого потока, обобщены данные по распылительному охлаждению, водораспределению в градирнях и применению CFD-моделирования для исследования внутреннего течения и структуры факела распыла.

Несмотря на значительное количество публикаций, посвящённых атомизации жидкости, характеристикам сопел, распылительному охлаждению и работе градирен, большинство исследований рассматривает указанные направления отдельно друг от друга. В существующих работах основное внимание, как правило, уделяется либо гидродинамике распыления, либо процессам теплообмена, либо вопросам водораспределения в конкретных технических системах.

В отличие от таких подходов, в настоящем обзоре оросительные устройства рассматриваются как элементы единой теплофизической системы, в которой гидродинамические параметры сопла непосредственно влияют на структуру капельного потока, характеристики межфазного взаимодействия и эффективность тепло- и массообмена. Особое внимание уделено взаимосвязи между внутренним течением в сопле, характеристиками факела распыла, размером и скоростью капель, равномерностью орошения и современными методами численного моделирования.

Представленный подход позволяет сформировать комплексное представление о путях оптимизации оросительных устройств в градирнях, испарительных системах, аппаратах газоочистки и установках распылительного охлаждения.

Методы исследования

Настоящая статья выполнена в формате обзорного исследования, направленного на систематизацию и анализ современных научных данных о гидродинамических и теплофизических закономерностях работы оросительных и распылительных устройств. Выбор обзорного формата обусловлен междисциплинарным характером рассматриваемой проблемы, которая объединяет вопросы атомизации жидкости, движения капельных и многофазных потоков, тепло- и массообмена, распылительного охлаждения, водораспределения в градирнях, а также численного моделирования течения в соплах.

Поиск литературных источников проводился по научным публикациям, представленным в международных базах данных и издательских платформах, включая Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis Online и другие научные ресурсы. При поиске использовались ключевые слова и их сочетания на английском языке: atomization, spray nozzles, pressure-swirl atomizer, flat fan nozzle, droplet size distribution, spray characteristics, spray cooling, cooling tower nozzle, water distribution, heat and mass transfer, two-phase flow, CFD simulation. Дополнительно анализировались списки литературы в наиболее близких к теме обзорных, экспериментальных и расчётных работах.

В обзор включались источники, в которых оросительные и распылительные устройства рассматривались не только как элементы подачи жидкости, но и как устройства, формирующие структуру распылённого потока. Основное внимание уделялось публикациям, где анализировались давление перед соплом, расход жидкости, геометрия проточной части, угол раскрытия факела, размер и скорость капель, коэффициент расхода, плотность орошения, равномерность распределения жидкости и влияние этих параметров на тепло- и массообмен.

Критериями включения источников в обзор являлись: соответствие теме исследования, наличие анализа характеристик сопел или распылённого потока, связь рассматриваемых параметров с процессами тепло- и массообмена, наличие экспериментальных, теоретических или численных данных, а также научная значимость публикации. Предпочтение отдавалось работам, опубликованным в рецензируемых журналах, монографиям, обзорным статьям, международным стандартам и исследованиям, представленным в авторитетных научных базах данных.

Из анализа исключались публикации, не связанные напрямую с распылением, оросительными устройствами, характеристиками капельного потока, теплообменом, градирнями или CFD-моделированием сопел. Также не рассматривались работы, в которых распыление упоминалось только как вспомогательный технологический процесс без анализа гидродинамических или теплофизических параметров.

Отобранные источники были сгруппированы по нескольким основным направлениям: фундаментальная теория атомизации жидкости; экспериментальные исследования сопел и форсунок; характеристики капельного потока; методы диагностики и стандарты испытаний распыла; распылительное охлаждение и теплообмен; оросительные устройства градирен и

испарительных систем; CFD-моделирование внутреннего течения и структуры факела. Такая группировка позволила рассматривать оросительное устройство не изолированно, а как элемент технической системы, формирующий условия тепло- и массообмена.

При анализе экспериментальных исследований учитывались не только полученные результаты, но и методы их определения. Это связано с тем, что расход, угол факела, размер капель и равномерность распределения жидкости могут существенно зависеть от методики испытаний, типа измерительного оборудования, свойств жидкости, давления и конфигурации экспериментальной установки. В связи с этим отдельно учитывались международные стандарты, описывающие методы испытаний распылительных сопел, измерения капельного спектра и классификации распыла.

Особое внимание уделялось равномерности распределения жидкости. Для градирен, испарительных охладителей и аппаратов контактного теплообмена этот параметр имеет принципиальное значение, поскольку при неравномерном орошении часть рабочей зоны аппарата используется неполностью. Поэтому при анализе учитывались исследования, в которых рассматривались методы оценки пространственного распределения жидкости, включая применение паттернаторов и других диагностических подходов.

При обобщении результатов не выполнялось прямое сопоставление отдельных численных значений, полученных в разных исследованиях, поскольку параметры распыла зависят от типа сопла, геометрии канала, давления, свойств жидкости, температуры, метода измерения и условий проведения эксперимента. Основной акцент был сделан на выявлении повторяющихся закономерностей: влияния давления на распад струи, роли геометрии сопла в формировании факела, связи размера капель с площадью межфазного контакта, значения равномерности орошения для эффективности тепло- и массообмена, а также возможностей CFD-моделирования для анализа внутреннего течения в соплах.

Следовательно, методика исследования была основана на комплексном анализе литературных данных, их тематической группировке и сопоставлении с позиции единой гидродинамической и теплофизической логики. Такой подход позволил выявить основные факторы, определяющие эффективность оросительных устройств, и сформулировать направления их дальнейшей оптимизации.

Для отражения логики поиска, отбора и последующего анализа публикаций методическая схема исследования представлена в табличной форме. В таблице 1 приведены основные этапы работы с литературными источниками, их назначение и группы источников, использованные на каждом этапе анализа.

Таблица 1 – Методическая схема поиска, отбора и анализа литературных источников

Этап исследования	Содержание этапа	Назначение этапа	Источники
1	*2*	*3*	*4*
Поиск публикаций	Поиск работ по ключевым словам: atomization, spray nozzles, spray cooling, droplet size distribution, cooling tower nozzle, heat and mass transfer	Сформировать массив публикаций по гидродинамике распыла и теплофизическим процессам	[1-12]
Первичный отбор	Исключение работ, не связанных с соплами, распылением, тепло- и массообменом	Уточнить тематические границы обзора	[1-12]
Анализ характеристик сопел	Рассмотрение исследований, где приведены давление, расход, угол факела, размер и скорость капель	Выявить влияние режима работы и конструкции сопла на структуру потока	[18-26]
Учет стандартов испытаний	Анализ методик определения расхода, угла факела, распределения распыла и капельного спектра	Обеспечить корректную интерпретацию экспериментальных данных	[13-15]
Анализ равномерности распыла	Рассмотрение методов оценки пространственного распределения жидкости с применением паттернаторов	Оценить равномерность орошения в рабочей зоне аппарата	[16]

1	2	3	4
Анализ оптической диагностики	Учет лазерно-доплеровских и фазово-доплеровских методов измерения размера и скорости капель	Оценить надежность данных о капельном потоке	[17]
Систематизация результатов	Группировка источников по направлениям: атомизация, сопла, распылительное охлаждение и теплообмен, градирни, диагностика, CFD	Связать гидродинамические и теплофизические аспекты проблемы	[1-50]

Как видно из таблицы 1, обзор строился не по принципу простого перечисления публикаций, а через последовательное выделение тематических блоков. Это позволило связать фундаментальные представления об атомизации жидкости с прикладными вопросами выбора сопел, диагностики распыла, равномерности орошения и теплофизической эффективности технических систем.

Результаты исследований

Классификация оросительных и распылительных устройств

Оросительные и распылительные устройства различаются не только конструкцией, но и способом формирования потока. Это важно учитывать, потому что от типа устройства зависит форма факела, размер капель, равномерность распределения жидкости и характер взаимодействия с газовой средой или поверхностью теплообмена. В наиболее общем виде такие устройства можно разделить на гидравлические, центробежные, пневматические и ударные распылители.

Гидравлические сопла формируют факел за счет давления самой жидкости. К этой группе относятся струйные, веерные, полноконусные и полоконусные сопла. Их преимущество заключается в сравнительно простой конструкции и возможности работы без дополнительного подвода газа. Центробежные распылители отличаются тем, что жидкость перед выходом из сопла получает вращательное движение. За счет этого на выходе образуется тонкая жидкая пленка, которая затем распадается на капли. Пневматические распылители используют энергию газового потока, поэтому позволяют получать более мелкий распыл, но требуют дополнительного оборудования для подачи воздуха или газа. В ударных распылителях струя дробится при контакте с отражателем или пластиной, что часто применяется в системах орошения и водораспределения.

Такая классификация удобна для обзорного анализа, поскольку позволяет связать конструкцию устройства с теплофизическим результатом его работы. Обобщенная схема классификации оросительных устройств представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация оросительных устройств по способу формирования распылённого потока [1-4, 18-23]

Как видно из рисунка 1, каждый тип распылителя формирует собственную структуру потока. Струйное сопло обеспечивает направленную подачу жидкости, но площадь межфазного контакта в этом случае ограничена. Веерные и конусные сопла лучше подходят для распределения жидкости по поверхности или объему. Центробежные и пневматические распылители создают более развитый капельный поток, однако их работа сильнее зависит от давления, свойств жидкости и состояния внутренних каналов. Поэтому выбор оросительного

устройства должен определяться не только требуемым расходом, но и задачей тепло- и массообмена: орошением поверхности, охлаждением газового потока, испарительным охлаждением, газоочисткой или распылительным охлаждением нагретой стенки.

Несмотря на общность принципа распыления жидкости, различные типы сопел формируют существенно отличающиеся структуры потока и капельные спектры. Для обобщения основных характеристик наиболее распространенных распылительных устройств в таблице 2 приведено их сравнительное описание.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика основных типов распылительных устройств [1-4, 18-23]

Тип сопла	Форма факела	Характерный размер капель	Преимущества	Область применения
Струйное сопло	Компактная струя	Крупный, в зависимости от давления и конструкции сопла	Высокая дальность действия	Гидроочистка, мойка
Веерное сопло	Плоский факел	Средний, в зависимости от давления и конструкции сопла	Равномерное покрытие поверхности	Орошение, распыление растворов
Сопло полого конуса	Полый конический факел	Мелкий, в зависимости от давления и конструкции сопла	Большая площадь межфазного контакта	Газоочистка, охлаждение
Сопло полного конуса	Заполненный конус	Средний, в зависимости от давления и конструкции сопла	Равномерное объемное распределение жидкости	Градирни, теплообменные аппараты
Центробежное сопло	Закрученный факел	Мелкий, в зависимости от давления и конструкции сопла	Высокая дисперсность распыла	Распылительное охлаждение

Характеристики сопел и распыла

После выбора типа оросительного устройства ключевым вопросом становится оценка характеристик распыла. На практике работа сопла определяется не одним параметром, а сочетанием давления, расхода, геометрии выходного отверстия, свойств жидкости и условий взаимодействия факела с окружающей средой. Экспериментальные исследования показывают, что даже сопла одного назначения могут формировать заметно разные капельные спектры и зоны покрытия при изменении типоразмера или рабочего давления [18].

Одним из наиболее чувствительных параметров является давление перед соплом. При его увеличении возрастает скорость истечения жидкости, что обычно способствует более интенсивному распаду струи или жидкой пленки на капли. Однако повышение давления нельзя считать универсальным способом улучшения распыла. С одной стороны, оно может уменьшать средний размер капель и расширять факел. С другой стороны, при избыточном давлении увеличиваются гидравлические потери, возрастает нагрузка на насосное оборудование и повышается вероятность уноса мелких капель из рабочей зоны. Поэтому давление необходимо рассматривать совместно с типом сопла, свойствами жидкости и назначением системы.

Не менее важна геометрия выходной части сопла. Для веерных, полоконусных и центробежных распылителей форма канала и выходного отверстия определяет угол раскрытия факела, толщину жидкой пленки, распределение жидкости по зоне орошения и устойчивость потока. В работах, посвященных современным конструкциям сопел, показано, что изменение угла установки, формы выходного канала и режима подачи жидкости влияет не только на равномерность распределения, но и на спектр капель [19,20,21]. Это особенно важно для технических систем, где требуется не просто подать заданный расход, а обеспечить устойчивое покрытие поверхности или объема аппарата.

Для описания качества распыла часто используют понятие капельного спектра. Под ним понимают распределение капель по размерам в факеле. Такой показатель важен, потому что реальный распыл почти никогда не состоит из капель одного размера. В одном потоке одновременно присутствуют мелкие, средние и крупные капли. Мелкие капли имеют большую удельную поверхность и могут активнее участвовать в тепло- и массообмене, но они легче уносятся воздушным потоком. Крупные капли, наоборот, лучше сохраняют направление движения и достигают поверхности, однако имеют меньшую площадь контакта на единицу объема жидкости. Поэтому для оросительных устройств важен не минимальный размер капель как таковой, а рациональное распределение капель по размерам.

В литературе встречаются различные подходы к классификации распыла по дисперсности и потенциальному риску сноса. В работах по плоскофакельным соплам и международным системам классификации отмечается, что категория распыла зависит не только от конструкции сопла, но и от давления, расхода, свойств жидкости и условий испытаний [22, 23]. Это означает, что данные разных исследований следует сравнивать осторожно, особенно если они получены при разных режимах работы и методах измерения.

Отдельно следует выделить проблему уноса и удержания капель. Для технических систем распыления это имеет прямое теплофизическое значение. Если часть жидкости не достигает расчетной зоны контакта, фактическая площадь тепломассообмена уменьшается, даже если общий расход жидкости остается достаточным. Исследования процессов удара капель о поверхность, их удержания и сноса показывают, что характеристики распылённого потока зависят от размера и скорости капель, свойств жидкости, состояния поверхности и параметров окружающего воздушного потока [24, 25].

На характеристики распыла влияют и свойства рабочей жидкости. Вязкость, поверхностное натяжение и наличие добавок могут заметно изменить механизм распада струи. Например, для полимерных растворов и других сложных жидкостей каплеобразование может отличаться от распыления воды, поскольку такие жидкости сильнее сопротивляются деформации и могут образовывать более устойчивые жидкие нити [26]. Для оросительных устройств это особенно важно в тех случаях, когда используется не чистая вода, а технологический раствор, антифриз, суспензия или другой теплоноситель.

Для обобщения основных факторов, определяющих характеристики сопел и распыла, в таблице 3 приведены их гидродинамические и практические эффекты.

Таблица 3 – Конструктивные и режимные факторы, влияющие на характеристики распыла

Фактор	Влияние на распыленный поток	Практическое значение	Источники
1	*2*	*3*	*4*
Тип сопла	Определяет форму факела: струйную, веерную, полоконусную, полноконусную или центробежную	Влияет на область применения оросителя и характер распределения жидкости	[18, 22, 23]
Рабочее давление	Увеличивает скорость истечения и может уменьшать средний размер капель	Повышает интенсивность распыла, но увеличивает энергозатраты и риск уноса мелких капель	[18-20]
Геометрия выходного отверстия	Влияет на угол факела, толщину жидкой пленки и равномерность распределения	Позволяет адаптировать сопло под конкретную зону орошения	[19-21]
Размер капель	Определяет площадь межфазного контакта и склонность капель к уносу	Важен для тепло- и массообмена, охлаждения и смачивания поверхности	[22-25]
Скорость капель	Влияет на дальность проникновения факела и контакт с поверхностью	Определяет устойчивость движения капель в газовой среде	[18, 24, 25]
Свойства жидкости	Вязкость и поверхностное натяжение меняют механизм распада струи	Особенно важно для технологических жидкостей, растворов и теплоносителей	[26]

1	2	3	4
Равномерность распределения	Показывает, насколько стабильно жидкость покрывает рабочую зону	Определяет эффективность орошения и теплообмена	[19-21, 24]
Безразмерные критерии (Re, We, Oh)	Определяют режим распада струи и дисперсность распыла	Используются для обобщения результатов и проектирования сопел	[1-5,11]
Расстояние от сопла до поверхности или насадки	Влияет на раскрытие факела, скорость капель и площадь покрытия	Позволяет регулировать плотность орошения и равномерность контакта	[24,25,38]

Как видно из таблицы 3, характеристики распыла формируются не отдельным параметром, а совокупностью конструктивных и режимных факторов. Поэтому оценивать оросительное устройство только по расходу или рекомендуемому давлению недостаточно. Для теплофизических систем важнее понять, какую структуру капельного потока создает сопло и насколько эта структура соответствует условиям конкретного процесса.

Следовательно, анализ источников [18-26] показывает, что оптимизация сопла должна основываться на балансе между дисперсностью распыла, равномерностью покрытия, устойчивостью факела и допустимыми гидравлическими потерями. Этот вывод логично подводит к следующему разделу, где распыленный поток рассматривается уже с позиции теплофизики: через размер и скорость капель, площадь межфазного контакта, теплоотдачу и эффективность распылительного охлаждения.

Безразмерные критерии гидродинамики распыления

Для анализа процессов атомизации жидкости и обобщения результатов, полученных для различных типов сопел, и рабочих жидкостей, широко используются безразмерные критерии гидродинамики. Их применение позволяет учитывать влияние инерционных, вязкостных и капиллярных сил на формирование распылённого потока.

Одним из наиболее распространённых критериев является число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu}, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3;

u – скорость потока, м/с;

d – характерный размер канала или диаметр струи, м;

μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Число Рейнольдса характеризует соотношение инерционных и вязкостных сил в потоке. При увеличении значения Re возрастает интенсивность турбулентности и вероятность разрушения жидкой струи.

Важную роль при анализе процессов распыления играет число Вебера:

$$We = \frac{\rho u^2 d}{\sigma}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3;

u – скорость потока, м/с;

d – характерный размер струи, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м.

Число Вебера отражает соотношение инерционных сил и сил поверхностного натяжения. Увеличение значения We способствует более интенсивному распаду струи и образованию мелкодисперсного распыла.

Для комплексного учёта влияния вязкости и поверхностного натяжения используется число Онезорге:

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}}, \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

d – характерный размер струи или отверстия сопла, м.

Число Онезорге широко применяется для классификации режимов атомизации и оценки влияния физических свойств жидкости на процесс каплеобразования.

Использование критериев Re, We и Oh позволяет рассматривать процессы распыления в обобщённом виде и является важным инструментом при проектировании современных оросительных и распылительных устройств [1-5].

Теплофизические характеристики распылённого потока и распылительное охлаждение

После формирования факела распыла основное значение приобретает не только гидродинамика сопла, но и теплофизическое поведение капельного потока. В этом случае важно учитывать, как капли переносят теплоту, как они взаимодействуют с газовой средой или нагретой поверхностью и какие параметры распыла сильнее всего влияют на интенсивность теплообмена. В обзорной работе J. Kim распылительное охлаждение рассматривается как один из перспективных способов отвода высоких тепловых потоков, однако подчеркивается, что эффективность такого процесса определяется совокупностью факторов, включая расход жидкости, размер капель, скорость факела и условия контакта с поверхностью [27].

В более широком контексте распылительное охлаждение рассматривается вместе с другими методами охлаждения, включая охлаждение за счёт мгновенного испарения (flash evaporation cooling). В обзоре Cheng и соавторов показано, что такие подходы находят применение в тепловом управлении, электронике, энергетических установках и системах, где требуется компактный и интенсивный отвод теплоты [28]. При этом распылительное охлаждение отличается тем, что жидкость подается не сплошным потоком, а в виде капельного факела, что позволяет увеличить площадь контакта и гибко управлять зоной охлаждения.

В зависимости от температуры поверхности и плотности теплового потока при распылительном охлаждении могут реализовываться разные режимы теплообмена. При умеренных температурах преобладает однофазное охлаждение, когда жидкость нагревается без интенсивного кипения. При дальнейшем росте тепловой нагрузки возникает пузырьковое кипение, которое часто сопровождается увеличением коэффициента теплоотдачи. Обобщение этих режимов, включая критический тепловой поток, подробно представлено в первой части обзора Liang и Mudawar [29].

При высоких температурах процесс становится более сложным. Здесь могут возникать переходное и пленочное кипение, а также эффект Лейденфроста, при котором между каплей и перегретой поверхностью образуется паровая прослойка. Эта прослойка ухудшает прямой контакт жидкости с поверхностью и может снижать интенсивность теплоотдачи. Высокотемпературные режимы распылительного охлаждения, включая задачи закалки, рассмотрены во второй части обзора Liang и Mudawar [30].

Для понимания механизмов теплообмена важно учитывать не только средний расход жидкости, но и локальное поведение капель на поверхности. Horacek, Kiger и Kim показали, что при охлаждении одной форсункой теплопередача зависит от распределения жидкости по поверхности, характера смачивания и режима кипения [31]. В работе Rybicki и Mudawar дополнительно рассматривается влияние ориентации распыла, включая охлаждение поверхностей при различном направлении подачи факела [32].

Одним из ключевых параметров является средний диаметр Заутера. Этот показатель характеризует отношение объема капель к их поверхности и поэтому удобен для оценки площади межфазного контакта. В работе Estes и Mudawar предложена корреляция между средним диаметром Заутера и критическим тепловым потоком при распылительном охлаждении малых поверхностей [33]. Это подтверждает, что размер капель имеет не только гидродинамическое, но и прямое теплофизическое значение.

Распылительное охлаждение также рассматривается как один из подходов к управлению высокими тепловыми нагрузками. В работе Mudawar показано, что для таких систем важно учитывать не только максимальный тепловой поток, но и устойчивость режима, конструктивную сложность и возможность практического применения [34]. Современные

обзоры также подтверждают интерес к распылительному охлаждению как к эффективному методу терморегулирования, особенно для компактных систем с высокой плотностью тепловыделения [35].

Отдельное направление связано с ударом множества капель о поверхность. В таких условиях теплообмен определяется не только отдельным контактом капли со стенкой, но и взаимодействием соседних капель, образованием жидкой пленки, разбрызгиванием и повторным смачиванием поверхности. Эти вопросы рассматриваются в обзоре Benther и соавторов, где также отмечается перспективность использования модифицированных и улучшенных поверхностей [36]. Работа Serdyukov и соавторов дополняет этот подход, поскольку в ней одновременно анализируются удар капель и теплообмен при распылительном охлаждении [37].

Важным конструктивным фактором является положение сопла относительно охлаждаемой поверхности. Если сопло расположено слишком близко, факел может не успеть раскрыться, и жидкость будет распределяться неравномерно. При слишком большом расстоянии часть мелких капель может потерять скорость или быть унесена газовым потоком. Влияние положения сопла на однофазное распылительное охлаждение показано в работе Gao и Li [38].

Состояние поверхности также влияет на эффективность охлаждения. Гладкие и микроструктурированные поверхности по-разному взаимодействуют с каплями: меняются смачивание, площадь контакта, условия кипения и распределение жидкости. Экспериментальные данные по распылительному охлаждению гладких и микроструктурированных поверхностей представлены в работе Zhang, Kim и соавторов [39]. Кроме того, характеристики атомизации самого pressure-swirl сопла могут быть связаны с тепловой эффективностью системы, что показано в исследовании Xie и соавторов [40].

Для обобщения основных теплофизических факторов, влияющих на распылительное охлаждение, в таблице 4 представлены ключевые параметры распыленного потока.

Таблица 4 – Теплофизические параметры распыленного потока и их влияние на охлаждение

Параметр	Теплофизическое значение	Влияние на процесс охлаждения	Источники
Расход жидкости	Определяет количество охлаждающей среды, поступающей в зону теплообмена	Может повышать интенсивность охлаждения, но не гарантирует равномерного распределения	[27, 28]
Средний размер капель	Влияет на площадь межфазного контакта и скорость нагрева капель	Мелкие капли увеличивают поверхность контакта, но легче уносятся потоком	[29, 33]
Режим кипения	Определяет механизм отвода теплоты от поверхности	Пузырьковое кипение может повышать интенсивность теплоотдачи, тогда как переход к плёночному кипению и эффекту Лейденфроста снижает устойчивость теплоотвода.	[29, 30]
Критический тепловой поток	Показывает предельный режим эффективного охлаждения	При его превышении возможна потеря устойчивого теплоотвода	[29, 33, 34]
Удар капель о поверхность	Определяет смачивание, растекание и формирование жидкой пленки	Влияет на локальный теплообмен и равномерность охлаждения	[36, 37]
Расстояние от сопла до поверхности	Влияет на раскрытие факела и плотность орошения	Позволяет регулировать площадь покрытия и скорость капель	[38]
Состояние поверхности	Определяет смачивание и режимы кипения	Микроструктуры могут повышать теплоотдачу, но требуют учета условий эксплуатации	[39]
Тип распылителя	Формирует размер капель, угол факела и скорость потока	Связывает характеристики атомизации с тепловой эффективностью	[40]

Как видно из таблицы 4, распылительное охлаждение нельзя описывать только через расход жидкости. Один и тот же расход может давать различный тепловой эффект при изменении размера капель, положения сопла, режима кипения или состояния поверхности. Поэтому для анализа оросительных устройств необходим переход от простого гидравлического описания к комплексной теплофизической оценке.

Градирни и испарительные системы

Если в распылительном охлаждении основное внимание уделяется контакту капель с нагретой поверхностью, то в градирнях и испарительных охладителях главным становится взаимодействие воды с воздушным потоком. Здесь оросительное устройство должно не просто распылить воду, а распределить ее так, чтобы максимально эффективно использовать объем аппарата и поверхность насадки.

В работе Vitkovic показано, что водораспределительная характеристика сопел является важным параметром при выборе форсунок для градирен. Неравномерное распределение воды приводит к тому, что часть насадки переувлажняется, а часть остается недостаточно смоченной. В результате уменьшается фактическая площадь контакта воды с воздухом и снижается эффективность тепло- и массообмена [41].

Обзор Somasundar и соавторов посвящен типам сопел, применяемых в градирнях. В нем отмечается, что конструкция форсунки влияет на форму зоны орошения, размер капель и распределение воды по рабочему объему аппарата [42]. Поэтому выбор сопла для градирни должен учитывать не только расход воды, но и характер ее распределения.

Практическая оценка и прогнозирование работы сопел градирен подробно рассмотрены в работе Viljoen [43]. Такой подход важен для инженерного анализа, поскольку фактическая работа оросительного устройства может отличаться от расчетной из-за особенностей конструкции, давления, высоты установки и условий эксплуатации.

Для расчета эффективности градирен применяются различные модели, включая методы Merkel, Poppe и e-NTU. Kloppers и Kröger показали, что выбор расчетного метода влияет на оценку тепловой эффективности градирни, особенно при учете реальных условий тепло- и массообмена между водой и воздухом [44]. При этом корректность расчета во многом зависит от того, насколько точно заданы водораспределение, расход воздуха и состояние насадки.

Дополнительным эксплуатационным фактором является загрязнение насадки. Qureshi и Zubair рассмотрели модель мокрой градирни с учетом загрязнения заполнителя, показав, что отложения могут снижать эффективность тепло- и массообмена и изменять рабочие характеристики аппарата [45]. Следовательно, при анализе оросительных устройств важно учитывать не только начальные параметры сопла, но и устойчивость системы при длительной эксплуатации. Факторы эффективности оросительных устройств в градирнях и испарительных системах представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Факторы эффективности оросительных устройств в градирнях и испарительных системах

Фактор	Влияние на работу системы	Теплофизическое значение	Источники
Равномерность распределения воды	Определяет полноту смачивания насадки	Влияет на фактическую площадь тепло- и массообмена	[41]
Тип сопла градирни	Формирует зону орошения и размер капель	Определяет характер контакта воды с воздухом	[42, 43]
Расход воды	Задает количество жидкости, участвующей в охлаждении	Влияет на тепловую нагрузку и режим испарения	[44]
Расчетная модель градирни	Позволяет оценивать эффективность тепло- и массообмена	Методы Merkel, Poppe и e-NTU дают разные уровни детализации	[44]
Загрязнение насадки	Ухудшает распределение воды и движение воздуха	Снижает эффективность тепло- и массообмена	[45]
Высота установки сопла	Определяет раскрытие факела и площадь зоны орошения	Влияет на равномерность смачивания насадки и контакт воды с воздухом	[41,42,43]

Следовательно, для градирен основное значение имеет не только сам факт распыления, но и пространственное распределение воды в аппарате. Даже при достаточном расходе неравномерное орошение может снижать эффективность системы. Поэтому оросительное устройство в градирне следует рассматривать как элемент, который формирует режим работы всей зоны тепло- и массообмена.

CFD и моделирование распылительных устройств

Экспериментальные методы исследования распыления жидкостей позволяют получать данные о расходе жидкости, угле раскрытия факела распыла, размерах капель и их распределении в потоке, что необходимо для оценки эффективности и качества процесса распыления. Однако они не всегда дают полное представление о том, что происходит внутри сопла. Между тем именно внутреннее течение во многом определяет структуру будущего факела. Поэтому в последние годы значительное внимание уделяется численному моделированию, в том числе методам вычислительной гидродинамики.

В обзоре Schmidt и Corradini, посвященном внутреннему течению в форсунках, показано, что процессы внутри сопла могут существенно влиять на характеристики распыла. Хотя работа ориентирована на дизельные форсунки, рассмотренные в ней вопросы внутреннего течения, турбулентности, кавитации и структуры потока имеют значение и для более широкого анализа распылительных устройств [46].

Fu выполнил численное моделирование внутреннего течения swirl atomizer при атмосферном давлении. Такие исследования важны потому, что центробежные распылители формируют факел за счет закрученного движения жидкости, а значит, распределение давления и скорости внутри сопла напрямую связано с расходом, устойчивостью факела и формированием жидкой пленки [47].

В работе Malý и соавторов сравниваются двумерные и трехмерные подходы к моделированию внутреннего течения центробежной форсунки с закруткой потока. Упрощенные модели могут быть полезны на предварительном этапе, однако трехмерное моделирование лучше отражает сложную структуру течения, особенно при наличии закручивания и несимметричных каналов [48].

Дальнейшее развитие этого направления связано с поиском численных моделей, способных прогнозировать рабочие характеристики центробежной форсунки с закруткой потока. В работе Malý и соавторов рассматриваются подходы к расчету параметров распылителя и подчеркивается необходимость валидации моделей по экспериментальным данным [49]. Это важно, поскольку численная модель без проверки может не отражать реальную работу устройства. Ronceros и соавторы предложили теоретическую формулировку и численное моделирование центробежных форсунок с закруткой потока со спиральными каналами. Такие конструкции позволяют управлять закручиванием потока, но требуют учета сложной геометрии, турбулентности и особенностей формирования факела [50].

Возможности вычислительной гидродинамики (CFD) позволяют анализировать различные характеристики распылительных устройств, включая структуру потока, распределение скоростей и процесс диспергирования жидкости. Основные возможности CFD-моделирования представлены в таблице 6.

Как видно из таблицы 6, CFD-моделирование позволяет не только прогнозировать характеристики факела, но и анализировать причины их формирования внутри сопла. Однако результаты численного моделирования требуют экспериментальной проверки, поскольку реальные параметры распыла зависят от свойств жидкости, шероховатости каналов, точности изготовления сопла и условий измерения.

Анализ работ [46-50] показывает, что CFD-моделирование позволяет исследовать процессы, которые трудно или невозможно наблюдать экспериментально, включая распределение давления и скорости внутри сопла, развитие турбулентности, кавитационные явления и формирование жидкой пленки. При этом наибольшую точность обеспечивают трехмерные модели, учитывающие реальную геометрию сопла и закручивание потока. Однако повышение точности сопровождается увеличением вычислительных затрат, поэтому выбор расчетного подхода должен определяться целями исследования и необходимой степенью детализации.

Таблица 6 – Направления применения CFD-моделирования при анализе распылительных устройств

Направление моделирования	Что позволяет оценить	Практическое значение	Источники
Внутреннее течение в сопле	Поля давления, скорости, турбулентности и кавитации	Позволяет понять причины изменения расхода и формы факела	[46]
Моделирование swirl atomizer	Закручивание потока, формирование жидкой пленки, устойчивость факела	Используется при проектировании центробежных распылителей	[47]
2D и 3D модели	Различие между упрощенным и детальным описанием течения	Помогает выбрать уровень сложности расчетной модели	[48]
Прогноз характеристик распыла	Коэффициент расхода, угол факела, параметры пленки	Позволяет сократить объем экспериментальных испытаний	[49]
Модели сопел со спиральными каналами	Влияние геометрии каналов на закручивание потока	Полезно для оптимизации новых конструкций распылителей	[50]

Для обобщения рассмотренного массива литературы использованные источники были распределены по основным тематическим направлениям. Такое представление позволяет показать, какие группы исследований составили основу обзора: теория атомизации и распыления, характеристики сопел и факела, распылительное охлаждение и теплообмен, градирни и водораспределение, методы диагностики, а также CFD-моделирование. Тематическая структура использованных источников представлена на рисунке 2.

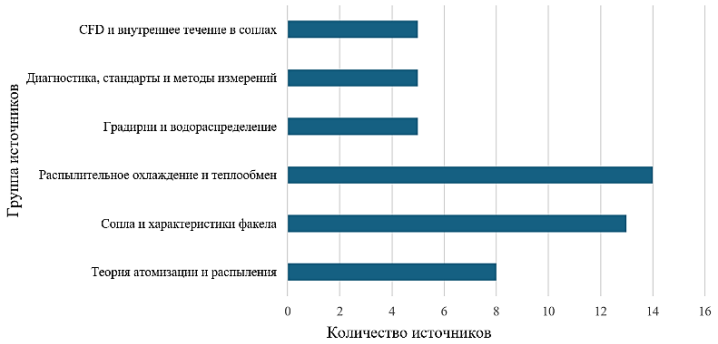


Рисунок 2 – Тематическая структура использованных литературных источников [1-50]

Как видно из рисунка 2, наибольшая часть источников относится к распылительному охлаждению и теплообмену, а также к исследованиям сопел и характеристик факела. Это объясняется тем, что именно эти направления наиболее полно отражают связь между гидродинамикой распыления и теплофизической эффективностью оросительных устройств. Источники по градирням, методам диагностики и CFD-моделированию дополняют обзор и позволяют рассмотреть проблему не только с экспериментальной, но и с расчетно-прикладной стороны.

Обсуждение результатов

Проведённый обзор показывает, что эффективность оросительных и распылительных устройств не может быть оценена только по расходу жидкости или рабочему давлению. Эти параметры являются важными, однако они отражают лишь гидравлическую сторону работы устройства. Для теплофизических систем более существенное значение имеет структура распылённого потока, формируемая соплом: форма факела, размер и скорость капель, равномерность распределения жидкости, плотность орошения и устойчивость взаимодействия капель с газовой средой, насадкой или теплообменной поверхностью.

Анализ фундаментальных работ по атомизации жидкости показывает, что распад струи или жидкой плёнки определяется совместным действием инерционных, вязкостных,

капиллярных и аэродинамических сил [1-6]. Поэтому одинаковое значение расхода или давления не гарантирует одинакового качества распыла. В зависимости от конструкции сопла один и тот же режим подачи жидкости может приводить к формированию компактной струи, веерного факела, полого или заполненного конуса, а также мелкодисперсного капельного потока. Это подтверждает необходимость рассматривать оросительное устройство не как простой элемент подачи жидкости, а как активный элемент формирования условий тепло- и массообмена.

Особенно важным является влияние рабочего давления. С одной стороны, увеличение давления обычно повышает скорость истечения жидкости, способствует более интенсивному распаду струи и может уменьшать средний размер капель. С другой стороны, чрезмерное повышение давления сопровождается ростом гидравлических потерь, увеличением энергозатрат и повышением вероятности уноса мелкодисперсных капель из рабочей зоны. Следовательно, повышение давления не может рассматриваться как универсальный способ повышения эффективности оросительного устройства. Более обоснованным является выбор такого режима работы, при котором обеспечивается рациональное сочетание дисперсности распыла, устойчивости факела и допустимых эксплуатационных затрат.

Сравнение различных типов сопел показывает, что каждая конструкция имеет собственную область рационального применения. Струйные сопла обеспечивают направленную подачу жидкости и большую дальность действия, однако создают ограниченную площадь межфазного контакта. Веерные и конусные сопла лучше подходят для равномерного распределения жидкости по поверхности или объёму аппарата. Центробежные и пневматические распылители позволяют формировать более развитый капельный поток, но их работа сильнее зависит от давления, свойств жидкости и состояния внутренних каналов. Поэтому выбор типа сопла должен определяться не только требуемым расходом, но и конкретной теплофизической задачей: охлаждением поверхности, испарительным охлаждением, газоочисткой, увлажнением или орошением насадки.

Капельный спектр является одним из ключевых параметров, связывающих гидродинамику распыла с теплофизической эффективностью. Мелкие капли имеют большую суммарную площадь поверхности и могут способствовать интенсификации испарения, теплоотдачи и массообмена. Однако они обладают меньшей инерцией, быстрее теряют скорость и легче уносятся воздушным потоком. Крупные капли, напротив, устойчивее достигают поверхности или зоны контакта, но имеют меньшую удельную площадь межфазного взаимодействия. Поэтому оптимизация распыла должна быть направлена не на получение минимального размера капель, а на формирование рационального капельного спектра, соответствующего условиям конкретного технического процесса.

В системах распылительного охлаждения связь между параметрами распыла и теплообменом проявляется особенно отчётливо. Эффективность охлаждения определяется не только расходом жидкости, но и средним диаметром капель, их скоростью, плотностью орошения, расстоянием от сопла до поверхности, состоянием поверхности и режимом кипения [27-40]. При умеренных тепловых нагрузках возможно однофазное охлаждение или пузырьковое кипение, при котором коэффициент теплоотдачи может возрастать. При более высоких температурах возникают переходное и плёночное кипение, а также эффект Лейденфроста, ухудшающий прямой контакт жидкости с поверхностью. Это показывает, что гидродинамическая структура факела непосредственно влияет на устойчивость и интенсивность теплообмена.

Для градирен и испарительных охладителей главным фактором становится равномерность распределения воды по рабочему объёму аппарата и поверхности насадки. Даже при достаточном общем расходе неравномерное орошение приводит к тому, что часть насадки переувлажняется, а другая часть используется неполностью. В результате уменьшается фактическая площадь контакта воды с воздухом и снижается эффективность тепло- и массообмена [41-45]. Следовательно, для таких систем качество работы оросительного устройства определяется не только расходной характеристикой, но и пространственным распределением жидкости.

Отдельное значение имеет эксплуатационная устойчивость оросительных устройств. В реальных условиях параметры распыла могут изменяться из-за загрязнения жидкости, износа выходных отверстий, образования отложений, изменения давления и свойств рабочей

среды. Это особенно важно для градирен, испарительных аппаратов и промышленных систем, работающих длительное время. Поэтому при выборе и оптимизации сопел необходимо учитывать не только начальные характеристики распыла, но и сохранение равномерности орошения, формы факела и расходных характеристик в процессе эксплуатации.

CFD-моделирование является перспективным инструментом анализа оросительных и распылительных устройств, поскольку позволяет изучать процессы, которые трудно наблюдать экспериментально: распределение давления и скорости внутри сопла, закручивание потока, кавитацию, турбулентность и формирование жидкой плёнки [46-50]. Вместе с тем численное моделирование не может полностью заменить экспериментальные исследования. Реальные характеристики факела зависят от шероховатости каналов, свойств жидкости, точности изготовления сопла и условий измерения. Поэтому наиболее надёжным подходом является сочетание CFD-анализа с экспериментальной проверкой полученных результатов.

Проведённый анализ показывает, что оптимизация оросительных устройств должна иметь комплексный характер. Недостаточно выбирать сопло только по расходу, давлению или типоразмеру. Необходимо одновременно учитывать гидродинамические параметры распыла, теплофизические условия процесса и эксплуатационные ограничения. Такой подход позволяет перейти от простого подбора оросительного устройства к обоснованному проектированию распылительных систем для градирен, испарительных охладителей, установок распылительного охлаждения, аппаратов газоочистки и других технических систем.

Заключение

Проведённый обзор показал, что оросительные и распылительные устройства в технических системах нельзя рассматривать только как элементы подачи жидкости. Их основная роль заключается в формировании структуры межфазного контакта, от которой зависят интенсивность тепло- и массообмена, равномерность орошения, устойчивость факела и эффективность работы всего аппарата.

Установлено, что характеристики распылённого потока определяются совокупным влиянием конструктивных, гидродинамических и теплофизических факторов. К наиболее значимым параметрам относятся тип сопла, рабочее давление, расход жидкости, геометрия проточной части, размер и скорость капель, угол раскрытия факела, плотность орошения, свойства рабочей среды и условия взаимодействия капель с газовым потоком, насадкой или теплообменной поверхностью.

Анализ работ по атомизации жидкости показывает, что повышение давления может способствовать более интенсивному распаду струи и уменьшению среднего размера капель. Однако данный способ повышения дисперсности имеет ограничения, поскольку сопровождается увеличением гидравлических потерь, энергозатрат и риска уноса мелкодисперсных капель из рабочей зоны. Поэтому оптимизация оросительного устройства должна быть направлена не на максимизацию давления, а на выбор рационального режима, обеспечивающего требуемую структуру распыла при допустимых эксплуатационных затратах.

Особое значение имеет капельный спектр. Мелкие капли увеличивают суммарную площадь межфазного контакта и могут способствовать интенсификации испарения, теплоотдачи и массообмена. В то же время они быстрее теряют скорость и легче уносятся воздушным потоком. Крупные капли устойчивее достигают поверхности или зоны контакта, но обладают меньшей удельной площадью взаимодействия. Следовательно, для технических систем важен не минимальный размер капель как самоцель, а рациональное распределение капель по размерам с учётом конкретной инженерной задачи.

Для систем распылительного охлаждения показано, что эффективность теплоотвода определяется не только расходом жидкости, но и средним диаметром капель, скоростью факела, плотностью орошения, расстоянием от сопла до поверхности, состоянием поверхности и режимом теплообмена. При высоких тепловых нагрузках дополнительно необходимо учитывать критический тепловой поток, переходное и плёночное кипение, а также эффект Лейденфроста. Это подтверждает прямую связь между гидродинамической структурой факела и теплофизической устойчивостью процесса охлаждения.

Для градирен и испарительных систем ключевым фактором является равномерность водораспределения. Даже при достаточном общем расходе жидкости неравномерное орошение снижает фактическую площадь контакта воды с воздухом или насадкой, что приводит к ухудшению тепло- и массообмена. Поэтому при выборе оросительных устройств для таких аппаратов необходимо учитывать не только расходную характеристику сопла, но и форму зоны орошения, устойчивость факела, высоту установки, состояние насадки и возможное изменение характеристик в процессе эксплуатации.

CFD-моделирование является важным инструментом анализа и оптимизации распылительных устройств. Оно позволяет исследовать внутреннее течение в соплах, распределение давления и скорости, закручивание потока, турбулентность, кавитационные явления и формирование жидкой плёнки. Вместе с тем расчётные модели должны обязательно проверяться экспериментальными данными, поскольку реальные параметры распыла зависят от свойств жидкости, шероховатости каналов, точности изготовления сопла и условий измерения.

В результате обзора сформирована интегрированная схема анализа оросительных устройств, объединяющая конструктивный, гидродинамический, дисперсный и теплофизический уровни. В отличие от подходов, в которых атомизация, распылительное охлаждение, водораспределение и CFD-моделирование рассматриваются преимущественно раздельно, предложенная систематизация показывает их последовательную взаимосвязь в цепочке «параметры сопла - структура распылённого потока - условия межфазного взаимодействия - теплофизическая эффективность». Именно данная взаимосвязь определяет авторскую позицию и научную новизну выполненного обзорного исследования.

Именно поэтому, дальнейшая оптимизация оросительных устройств должна основываться на комплексном подходе, объединяющем гидродинамические, теплофизические и эксплуатационные параметры. Такой подход позволяет перейти от простого выбора сопла по расходу и давлению к обоснованному проектированию распылительных систем для градирен, испарительных охладителей, аппаратов газоочистки, установок распылительного охлаждения и других технических систем.

Перспективы дальнейших исследований

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых атомизации жидкости, характеристикам сопел, распылительному охлаждению, градирням и CFD-моделированию, ряд вопросов остаётся недостаточно изученным. В первую очередь это касается установления прямой связи между внутренней гидродинамикой сопла, структурой формируемого факела и конечной теплофизической эффективностью технической системы. Во многих работах подробно рассматриваются либо параметры распылённого потока, либо процессы теплообмена, однако эти явления не всегда анализируются как единая взаимосвязанная система.

Одним из перспективных направлений является разработка комплексного критерия эффективности оросительного устройства. Такой критерий должен учитывать не только расход жидкости и давление перед соплом, но и средний размер капель, скорость факела, равномерность распределения жидкости, плотность орошения, площадь межфазного контакта, гидравлические потери и интенсивность тепло- и массообмена. Это позволило бы сравнивать различные типы сопел не по отдельным характеристикам, а по их реальному влиянию на работу конкретного аппарата.

Отдельного внимания заслуживает исследование оросительных устройств в условиях длительной эксплуатации. В реальных технических системах характеристики распыла могут изменяться вследствие загрязнения жидкости, износа выходных отверстий, образования отложений, изменения шероховатости внутренних каналов, колебаний давления и изменения свойств рабочей среды. Поэтому дальнейшие исследования должны учитывать не только начальные параметры сопла, но и стабильность формы факела, расходной характеристики и равномерности орошения в процессе продолжительной работы.

Перспективным направлением является совместное применение экспериментальных методов и CFD-моделирования. Эксперимент позволяет получать фактические данные о расходе жидкости, угле раскрытия факела, размере и скорости капель, а также распределении жидкости в рабочей зоне. CFD-моделирование, в свою очередь, даёт возможность анализировать внутреннее течение в сопле, распределение давления и

скорости, закручивание потока, турбулентность, кавитационные явления и формирование жидкой плёнки. Наиболее надёжные результаты могут быть получены при сочетании этих подходов и обязательной валидации расчётных моделей по экспериментальным данным.

Важным направлением дальнейших исследований является изучение распыления не только воды, но и других рабочих жидкостей: растворов, антифризов, суспензий, технологических жидкостей и специальных теплоносителей. Изменение вязкости, плотности, поверхностного натяжения и теплофизических свойств жидкости может существенно влиять на механизм распада струи, размер капель, угол факела, гидравлическое сопротивление и интенсивность тепло- и массообмена. Это особенно актуально для энергетических, холодильных, климатических и промышленных установок, работающих в широком диапазоне температур и режимов.

Также перспективным является исследование влияния схемы размещения сопел в аппарате. Для градирен, испарительных охладителей и аппаратов газоочистки важно учитывать не только характеристики отдельного распылителя, но и взаимодействие нескольких факелов, перекрытие зон орошения, высоту установки сопел, влияние воздушного потока и равномерность распределения жидкости по объёму аппарата или поверхности насадки. Такой подход позволит более точно оценивать эффективность всей системы, а не только отдельного оросительного элемента.

Для систем распылительного охлаждения дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение связи между капельным спектром, состоянием охлаждаемой поверхности и режимами теплообмена. Особый интерес представляют процессы перехода от однофазного охлаждения к пузырьковому, переходному и плёночному кипению, а также условия возникновения эффекта Лейденфроста. Более глубокое понимание этих процессов позволит повысить устойчивость теплоотвода при высоких тепловых нагрузках.

Таким образом, дальнейшее развитие исследований в области оросительных и распылительных устройств должно быть направлено на переход от анализа отдельных параметров распыла к комплексной оценке их влияния на работу теплофизической системы. Такой подход позволит более обоснованно выбирать тип сопла, режим давления, схему размещения оросителей и условия эксплуатации для градирен, испарительных охладителей, аппаратов газоочистки, установок распылительного охлаждения и других технических систем.

Список литературы

1. Lefebvre A.H. Atomization and Sprays / A.H. Lefebvre, V.G. McDonell. – 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. https://www.routledge.com/Atomization-and-Sprays/Lefebvre-McDonell/p/book/9781498736251.
2. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications / N. Ashgriz et al. – New York: Springer, 2011. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4.
3. Nasr G.G. Industrial Sprays and Atomization: Design, Analysis and Applications / G.G. Nasr, A.J. Yule, L. Bendig. London: Springer, 2002. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3816-7.
4. Bayvel L. Liquid Atomization / L. Bayvel, Z. Orzechowski/ Washington: Taylor & Francis, 1993. https://www.routledge.com/Liquid-Atomization/Bayvel/p/book/9780891169598.
5. Sirignano W.A. Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays / W.A. Sirignano. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. https://www.cambridge.org/.
6. Multiphase Flows with Droplets and Particles / C.T. Crowe et al. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. https://www.routledge.com/Multiphase-Flows-with-Droplets-and-Particles/Crowe-Schwarzkopf-Sommerfeld-Tsuji/p/book/9781439840504.
7. Yarin A.L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing / A.L. Yarin // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2006. – Vol. 38. – P. 159-192. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092144.
8. Rein M. Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces / M. Rein // Fluid Dynamics Research. – 1993. – Vol. 12, № 2. – P. 61-93. https://doi.org/10.1016/0169-5983(93)90106-K.
9. Experimental investigations of spray characteristics of a pressure-swirl atomizer / X. Fan et al // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. – 2020. – Vol. 234, № 5. https://doi.org/10.1177/0957650919875612.

10. Experimental investigation of flat fan nozzle V-cut depths and its impact on spray characteristics / W. Mughal et al // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 22959. https://doi.org/10.1038/s41598-025-05319-z.
11. Mondal D. Droplet size and velocity distributions in a spray from a pressure swirl atomizer: application of maximum entropy formalism / D. Mondal, A. Datta, A. Sarkar // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2004. – Vol. 218, № 7. – P. 737-749. https://doi.org/10.1243/0954406041319563.
12. Droplet spectrum of standard flat fan and hollow cone spray nozzles / J.P.A.R. Cunha et al // Pesquisa Agropecuária Brasileira. – 2004. – Vol. 39, № 10. – P. 977-985. https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/6865.
13. ISO 5682-1:2017. Equipment for crop protection – Spraying equipment – Part 1: Test methods for sprayer nozzles. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. https://www.iso.org/standard/60053.html.
14. ISO 25358:2018. Crop protection equipment – Droplet-size spectra from atomizers – Measurement and classification. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. https://www.iso.org/.
15. ANSI/ASABE S572.3. Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2020. URL: https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?AID=51101.
16. Miller P.C.H. Evaluation of a spray nozzle patternator / P.C.H. Miller // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1986. – № 1. – P. 43-52. https://doi.org/10.1016/0261-2194(86)90032-3.
17. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques / H.-E. Albrecht et al. Berlin: Springer, 2003. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05165-8.
18. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics / D. Nuyttens et al // Biosystems Engineering. – 2007. – Vol. 97, № 3. – P. 333-345. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001.
19. Reducing ground and airborne drift losses in young apple orchards with PWM-controlled spray systems / R. Salcedo et al // Computers and Electronics in Agriculture. – 2021. – Vol. 184. – Article 106389. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106389.
20. Characterization of activation pressure, flow rate and spray angle for PWM-controlled hollow-cone nozzles / R. Salcedo et al // Biosystems Engineering. – 2022. – Vol. 218. – P. 139-152. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.002.
21. Effect of angled spray nozzle designs on spray distribution and droplet spectrum / M.M. Negrisoli et al // Revista Ciência Agronômica. – 2021. – Vol. 52, № 3. https://www.scielo.br/j/rca/a/3YNNjbRVPPQmDk8dPyHTD3f/.
22. Czaczyk Z. Spray classification for selected flat fan nozzles / Z. Czaczyk // Journal of Plant Protection Research. – 2012. – Vol. 52, № 1. https://www.plantprotection.pl/Spray-classification-for-selected-flat-fan-nozzles,91811,0,2.html.
23. The international (BCPC) spray classification system including a drift potential factor / E.S.E. Southcombe et al // Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference – Weeds. – 1997. – P. 371-380.
24. Spillman J.J. Spray impaction, retention and adhesion: an introduction to basic characteristics / J.J. Spillman // Pesticide Science. – 1984. – Vol. 15, № 2. – P. 97-106. https://doi.org/10.1002/ps.2780150202.
25. Hewitt A.J. Spray drift: impact of requirements to protect the environment / A.J. Hewitt // Crop Protection. – 2000. – Vol. 19, № 8-10. – P. 623-627. https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00082-X.
26. Gaillard A. What determines the drop size in sprays of polymer solutions? / A. Gaillard, R. Sijs, D. Bonn // arXiv. 2021. https://arxiv.org/abs/2108.11163.
27. Kim J. Spray cooling heat transfer: the state of the art / J. Kim // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2007. – Vol. 28, № 4. – P. 753-767. https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.09.003.
28. Spray cooling and flash evaporation cooling: the current development and application / W.-L. Cheng et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 55. – P. 614-628. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.014.

29. Liang G. Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux / G. Liang, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 1174-1205. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.029.
30. Liang G. Review of spray cooling - Part 2: High temperature boiling regimes and quenching applications / G. Liang, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 1206-1222. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.030.
31. Horacek B. Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms / B. Horacek, K.T. Kiger, J. Kim // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 48, № 8. – P. 1425-1438. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.026.
32. Rybicki J.R. Single-phase and two-phase cooling characteristics of upward-facing and downward-facing sprays / J.R. Rybicki, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. – Vol. 49, № 1-2. P. 5-16. https://engineering.purdue.edu/mudawar/files/articles-all/2006/2006-01.pdf.
33. Estes K.A. Correlation of Sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces / K.A. Estes, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1995. – Vol. 38, № 16. – P. 2985-2996. https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00047-C.
34. Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes / I. Mudawar // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2001. – Vol. 24, № 2. – P. 122-141. https://doi.org/10.1109/6144.926375.
35. Spray cooling as a high-efficient thermal management solution: a review / J. Yin et al // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 22. – Article 8547. https://doi.org/10.3390/en15228547.
36. Heat transfer during multiple droplet impingement and spray cooling: review and prospects for enhanced surfaces / J.D. Benther et al // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 178. – Article 121587. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121587.
37. The simultaneous analysis of droplets' impacts and heat transfer during spray cooling / V. Serdyukov et al // Water. – 2021. – Vol. 13, № 19. – Article 2730. https://doi.org/10.3390/w13192730.
38. Gao X. Effects of nozzle positioning on single-phase spray cooling / X. Gao, R. Li // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 1247-1257. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.095.
39. Experimental investigation of spray cooling on smooth and micro-structured surfaces / Z. Zhang et al // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 78. – P. 879-887. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931014003159.
40. Characterization of spray atomization and heat transfer performance of pressure swirl nozzles / J.L. Xie et al // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2013. – Vol. 46. – P. 18-26. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072912003456.
41. Vitkovic P. Water distribution characteristics of spray nozzles in a cooling tower / P. Vitkovic // EPJ Web of Conferences. – 2015. – Vol. 92. – Article 02109. https://doi.org/10.1051/epjconf/20159202109.
42. Review on cooling tower nozzle types / K.G. Somasundar et al // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 37. – P. 3016-3018. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.723.
43. Viljoen D.J. Evaluation and performance prediction of cooling tower spray nozzles. Master's thesis. Stellenbosch University, 2006. URL: https://scholar.sun.ac.za/.
44. Kloppers J.C. Cooling tower performance evaluation: Merkel, Poppe, and e-NTU methods of analysis / J.C. Kloppers, D.G. Kröger // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2005. – Vol. 127, № 1. – P. 1-7. https://doi.org/10.1115/1.1787504.
45. Qureshi B.A. A complete model of wet cooling towers with fouling in fills / B.A. Qureshi, S.M. Zubair // Applied Thermal Engineering. – 2006. – Vol. 26, № 16. – P. 1982-1989. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.01.010.
46. Schmidt D.P. The internal flow of diesel fuel injector nozzles: a review / D.P. Schmidt, M.L. Corradini // International Journal of Engine Research. – 2001. – Vol. 2, № 6. – P. 1-22. https://doi.org/10.1243/1468087011545316.
47. Fu Q. Numerical simulation of the internal flow of swirl atomizer under ambient pressure / Q. Fu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2016. – Vol. 230, № 10. – P. 1760-1770. https://doi.org/10.1177/0954406215598803.

48. 2D and 3D numerical modelling of internal flow of pressure-swirl atomizer / M. Malý et al // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Vol. 213. – Article 02055. https://doi.org/10.1051/epjconf/201921302055.
49. Searching for a numerical model for prediction of pressure-swirl atomizer performance / M. Malý et al // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 13. – Article 6357. https://doi.org/10.3390/app12136357.
50. Comprehensive theoretical formulation and numerical simulation of pressure-swirl atomizers with helical channels / J. Ronceros et al // Energies. – 2024. – Vol. 17, № 21. – Article 5414. https://doi.org/10.3390/en17215414.

А.А. Ахметов*, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова
Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20А
*e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru

ТЕХНИКАЛЫҚ БҮРКУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ СУАРУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУДЫҢ ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ АСПЕКТІЛЕРІ – ШОЛУ

Мақалада техникалық жүйелердегі суару және бүрку құрылғыларының жұмыс істеуінің гидродинамикалық және жылуфизикалық аспектілеріне арналған заманауи зерттеулерге шолу ұсынылған. Жұмыстың мақсаты суару құрылғыларының конструкциялық, гидродинамикалық және жылуфизикалық параметрлерінің бүрку сипаттамалары мен жылу- және массаалмасу тиімділігіне әсері туралы заманауи ғылыми көзқарастарды жүйелеу болып табылады. Бүркілген ағынның қалыптасуын анықтайтын негізгі факторлар, соның ішінде жұмыс қысымы, сұйықтық шығыны, саптама геометриясы, бүріккіш түрі, тамшылардың өлшемі мен жылдамдығы, бүрку алауының ашылу бұрышы, сұйықтықтың таралу біркелкілігі және жұмыс ортасының қасиеттері қарастырылған. Суару құрылғыларының тиімділігі тек шығын мен қысыммен ғана емес, сонымен қатар тамшылы ағын құрылымымен және оның газдық ортамен, толтырмамен немесе жылуалмасу бетімен өзара әрекеттесу жағдайларымен анықталатыны көрсетілген. Тамшылы спектр, суару тығыздығы, саптаманың орналасуы, беттің күйі және жылуалмасу режимі шешуші рөл атқаратын бүрку арқылы салқындату мәселелеріне ерекше назар аударылған. Градирнялар мен буландырғыш жүйелер үшін жылу- және массаалмасу тиімділігін анықтайтын негізгі факторлардың бірі ретінде судың біркелкі таралуының маңызы көрсетілген. Сонымен қатар саптамалардағы ішкі ағынды және бүрку алауының қалыптасуын зерттеуге арналған CFD-модельдеу мүмкіндіктері қарастырылған. Суару құрылғыларын жобалау және оңтайландыру кезінде гидродинамикалық, жылуфизикалық және пайдалану параметрлерін кешенді түрде ескеру қажеттілігі туралы қорытынды жасалған.

Түйін сөздер*: *суару құрылғылары; сұйықтықтың атомизациясы; жылу- және массаалмасу; бүрку арқылы салқындату; CFD-модельдеу.

A.A. Akhmetov*, M.V. Yermolenko, O.A. Stepanova
Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
*e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru

HYDRODYNAMIC AND THERMOPHYSICAL ASPECTS OF SPRAYING DEVICE OPTIMIZATION IN TECHNICAL SPRAY SYSTEMS: A REVIEW

This paper presents a review of recent studies devoted to the hydrodynamic and thermophysical aspects of irrigation and spraying devices operating in technical systems. The aim of the study is to systematize current knowledge on the influence of design, hydrodynamic, and thermophysical parameters of irrigation devices on spray characteristics and the efficiency of heat and mass transfer processes. The main factors governing spray formation are considered, including operating pressure, liquid flow rate, nozzle geometry, atomizer type, droplet size and velocity, spray cone angle, liquid distribution uniformity, and properties of the working medium. It is shown that the efficiency of irrigation devices is determined not only by flow rate and pressure but also by the structure of the droplet flow and the conditions of its interaction with the surrounding gas medium, packing elements, or heat-transfer surfaces. Particular attention is paid to spray cooling, where heat transfer intensity depends on droplet size distribution, irrigation density, nozzle position, surface condition, and heat transfer regime. For cooling towers and evaporative systems, uniform water distribution is identified as one of the key factors affecting heat and mass transfer performance. The capabilities of CFD modeling for investigating internal nozzle flow and spray cone formation are also discussed. It is concluded that the optimization of irrigation devices should be based on the integrated consideration of hydrodynamic, thermophysical, and operational parameters during their design and application.

Key words: *irrigation devices; liquid atomization; heat and mass transfer; spray cooling; CFD modeling.*

Сведения об авторах

Алихан Алибекович Ахметов* – докторант образовательной программы 8D05302- «Техническая физика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru.

Михаил Вячеславович Ермоленко – к.т.н., ассоциированный профессор, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Ольга Александровна Степанова – кандидат технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Авторлар туралы мәліметтер

Алихан Алибекович Ахметов* – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының 8D05302 – «Техникалық физика» білім беру бағдарламасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru.

Михаил Вячеславович Ермоленко – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Ольга Александровна Степанова – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Information about the authors

Alikhan Alibekuly Akhmetov* – PhD Student of the Educational Program 8D05302 – Technical Physics, Department of «Technical Physics and Thermal Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru.

Mikhail Vyacheslavovich Yermolenko – Candidate of Technical Sciences, associate professor, senior teacher of the department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Olga Aleksandrovna Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Поступила в редакцию 29.06.2026
Поступила после доработки 20.08.2026
Принята к публикации 21.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-66

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 29.19.21

Т. Тусеев[1], А.А. Куйкабаева[1]*, Э.М. Зульбухарова[1], А.К. Данлыбаева[1], Қ.М. Омаров[2]
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ. әл-Фараби даңғылы, 71
[2]Әскери бөлім 18292,
2050008, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Байзақов көшесі, 275 а
*e-mail: a.kuikabaeva1@gmail.com

КРЕМНИЙ ДИОКСИДІНІҢ (SiO_2) ГИДРОКСИЛ ҚАБАТЫНА ɣ-СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Жұмыста γ-сәулеленудің кремний диоксидінің адсорбциялық қасиеттеріне әсері зерттелді. SiO_2 бетінде оттегінің гамма-адсорбциясының спектралдық және температуралық тәуелділіктері анықталды, сәулеленудің гидроксилдік қабат күйіне ықпалы қарастырылды, парамагниттік және адсорбциялық орталықтар арасындағы өзара байланыс айқындалды, сондай-ақ радиациялық адсорбциядағы қоспалардың рөлі белгіленді. Вакуумда жүргізілген γ-сәулелену ИҚ-спектрдің түрін өзгертеді: оқшауланған және сутекпен байланысқан гидроксил топтарының (3750,*

©Т. Тусеев, А.А. Куйкабаева, Э.М. Зульбухарова, А.К. Данлыбаева, Қ.М. Омаров, 2026