

Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 628.4.02

АНАЛИЗ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Баженов¹ В.И., Говорова² Ж.М., Орлов³ Е.В.¹ АО «Водоснабжение и водоотведение», 115054, г. Москва, Большой Строченовский переулок, 7^{2,3} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, Россия, Москва, Ярославское шоссе, 26E-mail: ¹ bazhenov@pump.ru, ² GovorovaZhM@mgsu.ru, ³ jeks-2003@yandex.ru

Аннотация. Анализ рассматривает развитие зарубежных аддитивных технологий (АТ) для предстоящей трансформации сферы водопользования, водоснабжения и водоотведения в России.

Предмет исследования: Аддитивные технологии (3D-печать) применительно к созданию элементов систем водоснабжения и водоотведения. Исследование направлено на решение проблемы технологической инерции отрасли, при которой современные знания о процессах очистки и транспортировки вод не могут быть реализованы без крупных инвестиций в традиционное строительство или циклов реконструкции.

Материалы и методы: Анализ проведен на основе рецензируемых источников, индексируемых в базах Google Scholar, Scopus и Web of Science за 2015–2025 гг. Классификация технологий выполнена в соответствии с ГОСТ Р 57558-2025 с дополнением зарубежных подпроцессов (FDM, SLS, SLM, SLA, DLP) для корректной интерпретации международного опыта.

Результаты: Установлено, что аддитивные технологии применяются при изготовлении широкой номенклатуры элементов ВКХ: форм для литья, рабочих колес насосов, запорно-регулирующей арматуры, труб и фитингов, теплообменных труб, мембранных подложек, фильтрующих элементов, бионосителей, аэраторов, элементов датчиков, а также бетонных и пластиковых строительных конструкций. Показано, что каждая технология (BJ, MJ, ME, DED, PBF, VP, SL, CP) имеет свою нишу: высокоточные методы применяются для прецизионных элементов (мембраны, фильтры), крупноформатные – для труб и строительных конструкций. Приведены примеры реализованных проектов: приемные камеры сточных вод, распределительные камеры, туалетные блоки, пластиковые колодцы и люки.

Выводы: Аддитивное производство вышло за рамки прототипирования и технически готово к решению задач ВКХ. Перспективы развития в России связаны с освоением автоматизированного ремонта изделий, изготовления запчастей и появления новых продуктов на рынке. Переход от единичных кейсов к тиражированию требует разработки методик оценки надежности и экономической эффективности в условиях длительной эксплуатации.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, водоснабжение, водоотведение, очистка воды.

ВВЕДЕНИЕ

Стратегия развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 года (ПП РФ № 1913-р от 14 июля 2021 г.) в части ключевых технологий предусматривает разработку и освоение автоматизированного ремонта изделий методами аддитивных технологий, автоматизированного возведения жилых домов, зданий и других объектов, а также изделий строительного назначения.

Научная проблема формулируется как преодоление технологической инерции производства: переход от унифицированных, капиталоемких методов к гибкой парадигме создания элементов и сооружений, адекватной сложности изделий для современных процессов водопользования. Существует парадокс – мы знаем, как развивать эффективнее и экологичнее системы водопользования, но наш индустриальный базис не позволяет масштабировать эти знания иначе как через крупные инвестиции в традиционное строительство или многолетние циклы реконструкции. Научное знание оказывается заложником технологической инерции производства.

Актуальность аддитивных технологий для ВКХ определяется тремя факторами: ресурсная эффективность (материал расходуется только там, где он действительно необходим для выполнения конструктивной или функциональной задачи); эксплуатационная гибкость (технологии позволяют перейти от логистики «сораньем на складе и ждем» к логистике «печатаем по мере необходимости»); гидродинамическая и технологическая оптимальность (технологии снимают жесткие ограничения на геометрию изделия, это переход от «технологии ради производства» к «технологии ради процесса»).

Исследование адресовано трем ключевым задачам ВКХ: (1) повышение надежности через оперативное изготовление запчастей в условиях ремонтных мастерских; (2) интенсификация очистки за счет оптимизированной геометрии бионосителей для аэротенков и мембран без строительства новых сооружений; (3) цифровая трансформация «оптимизированная цифровая модель → готовое изделие с расчетными характеристиками».

Значением для науки является появление и развитие нового междисциплинарного поля на стыке материаловедения, гидравлики и

биотехнологии, где исследователь перестает быть пассивным наблюдателем процессов в жестко заданных формах, получая возможность активно конструировать среду их протекания. Значение для практики – снижение импортозависимости, сокращение простоев, превращение эксплуатирующей организации в технологического интегратора, адаптирующего инфраструктуру под переменные вызовы в режиме реального времени.

Цель статьи – анализ зарубежного опыта развития аддитивных технологий для создания элементов систем водоснабжения и водоотведения с обоснованием методологических принципов. Данный анализ позволит определить перспективы 3D-печати в России.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

3D-печать определена как ключевая технология концепций «Industry 4.0» и «Construction 4.0» [1]. Отечественный опыт сферы водопользования, водоснабжения и водоотведения характеризуется явным дефицитом информации – опубликованы лишь элементы внутреннего водоснабжения на основе труб, фитингов их комплектующих [2] и пожарного дренчера [3]. Конечно, русскоязычный интернет содержит отрывочные сведения о возможностях коммерческих компаний по 3D-печати, но подобные данные невозможно сформировать в системные направления развития отрасли, тем более обосновать их реальными фактами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аддитивное производство (или 3D-печать для производства инженерных компонентов) благодаря своим многочисленным преимуществам: гибкости в выборе материалов, доступности, экологичности поддержано в России ГОСТ Р 57558-2025 «Аддитивные технологии. Базовые принципы. Термины и определения» [4]. Итоговое количество действующих ГОСТ Р по аддитивным технологиям на конец 2025 года составляет 41 ед.

На рис. 1 использован перечень технологий и аббревиатура процессов 3D-печати на основе определений ГОСТ Р 57558-2025 [4]. Однако, материалы дополнены подпроцессами (FDM, SLS, SLM, SLA, DLP см. расшифровку аббревиатуры в подрисуночной надписи), которые реализованы зарубежными производителями 3D-принтеров, и с давних пор и используются постоянно и традиционно. Полагаем, что ГОСТ Р 57558-2025 [4] их не использует за ненужностью глубокой детализации классических процессов. Авторы статьи классифицировали их в соответствии с базовыми классическими процессами, ввиду множества зарубежных референсов к данным подпроцессам. Гибридные технологии (а) также инициативно выделены авторами в отдельную группу, т.к. они позволяют дополнить друг друга и устранить индивидуальные недостатки. – выделен как жизненно важный строительный процесс объектов инфраструктуры;

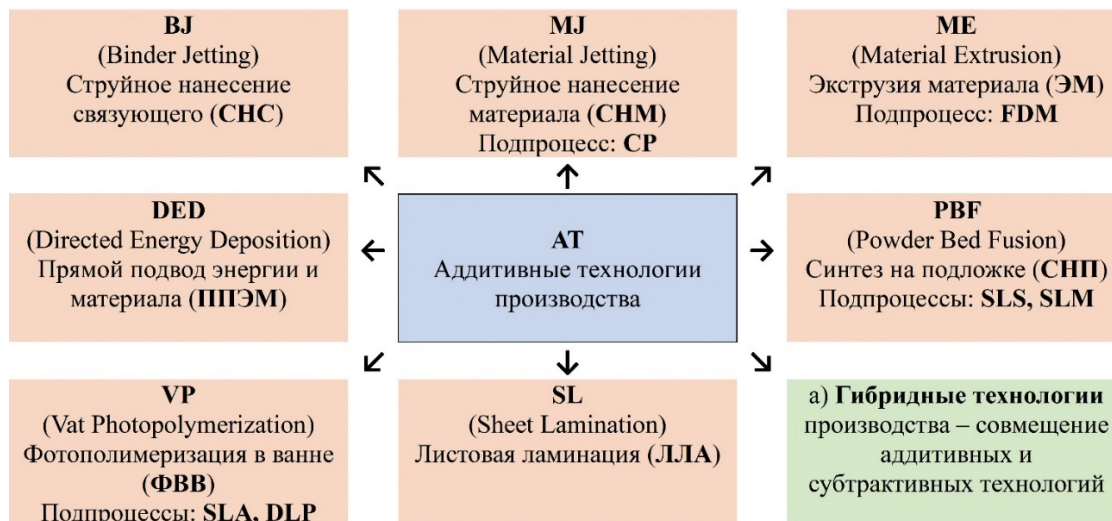


Рис. 1. Классификация аддитивных технологий (АТ) на основе ГОСТ Р 57558-2025 [4] – 7 основных технологий (выделены оранжевым цветом). Подпроцессы: CP (Concrete Printing, Печать бетоном); FDM (Fused Deposition Modeling, Моделирование методом наплавления); SLS (Selective Laser Sintering, Селективное лазерное спекание); SLM (Selective Laser Melting, Лазерное сплавление); SLA (Stereolithography, Стереолитография); DLP (Digital Light Processing, Цифровая обработка света)

Fig. 1. Classification of additive technologies (AT) based on GOST R 57558-2025 [4] – 7 main technologies (highlighted in orange). Subprocesses: CP (Concrete Printing); FDM (Fused Deposition Modeling); SLS (Selective Laser Sintering); SLM (Selective Laser Melting); SLA (Stereolithography); DLP (Digital Light Processing)

Для достижения цели программа исследований строится на методе аналитического обзора. Формирование доказательной базы выполнялось на основе рецензируемых источников, индексируемых в международных базах данных Google Scholar, Scopus и Web of Science. Поисковый запрос выстраивался на комбинации ключевых терминов: "additive manufacturing" / "3D printing" в сочетании с "water treatment", "membrane fabrication", "biocarrier", "wastewater", "concrete printing", "digital construction", "pump", "impeller", "pipe", "fitting", "valve". Глубина поиска — 10 лет (2015–2025) для обеспечения актуальности при сохранении возможности отследить эволюцию подходов.

Применение описанного методического аппарата позволит сформировать структурированную картину современного состояния проблемы и обосновать направления наиболее перспективных разработок для отрасли водоснабжения и водоотведения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Технология 3D-печати позволяет создавать сложные конструкции с высокой точностью и меньшими затратами, что особенно важно для разработки элементов водоочистных сооружений, инфраструктурных компонентов и инновационных систем, табл. 1. Весьма очевидно, что трехмерные модели CAD (САПР) необходимы для 3D-печати, так как они позволяют создавать реалистичные компьютерные модели элементов, деталей и сборок для сложного моделирования и цифрового производства. С точки зрения необходимости поддержания жизненного цикла объектов ВиВ технологии и элементы 3D-печати можно отнести к технологиям информационного моделирования (ТИМ), поскольку они явно способны пополнить этап жизненного цикла «эксплуатация и техническое обслуживание».

Таблица 1. Анализ технологий 3D-печати в водоснабжении и водоотведении
Table 1. Analysis of 3D printing technologies in water supply and sanitation

Тип	Материалы	Отраслевые примеры 3D печати: Изготовленный элемент / Подробности
VJ	Песок, полимеры, порошкообразный пластик, металл, керамика, стекло, композиты.	[5] Керамические фильтры / Разработка в сфере очистки воды. [6] Формы для литья из кварцевого песка / Для отливки новые рабочих колес фирмы KSB.
MJ	Фотополимеры (фоточувствительная смола, затвердевающая под воздействием света или тепла), воск, иногда металлы, керамика или стекло.	[7] Пресс-формы для литья / Лопатки турбины из пластмассы. [8] Гироидные бионосители для аэротенков / Удельная площадь поверхности бионосителей более 2300 м ² /м ³ . [9] Прокладки (отводящие подложки) ультрафильтрационных мембран / Метод MJ (Polyjet) один из лучших по массопереносу и точности, но материалы могут со временем деградировать.
ME	Пластик, полимеры, металл, термопластичные гели, биодобавки (внедрение бактерий), бетон, полимербетон, бетон с фибродобавками	[9] Прокладки ультрафильтрационных мембран / Сфера водоподготовки. Метод FDM на основе материала АБС* результирует: низкую общую точность в изготовлении, материал более долговечен, чем фотополимеры. [10] Три варианта бионосителей для аэротенков / Удельная площадь поверхности 437-600 м ² /м ³ . [11] Рабочие колеса центробежных насосов / Метод FDM из пластика АБСplus*, АБС* и ПЛА*. [12] Микропористые структуры фильтров / Для водоочистки. [13] Трубы: ребристая, сотовая, гибридная, цельнолитая / Для водоснабжения и водоотведения. Исследования механических характеристик труб, изготовленных из пластика АБС* методом FDM. [14] Трубы / Материал ПЛА*. Внедрение нового метода осевой печати, улучшающего механические свойства печатных образцов (проверка на растяжение и изгиб). [15] Трубные фитинги / Специальная параметрическая конструкция трубных фитингов из термопластичных материалов. [16] Кассеты систем аэрации / Метод FDM из пластика ПЛА* и АБС*. Разработка и технологические испытания образцов. [17] Элементы датчиков для воды (платформы, ячейки, электроды) / Комплексная печать из материалов АБС*, ПК* и ПЛА*.
CP	Бетон, полимербетон, бетон с фибродобавками	[18] Водные резервуары-накопители / Исследования, в т.ч. арматуры, установленной после печати. [19] Бетонные ванно-туалетные блоки (типовые) / Для жилых помещений размером 1620 мм × 1500 мм × 2800 мм. [20, стр. 60] Три технических решения туалетов / Для общественного и индивидуального пользования.
DED	Металлы, гибриды (металлический порошок, металлическая проволока иногда с керамикой)	[21] Трехдвоймовый клапан (30 кг) / Выполняет задачи подачи и распределения жидкости, снижения давления и расхода воды. Класс 1 ядерной безопасности. Химический состав порошка: 17,8 % хрома, 12,8 % никеля, 2,36 % молибдена, а также малое количество марганец, кремний, фосфор, сера и азот.

		[22] Цельное рабочее колесо гидротурбины / Представлено в необработанном виде. [23] Цельное рабочее колесо центробежного канализационного насоса Grundfos полуоткрытого типа / Нержавеющая сталь марки 316L.
PBF	Порошки (пластика, металла, керамики, иногда полимеров)	[24] Полный процесс изготовления трех закрытых канальных рабочих колеса центробежных насосов / Никелевый состав Inconel 625, представлен анализ постобработки и балансировки. Рентгеновские КТ-сканирования проводились для анализа возможных дефектов. [25] Теплообменные трубы (синусоидальные гофрированные) / Исследования теплопередачи труб. [26] Теплообменные трубы / Исследования поверхностной шероховатости труб. [9] Прокладки ультрафильтрационных мембран / Для водоподготовки. Материал нейлон, используемый в SLS более долговечен, чем фотополимеры. [27] Прокладки мембран Gyroid / SLS печать позволяет достичь улучшенного массопереноса для ультрафильтрации и обратного осмоса. [28] Сверхгидрофобные полисульфоновые мембраны / SLS печать мембран для разделения масла и воды.
VP	УФ-отверждаемые фотополимерные смолы, полимеры и пластики (литые, прозрачные, промышленные, биосовместимые)	[17] Элементы датчиков для воды (платформы, ячейки) / Использование прозрачных смол в качестве материалов. [29] Пористая полимерная керамика / Для фильтрации и исследования способности адсорбировать красители. [30] Гетерогенная катионообменная мембрана / Метод SLA и исследование электрохимических и механических свойств мембраны. [31] Керамические мембраны (гидрофильные пористые) / Для ультрафильтрации, методом SLA. Метод может быть использован для изготовления мембран микрофильтрации. [32] Фильтрующие мембраны нанофильтрации / Для очистки воды. Метод DLP. Исследования антибактериальных свойств мембран. [33] Упругие перфорированные прокладки мембран / Для фильтрации. Метод DLP. Исследования конструктивной особенности и энергоэффективности мембран.
SL	Металлические ленты, полотна, пластиковые листы (Полимеры, металлы, керамика)	[34] Ионно-транспортные керамические мембраны / Для производства синтез-газа (смеси водорода и оксида углерода). Разработка новой технологии изготовления. Пластиковые слои ламинируют под давлением и склеивают. [35] Фильтрационная керамика / Для фильтрации взвешенных частиц. Использован новый метод рулонной формовки.
* Примечание: Материалы для печати методом ME (поставляются в виде нитей, намотанных на катушки, и используются для создания трехмерных объектов методом послойного нанесения): АБС (ABS) – акрилонитрилбутадиенстирол, ударопрочный термопластик с основой из эластомеров на базе полибутадиена, чувствителен к УФ-излучению; АБСplus (ABSplus) – улучшенная версия ABS-пластика, повышенная ударопрочность, уменьшенная усадка при печати, лучшая адгезия между слоями; ПЛА (PLA) – полилактид, экологичный биоразлагаемый пластик, низкая термостойкость, повышенная хрупкость под воздействием УФ-излучения; ПК (PC) – поликарбонат, высокопрочный термопластик, высокая прочность, прозрачность.		

Проведенный анализ зарубежных источников позволил систематизировать существующие применения аддитивных технологий в водопроводно-канализационном хозяйстве. Полученные результаты (табл. 2) демонстрируют, что аддитивное производство вышло за рамки прототипирования и используется для изготовления широкой номенклатуры функциональных элементов — от вспомогательной оснастки до несущих бетонных конструкций.

Последние элементы (печать бетоном) представим вариантами крупногабаритных строительных элементов конструкций для отрасли водоснабжение и водоотведение, рис. 2, разработанные на платформе английской фирмы ChangeMaker3D (с торговой маркой PrintInfrastructure™) при обеспечении заказа и инвестиций инновационного фонда Ofwat. Также профильной крупногабаритной печатью являются элементы 3D-печати пластиковых колодцев профилией и люков на примере австрийской

компании Pipelife [36], переоснадившей производство конвейерными лентами для исключения участия человека, рис. 3.

Полагаем подобные направления аддитивных технологий в ближайшей перспективе освоят и отечественные предприятия, что обеспечит для отрасли водоснабжение и водоотведение реализацию процессов автоматизированного ремонта изделий, запчастей и появление на рынке новых продуктов. Приведенный анализ подтверждает, что мировая практика накопила достаточный эмпирический материал, демонстрирующий техническую реализуемость аддитивного производства элементов ВКХ. Следующим логическим шагом должен стать переход от демонстрации единичных кейсов к тиражированию успешных решений, что требует разработки методик оценки надежности и экономической эффективности в условиях длительной эксплуатации.

Таблица 2. Классификация аддитивно изготавливаемых элементов водопользования, водоснабжения и водоотведения по технологиям печати
Table 2. Classification of additively manufactured elements for water use, water supply and sanitation by printing technologies

Элементы и конструкции	Технологии 3D-печати	Назначение / Функция
Формы для металлического литья	VJ, MJ	Производство оснастки для литья корпусных деталей насосов, арматуры
Рабочие колеса центробежных насосов и гидротурбин	ME, DED, PBF	Гидравлические элементы с оптимизированной геометрией лопаток
Трубы пластиковые и фитинги	ME	Напорные и безнапорные трубопроводы, соединительные детали
Теплообменные трубы	PBF	Элементы систем утилизации тепла сточных вод
Специальные гидравлические клапаны	DED	Запорно-регулирующая арматура сложной конфигурации
Прокладки (отводящие подложки) мембран для нано-, ультра- и микрофильтрации	MJ, ME, PBF (SLS), VP (DLP)	Поддерживающие структуры мембранных модулей
Фильтрующие элементы (керамические, термопластовые)	VJ, ME, PBF (SLS), VP, VP (SLA), VP (DLP), SL	Барьерные структуры для механической, мембранной фильтрации
Бионосители для аэротенков	MJ, ME	Загрузка для иммобилизации активного ила в сооружениях биологической очистки
Аэраторы пневматические	ME	Системы диспергирования воздуха в аэротенках
Элементы датчиков для воды	ME, VP	Корпуса, проточные ячейки, держатели электродов контрольно-измерительной аппаратуры
Бетонные конструкции (туалеты, блоки, резервуары, колодцы)	ME (CP)	Элементы строительной части очистных сооружений и сетей

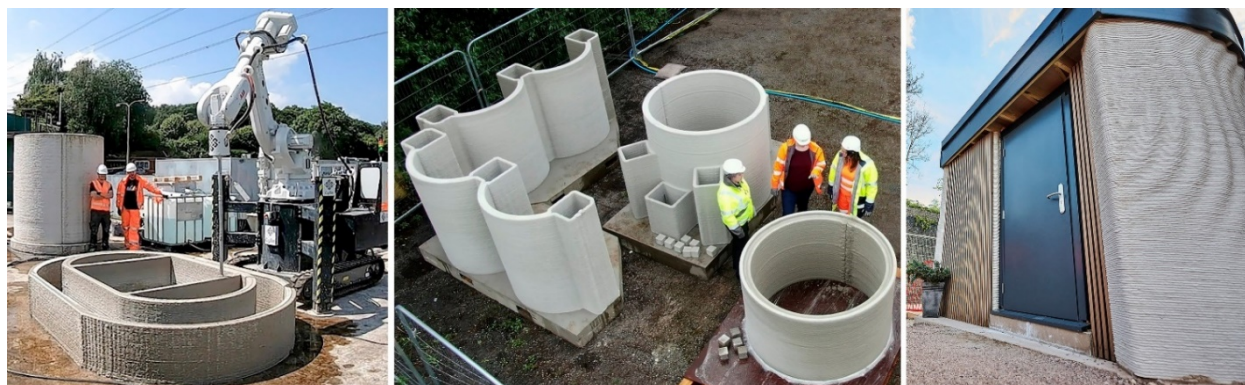


Рис. 2. Примеры 3D-печати ME (CP) для водной инфраструктуры на платформе ChangeMaker3D (слева-направо): приемная камера сточных вод (г. Чешир); распределительные камеры и кольца люков; туалетная кабинка (предполагает устройство системы сбора дождевой воды для слива унитаза и солнечной батареи).

Fig. 2. Examples of ME (CP) 3D printing for water infrastructure on the ChangeMaker3D platform (left to right): a wastewater collection chamber (Cheshire); distribution chambers and manhole rings; a toilet cubicle (incorporating a rainwater collection system for toilet flushing and a solar panel).



Рис. 3. Примеры 3D-печати ME (FDM) пластиком для сферы транспортировки сточных и ливневых вод компании Pipelife [36].

Fig. 3. Examples of ME (FDM) 3D printing with plastic for wastewater and stormwater transportation by Pipelife [36].

ВЫВОДЫ

1) Выполнена систематизация аддитивных технологий применительно к задачам водоснабжения и водоотведения на основе гармонизации терминологической базы ГОСТ Р 57558-2025 с зарубежными классификаторами (FDM, SLM, SLA, DLP). Это обеспечило методологическую основу для корректной интерпретации международного опыта в контексте его адаптации к российской нормативной практике.

2) На основе анализа зарубежных источников установлено, что аддитивные технологии находят применение при изготовлении широкой номенклатуры элементов систем водоснабжения и водоотведения: форм для литья, рабочих колес насосов, запорно-регулирующей арматуры, труб и фитингов, теплообменных труб, мембранных подложек, фильтрующих элементов, бионосителей, аэраторов, элементов датчиков, а также бетонных и пластиковых строительных конструкций. Подтверждена технологическая готовность аддитивного производства для решения задач как механического, так и технологического оборудования очистных сооружений.

Визуализированы элементы 3D-печати крупногабаритных строительных элементов конструкций бетоном и пластиком, типичных для отрасли.

3) Перспективы развития отраслевых аддитивных технологий в России несут оптимистичный и позитивный характер. Они связаны с освоением автоматизированного ремонта изделий, изготовления запчастей и появления новых продуктов на рынке. Переход от единичных кейсов к тиражированию требует разработки методик оценки надежности и экономической эффективности в условиях длительной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург А.В., Адамцевич Л.А., Адамцевич А.О. Строительная отрасль и концепция «Индустрия 4.0»: обзор // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 7. С. 885–911. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.885-911
2. Свирская В.И., Приймак Л.В. Внедрение элементов инновационных технологий при разработке инженерных систем // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2023. С. 516–519.
3. Солопова В.А., Сухенко М.В., Борискина П.А. Технологии 3D-печати в пожарной безопасности // Апробация. 2017. № 1 (52). С. 10–11.
4. ГОСТ Р 57558-2025 «Аддитивные технологии. Базовые принципы. Термины и определения». Москва: Российский институт стандартизации, 2025.
5. Manotham S., Butnoi P., Tesavibul P. Application of alumina fabricated through photosensitive binder jetting techniques in water filtration // *Rapid Prototyping Journal*. 2025. Vol. 31 (8): 1821–1830. DOI: 10.1108/RPJ-12-2024-0496
6. Hernández F., Fragoso A. Fabrication of a stainless-steel pump impeller by integrated 3D sand printing and casting: mechanical characterization and performance study in a chemical plant // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 7. P. 3539.
7. Gülcan O., Günaydın K., Tamer A. The state of the art of material jetting — a critical review // *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 16. P. 2829. DOI: 10.3390/polym13162829
8. Elliott O. et al. Design and manufacturing of high surface area 3d-printed media for moving bed bioreactors for wastewater treatment // *Journal of Contemporary Water Research & Education*. 2017. Vol. 160. No. 1. P. 144–156. DOI: 10.1111/j.1936-704X.2017.03246.x
9. Tan W.S. et al. Comparison of solid, liquid and powder forms of 3D printing techniques in membrane spacer fabrication // *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 537. P. 283–296. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.05.037
10. Dong Y. et al. A novel bio-carrier fabricated using 3D printing technique for wastewater treatment // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. No. 1. P. 12400. DOI: 10.1038/srep12400
11. Pavlovic A. et al. Polymers in Additive Manufacturing: the Case of a Water Pump Impeller // *FME Transactions*. 2017. Vol. 45. No. 3. DOI: 10.5937/fmet1703354P
12. Kotorčević N. et al. Material Extrusion 3D Printing of Micro-Porous Copper-Based Structure for Water Filters // *Machines*. 2024. Vol. 12. No. 7. P. 470. DOI: 10.3390/machines12070470
13. Ergene B. et al. An experimental investigation on mechanical performances of 3D printed lightweight ABS pipes with different cellular wall thickness // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2021. Vol. 15. No. 2. P. 8169–8177. DOI: 10.15282/jmes.15.2.2021.16.0641
14. Zhang H. et al. Research and implementation of axial 3D printing method for PLA pipes // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No. 13. P. 4680. DOI: 10.3390/app10134680
15. Fini A.T. et al. Parametric Design of Easy-Connect Pipe Fitting Components Using Open-Source CAD and Fabrication Using 3D Printing // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2025. Vol. 9. No. 2. P. 65. DOI: 10.3390/jmmp9020065
16. Moga I.C. et al. Innovative technological solutions for efficient biological wastewater treatment // *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2020. Vol. 18. No. 4. P. 181–186. URL: <https://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2020/ANNALS-2020-4-26.pdf>
17. Sun Y. et al. Application of 3d printing technology in sensor development for water quality monitoring // *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 5. P. 2366. DOI: 10.3390/s23052366

18. Gebhard L. et al. Structural behaviour of post-installed reinforcement for 3D concrete printed shells — A case study on water tanks // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 366. P. 130163. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130163
19. Weng Y. et al. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261. P. 121245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121245
20. Pimpley P. Success Factors for 3D Printing Technology Adoption in Construction: University of Maryland, College Park, 2019. URL: <https://api.drum.lib.umd.edu/server/api/core/bitstreams/8c421aac-9e51-4553-a563-cd75325aabac/content>
21. Kang S.H. et al. Additive manufacture of 3 inch nuclear safety class 1 valve by laser directed energy deposition // *Journal of Nuclear Materials*. 2021. Vol. 547. P. 152812. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2021.152812
22. Musa M. et al. Advanced manufacturing and materials for hydropower: Challenges and opportunities. Oak Ridge National Laboratory. Report No. ORNL/TM-2023/2835. 2023. 106 p. URL: https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub19055_8.pdf
23. Jayawardane H. et al. Investigating the 'techno-eco-efficiency' performance of pump impellers: metal 3D printing vs. CNC machining // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 121. No. 9. P. 6811–6836. DOI: 10.1007/s00170-022-09748-2
24. Adiaconitei A. et al. Manufacturing of closed impeller for mechanically pump fluid loop systems using selective laser melting additive manufacturing technology // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 20. P. 5908. DOI: 10.3390/ma14205908
25. Liu C. et al. Heat transfer enhancement characteristics of sinusoidal corrugated tubes fabricated via laser powder bed fusion // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 60. P. 104722. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104722
26. Spickler B. et al. Surface roughness and dimensional evaluation of laser powder bed fusion additively manufactured shell and tube heat exchangers // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2025. P. 103858. DOI: 10.1016/j.tsep.2025.103858
27. Sreedhar N. et al. 3D printed feed spacers based on triply periodic minimal surfaces for flux enhancement and biofouling mitigation in RO and UF // *Desalination*. 2018. Vol. 425. P. 12–21. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.010
28. Yuan S. et al. Super-hydrophobic 3D printed polysulfone membranes with a switchable wettability by self-assembled candle soot for efficient gravity-driven oil/water separation // *Journal of Materials Chemistry A*. 2017. Vol. 5. No. 48. P. 25401–25409. DOI: 10.1039/C7TA08836A
29. Felsberger T. Hierarchically porous ceramics with surface functionalities structured by vat photopolymerization: Technische Universität Wien, 2024. DOI: 10.34726/hss.2024.123421
30. Zarybnicka L. et al. 3D printed heterogeneous cation exchange membrane processed using stereolithography // *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. Vol. 140. No. 35. P. e54341. DOI: 10.1002/app.54341
31. Ray S.S. et al. Solvent based slurry stereolithography 3D printed hydrophilic ceramic membrane for ultrafiltration application // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. No. 8. P. 12480–12488. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.02.010
32. Mohd Nizam N.H., Badrol Hisam Z.A., Zazani A.H. Innovation of 3D-printed waste-derived graphene oxide for water treatment via digital light processing // *Proceeding for International Undergraduates Get Together 2024 (IUGeT 2024): Undergraduates' Digital Engagement Towards Global Ingenuity*. 2nd Edition. 2024. P. 196–205. URL: <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/118743>
33. Roy Barman S. et al. 3D-printed materials for wastewater treatment // *JACS Au*. 2023. Vol. 3. No. 11. P. 2930–2947. DOI: 10.1021/jacsau.3c000409
34. Carolan M., Chen C., Chen J., Miller C., Minford E., Waldron W. ITM Ceramic Membrane Technology to Produce Synthesis Gas // *ECS Transactions*. 2008. P. 319–325. DOI: 10.1149/1.3050403
35. Zhang Y. et al. Al₂O₃ ceramics preparation by LOM (laminated object manufacturing) // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 17. No. 7. P. 531–534. DOI: 10.1007/s001700170154
36. Schoenmaker T. 3D Printing of Flow Profiles for Inspection Chambers and Manholes // *Journal of Civil Engineering Research & Technology*. 2024. Vol. 6. No. 3. P. 1–5. DOI: 10.47363/sqtbmq87

REFERENCES

- Ginzburg A.V., Adamtsevich L.A., Adamtsevich A.O. Construction industry and the concept of "Industry 4.0": an overview // *Vestnik MGSU*. 2021. V. 16. No. 7. P. 885–911. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.885-911 (In Russian)
- Svirskaya V.I., Priymak L.V. Implementation of Elements of Innovative Technologies in the Development of Engineering Systems // *Current Issues in Construction: A Look into the Future: A Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk, 2023. Pp. 516–519. (In Russian)
- Solopova V.A., Sukhenko M.V., Boriskina P.A. 3D printing technologies in fire safety // *Aprobatsiya*. 2017. No. 1 (52). P. 10–11. (In Russian)
- GOST R 57558-2025 "Additive Technologies. Basic Principles. Terms and Definitions." Moscow: Russian Institute of Standardization, 2025.
- Manotham S., Butnoi P., Tesavibul P. Application of alumina fabricated through photosensitive binder jetting techniques in water filtration // *Rapid Prototyping Journal*. 2025. Vol. 31 (8): 1821–1830. DOI: 10.1108/RPJ-12-2024-0496
- Hernández F., Fragoso A. Fabrication of a stainless-steel pump impeller by integrated 3D sand

- printing and casting: mechanical characterization and performance study in a chemical plant // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 7. P. 3539.
7. Gülcan O., Günaydın K., Tamer A. The state of the art of material jetting — a critical review // *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 16. P. 2829. DOI: 10.3390/polym13162829
8. Elliott O. et al. Design and manufacturing of high surface area 3d-printed media for moving bed bioreactors for wastewater treatment // *Journal of Contemporary Water Research & Education*. 2017. Vol. 160. No. 1. P. 144–156. DOI: 10.1111/j.1936-704X.2017.03246.x
9. Tan W.S. et al. Comparison of solid, liquid and powder forms of 3D printing techniques in membrane spacer fabrication // *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 537. P. 283–296. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.05.037
10. Dong Y. et al. A novel bio-carrier fabricated using 3D printing technique for wastewater treatment // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. No. 1. P. 12400. DOI: 10.1038/srep12400
11. Pavlovic A. et al. Polymers in Additive Manufacturing: the Case of a Water Pump Impeller // *FME Transactions*. 2017. Vol. 45. No. 3. DOI: 10.5937/fmet1703354P
12. Kotorčević N. et al. Material Extrusion 3D Printing of Micro-Porous Copper-Based Structure for Water Filters // *Machines*. 2024. Vol. 12. No. 7. P. 470. DOI: 10.3390/machines12070470
13. Ergene B. et al. An experimental investigation on mechanical performances of 3D printed lightweight ABS pipes with different cellular wall thickness // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2021. Vol. 15. No. 2. P. 8169–8177. DOI: 10.15282/jmes.15.2.2021.16.0641
14. Zhang H. et al. Research and implementation of axial 3D printing method for PLA pipes // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No. 13. P. 4680. DOI: 10.3390/app10134680
15. Fini A.T. et al. Parametric Design of Easy-Connect Pipe Fitting Components Using Open-Source CAD and Fabrication Using 3D Printing // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2025. Vol. 9. No. 2. P. 65. DOI: 10.3390/jmmp9020065
16. Moga I.C. et al. Innovative technological solutions for efficient biological wastewater treatment // *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2020. Vol. 18. No. 4. P. 181–186. URL: <https://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2020/ANNALS-2020-4-26.pdf>
17. Sun Y. et al. Application of 3d printing technology in sensor development for water quality monitoring // *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 5. P. 2366. DOI: 10.3390/s23052366
18. Gebhard L. et al. Structural behaviour of post-installed reinforcement for 3D concrete printed shells — A case study on water tanks // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 366. P. 130163. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130163
19. Weng Y. et al. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261. P. 121245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121245
20. Pimpley P. Success Factors for 3D Printing Technology Adoption in Construction: University of Maryland, College Park, 2019. URL: <https://api.drum.lib.umd.edu/server/api/core/bitstreams/8c421aac-9e51-4553-a563-cd75325aabac/content>
21. Kang S.H. et al. Additive manufacture of 3 inch nuclear safety class 1 valve by laser directed energy deposition // *Journal of Nuclear Materials*. 2021. Vol. 547. P. 152812. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2021.152812
22. Musa M. et al. Advanced manufacturing and materials for hydropower: Challenges and opportunities. Oak Ridge National Laboratory. Report No. ORNL/TM-2023/2835. 2023. 106 p. URL: <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub190558.pdf>
23. Jayawardane H. et al. Investigating the 'techno-eco-efficiency' performance of pump impellers: metal 3D printing vs. CNC machining // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 121. No. 9. P. 6811–6836. DOI: 10.1007/s00170-022-09748-2
24. Adiaconitei A. et al. Manufacturing of closed impeller for mechanically pump fluid loop systems using selective laser melting additive manufacturing technology // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 20. P. 5908. DOI: 10.3390/ma14205908
25. Liu C. et al. Heat transfer enhancement characteristics of sinusoidal corrugated tubes fabricated via laser powder bed fusion // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 60. P. 104722. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104722
26. Spickler B. et al. Surface roughness and dimensional evaluation of laser powder bed fusion additively manufactured shell and tube heat exchangers // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2025. P. 103858. DOI: 10.1016/j.tsep.2025.103858
27. Sreedhar N. et al. 3D printed feed spacers based on triply periodic minimal surfaces for flux enhancement and biofouling mitigation in RO and UF // *Desalination*. 2018. Vol. 425. P. 12–21. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.010
28. Yuan S. et al. Super-hydrophobic 3D printed polysulfone membranes with a switchable wettability by self-assembled candle soot for efficient gravity-driven oil/water separation // *Journal of Materials Chemistry A*. 2017. Vol. 5. No. 48. P. 25401–25409. DOI: 10.1039/C7TA08836A
29. Felsberger T. Hierarchically porous ceramics with surface functionalities structured by vat photopolymerization: Technische Universität Wien, 2024. DOI: 10.34726/hss.2024.123421
30. Zarybnicka L. et al. 3D printed heterogeneous cation exchange membrane processed using stereolithography // *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. Vol. 140. No. 35. P. e54341. DOI: 10.1002/app.54341
31. Ray S.S. et al. Solvent based slurry stereolithography 3D printed hydrophilic ceramic

membrane for ultrafiltration application // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. No. 8. P. 12480–12488. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.02.010

32. Mohd Nizam N.H., Badrol Hisam Z.A., Zazani A.H. Innovation of 3D-printed waste-derived graphene oxide for water treatment via digital light processing // *Proceeding for International Undergraduates Get Together 2024 (IUGeT 2024): Undergraduates' Digital Engagement Towards Global Ingenuity*. 2nd Edition. 2024. P. 196–205. URL: <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/118743>

33. Roy Barman S. et al. 3D-printed materials for wastewater treatment // *JACS Au*. 2023. Vol. 3. No. 11. P. 2930–2947. DOI: 10.1021/jacsau.3c00409

34. Carolan M., Chen C., Chen J., Miller C., Minford E., Waldron W. ITM Ceramic Membrane Technology to Produce Synthesis Gas // *ECS Transactions*. 2008. P. 319–325. DOI: 10.1149/1.3050403

35. Zhang Y. et al. Al₂O₃ ceramics preparation by LOM (laminated object manufacturing) // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001. Vol. 17. No. 7. P. 531–534. DOI: 10.1007/s001700170154

36. Schoenmaker T. 3D Printing of Flow Profiles for Inspection Chambers and Manholes // *Journal of Civil Engineering Research & Technology*. 2024. Vol. 6. No. 3. P. 1–5. DOI: 10.47363/sqtbmq87

ANALYSIS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR ENGINEERING OF WATER MANAGEMENT SYSTEMS

Bazhenov ¹ V.I., Govorova ² Zh.M., Orlov ³ E.V.

¹ JSC "Water and Wastewater", 115054, Moscow, Bolshoy Strochenovskiy Pereulok, 7
2 Moscow State

²⁻³ University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russia

E-mail: ¹ bazhenov@pump.ru, ² GovorovaZhM@mgsu.ru, ³ jeks-2003@yandex.ru

Abstract. The analysis examines the development of foreign additive technologies (AT) for the upcoming transformation of the water use, water and wastewater sector in Russia.

Subject: Additive technologies (3D printing) applied to the creation of water supply and wastewater disposal system components. The research aims to address the industry's technological inertia, which means that modern knowledge about water treatment and transportation processes cannot be implemented without major investments in traditional construction or extensive renovation cycles.

Materials and methods: The analysis was conducted based on peer-reviewed sources indexed in Google Scholar, Scopus, and Web of Science for 2015–2025. The technology classification was carried out in accordance with GOST R 57558-2025 with the addition of foreign subprocesses (FDM, SLS, SLM, SLA, DLP) to ensure a correct interpretation of international experience.

Results: It has been established that additive manufacturing is used in the manufacture of a wide range of water and wastewater treatment components: casting molds, pump impellers, shut-off and control valves, pipes and fittings, heat exchange tubes, membrane substrates, filter elements, biocarriers, aerators, sensor elements, as well as concrete and plastic building structures. It is shown that each technology (BJ, MJ, ME, DED, PBF, VP, SL, CP) has its own niche: high-precision methods are used for precision components (membranes, filters), while large-format methods are used for pipes and building structures. Examples of completed projects are provided: wastewater receiving chambers, distribution chambers, toilet blocks, plastic manholes and manholes.

Conclusions: Additive manufacturing has moved beyond prototyping and is technically ready to address water and wastewater management challenges. Its development prospects in Russia lie in the development of automated repair, spare parts manufacturing, and the introduction of new products to the market. The transition from isolated cases to mass production requires the development of methods for assessing reliability and cost-effectiveness under long-term operating conditions.

Key words: Additive technologies, 3D printing, water supply, wastewater, water treatment.