

УДК 628.144

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Николенко И.В.<sup>1</sup>, Чемодуров В.Т.<sup>2</sup>, Бекирова З.Р.<sup>3</sup>

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»

<sup>1,3</sup>Институт биохимических технологий, экологии и фармации<sup>2</sup>Институт «Академия строительства и архитектуры»

295493, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181

<sup>1</sup>nikoshi@mail.ru, <sup>2</sup>Chens\_mu1@mail.ru

**Аннотация:** В статье рассмотрены особенности нагружения трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения приморских городов, которые размещены в береговых зонах. Анализ условий эксплуатации таких трубопроводов на Южном берегу Крыма показал, что аварии, связанные с их разрушением, часто происходят в результате штормовых воздействий. Показано, что в условиях шторма трубопроводы подвергаются дополнительным нагрузкам, которые в зависимости от их интенсивности могут привести к разрушению, с потерей работоспособного состояния систем водоснабжения и водоотведения, а также нарушать требования экологической безопасности в береговых зонах. В действующих нормативных документах отсутствуют рекомендации по расчету трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения, размещенных в береговой зоне, которые могут подвергаться штормовым воздействиям. Для оценки прочности таких трубопроводов предложены расчетные зависимости для двух схем нагружения. Выполнен расчет трубопровода системы водоснабжения, размещенного в береговой зоне г. Алушта и проведен анализ полученных результатов.

**Предмет исследования.** Характер нагружения трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения в прибрежной зоне, с учетом воздействия волновых нагрузок.

**Материалы и методы.** На основе анализа особенностей нагружения, предложены две расчетные схем, которые встречаются на практике эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения, размещенных в береговой зоне. Первый вариант расчета – часть трубопровода уложена непосредственно на грунт, во втором варианте расчета – трубопровод располагается на вертикальных опорах.

**Результаты.** Установлено, что при надземном размещении пролеты опор и уровни волнения оказывают существенное влияние на прочность трубопровода. Изменение пролета между опорами приводит к увеличению суммарных напряжений в трубопроводе в меньшей степени, чем увеличение волновой нагрузки. При принятом материале труб и волновой нагрузке при штормах в 7 и 8 баллов вне зависимости от величины пролета между опорами прочность, рассмотренного в статье трубопровода, не обеспечивается.

**Выводы.** При оценке устойчивости и надёжности систем водоснабжения и водоотведения приморских городов, размещенных в прибрежных зонах необходимо учитывать особенности нагружения. Чтобы гарантировать прочность и долговечность надземного трубопровода в прибрежной зоне, необходимо осуществлять выбор пролета между его опорами с учетом допускаемого уровня волновой нагрузки, а также учитывать их при подборе материала трубопровода. При наземном размещении трубопроводов в прибрежной зоне максимальная волновая нагрузка не сильно влияет на их прочность, что обеспечивает достаточный запас надежности.

**Ключевые слова:** система водоснабжения, трубопровод, береговая зона, волновая нагрузка, упругое основание, опора, прочность, коэффициент запаса прочности

## ВВЕДЕНИЕ

Особенностью систем водоснабжения и водоотведения (СВВ) приморских городов является наличие трубопроводов, размещенных в береговых зонах, которые могут подвергаться штормовым воздействиям различной интенсивности. При таких воздействиях СВВ могут терять работоспособное состояние, а также нарушать требования экологической безопасности в береговых зонах. Для систем водоснабжения приморских городов эти особенности необходимо учитывать при оценке параметров их устойчивости и надежности.

Разрушительные циклоны в последних лет на Земле стали происходить всё чаще из-за тенденций глобального потепления, вызванного накоплением в атмосфере углекислого газа и других поглощающих

тепло газов, что связано с повышением антропогенной нагрузки всего человечества. В результате, повышение температуры атмосферы Земли изменяет известные фундаментальные константы, которые положены в основу долгосрочных метеорологических прогнозов. Это увеличивает вероятность появления экстремальных погодных явлений: ураганов, смерчей, торнадо. Согласно исследованиям ООН, между 2005 и 2014 годами на Земле в среднем происходило 335 стихийных бедствий, связанных с погодой, что вдвое превышает уровень, зафиксированный в прошлом веке с 1985 по 1995 год [1]. Анализ статистики Росгидромета и страховых агентств по всему миру показывает, что в последние десятилетия участились случаи всевозможных погодных катаклизмов, причем основной вклад в это увеличение вносят ветровые нагрузки, которые

являются источниками сопутствующих аномальных климатических явлений.

В условиях штормовых воздействий трубопроводы СВВ, расположенные в береговой зоне, подвергаются повышенным нагрузкам. В зависимости от их величины, данные нагрузки могут инициировать повреждение отдельных элементов трубопроводных систем, что влечет за собой утрату их функциональной работоспособности и, как следствие, снижение устойчивости инженерной инфраструктуры систем водоснабжения населенных пунктов. При проектировании СВВ необходимо предусматривать анализ потенциальных нештатных сценариев эксплуатации и их последствий для обеспечения безаварийного функционирования. Результаты анализа условий эксплуатации СВВ в приморских городах свидетельствуют о том, что разрушение трубопроводов, размещенных в береговой зоне, обусловлены в том числе штормовыми воздействиями.

Надежность, устойчивость и живучесть СВВ являются важными аспектами ее функционирования и имеют большое значение для жизнеобеспечения, безопасности и комфорта населения, развития экономики, а также техногенной безопасности. Устойчивость означает способность системы сохранять свою работоспособность в условиях различных внешних, в том числе природных воздействий. Анализ условий потери устойчивости систем водоснабжения, связанных с их состоянием, с учетом внешних воздействий показал, что нарушение устойчивости систем водоснабжения происходит на четырех уровнях [2]. Классификация условий потери устойчивости СВВ на четыре уровня позволяет для каждого из них определить условия, действующие внешние и внутренние факторы, область допустимых их изменений относительно которых система будет считаться устойчивой, что позволит обосновывать методы оценки, на основании которых обеспечивать устойчивую работу этих систем. Технический уровень потери устойчивости систем водоснабжения связан с нарушением их работоспособного состояния по причине разрушения элементов в результате внешних воздействий.

Оценка устойчивости второго уровня сложных технических систем, к которым относятся СВВ, предполагает четкое определение следующих условий [3]:

- действующие факторы: идентификация внешних и внутренних факторов, оказывающих воздействие на систему.

- ключевые параметры устойчивости: определение того, какие свойства системы и в каком диапазоне параметров должны сохранять свое постоянство, и в какой степени это влияет на устойчивость.

- пределы допустимых воздействий: установление внешних факторов и области

допустимых изменений относительно которых система будет считаться неизменной, то есть устойчивой.

При расчетах зданий и сооружений в общем своде правил по нагрузкам и воздействиям СП 20.13330.2016 к особым климатическим нагрузкам отнесены (снеговые, ветровые, температурные и гололедные) нагрузки, действие которых может привести к аварийной расчетной ситуации. Нагрузки и воздействия, не включенные в этот СП устанавливаются в иных нормах проектирования строительных конструкций, в задании на проектирование или в рекомендациях, разработанных в рамках научно-технического сопровождения.

Расчет трубопроводов на прочность и устойчивость в соответствии с СП 33.13330.2012 должен производиться по методу предельных состояний и включает определение толщин стенок труб, тройников, переходов, отводов и заглушек, проведение поверочного расчета принятого конструктивного решения трубопровода. Поверочный расчет трубопроводов следует производить на неблагоприятные сочетания нагрузок и воздействий для конкретно принятого конструктивного решения с оценкой прочности и устойчивости продольных и поперечных сечений рассматриваемого трубопровода. Для трубопроводов расчетные нагрузки, воздействия и их возможные сочетания принимаются в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016. К сожалению, кратковременные нагрузки от действия штормовых волн в перечень воздействий и характеристик в указанном СП не рассматриваются. Поэтому не приводятся соответствующие коэффициенты надежности по нагрузкам, которые необходимо учитывать при определении толщин стенок труб и соединительных деталей. Таким образом, в указанных сводах правил отсутствуют нормативы по расчету трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов, размещенных в береговой зоне, которые могут подвергаться штормовым воздействиям различной интенсивности, а при таких воздействиях инженерные системы водопользования могут терять работоспособное состояние.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Береговые зоны представляют собой активные геодинамические системы, которые, находятся на стыке систем «суша» и «море», что приводит к высоким скоростям процессов изменений приморских территорий [4]. В береговых зонах приморских городов Крымского полуострова размещают трубопроводы СВВ в случаях невозможности, сложности либо высокой стоимости эксплуатации при прокладке другим способом. Волновая деятельность моря оказывает существенное влияние на прибрежные территории. Согласно справочным данным по режиму ветра и волнения в Черном и Балтийском морях

максимальный ущерб прибрежным территориям наносит штормовое волнение, которое генерируется ветрами от наиболее волноопасных направлений со скоростью более 10 м/с. При этом штормовые волнения имеют выраженные сезонные циклы.

Трубопроводы СВВ при проектировании размещаются в береговых зонах на основе анализа различных факторов. Основными техническими

решениями при проектировании таких трубопроводов являются применение надземного и наземного размещения. На рис. 1а показан трубопровод, размещенный на опорах в береговой зоне города Алушты (Южный берег Крыма), а на рис. 1б – «наземное» размещение участка этого трубопровода при разрушении опор.



а



б

Рис. 1. Трубопроводы системы водоснабжения, размещенные в береговой зоне г. Алушты:  
А – на опорах; б – «наземное» размещение.

Fig. 1. Water supply system pipelines located in the coastal zone of Alushta: a – on supports;  
b – “above-ground” placement.

В конце ноября 2023 года Краснодарском крае и Крыму высота волн в Черном море доходила до **9 метров**, а **сила ветра достигала 40 м/с**. Метеорологи заявили, что для Крымского полуострова это был сильнейший разгул стихии за всю историю наблюдений, который окрестили «штормом века». Волны на берегах Крыма во время шторма достигли самой большой высоты за 100 лет в диапазоне 7...10 м [5]. В истории полуострова подобный шторм был только в 1854 году во время Крымской войны. Тогда случилась «Балаклавская буря», благодаря которой появились первые карты погоды. Во время шторма 14 ноября 1854 года похожий штормовой циклон разнес флоты британцев, французов и Османской империи, были потоплены около 30 судов и кораблей, а более 40 получили тяжелые повреждения. С того времени военные задачи флотам ставились с учетом погодных условий на основании синоптических карт, которые разработали в 1855 году. Разрушительные циклоны в последние несколько лет 21-го века на Земле стали происходить всё чаще, а всё из-за рекордно теплой погоды.

Волновые нагрузки при штормах создают как проблемы природопользования в береговых зонах Крымского полуострова и в приморских городах, так и вызывают дополнительные нагрузки на инженерные, берегоукрепительные сооружения, в том числе и трубопроводах СВВ, размещенные в береговой зоне [6]. На рис. 2 показаны трубопроводы системы водоснабжения г. Алушта, размещенные в береговой зоне до и после этого шторма.

В наставлениях Комитета по гидрометеорологии указано, что *шторм* — это событие, при котором ветер превышает 16 м/с, а волнение - 5 баллов. Статистики штормов и окон погоды используются при планировании операций на шельфе, времени достижения судном места убежищ а и т.п. Подходы к расчету длительности штормов и окон погоды изложены в многочисленных публикациях, однако результаты представлены только в справочниках нового поколения. Потребности мореплавания, судостроения и освоение шельфа повысили требования к составу, полноте и достоверности сведений о режиме ветра и волнения. Удовлетворить эти потребности, в настоящее время, возможно за счет применения возможностей современной компьютерной техники для высокопроизводительных вычислений, которые позволяют выполнять расчеты волнового климата, с применением подхода, основанного на получении режимных сведений в результате расчетов по гидродинамическим моделям. Такой подход получил признание во всем мире, в том числе в России, одобрен и реализован при решении многочисленных научных и прикладных задач [7].

Сведения, необходимые для проектирования сооружений в открытом море и на шельфе по режиму ветра и волнения в морях РФ и их районах представлены в справочнике по режиму ветра и волнения в Черном и Балтийском морях. Результаты расчетов волнения по гидродинамической модели в этих морях при разных условиях волнообразования согласуются с инструментальными измерениями, выполненными различными измерительными

приборами, что подтверждает достоверность сведений, приведенных в справочнике. Сложившаяся практика проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений разделяет режимные характеристики ветра и волн

на экстремальные и оперативные. Первые определяют так называемый режим выживания сооружений, а вторые - режим их повседневной эксплуатации.



а



б

**Рис. 2.** Трубопроводы системы водоснабжения г. Алушта, размещенные в береговой зоне:  
а – до шторма; б – после шторма

**Fig. 2.** Water supply system pipelines in the coastal zone of Alushta: a – before the storm; b – after the storm

Для проектирования судов, гидротехнических сооружений, планирования работ в открытом море и на шельфе в справочнике по режиму ветра и волнения в Черном и Балтийском морях приводятся оценки высот волн и скоростей ветра для этих морей и их районов. Результатом вычислительной процедуры является модельная выборка наибольших высот волн и скоростей ветра скорости ветра, которые возможны 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Для районов морей приводятся значения повторяемости скоростей ветра по направлениям по месяцам и за весь год и средняя скорость ветра по направлениям, а также длительность штормов и окон погоды 3 % обеспеченности для высот волн по градациям через 2 м и максимальные значения высот волн по месяцам. Каждое значение наибольшей высоты волны или скорости ветра является реализацией случайной величины, изменяющейся в некотором диапазоне. При решении прикладных задач и выборе экстремумов определяется мера риска, который допустим при оценке максимальных волн. В частности, занижение максимальной волны увеличивает риск разрушения сооружения, а завышение волны приводит к удорожанию стоимости объекта. В целом представленные модели хорошо воспроизводят изменчивость штормов и окон погоды, хотя в конкретном шторме модельные результаты могут быть несколько ниже, чем измеренные значения.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Прошедшие шторма в Крыму показали уязвимость трубопроводов СВВ, возведенных и (или) размещенных на побережье возле среза морской поверхности. Следует отметить, что

шторма различной интенсивности периодически разрушают участки трубопроводов СВВ, размещенных в береговых зонах [5, 9, 11]. При этом в действующих сводах правил по нагрузкам и воздействиям не рассматриваются волновые нагрузки и воздействия, а устанавливаются косвенно в иных нормах проектирования строительных конструкций, в задании на проектирование либо в рекомендациях, разработанных в рамках научно-технического сопровождения.

В работе [9] авторами предложена методология расчета трубопроводов СВВ в береговой зоне. Она основана на анализе влияния прибрежных волн как нестационарного случайного нагружения на прочность трубопровода. Рассмотрены два расчетных случая, которые встречаются на практике эксплуатации трубопроводов СВВ, размещенных в береговой зоне. Первый вариант расчета, в случае, когда часть трубопровода уложена непосредственно на грунт, а во втором варианте расчета - трубопровод располагается на вертикальных опорах, размещенных на расстоянии. В первом варианте расчета - трубопровод, который уложен непосредственно на грунте - принимается как модель балки на упругом (винклеровом) основании [9]. Во втором варианте расчета - трубопровод, расположенный на вертикальных опорах - рассматривается как модель балки на двух опорах.

В предложенной методологии расчете трубопровода, размещенного в береговой зоне, определяются:

- нормальные напряжения от изгиба трубы

$$\sigma_M = \frac{M_0}{\pi r^2 \delta} \quad (1)$$

где  $M_0$  - изгибающий момент в сечении трубопровода;  $r$  - внутренний радиус трубы;  $\delta$  - толщина стенки трубы.

- нормальные напряжения от внутреннего давления в трубопроводе

$$\sigma_N = \frac{p_t r}{\delta}. \quad (2)$$

Суммарная вертикальная погонная нагрузка на ось трубы с учетом волновой нагрузки

$$q_{yc} = q_y + q_{yb}. \quad (3)$$

где  $q_y$  - погонная нагрузка на ось трубы (балки);  $q_{yb}$  - дополнительная волновая нагрузка на трубопровод.

Погонная нагрузка на ось трубы с водой

$$q_y = q_B + q_M, \quad (4)$$

здесь  $q_B = \pi r^2 g \rho_B$ ,  $q_M = \pi(R^2 - r^2)g\rho_M$ . - где погонная нагрузка от веса воды и трубы;  $R$  - наружный радиус трубы;  $\rho_B, \rho_M$  - плотность воды и материала трубы.

Вертикальная погонная статическая нагрузка веса воды над трубой

$$q_{yb} = 2r\epsilon g\rho_B, \quad (5)$$

где  $\epsilon$  - высота гребня волны.

По этой нагрузке рассчитываются напряжения в вертикальной плоскости без учета динамической составляющей падения волны.

Горизонтальная нагрузка на трубопровод от набегающей волны зависит от ее скорости.

Скорость движения волны определим по приближенной формуле

$$v = \frac{2\pi h}{\tau}. \quad (6)$$

где  $h$  - высота волны;  $\tau$  - период волнения.

Горизонтальная волновая погонная нагрузка на трубопровод

$$q_z = c_z \frac{\rho_B v^2}{2} 2r, \quad (7)$$

Здесь  $c_z = 1$  - аэродинамический коэффициент.

Суммарные напряжения от действия погонных нагрузок в вертикальной и горизонтальной плоскостях трубопровода

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_{yc}^2 + \sigma_{zc}^2}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{yc}$ , и  $\sigma_{zc}$  - суммарные напряжения в вертикальной и горизонтальной плоскостях, соответственно, от статической и динамической нагрузок на трубопровод.

Формула (7) характеризует горизонтальную волновую погонную нагрузку при плавном обтекании трубы водой с постоянной скоростью. При сопротивлении от набегающих волн реакция трубы на ударную нагрузку переносится в разряд динамического сопротивления. В этом случае необходимо рассчитать коэффициент динамичности нагрузки.

$$k_g = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_B^2}{g\Delta_{ст}}}, \quad (9)$$

здесь  $\Delta_{ст}$  - статический прогиб трубы, который определяется различными методами, например, начальных параметров.

Коэффициент динамичности нагрузки (9) позволяет учитывать влияния действие прибрежных волн на прочность трубопроводов СВВ, как на нестационарное случайное нагружение.

В первом варианте расчета изгибающий момент в сечении трубопровода, как балки на упругом основании определяется по зависимости [9, 10].

$$M_0 = -2\beta^2 E J_z \frac{q_{yc}}{k}. \quad (10)$$

где  $\beta$  - параметр упругого основания балки;  $E$  - модуль упругости материала;  $J_z$  - момент инерции поперечного сечения балки;  $k$  - коэффициент постели, который учитывает податливость упругого основания балки;  $q_{yc}$  - погонная нагрузка на ось балки.

Коэффициент постели для круглого трубопровода рассчитываем по зависимости

$$k = k_1 \cdot (0,5 \dots 2)R, \quad (11)$$

где  $R$  - наружный радиус трубы,  $k_1$  - коэффициент податливости материала основания трубопровода, который выбирается для соответствующего грунта береговой зоны из справочника [12].

Для упругого (винклерового) основания балки параметр  $\beta$  в формуле (9) зависит от геометрических характеристик сечения балки и коэффициента постели в виде [10]

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EJ_z}}. \quad (12)$$

Следует отметить, что внешняя нагрузка в этом расчетном случае во многом зависит от коэффициента постели, который может меняться в широких пределах, особенно в случае размыва грунта. Это обстоятельство отражается на значениях нагрузки, что может обуславливать снижение достоверности расчетов на прочность трубы. Вертикальная нагрузка в зависимости от коэффициента постели основания определяет прогиб трубы.

$$y = \frac{q_y}{2k}. \quad (13)$$

Во втором варианте расчета максимальный изгибающий момент в сечении трубопровода, как в середине пролета балки, расположенной на двух вертикальных опорах, определяется по известной зависимости [9, 10]. Эта расчетная схема может применяться в случае больших размывов грунта под трубопроводом по действием волновой нагрузки.

$$M_{max} = \frac{q_y L^2}{8}, \quad (14)$$

где  $L$  - расстояние между опорами трубопровода.

Напряжения в опасных сечениях трубопровода по первому и второму варианту определяются по формуле (1) а от действия внутреннего давления по формуле (2).

Для оценки принятых конструктивных решений для трубопроводов, размещенных в береговых зонах, которые могут подвергаться штормовым воздействиям различной интенсивности определяется запас прочности трубы для двух

вариантов расчета при действии различных параметрах волновой среды по отношению:

$$k_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_c} \quad (15)$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести материала трубопровода.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Выполним расчет трубопровода системы водоснабжения, размещенного в береговой зоне г. Алушты с участками наземного и надземного расположения. Трубопровод длиной 8,2 км выполнен из труб стальных бесшовных горячедеформированных по действующему ГОСТ 32528—2013 диаметром  $2R = 325$  мм и толщиной стенки  $\delta = 10$  мм. Материал сталь Ст2сп с пределом текучести  $\sigma_T = 216$  МПа.

Для расчета принимаем следующие исходные данные:  $r = 0,1525$  м – внутренний радиус трубы,  $R = 0,1625$  м – наружный радиус трубы, момент инерции сечения трубы  $J_z = 0,000126$  м<sup>4</sup>,  $p_a = 2,4$  МПа – макси-мальное давление внутри трубопровода. Модуль упругости материала трубы  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па. Плотности материалов  $\rho_B = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_M = 7870$  кг/м<sup>3</sup>. Общая погонная нагрузка  $q_y = 1487$  Н/м. Коэффициент пастели выбирается для гравия из справочных данных по сопротивлению материалов:  $k_1 = 10$  МН/м<sup>3</sup>. В нашем случае  $k = k_1 \cdot (0,5 \dots 2)R = 0,82 \dots 3,26$  МН/м<sup>2</sup>.

Максимальные напряжения от внутреннего давления в трубопроводе  $\sigma_N = 36,6$  МПа, что существенно меньше допускаемых напряжений. То есть в нормальных условиях эксплуатации при отсутствии волновой нагрузки параметры трубы полностью отвечают условиям ее прочности и устойчивости.

Рассмотрим максимально возможное волнение море в заданном районе моря, согласно данным справочника по режиму ветра и волнения в Черном и Балтийском морях - параметры его волнения:  $h = 9$  м – высота волны;  $\tau = 10$  с – период;  $\lambda = 180$  м – длина волны;  $\epsilon = 7$  м – гребень волны [8].

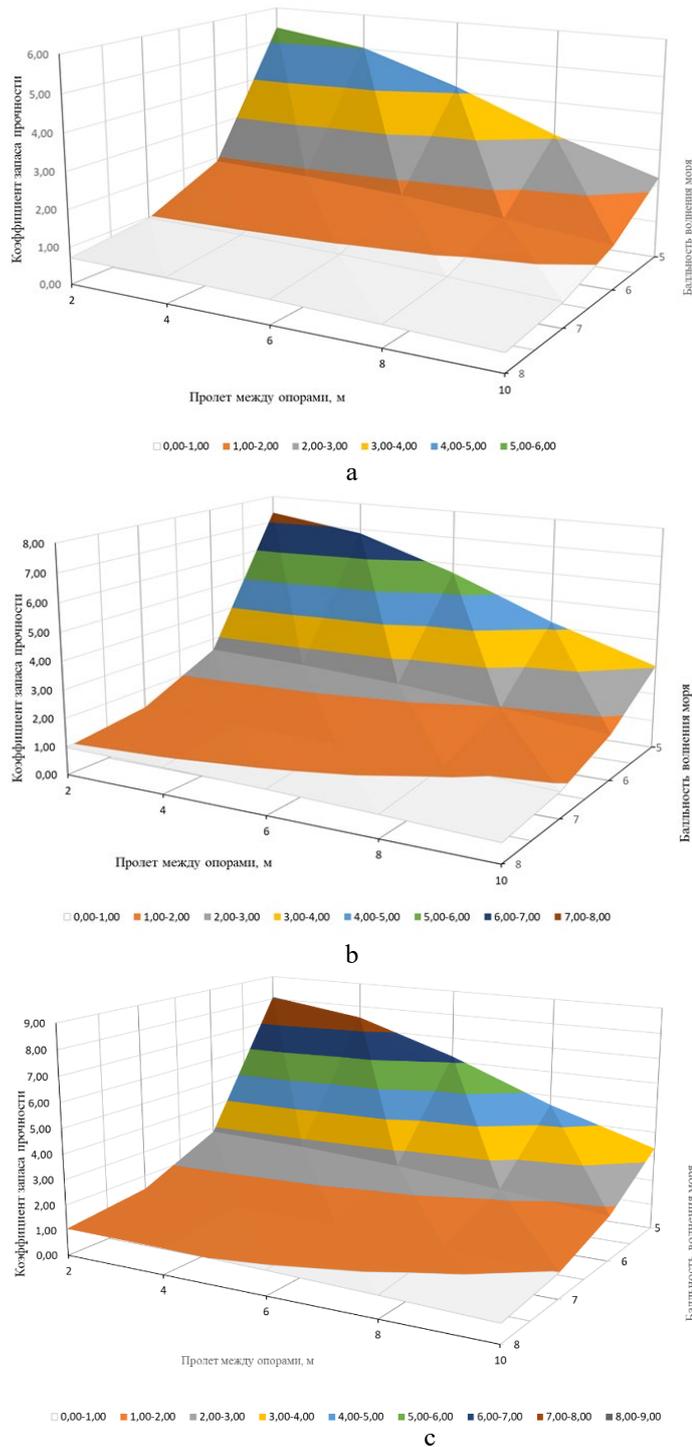
В первом варианте расчета прибрежного трубопровода при его «наземном» размещении, как трубы на упругом основании, максимальные напряжения в сечении трубы составляют  $\sigma_c = 78,6 \dots 121,7$  МПа. При действии максимальной волновой нагрузки повышение напряжений в трубе находится в пределах  $\sigma_y = 8 \dots 12$  МПа, то есть не оказывает существенного снижения ее прочности. Следует отметить, что при воздействии волновой нагрузки на трубопроводы, свободно размещенные на береговом грунте, происходит его размыв под трубой и трубопровод в этом случае необходимо рассматривать как размещенный на опорах, то есть по второму варианту расчета. Поэтому предпочтительным вариантом наземного расположения трубопровода является схема

укладки труб на грунт с предварительно подготовленным бетонным ложем и покрытием ее кожухом.

По второму варианту расчета трубопровода размещенного в береговой зоне на вертикальных опорах с различными пролетами в диапазоне  $L = 2, 4, 6, 8, 10$  м и при фиксированных уровнях волнения моря 5, 6, 7, 8 баллов определены коэффициенты запаса прочности труб, зависимости которых представлены на рис. 3. Для рассмотренного надземного трубопровода проанализированы варианты замены его материала на углеродистые стали 35 с пределом текучести  $\sigma_T = 294$  МПа и стали 45 с пределом текучести  $\sigma_T = 323$  МПа. в соответствии с ГОСТ 32528—2013.

Анализ представленных результатов по второму варианту расчета показывает, что при надземном размещении пролеты опор и уровни волнения оказывают существенное влияние на прочность трубопровода. Изменение пролета между опорами приводит к увеличению суммарных напряжений в трубопроводе в меньшей степени, чем увеличение волновой нагрузки. При принятом материале труб и волновой нагрузке при штормах в 7 и 8 баллов вне зависимости от величины пролета между опорами прочность рассмотренного трубопровода не обеспечивается. Для обеспечения прочности надземного трубопровода в береговой зоне необходимо выбор пролета между его опорами осуществлять с учетом допускаемого уровня волновой нагрузки, а также учитывать их при подборе материала трубопровода. При увеличении волновой нагрузки с 5 до 8 баллов максимальные напряжения в опасных сечениях трубопровода размещенного на опорах в диапазоне пролетов 2...10 метров увеличиваются в 4,6...7,6 раз. При этом большое увеличение максимальных напряжений происходит при меньшем пролете опор. При увеличении пролета между опорами с 2 до 10 метров максимальные напряжения в опасных сечениях трубопровода размещенного на опорах в диапазоне волновой нагрузки 5...8 баллов увеличиваются в 1,5...2,4 раза. При этом большое увеличение максимальных напряжений происходит при большей волновой нагрузке.

Анализ зависимостей запаса прочности при действии различных параметрах волновой среды представленных на рис. 3 показал, что при надземном размещении с пролетами опор в диапазоне  $L = 2 \dots 6$  м только применение в качестве материала трубы углеродистой стали 45 обеспечивает прочность трубопровода для 8-ми балльной волновой нагрузке даже при сохранении внутреннего рабочего давления. Для рассмотренного трубопровода увеличение пролета опор более 6 м не обеспечивает его прочности при волновой нагрузке более 8-ми баллов при сохранении внутреннего рабочего давления.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента запаса прочности трубопровода, размещенного в береговой зоне на вертикальных опорах с различными пролетами при фиксированных уровнях волнения моря для материалов трубы: а - Сталь Ст2сп; б – сталь 35; в – сталь 45.

**Fig. 3.** Dependence of the safety factor of a pipeline placed in the coastal zone on vertical supports with different spans at fixed sea wave levels for pipe materials: а - Ст2сп steel; б - steel 34; в - steel 45.

Следует отметить, что суммарные напряжения в сечении трубы, свободно опирающихся на грунт, при аналогичной волновой нагрузке обеспечивают достаточный запас прочности  $k_T=1,8...4,4$  при изготовлении из материала Сталь Ст2сп., для материала Сталь 35 –  $2,45...5,98$ , а для Сталь 45 –  $2,68...6,56$ .

Таким образом, наиболее опасным состоянием трубопроводов СВВ, размещенных в береговой зоне является размещение труб на вертикальных опорах, когда они подвергаются динамическому удару набегающей волны. Поэтому предпочтительным вариантом наземного расположения трубопровода является схема укладки труб на грунт с

предварительно подготовленным бетонным ложем и накрытием ее кожухом.

Крымский полуостров является важным туристским и рекреационным регионом Российской Федерации благодаря особенностям климата, рельефа, флоры и фауны, уникальным памятникам многовековой истории, культуры и природным объектам. При этом, полуостров ввиду ограниченности водных ресурсов относится к вододефицитным регионам страны [3, 10]. В связи со стремительным возрастанием антропогенной нагрузки на приморские урбанизированные территории в настоящее время возникает необходимость в обеспечении экологической безопасности таких территорий, которые должны обеспечивать и сохранять эффективную рекреацию населения [12]. Важным способом улучшения экологической безопасности рекреационных прибрежных территорий является экологически безопасное проектирование объектов жизнеобеспечения. Актуальными являются проблемы влияния на эти системы природно-климатических факторов, вследствие повсеместного увеличения антропогенной нагрузки на водные ресурсы, а также по причине роста неопределенностей, связанных с изменениями климата.

Устойчивое водопользование во всем мире в настоящее время становится ключевой проблемой, поскольку растущее антропогенное воздействие, многие природные процессы, оказывает сильное влияние на пригодные для использования водные ресурсы, что в некоторых случаях приводит к необходимости размещения трубопроводов СВВ в береговых зонах. Не менее важными являются проблемы, которые связаны с тем, что в 21-ом веке изменилась «стационарность», как основополагающая концепция водопользования, согласно которой гидрологические системы изменяются и колеблются в пределах известного набора границ на основе многолетних наблюдений [13]. Поэтому события прошлого перестают быть надежным проводником в будущее для его прогнозирования. С другой стороны, следует предположить, что изменилась не «стационарность» гидрологических процессов, а выявилось увеличение изменчивости в связи с увеличением периода наблюдений и влияние дополнительных факторов, которые ранее не наблюдались или не учитывались [1].

Наличие трубопроводов, размещенных в береговых зонах, которые могут подвергаться штормовым воздействиям различной интенсивности влияет на устойчивость и работоспособность СВВ, а также на экологическое состояние береговых зон [14]. В связи с возрастанием антропогенной нагрузки на урбанизированных территориях приморских городов в настоящее время возникает необходимость с одной стороны в обеспечении требований действующих СанПиН для жителей и отдыхающих, а с другой стороны – техниче

сакую безопасности таких территорий, которые должны гарантировать эффективную рекреацию населения. Поэтому рекреационные комплексы приморских территорий Крымского полуострова тесно связаны с характеристиками экологического состояния окружающей среды, для которой необходимо учитывать условия обеспечения устойчивости действующих инженерных систем, в том числе обеспечивать экологическую безопасность территории [15, 16, 17].

С учетом вышеизложенного, проектирование и эксплуатацию трубопроводов СВВ, размещенных в береговых зонах необходимо выполнять с учетом климатических условий региона, в том числе параметров волнового нагружения. Это позволит применить конструктивные решения и выбрать материалы, которые будут наиболее устойчивы к этим дополнительным внешним воздействиям и обеспечат надежную эксплуатацию СВВ, а также безопасное экологическое состояние в береговых зонах рекреационных районов.

## ВЫВОДЫ

Особенностью СВВ приморских городов является наличие трубопроводов, расположенных в береговой зоне, которые подвержены воздействию штормов различной интенсивности, вызывающих дополнительные динамические нагрузки. Последние в зависимости от величины набегающих волн могут привести к разрушению труб и потере их работоспособного состояния. При оценке устойчивости и надёжности СВВ приморских городов необходимо учитывать эти особенности. В действующих нормативных документах отсутствуют рекомендации по расчету трубопроводов СВВ, размещенных в береговой зоне, которые могут подвергаться штормовым воздействиям.

На основе анализа условий эксплуатации трубопроводов СВВ, размещенных в береговой зоне, предложены две расчетные схемы, которые учитывают особенности их наземного и надземного расположения и нагружения. В первой наземной расчетной схеме, часть трубопровода уложена непосредственно на грунт, который моделируется упругим (винклеровым) основанием. Во второй надземной схеме трубопровод располагается на вертикальных опорах. Для этих двух расчетных схем представлены расчетные зависимости для оценки прочности трубопроводов

Выполнен расчет трубопровода системы водоснабжения, размещенного в береговой зоне г. Алушта и проведен анализ полученных результатов. Показано, что при наземном расположении трубопровода действие максимальной волновой нагрузки не оказывает существенного снижения его прочности, а также обеспечивают достаточный запас прочности. Установлено, что при волновой нагрузке штормов в 7 и 8 баллов вне зависимости от величины пролета между опорами применение для

надземного трубопровода материала труб сталь Ст2сп и сталь 35 их запас прочности не обеспечивает. Чтобы гарантировать прочность и долговечность надземного трубопровода в прибрежной зоне, необходимо осуществлять выбор пролета между его опорами с учетом допускаемого уровня волновой нагрузки, а также учитывать их при подборе материала трубопровода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Milly C. and etc. Stationarity is dead: Whither Water Management? / C. D. Milly, J. Betancourt, M. Falkenmark, R. M. Hirsch, Z. W. Kundzewicz, D. P. Lettenmaier// Science, 2008: Vol. 319, Issue 5863, pp. 573-574.

2. Николенко И.В. Выбор метода оценки устойчивости систем водоснабжения с водохранилищами естественного стока Крымского полуострова /И.В. Николенко, Н.С. Мельникова, Э.А. Каримов // Строительство и техногенная безопасность Симферополь, 2023. вып. 30 (82). С. 103-115.

3. Николенко И.В., Сколубович Ю.Л., Мельникова Н.С. Методика количественной оценки устойчивости систем водоснабжения // Известия вузов. Строительство. 2025. № 3. С. 41–51.

4. Горячкин, Ю. Н. Штормовой ветроволновой режим у черноморского побережья Крыма / Ю. Н. Горячкин, Л. Н. Репетин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — 2009. — Вып. 19. — С. 56—69.

5. В Крыму закончился «шторм века». Электронный ресурс: режим доступа: [https://lenta.ru/news/2023/11/27/storm\\_crimea\\_konets/](https://lenta.ru/news/2023/11/27/storm_crimea_konets/) (дата обращения 03.03.2025 г.)

6. Горячкин, Ю.Н. Проблемы природопользования в береговой зоне крымского полуострова / Ю.Н. Горячкин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. - 2015. - № 1. - С. 5-11.

7. Горячкин, Ю. Н. Штормовой ветроволновой режим у черноморского побережья Крыма [Текст] / Ю. Н. Горячкин, Л. Н. Репетин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — 2009. — Вып. 19. — С. 56—69.

8. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей: Справочник// СПб: Российский морской регистр судоходства, 2006. – 451 с.

9. Николенко И. В., Чемодуров В.Т. К обоснованию методологии расчета трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения, размещенных в береговой зоне// Известия вузов. Строительство. 2025. №8 (800), С. 129 – 140.

10. Чемодуров В.Т. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. //В.Т. Чемодуров, С.Г. Ажермачев, К.С. Пшеничная-Ажермачева//

Учебное пособие. М., «Инфра-Инженерия», 2022 г. 198 с.

11. Николенко И.В. Устойчивость систем водоснабжения Крымского полуострова в условиях негативного действия природных и техногенных явлений/ И.В. Николенко И.В., Э.А. Каримов, Н.С. Мельникова, О.В. Невельский// Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. № 3 (43). С. 108-119.

12. Коробко В.И., Коробко Л.В. Строительная механика стержневых систем. - М.: АСВ. 2007. - 510 с.

13. Ветрова, Н.М. Проблемы зон экологического риска приморских территорий / Н.М. Ветрова, Т.А. Иваненко, Э.Э. Меннанов, А.А. Гайсарова // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии — 2019. — № 2 (26). — С. 60—76.

14. S. Postel. Replenish. The Virtuous Cycle of Water and Prosperity. – NY, Island Press, 2017 – 339 p.

15. Садыкова, Г.Э. Особенности оценки природных рисков прибрежных территорий / Г.Э. Садыкова, Т.А. Иваненко, З.Д. Сапронова // Строительство и техногенная безопасность. — 2011. — Вып. 39. — С. 72—79

16. Ветрова, Н.М. Обеспечение экологической безопасности рекреационного региона [Текст] / Н.М. Ветрова, С.И. Федоркин // Симферополь.: ИТ «АРИАЛ». — 2012. — 294 с.

17. Ветрова, Н.М. Проблемы зон экологического риска приморских территорий [Текст] / Н.М. Ветрова, Т.А. Иваненко, Э.Э. Меннанов, А.А. Гайсарова // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии — 2019. — № 2 (26). — С. 60—76.

## REFERENCES

1. Milly C. and etc. Stationarity is dead: Whither Water Management? / C. D. Milly, J. Betancourt, M. Falkenmark, R. M. Hirsch, Z. W. Kundzewicz, D. P. Lettenmaier// Science, 2008: Vol. 319, Issue 5863, pp. 573-574.

2. Nikolenko I.V. The choice of a method for assessing the stability of water supply systems with reservoirs of natural runoff of the Crimean Peninsula /I.V. Nikolenko, N.S. Melnikova, E.A. Karimov // Construction and technogenic safety Simferopol, 2023. issue 30 (82). pp. 103-115.

3. Nikolenko I.V., Skolubovich Yu.L. Melnikova N.S. Methodology of quantitative assessment of stability of water supply systems // Izvestiya vuzov. Construction. 2025. No. 3. pp. 41-51.

4. Goryachkin, Yu. N. Stormy wind wave regime off the Black Sea coast of Crimea / Yu. N. Goryachkin, L. N. Repetin // Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources. — 2009. — Issue 19. — pp. 56-69.

5. The "storm of the century" has ended in Crimea. Electronic resource: access mode: [https://lenta.ru/news/2023/11/27/storm\\_crimea\\_konets/](https://lenta.ru/news/2023/11/27/storm_crimea_konets/) (date of request 03.03.2025)

6. Goryachkin, Yu.N. Problems of nature management in the coastal zone of the Crimean peninsula / Yu.N. Goryachkin // Environmental safety of the coastal and offshore zones of the sea. - 2015. - No. 1. - pp. 5-11.

7. Goryachkin, Yu. N. Stormy Wind-Wave Regime off the Black Sea Coast of Crimea [Text] / Yu. N. Goryachkin, L. N. Repetin // Environmental Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources. — 2009. — Issue 19. — Pp. 56—69.

8. Reference data on the wind and wave regime of the Baltic, North, Black, Azov, and Mediterranean Seas: Handbook// SPb: Russian Maritime Register of Shipping, 2006. – 451 p.

9. Nikolenko I. V., Chemodurov V.T. To substantiation of the methodology of calculation of pipelines of water supply and sanitation systems placed in the coastal zone// Izvestiya vuzov. Construction. 2025. No. 8 (800), pp. 129 – 140.

10. Chemodurov V.T. Fundamentals of the Theory of Elasticity, Plasticity, and Creep. //V.T. Chemodurov, S.G. Azermachev, K.S. Pshenichnaya-Azermacheva// Textbook. Moscow, Infra-Engineering, 2022, 198 p.

11. Nikolenko I.V. Sustainability of the Crimean Peninsula Water Supply Systems under the Negative Influence of Natural and Man-Made Phenomena/ I.V.

Nikolenko, E.A. Karimov, N.S. Melnikova, O.V. Nevelsky// Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies. 2023. No. 3 (43). Pp. 108-119.

12. Korobko V.I., Korobko L.V. Structural Mechanics of Rod Systems. Moscow: ASV. 2007. 510 p.

13. Vetrova, N.M. Problems of Environmental Risk Zones in Seaside Territories / N.M. Vetrova, T.A. Ivanenko, E.E. Mennanov, A.A. Gaisarova // Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies — 2019. — No. 2 (26). — Pp. 60—76.

14. S. Postel. Replenish. The Virtuous Cycle of Water and Prosperity. – NY, Island Press, 2017 – 339 p.

15. Sadykova, G.E. Features of the assessment of natural risks of coastal territories / G.E. Sadykova, T.A. Ivanenko, Z.D. Saprionova // Construction and technogenic safety. – 2011. – Issue 39. – P. 72-79

16. Vetrova, N.M. Ensuring Environmental Safety in a Recreational Region [Text] / N.M. Vetrova, S.I. Fedorkin // Simferopol: IT "ARIAL". — 2012. — 294 p.

17. Vetrova, N.M. Problems of Environmental Risk Zones in Coastal Territories [Text] / N.M. Vetrova, T.A. Ivanenko, E.E. Mennanov, and A.A. Gaisarova // Biosphere Compatibility: Human, Region, and Technologies — 2019. — No. 2 (26). — Pp. 60—76.

## THE ANALYSIS OF PIPELINE LOADING FEATURES OF WATER SUPPLY AND WASTEWATER DISTRIBUTION SYSTEMS IN THE COASTAL ZONE TO SUBSTANTIATE THEIR CALCULATION METHODS

Nikolenko<sup>1</sup> I.V., Chemodurov<sup>2</sup> V.T., Bekirova<sup>3</sup> Z.R.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University,  
Institute of Biochemical Technologies, Ecology and Pharmacy<sup>1,3</sup>,  
Institute "Academy of Construction and Architecture"<sup>2</sup>,  
181, Kievskaya str., Simferopol, 295050, Russian Federation

**Abstract:** The article discusses the features of loading pipelines of water supply and sanitation systems in seaside cities located in coastal zones. An analysis of the operating conditions of such pipelines on the southern coast of Crimea has shown that accidents related to their destruction often occur as a result of storm impacts. It has been demonstrated that during storms, pipelines are subjected to additional loads, which, depending on their intensity, can lead to destruction and loss of the operational state of water supply and sanitation systems, as well as violate environmental safety requirements in coastal zones. The current regulatory documents do not provide recommendations for calculating pipelines of water supply and sanitation systems located in the coastal zone, which may be exposed to storm effects. To assess the strength of such pipelines, we propose calculation equations for two loading schemes. The calculation of the water supply system pipeline located in the coastal zone of the city of Alushta was performed, and the results were analyzed.

**Subject of research.** The nature of loading of pipelines of water supply and sanitation systems in the coastal zone, taking into account the impact of wave loads.

**Materials and methods.** Based on the analysis of loading features, two calculation schemes are proposed, which are encountered in the practice of operation of pipelines of water supply and sanitation systems located in the coastal zone. The first calculation option is when a part of the pipeline is laid directly on the ground, in the second calculation option – the pipeline is located on vertical supports.

**Results.** It has been established that when the pipeline is located above ground, the span of the supports and the level of wave action have a significant impact on the pipeline's strength. Changing the span between supports leads to an increase in the total stresses in the pipeline to a lesser extent than an increase in the wave load. With the chosen pipe material and the wave load during storms of 7 and 8 points, regardless of the span between supports, the pipeline discussed in the article does not meet the required strength.

**Conclusions.** When assessing the stability and reliability of water supply and sanitation systems in coastal cities located in coastal zones, it is necessary to take into account the specific features of loading. To ensure the strength and durability of above-ground pipelines in coastal zones, it is necessary to select the span between their supports based on the permissible level of wave load, and to consider these factors when selecting the pipeline material. When pipelines are located above ground in coastal zones, the maximum wave load does not significantly affect their strength, providing sufficient safety margins.

**Key words:** water supply system, pipeline, coastal zone, wave load, elastic base, support, strength, safety factor