

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

DOI: 10.15593/2409-5125/2020.04.10

УДК 628.237

А.М. Телятникова

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В КАМЕРЕ ГАШЕНИЯ НАПОРА

При транспортировке сточных вод в канализационных сетях активно протекают процессы образования и выделения сероводорода. Данное явление влечет за собой множество последствий, в том числе и возможное формирование зон с неприятной санитарно-экологической обстановкой рядом с колодцами. Во избежание подобных последствий необходимо заранее проводить оценку потенциала сооружения к газовой выделению. В формировании методики оценки воздействия значительно может помочь компьютерное моделирование в пакетах конечно-элементного анализа. В связи с этим целью исследования стала разработка и оптимизация математической модели, соответствующей реальному объекту камеры гашения напора (КГН), для определения его основных гидро- и аэродинамических характеристик. Моделирование КГН выполнялось в пакете ANSYS CFX, реализующем метод вычислительного гидродинамического анализа CFD (Computational Fluid Dynamics). Проведены работы по изучению влияния конфигураций сеточного поля и мнимого шага по времени на получаемые результаты. На основании анализа данных подобраны наиболее оптимальные параметры моделирования. Выполнена качественная и количественная оценка результатов гидродинамики модели. Определены основные тенденции распространения сероводорода внутри моделируемого объекта. Проведенное исследование позволило качественно улучшить получаемые результаты, а также оптимизировать характеристики вычислительного процесса. В дальнейшем разработанная модель может быть использована для выявления количественных и пространственных закономерностей распределения газа внутри сооружения и за его пределами при различных характеристиках входящего потока. Данные моделирования также могут быть положены в основу методики оценки влияния сооружения системы канализации на окружающую среду.

Ключевые слова: камера гашения напора (КГН), канализационная сеть, канализационные газы, сероводород, санитарно-экологическая обстановка, компьютерное моделирование, ANSYS CFX.

Введение. Явление газообразования и последующего массопереноса в системах канализации широко известно и достаточно хорошо изучено. Наиболее распространенным в хозяйственно-бытовых системах газом яв-

ляется сероводород. Он же чаще всего становится основной причиной негативных последствий процесса газовой выделенной в канализации. Образование сероводорода в сточной воде обусловлено жизнедеятельностью сульфатредуцирующих бактерий, присутствующих в закрепившейся на стенках коллекторов биопленке. Продуктом жизнедеятельности данного вида бактерий являются сульфиды, которые, в свою очередь, попадая в сточную воду, восстанавливаются до дигидросульфида H_2S . В данной форме соединение серы способно множество раз покинуть водную среду и растворяться в ней обратно. Подробному изучению процесса массопереноса через границу раздела фаз жидкость – газ посвящено множество исследований [1–3]. Особый интерес в этой области направлен на изучение зависимости коэффициента массопереноса от различных параметров [4–6]. Попадая в воздушную среду, газ распространяется внутри элементов канализационной системы, а также частично покидает ее, выходя в атмосферный воздух через неплотности, щели и элементы системы вентиляции.

Явление образования и выделения газа в системе канализации влечет за собой множество последствий. Чаще всего, как негативный результат данного процесса, упоминается газовая коррозия конструктивных элементов сетей и сооружений [7, 8]. Именно этой проблеме и методам ее решения к настоящему моменту посвящена большая часть исследований, связанных с вопросом массообмена в канализации [9, 10]. Также значительное внимание в научной среде уделяется вопросу ароматического загрязнения воздуха селитебных территорий канализационным сероводородом [11]. Данный вид загрязнения крайне неблагоприятно сказывается на комфортности городской среды и общем самочувствии горожан [12]. Для улучшения ситуации по данной проблеме активно ведутся разработки в области газоочистки [13] и совершенствования систем мониторинга [14, 15]. Последствия газовой выделенной в виде санитарной и экологической опасности самих сетей и сооружений, а также прилегающих к ним территорий упоминаются реже, но не становятся от этого менее значимыми. В больших концентрациях канализационные газы приводят к отравлениям разной степени тяжести и летальным исходам [1, 16], в меньших – к раздражению слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей [17–18]. В мировой практике существуют примеры, подтверждающие, что негативному воздействию от канализационных газов могут быть подвержены не только локальные участки местности, но и целые районы [19]. В связи с этим можно сказать об особой актуальности вопроса санитарно-экологической безопасности вблизи сетей и сооружений и его некоторой недооцененности.

Особенно отметим, что современное российское законодательство предусматривает учет, разработку соответствующих проектов и принятие защитных мер для всех источников, выделяющих загрязняющие атмосферные вещества¹, к которым относится и сероводород². Фактически данное требование выполняется только в отношении крупных техногенных объектов, а методики для расчета оценки влияния официально установлены лишь для промышленных предприятий³. Для объектов системы канализации такие методики отсутствуют, за исключением рекомендаций, разработанных ОАО «НИИ Атмосфера» для очистных сооружений⁴.

Хорошим методом для разработки подобных рекомендаций по оценке воздействия может стать компьютерное моделирование в пакетах конечно-элементного анализа. Оно может помочь установить балансовые зависимости между количеством газа внутри сооружения и во внешней среде, а также оценить его потенциально возможные для выделения количества. Но для этого необходимо понимать процессы, происходящие в самом сооружении. Поэтому целью данного исследования стала разработка и оптимизация математической модели, соответствующей реальному объекту системы канализации, для определения его основных гидро- и аэродинамических характеристик. Натурным прототипом для моделирования в данной работе стала камера гашения напора (КГН), располагающаяся в г. Череповце Вологодской области. Сооружения типа КГН представляют особый интерес в вопросе газовыделения из-за сочетания в себе двух участков с различными режимами движения. Особая подверженность камер к заполнению канализационными газами подтверждается многими статистическими исследованиями [20, 21].

Важно отметить, что работы по изучению влияния различных параметров системы на интенсивность образования и эмиссии газов достаточно активно ведутся в современном научном сообществе. Имеются исследования, где устанавливаются зависимости количества образовавшегося и выделившегося газа от гидравлических характеристик потока [22, 23],

¹ ГОСТ 17.2.1.04–77. Охрана природы. Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения, промышленные выбросы. Термины и определения. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 32 с.

² Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 июля 2015 г. № 1316-р. 21 с.

³ ГОСТ 17.2.3.02–2014. Правила установления допустимых выбросов загрязняющих веществ промышленными предприятиями. М.: Стандартинформ, 2018. 22 с.

⁴ Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух. СПб.: НИИ Атмосфера, 2012. 224 с.

аэродинамических особенностей работы сети [24], физических и климатических параметров [25–27], а также состава сточной жидкости [3, 28, 29]. Данные работы рассматривают как сети целиком, так и участки сетей, но среди них не встречается узконаправленного изучения КГН.

Материалы и методы. Для моделирования КГН был выбран программный продукт ANSYS CFX, реализующий метод вычислительного гидродинамического анализа CFD (Computational Fluid Dynamics). Моделирование в данном пакете включает в себя несколько основных стадий: конструирование расчетной области (*Geometry*); генерацию расчетной сетки (*Mesh*); установку начальных, граничных условий, а также прочих характеристик проведения расчета (*Setup*); непосредственно сам расчет (*Solution*). Отображение результатов моделирования производится в разделе *Results*.

Поскольку сфера интересов моделирования КГН лежит в выявлении ее аэро- и гидродинамических параметров, конструируемой на первом этапе расчетной областью является внутреннее воздушное пространство сооружения. Конструктивные особенности камеры, располагающейся в г. Череповце, представлены на рис. 1. Разработанная геометрия будущей модели в полной мере соответствует своему натурному прототипу. Основные параметры сконструированной расчетной области следующие: $d_{inl} = 0,71$ м, $l_{inl} = 3$ м, $i_{inl} = 0,026$, $h_{inl} = 1,995$ м, $a_{inl} = 1,7$ м, $d_{out} = 1$ м, $l_{out} = 3$ м, $i_{out} = 0,0016$, $h_{out} = 0,7$ м, $H = 3,5$ м, $a = 4,4$ м, $b = 4,0$ м, $d_{open} = 0,7$ м, $h_{open} = 0,44$ м, $a_{open} = 2$ м, $b_{open} = 0,65$ м. Важно отметить, что действующие сооружение установлено на сети ниже дюкера через р. Шексну, на расстоянии 74,3 м от приемной камеры дюкера. Протяженность напорного участка от канализационной насосной станции до КГН составляет около 2 км. Со спецификой установки сооружения связан восходящий к камере уклон напорных трубопроводов.

Далее производилась генерация расчетной сетки. Стандартный модуль *Mesh* может конструировать сетку различной конфигурации. Проведение пробных расчетов с различными типами сеток выявило лучшую математическую сходимость при заполнении всей расчетной области тетраэдрами. Ключевое значение в моделировании также имеют величины максимального размера ячеек сетки на поверхности (*Max Face Size*) и их дальнейшего прироста в объеме (*Growth Rate*). Особое внимание необходимо уделять пристеночным областям потока. В продольном профиле пристеночных зон принято выделять буферный и вязкий (ламинарный) подслой.

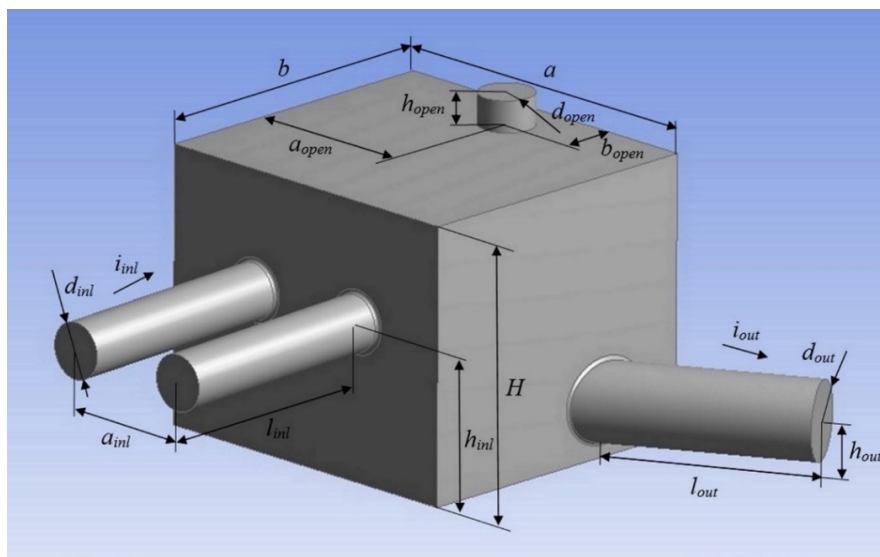


Рис. 1. Конструкция КГН и ее основные параметры

При разработке гидродинамической модели очень важно контролировать, чтобы первый узел расчетной сетки не попал в буферный слой, где функция скорости развивается по логарифмическому закону, в противном случае это приведет к значительным погрешностям расчета. Для контроля данного факта в ANSYS CFX применяется безразмерная величина $YPlus$. По своему смыслу величина $YPlus$ близка к числу Рейнольдса и для k - ϵ -моделей должна составлять от 30 до 300. Из-за малых размеров ламинарной области ее достаточно сложно охватить общим сеточным полем, поэтому применяется функция дополнительного измельчения *Inflation*, определяющая: общую толщину области измельчения (*Maximum Total Thickness*) или размер первого слоя (*First Layer Thickness*); количество слоев в пристеночной области (*Number of Layers*) и их прирост (*Growth Rate Inflation*). Отметим, что одним из основных пунктов эффективного моделирования является не количество узлов и ячеек, а качество сконструированной сетки. Именно оно прямым образом влияет на математическую сходимость модели, а соответственно, и на вычисляемые аэро- и гидродинамические параметры. Основными качественными характеристиками сетки выступают: коэффициент пропорциональности (*Aspect Ratio*), ортогональность (*Orthogonality Quality*) и асимметричность (*Skewness*) сетки, коэффициент сеточного роста (*Mesh Expansion Factor*). *Aspect Ratio* представляет собой соотношение максимальной и минимальной площадей ячейки и не должен превышать 100. *Orthogonality Quality*

характеризует правильность фигуры ячейки, то, насколько ее углы близки к идеальной величине (60° для тетраэдра). Данная величина должна стремиться к 1. *Skewness*, по сути, имеет противоположный ортогональности смысл и свидетельствует об искривлениях фигуры. Данная величина должна стремиться к 0. Проблемы с достижением рекомендуемых значений этих трех параметров чаще всего возникают в пристеночных областях, где реализована функция *Inflation*. Решением данной проблемы может стать локальное сгущение сетки на поверхности при помощи функции *Sizing*. *Mesh Expansion Factor* – это отношение максимального и минимального расстояния до центра масс соседних элементов. Данная величина должна быть менее 20. Достижение хороших показателей по данному фактору возможно при уменьшении *Grow Rate* как для сетки в целом, так и для зон с применением *Inflation*.

Для оптимизации разрабатываемой модели в рамках данной работы были проведены испытания с различными исходными параметрами сеток. Общие характеристики испытываемых вариантов представлены в таблице.

Параметры испытываемых сеток

Параметр	Номер образца												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Максимальный размер ячейки на поверхности, мм / Max Face Size, mm	40	35	30	25	35	35	35	35	35	35	30	35	35–20
Скорость прироста / Growth Rate	1,20	1,20	1,20	1,20	1,2	1,20	1,20	1,17	1,09	1,10	1,05	1,10	1,10
Измельчение / Inflation													
Максимальная общая толщина, мм / Maximum Total Thickness, mm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	35	35–30
Толщина первого слоя, мм / First Layer Thickness, mm	–	–	–	–	2,5–10	1,5–3	1–3	1,2–3	1,5–3	1,2–3	1,2–2,5	–	–
Число слоев, шт / Number of Layers, pc	–	–	–	–	7	7	7	7	10	10	10	10	15
Скорость прироста в зоне измельчения / Growth Rate Inflation	–	–	–	–	1,060–1,336	1,296–1,455	1,296–1,556	1,296–1,51	1,189–1,284	1,189–1,316	1,193–1,294	1,2	1,050–1,200

Окончание таблицы

Параметр	Номер образца												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Качественные характеристики													
Коэффициент пропорциональности / Aspect Ratio	6	6	6	6	15	39	59	47	40	50	43	52	84
Угол ортогональности, град / Orthogonality Angle, deg	43,6	45,8	45,0	43,2	32,4	31,7	31,9	32	30,6	30,7	25,7	32,5	25,8
Коэффициент сеточного роста / Mesh Expansion Factor	12	15	16	14	18	20	20	17	16	15	18	12	18

*Примечание. Формирование пристеночных зон измельчения для всех испытываемых вариантов выполнялось на поверхностях контакта жидкости с твердой стенкой (подводящие и отводящий трубопроводы, стенки и дно колодца).

Далее расчетная область со сконструированной сеткой импортировалась в раздел *Setup*, где задавались основные параметры моделирования. Внутри расчетной области определялось наличие трех веществ: воды (*Water*), воздуха (*Air*) и газа сероводорода (*Gas*). При этом *Water* и *Air* были определены как сплошные среды (*Continuous Fluid*), а *Gas* – как дисперсная среда (*Dispersed Fluid*) со средним диаметром пузырька 1 мм. Для пар сред *Air/Gas* и *Water/Gas* была задана модель межфазной передачи *Particle Model*, а для пары *Air/Water* – модель со свободной поверхностью (*Free Surface*). Для воссоздания гидродинамических процессов внутри КГН была использована модель турбулентности *k-Epsilon*. Данная модель в полной мере удовлетворяет задачам данного исследования и является хорошим компромиссом с точки зрения надежности и точности. Термодинамически модель КГН была определена как изотермическая с температурой, равной 15 °С, что соответствует ее величине в реальных сетях [22]. Кроме того, все процессы внутри КГН происходили под постоянным давлением (*Reference Pressure*), равным атмосферному.

На рис. 2 представлено наглядное отображение граничных условий, устанавливаемых для моделирования. В начальный момент времени в расчетной области присутствует только воздух. Далее в камеру по двум трубопроводам поступает смесь сточной жидкости и газа. Согласно данным МУП «Водоканал» г. Череповца, в настоящее время КГН работает с производительностью 800 м³/ч. Количество сероводорода в сточной воде было принято в соответствии с статистическими данными для городских

сетей по сульфидам [30] с учетом их дальнейшего процентного пересчета на сероводород⁵. С учетом специфики ввода данных в комплексе ANSYS CFX, на граничных условиях входа *Inlet_1* и *Inlet_2* для выполнения перечисленных условий был задан суммарный расход смеси, равный 222 кг/с, и долевое соотношение количеств *Gas* и *Water* в ней 0,03 и 0,97 соответственно. На границах выхода (*Outlet*) и открытого пространства люка (*Open*) определялось нулевое избыточное давление и присутствие в начальный момент времени только фазы *Air*. Для поверхностей расчетной области, контактирующих с конструктивными элементами сооружения, были определены граничные условия *Wall*, позволяющие задать шероховатость материала. Согласно данным МУП «Водоканал» г. Череповца материалом труб служит полиэтилен (*Wall_PE*), сам колодец КГН выполнен из железобетона (*Wall_GB*).

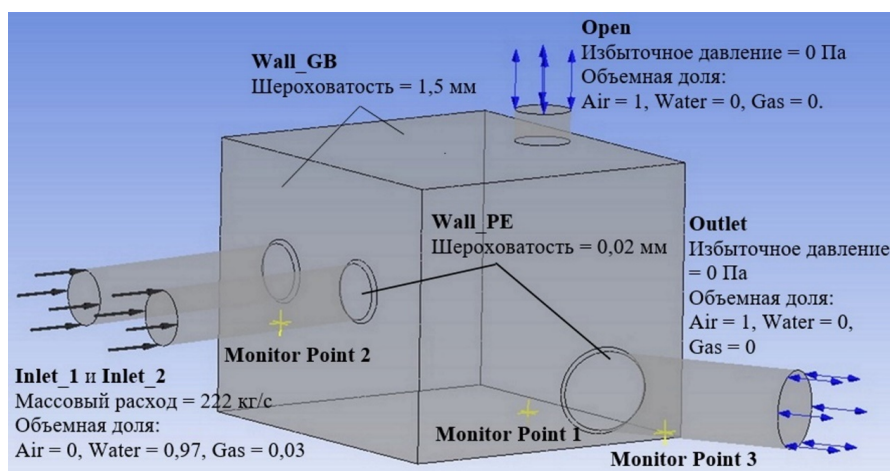


Рис. 2. Граничные условия модели КГН

Для реализации основной задачи данного исследования по контролю аэро- и гидродинамических параметров хорошо подходит решение в условиях стационарного состояния (*Steady State*). Данный подход к решению задачи позволил значительно сократить затрачиваемые на расчет вычислительные ресурсы и время. Поскольку задача *Steady State* решается в условиях переменных состояний, не меняющихся во времени, то для ее решения необходимо задать так называемый мнимый шаг по времени (*Timescale*). Данный параметр также очень важен при моделировании, так

⁵ РД 52.24.450–2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-n-фенилендиамином. Ростов н/Д: Росгидромет, ГУ ГХИ, 2010. 44 с.

как прямым образом оказывает воздействие на математическую сходимость задачи. Также в настройках процессора (*Solver Control*) определялось автоматическое завершение решения, когда уровни средних невязок (*RMS Residual*) значений масс, моментов и кинетической турбулентной энергии достигнут величин менее 10^{-4} , а общие дисбалансы (*Imbalance*) в системе для всех фракций составят менее 1 %. Для контроля получаемого решения были использованы мониторы (*Monitor Point*), отображенные на рис. 2. Выход величин скорости потока, фиксировавшихся в них, на постоянный уровень свидетельствует о стабильности получаемого решения.

Результаты исследования. Проведение сеточных исследований позволило оптимизировать работу модели и значительно уточнить формируемую программой аэро- и гидродинамическую картину. На первом этапе испытаний осуществлялась проверка образцов сетки без дополнительного пристеночного слоя (образцы № 1–4). Наилучшие результаты моделирования достигались, когда максимальный размер ячейки на поверхности (*Max Face Size*) составлял от 0,035 м (образец № 2) до 0,030 м (образец № 3). Снижение размерности сетки ниже указанных величин не давало существенных улучшений, при этом в значительной степени возрастало затрачиваемое на расчет время. Увеличение размера ячейки также имело отрицательные тенденции и приводило к получению грубых результатов с неприемлемыми величинами невязок. Далее для наиболее перспективного образца № 2 производилось формирование пристеночного слоя с различной размерностью ячейки, в результате чего были получены образцы № 5–8. Данные виды сетки не позволили достичь рекомендуемых величин *YPlus*, поэтому было принято решение об увеличении количества слоев (образцы № 9–11), позволяющем снизить *Growth Rate Inflation* и сформировать более плавный переход из пристеночной области в общее сеточное поле. Кроме того, с увеличенным количеством слоев были сконструированы варианты расчетной сетки с установкой общей толщины слоя измельчения (*Maximum Total Thickness*) и получены образцы № 12 и 13. Выполнение образцов № 9–13 позволило в значительной степени уточнить профиль продольных скоростей потока. Графическое отображение результатов влияния параметров сетки на величину средней скорости потока на примере данных точки *Monitor Point 2* представлено на рис. 3, а. Как видно из графика, при увеличении количества слоев сетки показатель средней скорости изменился в 2 раза. Данные результаты связаны с тем, что у образцов № 9–13 значительно снижалась толщина моделируемого буферного слоя и зона развитой турбулентности присутствовала в большей части толщины потока (рис. 3, б, в). Об улучшении качества пристеночных функций свидетельствовал и показатель *YPlus*.

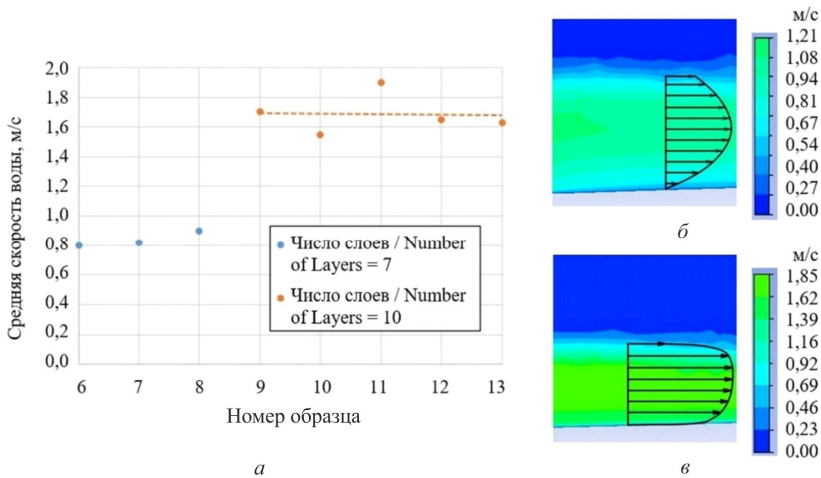


Рис. 3. Взаимосвязь параметров сетки и моделируемой скорости: *a* – величины средней скорости потока сточной воды в точке Monitor Point 2 для образцов № 6–13; *б* – продольный профиль скоростей в напорном трубопроводе образца № 6; *в* – продольный профиль скоростей в напорном трубопроводе образца № 12

Как видно из рис. 3, результаты, наиболее близкие к средней величине скорости, показали образцы № 9, 12 и 13. В конечном счете, за основу для моделирования был принят образец № 12, так как он позволял получать равноценные с другими вариантами результаты за меньшее количество итераций, а соответственно, и меньшее количество времени. По сравнению с образцом № 9 количество итераций снижалось на 19,9 %, а с образцом № 13 – на 32,4 %. Кроме того, и анализ параметров математической сходимости также показал, что из всех испытываемых конфигураций наилучшим образом себя зарекомендовал образец № 12, так как в процессе моделирования наблюдалось наиболее устойчивое состояние расчета.

Изучение влияние параметра *Timescale* также позволило установить, что для достижения сходимости решаемой задачи наилучшим образом подходит функция *Physical Timescale* с шагом 0,35 с. На практике более распространенным является применение опции *Auto Timescale*, которая позволяет автоматически, на основании вшитых в программный комплекс алгоритмов расчета вычислять величину требуемого шага. В рамках данного исследования автоматически рассчитанная величина была практически вдвое больше, чем шаг, показавший наилучший результат, и составляла 0,64 с. На рис. 4 представлены изменения в уровне невязок, возникающие в результате регулирования *Timescale*. Для удобства анализа на графике представлена только выборка для уравнения моментов (*V-Mom*), а сами значения невязок были аппроксимированы и описаны степенными функциями.

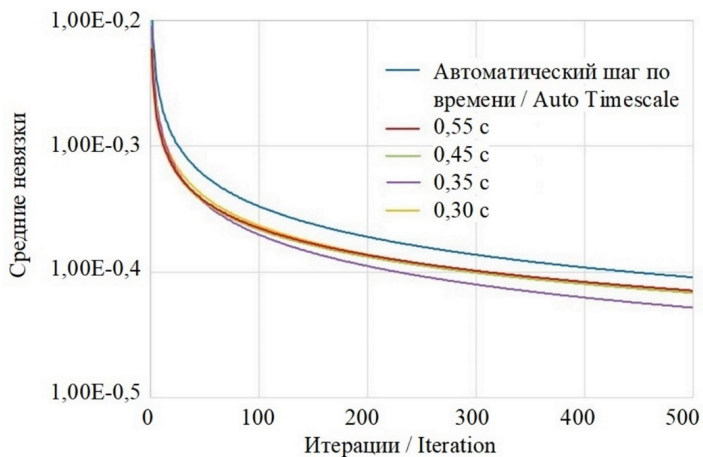


Рис. 4. Зависимость невязок $V\text{-Mom}$ в уравнении моментов от $Timescale$

Общий вид получаемой при моделировании гидродинамической картины представлен на рис. 5. Полученные результаты по объемному заполнению области расчета и скорости потока хорошо соотносятся с прогнозируемыми по классическим методикам.

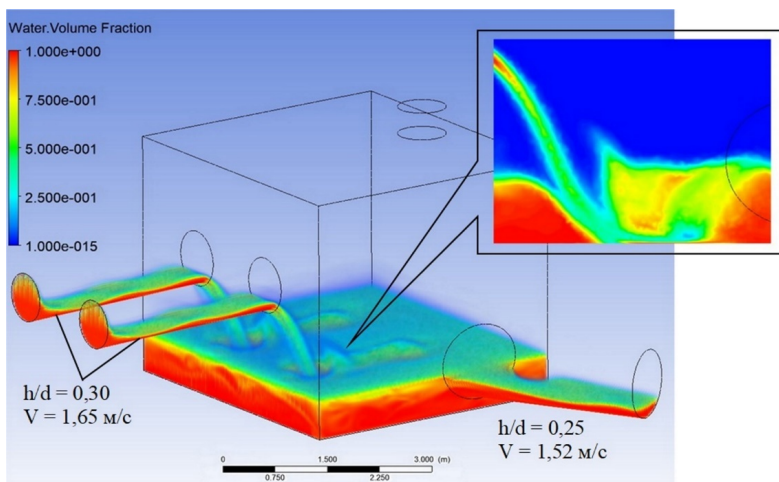


Рис. 5. Результаты моделирования. Гидродинамическая картина

Как и ожидалось, при работе сети на производительность $800 \text{ м}^3/\text{ч}$ в подводящих напорных трубопроводах не наблюдается полного заполнения. В местах падения напорного потока на дно камеры образуются гидравлические прыжки, в которых происходит активное эжектирование жидкости воздухом, о чем свидетельствует цветное распределение на рис. 5.

Численные значения полученных гидродинамических характеристик в подводящих и отводящем трубопроводах также представлены на рис. 5.

Изучение поля давления в расчетной области модели показало, что максимальное избыточное давление наблюдается на дне колодца в местах падения потока и составляет 7806 Па, в среднем давление жидкости на дне камеры имеет величину 5370 Па. В верхней зоне сооружения избыточное давление отсутствует или крайне незначительно. Вакуумметрическое давление фиксируется в месте отрыва струи при падении из подводящих трубопроводов в колодец. Его величина достигает 2000 Па. Кроме того, незначительное вакуумметрическое давление наблюдается вблизи поверхности жидкости, утекающей из камеры по самотечному коллектору. Данное явление обусловлено увлекающей способностью потока.

Увлекающей способностью потока объясняется и картина распределения сероводорода внутри КГН. Визуализация долевого распределения газа с нанесенными линиями тока (рис. 6) наглядно отображает, что большая часть выделившегося в воздушную среду сероводорода покидает расчетную область через отводящий коллектор.

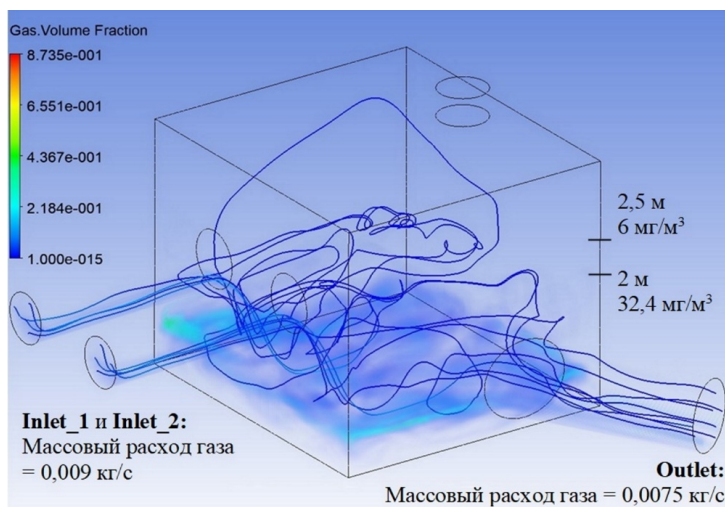


Рис. 6. Распределение сероводорода внутри КГН

Еще более значительное количество газа уносится из камеры, так и не покинув водную среду. В конечном счете через границу *Outlet* КГН покидает 83,4 % поступившего сероводорода. Оставшийся газ поднимается в верхнюю часть сооружения и остается циркулировать там. Именно эта доля газа потенциально может покинуть сооружение и поступить в окружающую среду. На рис. 6 обозначены концентрации газа, наблюдаемые

в КГН на различных высотах. Кроме того, аэродинамическая картина показывает, что значительная доля сероводорода скапливается в периферийной области сооружения, в особенности в противоположном отводящему коллектору углу камеры. Данное явление может быть обусловлено формированием застойных зон сточной жидкости и воздушных масс из-за удаленности от районов повышенной турбулентности: области падения потока и основной траектории течения в сооружении.

Заключение и обсуждение. Проведение данного исследования позволило:

1. Оптимизировать модель сооружения КГН, подобрав наиболее перспективные параметры сеточного поля, мнимого шага по времени, начальных и граничных условий, а также значительно улучшить качество получаемых при моделировании результатов.

2. Установить основные тенденции газо- и гидродинамики моделируемого сооружения.

В дальнейшем разработанная модель может быть использована для получения балансовых зависимостей между количеством газа внутри сооружения и во внешней среде, что, в свою очередь, станет основой для разработки рекомендаций по оценке влияния объекта на окружающую среду.

Библиографический список

1. Lucie C. Caractérisation du transfert liquide/gaz du sulfure d'hydrogène dans les réseaux d'assainissement: doctoral dissertation Ecologie, Environnement. – Lyon, 2016. – 194 p.
2. Influence of relative air/water flow velocity on oxygen mass transfer in gravity sewers / C. Lucie, F. Springer, G. Lipeme Kouyi, P. Buffière // *Water Science and Technology*. – 2017. – Vol. 75. – P. 1529–1538. DOI: 10.2166/wst.2017.001
3. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A.H. Sewer processes. Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks. – Miami: Taylor & Francis Group, LLC, 2013. – 399 p.
4. The liquid-gas mass transfer coefficient in open channel flow is correlated to the turbulent kinetic energy at the interface / F. Springer, C. Lucie, G. Lipeme Kouyi, A. Claro Barreto, P. Buffière // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 98. – P. 1191–1201. DOI: 10.1002/cjce.23704
5. Sulfide emissions in sewer networks: Focus on liquid to gas mass transfer coefficient / C. Lucie, F. Springer, G. Lipeme Kouyi, P. Buffière // *Water Science & Technology*. – 2017. – Vol. 75. – P. 1899–1908. DOI: 10.2166/wst.2017.070
6. Teuber K., Broecker T. Using computational fluid dynamics to describe H₂S mass transfer across the water–air interface in sewers // *Water Science & Technology*. – 2019. – Vol. 79. – P.1934–1946. DOI: 10.2166/wst.2019.193
7. The rapid chemically induced corrosion of concrete sewers at high H₂S concentration / L. Xuan, L. O'Moore, S. Yarong, P. Bond, Y. Zhiguo, W. Simeon, L. Hanzic, J. Guangmin // *Water Research*. – 2019. – Vol. 162. – P. 95–104. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.062
8. Kuliczowska E., Parka A. The structural integrity of corroded concrete sewers // *Engineering Failure Analysis*. – 2019. – Vol. 104. – P. 409–421. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.012
9. Corrosion of concrete sewers – The kinetics of hydrogen sulfide oxidation / J. Vollertsen, A. Nielsen, H. Jensen, T. Wium-Andersen, T. Hvitved-Jacobsen // *The Science of the total environment*. – 2008. – Vol. 394. – P. 162–170. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.01.028

10. Impact of fluctuations in gaseous H₂S concentrations on sulfide uptake by sewer concrete: The effect of high H₂S loads / X. Sun, G.Jiang, B.Philip, K. Jurg // *Water Research*. – 2015. – Vol. 81. – P. 84–91. DOI: 10.1016/j.watres.2015.05.044
11. Modeling the Effects of Sewer Mining on Odour and Corrosion in Sewer Systems / N. Marleni, S. Gray, A. Sharma, S. Burn, N. Muttill // 20th International Congress on Modelling and Simulation, 1–6 December. – Adelaide, 2013. – P. 2813–2819. DOI: 10.36334/modsim.2013.112.marleni
12. Bokowa A. The Review of the Odour Legislation // *Proceedings of the Water Environment Federation*. – 2010. – Vol. 20. – P. 492–511. DOI: 10.2175/193864710802767902
13. Богомолов М.В., Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В. Методы удаления запахов в системах транспортировки и очистки сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2016. – № 7. – С. 33–43.
14. Sivret E., Stuetz R. Sewer odour abatement monitoring – An Australian survey // *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. – 2012. – Vol. 66. – P. 1716–1721. DOI: 10.2166/wst.2012.376
15. Beyond H₂S: Applying Gas Chromatography to Characterise Sewer Odour Emissions / E. Sivret, B. Wang, G. Parsci, S. Kenny, H. Bustamante, R. Stuetz // *Proceedings of the Water Environment Federation*. – 2012. – Vol. 2012. – Pp. 60–73. DOI: 10.2175/193864712811700598
16. Occupational safety during interventions in confined spaces / D. Burlet-Vienney, Y. Chinniah, A. Bahloul, B. Roberge // *Safety Science*. – 2015. – Vol. 79. – P. 19–28. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.05.003
17. Is H₂S a suitable process indicator for odour abatement performance of sewer odours? / B. Wang, E. Sivret, G. Parsci, X. Wang, N. Le, S. Kenny, H. Bustamante, R. Stuetz // *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. – 2014. – Vol. 69. – P. 92–98. DOI: 10.2166/wst.2013.559.
18. Modeling Odors and Hydrogen Sulfide in the Sewers of San Francisco / J. Vollertsen, N. Revilla, T. Hvitved-Jacobsen, A.H. Nielsen // *Proceedings of the Water Environment Federation*. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–11. DOI: 10.2175/193864714816099923
19. Etude de la problématique de la présence de l’H₂S dans le réseau d’assainissement de la ville basse de la ville de Mohammedia / A. Taleb, I. Kanbouchi, S. Souabi, A. Chtaini // *Journal of Materials and Environmental Science*. – 2015. – Vol. 6. – P. 2137–2147.
20. Васильев В.М., Панкова Г.А., Столбихин Ю.В. Разрушение канализационных тоннелей и сооружений на них вследствие микробиологической коррозии // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2013. – № 9. – С. 67–76.
21. Ахмадуллин Р.Р. Повышение долговечности железобетона в условиях сероводородной коррозии: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2006. – 154 с.
22. Федоров С.В., Васильев В.М., Клементьев М.Н. Исследование газовой выделения на участке канализационной сети // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2019. – № 5. – С. 54–59.
23. Mannina G., Calabrò P., Viviani G. Mathematical Modelling of In-Sewer Processes as a Tool for Sewer System Design // *New Trends in Urban Drainage Modelling*. UDM 2018, 23–26 September. – Palermo, 2018. – P. 814–819. DOI: 10.1007/978-3-319-99867-1_140
24. Qian Y., Zhu D., Edwini-Bonsu S. Air Flow Modeling in a Prototype Sanitary Sewer System // *Journal of Environmental Engineering (United States)*. – 2018. – Vol. 144. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001342
25. Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: A review and case studies / E. Eijo-Rio, A. Petit-Boix, G. Villalba, M. Suárez-Ojeda, D. Marín, M. Amores, X. Aldea, J. Rieradevall, X. Gabarrell Durany // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 3. – P. 2084–2094. DOI: 10.1016/j.jece.2015.07.006
26. Ventura Matos R., Ferreira F., Saldanha Matos J. Influence of Intermittence and Pressure Differentials in Hydrogen Sulfide Concentration in a Gravity Sewer // *Water*. – 2019. – Vol. 11. – P. 1780. DOI: 10.3390/w11091780
27. Hydrogen sulfide generation and emission in urban sanitary sewer in China: What factor plays the critical role? / Z. Zuo, J. Chang, Z.Lu, M. Wang, Y. Lin, M. Zheng, D. Zhu, T. Yu, Y.C. Liu // *Environmental Science: Water Research & Technology*. – 2019. – Vol. 5. – P. 839–848. DOI: 10.1039/C8EW00617B

28. Modeling anaerobic organic matter transformations in the wastewater phase of sewer networks / E. Rudelle, J. Vollertsen, T. Hvitved-Jacobsen, A. Nielsen // *Water Science and Technology*. – 2012. – Vol. 52. – P. 201–208. DOI: 10.2166/wst.2012.378

29. A sewer process model as planning and management tool – Hydrogen sulfide simulation at catchment scale / J. Vollertsen, L. Nielsen, T. Blicher, T. Hvitved-Jacobsen, A. Nielsen // *Water Science and Technology*. – 2011. – Vol. 64. – P. 348–354. DOI: 10.2166/wst.2011.717

30. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review / L. Zhang, P. De Schryver, B. De Gussemé, W. De Muynck, N. Boon, W. Verstrete // *Water Research*. – 2008. – Vol. 42. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.watres.2007.07.013

References

1. Lucie C. Caractérisation du transfert liquide/gaz du sulfure d'hydrogène dans les réseaux d'assainissement : doctoral dissertation Ecologie, Environnement. Lyon, 2016. 194 p.

2. Lucie C., Springer F., Lipeme Kouyi G., Buffière P. Influence of relative air/water flow velocity on oxygen mass transfer in gravity sewers. *Water Science and Technology*, 2017, vol. 75, pp. 1529–1538. DOI: 10.2166/wst.2017.001.

3. Hvitved-Jacobsen T, Vollertsen J, Nielsen A. H. Sewer processes. Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks. Miami: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, 399 p.

4. Springer F., Lucie C., Lipeme Kouyi G., Claro Barreto A., Buffière P. The liquid-gas mass transfer coefficient in open channel flow is correlated to the turbulent kinetic energy at the interface. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2020, vol. 98, pp. 1191–1201. DOI: 10.1002/cjce.23704

5. Lucie C., Springer F., Lipeme Kouyi G., Buffière P. Sulfide emissions in sewer networks: Focus on liquid to gas mass transfer coefficient. *Water Science & Technology*, 2017, vol. 75, pp. 1899–1908. DOI: 10.2166/wst.2017.070

6. Teuber K., Broecker T. Using computational fluid dynamics to describe H₂S mass transfer across the water–air interface in sewers. *Water Science & Technology*, 2019, vol. 79, pp.1934–1946. DOI: 10.2166/wst.2019.193

7. Xuan L., O'Moore L., Yarong S., Bond P., Zhiguo Y., Simeon W., Hanzic L., Guangmin J. The rapid chemically induced corrosion of concrete sewers at high H₂S concentration. *Water Research*, 2019, vol. 162, pp. 95–104. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.062

8. Kuliczowska E., Parka A. The structural integrity of corroded concrete sewers. *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 104, pp. 409–421. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.012

9. Vollertsen J., Nielsen A., Jensen H., Wium-Andersen T., Hvitved-Jacobsen T. Corrosion of concrete sewers – The kinetics of hydrogen sulfide oxidation. *The Science of the total environment*, 2008, vol. 394, pp. 162–170. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.01.028

10. Sun X., Jiang G., Philip B., Jurg K. Impact of fluctuations in gaseous H₂S concentrations on sulfide uptake by sewer concrete: The effect of high H₂S loads. *Water Research*, 2015, vol. 81, pp. 84–91. DOI: 10.1016/j.watres.2015.05.044

11. Marleni N., Gray S., Sharma A., Burn S., Muttil N. Modeling the Effects of Sewer Mining on Odour and Corrosion in Sewer Systems. *20th International Congress on Modelling and Simulation*, 1–6 December, Adelaide, 2013, pp. 2813–2819. DOI: 10.36334/modsim.2013.112.marleni

12. Bokowa A. The Review of the Odour Legislation. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2010, vol. 20, pp. 492–511. DOI: 10.2175/193864710802767902

13. Bogomolov M. V., Karmazinov F. V., Kostiuhenko S. V. Metody udaleniia zapakhov v sistemakh transportirovki i ochestki stochnykh vod [Methods for removing odors in a transport and wastewater treatment system]. *Water supply and sanitary technique*, 2016, no. 7, pp. 33–43.

14. Sivret E., Stuetz R. Sewer odour abatement monitoring – An Australian survey. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2012, vol. 66v pp. 1716–1721. DOI: 10.2166/wst.2012.376

15. Sivret E., Wang B., Parsi G., Kenny S., Bustamante H., Stuetz R. Beyond H₂S: Applying Gas Chromatography to Characterise Sewer Odour Emissions. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2012, vol. 2012, pp. 60–73. DOI: 10.2175/193864712811700598

16. Bulet-Vienney D., Chinniah Y., Bahloul A., Roberge B. Occupational safety during interventions in confined spaces. *Safety Science*, 2015, vol. 79, pp. 19–28. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.05.003
17. Wang B., Sivret E., Parsci G., Wang X., Le N., Kenny S., Bustamante H., Stuetz R. Is H₂S a suitable process indicator for odour abatement performance of sewer odours? *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2014, Vol. 69, pp. 92–98. DOI: 10.2166/wst.2013.559.
18. Vollertsen J., Revilla N., Hvitved-Jacobsen T., Nielsen A. H. Modeling Odors and Hydrogen Sulfide in the Sewers of San Francisco. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2014, vol. 2014, pp. 1–11. DOI: 10.2175/193864714816099923
19. Taleb A., Kanbouchi I., Souabi S., Chtaini A. Etude de la problématique de la présence de l'H₂S dans le réseau d'assainissement de la ville basse de la ville de Mohammedia. *Journal of Materials and Environmental Science*, 2015, vol. 6, pp. 2137–2147.
20. Vasil'ev V. M., Pankova G. A., Stolbikhin I. V. Razrushenie kanalizatsionnykh tonnelei i sooruzhenii na nikh v sledstvie mikrobiologicheskoi korrozii [Destruction of sewer tunnels and structures on them as a result of microbiological corrosion]. *Water supply and sanitary technique*, 2013, no. 9, pp. 67–76.
21. Akhmadullin R. R. *Povyshenie dolgovechnosti zhelezobetona v usloviakh serovodorodnoi korrozii : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the durability of reinforced concrete in conditions of hydrogen sulfide corrosion : thesis of candidate of technical sciences]. Ph. D. thesis. Ufa, 2006. 154 p.
22. Fedorov S. V., Vasil'ev V. M., Klement'ev M. N. Issledovanie gazovydeleniia na uchastke kanalizatsionnoi seti [Study of gas evolution in a sewer section]. *Water supply and sanitary technique*, 2019, no. 5, pp. 54–59.
23. Mannina G., Calabrò P., Viviani G. Mathematical Modelling of In-Sewer Processes as a Tool for Sewer System Design. *New Trends in Urban Drainage Modelling. UDM 2018*, 23–26 September, Palermo, 2018, pp. 814–819. DOI: 10.1007/978-3-319-99867-1_140
24. Qian Y., Zhu D., Edwini-Bonsu S. Air Flow Modeling in a Prototype Sanitary Sewer System. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, 2018, vol. 144. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001342
25. Eijo-Rio E., Petit-Boix A., Villalba G., Suárez-Ojeda M., Marín D., Amores M., Aldea X., Rieradevall J., Gabarrell Durany X. Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: A review and case studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, vol. 3, pp. 2084–2094. DOI: 10.1016/j.jece.2015.07.006
26. Ventura Matos R., Ferreira F., Saldanha Matos J. Influence of Intermittence and Pressure Differentials in Hydrogen Sulfide Concentration in a Gravity Sewer. *Water*, 2019, vol. 11, p. 1780. DOI: 10.3390/w11091780
27. Zuo Z., Chang J., Lu Z., Wang M., Lin Y., Zheng M., Zhu D., Yu T., Liu Y. C. Hydrogen sulfide generation and emission in urban sanitary sewer in China: What factor plays the critical role? *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2019, vol. 5, pp. 839–848. DOI: 10.1039/C8EW00617B
28. Rudelle E., Vollertsen J., Hvitved-Jacobsen T., Nielsen A. Modeling anaerobic organic matter transformations in the wastewater phase of sewer networks. *Water Science and Technology*, 2012, vol. 52, pp. 201–208. DOI: 10.2166/wst.2012.378
29. Vollertsen J., Nielsen L., Blicher T., Hvitved-Jacobsen T., Nielsen A. A sewer process model as planning and management tool – Hydrogen sulfide simulation at catchment scale. *Water Science and Technology*, 2011, vol. 64, pp. 348–354. DOI: 10.2166/wst.2011.717
30. Zhang L., De Schryver P., De Gussemé B., De Muynck W., Boon N., Verstrete W. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review. *Water Research*, 2008, vol. 42, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.watres.2007.07.013

Получено 04.10.2020

A. Teliatnikova

SIMULATION OF GAS RELEASE PROCESSES IN THE HEAD SUPPRESSING CHAMBER

In the sewer networks, hydrogen sulfide is actively formed and released. This phenomenon has many consequences, including the possible formation of zones with unpleasant sanitary and environmental conditions near the wells. In order to avoid such consequences, it is necessary to assess in advance the potential of the sewer facility for gas release. Computer modeling in finite element analysis packages can significantly help in the formation of a methodology for assessing impact. In this regard, the aim of the study was the development and optimization of a mathematical model corresponding to the real object – head suppressing chamber (HSC), to determine its main hydrological and aerodynamic characteristics. Simulation of HSC is performed in the ANSYS CFX package, which implements the method of computational hydrodynamic analysis of CFD (Computational Fluid Dynamics). The influence of the configurations of the grid field and the imaginary timescale on the results obtained has been studied. Based on the data analysis, the most optimal modeling parameters were selected. A qualitative and quantitative assessment of the results of the hydrodynamics of the model is carried out. Main trends in the distribution of hydrogen sulfide inside the simulated object are determined. The study has made it possible not only to qualitatively improve the results obtained, but also to optimize the characteristics of the computing process. In the future, the developed model can be used to identify quantitative and spatial regularities of gas distribution inside the facility and beyond with various characteristics of the incoming stream. Simulation data can also form the basis of a methodology for assessing the environmental impact of a sewerage system.

Keywords: head suppressing chamber (HSC), sewer network, sewer gases, hydrogen sulfide, sanitary and environmental conditions, computer modeling, ANSYS CFX.

Телятнікова Анна Максимовна (Санкт-Петербург, Россия) – аспирант, старший преподаватель кафедры «Водопользование и экология», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, e-mail: kononova.a.m@lan.spbgasu.ru).

Anna Teliatnikova (St.-Petersburg, Russian Federation) – Postgraduate Student, Senior Lecturer, Department of Water Use and Ecology, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, St. Petersburg, 2-ia Krasnoarmeiskaia st., 4, e-mail: kononova.a.m@lan.spbgasu.ru).