

УДК 536.2  
PACS 02.60.Cb; 44.25.+f

## Лабораторное моделирование в задачах промышленной безопасности

А. В. Беляева\*, А. Н. Сухановский

Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь

\* eav@icmm.ru

В работе представлен экспериментальный подход, позволяющий моделировать распространение вредных веществ в результате аварий техногенного характера. Он основан на использовании детального макета местности, масштаб которого позволяет достичь значений управляющих параметров, сравнимых с эффективными значениями параметров в нижней части атмосферного слоя. В рамках данного подхода проведено качественное описание выброса хлора на ООО «Сода-Хлорат» г. Березники. Экспериментальная модель представляет собой трехмерный макет местности, который учитывает рельеф, а также высоту и расположение зданий на территории почти 6 квадратных километров. Параметры эксперимента подбирались для качественного моделирования процесса распространения смеси хлор/воздух в атмосфере. Рассмотрены различные сценарии выброса хлора. Показано, что существенную роль в процессе распространения играет рельеф местности. Для всех описанных случаев показано, что примесь не достигает границы жилых кварталов. Полученные результаты хорошо согласуются с данными натурных наблюдений.

**Ключевые слова:** техногенные аварии; гравитационная конвекция; примесь

*Поступила в редакцию 20.08.2024; после рецензии 07.10.2024; принята к опубликованию 07.10.2024*

## Laboratory modeling of man-made disasters

A. V. Belyaeva\*, A. N. Sukhanovskii

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

\* eav@icmm.ru

The paper presents an experimental approach to predicting the consequences of technogenic accidents. This approach consists in laboratory modeling of the process of heavy impurities transfer in conditions of orographically inhomogeneous surface. The paper provides a qualitative description of chlorine release at Soda-Chlorate Ltd in the city of Berezniki, prepared within the framework of this approach. The experimental model is a three-dimensional model of the area that takes into account the relief as well as the height and location of buildings on the territory of almost 6 square kilometers. The parameters of the experiment were selected for qualitative modeling of the process of chlorine/air mixture propagation in the atmosphere. Various scenarios of chlorine emission were considered. It is shown that the terrain plays a significant role in the propagation process. For all cases it is obtained that the impurity does not reach the boundary of residential areas. This result correlates with the data of field observations.

**Keywords:** man-made disaster; gravitational convection; impurity

*Received 20 August 2024; revised 07 October 2024; accepted 07 October 2024*

doi: 10.17072/1994-3598-2024-4-14-21

### 1. Введение

В настоящее время значительную группу промышленных предприятий можно отнести к хими-

чески опасным объектам. Большинство из потенциально опасных производств в Российской Федерации находится на территории населенных пунктов или в непосредственной близости от них. Аварии на таких объектах, связанные с использо-

ванием, транспортировкой и хранением токсических и горючих газов, представляют большую опасность как для персонала, так и для населения прилегающих районов, и наносят большой экономический и экологический ущерб [1]. Предприятия химической промышленности производят мониторинг содержания загрязняющих веществ в атмосфере на границе санитарно-защитной зоны при эксплуатации объекта в штатном режиме. Прогнозирование развития и последствий техногенных аварий обычно реализуется посредством математического моделирования, так как натурное моделирование значительных выбросов загрязняющих веществ неизбежно приведет к нанесению существенного экологического вреда.

Одной из наиболее актуальных задач промышленной безопасности является задача описания рассеяния облака газообразной примеси в условиях орографической неоднородности. Наибольшее внимание уделяется распространению тяжелого (относительно окружающего воздуха) газа, так как он локализуется в приземном слое, представляя существенную угрозу безопасности персонала и гражданских лиц. Надо отметить, что многие выбросы при промышленных авариях в начальный момент времени имеют плотность большую, чем воздух [2].

Обзор и анализ существующих математических моделей распространения облаков тяжелых газов, а также соответствующих программных комплексов представлены в [3]. Анализ имеющихся подходов показал, что распространение промышленных выбросов в случае плоского рельефа хорошо описывается в рамках интегральных моделей. Суть интегрального подхода заключается в том, что в интересующем пространственном объеме происходит отказ от детального описания картины течения, а вместо этого отслеживается изменение интегральных характеристик (масса, импульс, энергия и т. д.). При этом теряется информация о локальных характеристиках [2].

Учет неоднородности рельефа и наличия застройки при моделировании аварий с распространением облаком тяжелых газов реализован в ряде двумерных численных моделей [4–6]. Данные модели построены методом осреднения по высоте течения исходных трехмерных уравнений гидродинамики и являются обобщением модели мелкой воды на случай гидродинамических течений с переменной плотностью и массовыми концентрациями компонентов газовой среды.

Для получения подробной информации о последствиях техногенных аварий необходимо использовать CFD-модели (Computational Fluid Dynamics). Наиболее полные, трехмерные нестационарные модели могут применяться для расчетов выбросов любого типа в условиях реального рельефа местности и застройки. В работе [7] было численно исследовано распространение легкой примеси в различных районах Токио (Япония). В

качестве модели рассматривались районы размером  $2 \times 1$  км, для которых полностью воспроизводились расположение и высота зданий. В [8] рассматривалась часть Гамбурга (Германия) размером  $4 \times 4$  км с пространственным разрешением 2.5 м. Трехмерная модель учитывала не только расположение зданий, но и особенности рельефа. Однако такие модели характеризуются высокой сложностью и требуют огромных вычислительных затрат. Например, в [8] расчеты заняли около 7 недель машинного времени.

Высокие вычислительные затраты стимулируют развитие экспериментальных подходов для моделирования переноса примесей в условиях сложного рельефа. Обычно эксперименты по изучению распространения примесей различной природы в условиях городского ландшафта проводятся с использованием аэродинамической трубы. Однако экспериментальные стенды, которые учитывают реальную геометрию городов очень мало. В [9] была построена и исследована центральная часть г. Нант (Франция). Масштаб модели составляет 1:200, а размер рассматриваемой территории – 400 м. Модель Токио диаметром 500 м в масштабе 1:600 была использована в [10]. Детальная аэродинамическая модель центрального района Оклахома-Сити (США) использовалась в [11]. Размер района составляет 1.6 км на 1.6 км при масштабе 1:300. Надо отметить, что работа по созданию «реального» макета города очень трудоемка, а содержание самой аэродинамической трубы крайне затратно.

Эксперименты в аэродинамических трубах позволяют исследовать перенос примеси при наличии интенсивной внешней циркуляции, когда движением примеси из-за разности плотностей можно пренебречь. Для исследования распространения примеси в случае отсутствия заметной внешней циркуляции (штиль) предлагается использовать экспериментальный подход, который был успешно реализован в [12–13]. Подход предполагает использование детализированного макета местности, который учитывает рельеф, а также высоту и расположение зданий. Масштаб макета выбирается с учетом характерных значений коэффициентов турбулентной вязкости в приземном атмосферном слое для того, чтобы управляющие параметры в лабораторном эксперименте и эффективные управляющие параметры в реальных условиях были сравнимы. В данной работе проведено моделирование выброса хлора на ООО «Сода-Хлорат». ООО «Сода-хлорат» – крупное предприятие химической промышленности, которое расположено в г. Березники Пермского края. По данным ГУ МЧС Пермского края, в марте 2013 г. на ООО «Сода-хлорат» произошел выход хлора с наружной установки синтеза [14]. Хлор является крайне токсичным газом, который в 2.5 раза тяжелее воздуха. При этом жилые кварталы расположены примерно в 2–3 км от цехов.

## 2. Экспериментальная установка

Экспериментальная модель представляет собой трехмерный макет части г. Березники (с центром в точке 59°24'29" с. ш., 56°48'19" в. д.) размером 3.2×1.8 км (масштаб печати 1:5000), который учитывает рельеф местности, а также высоту и расположение зданий. Модель создана из PETG пластика на 3D принтере. В качестве основы были использованы данные из некоммерческого веб-картографического проекта OpenStreetMap. На рис. 1, а показана карта местности, рис. 1, б – распределение высоты рельефа. Белой линией отмечена граница жилых кварталов, желтой окружностью – здания управления ООО «Сода-хлорат».

В целях обеспечения безопасности населения вокруг промышленных предприятий устанавливается специальная территория с особым режимом использования (санитарно-защитная зона (СЗЗ)), которая служит буферной зоной между промышленным объектом и нормируемой территорией (жильём, огородами, рекреационными территориями, детскими спортивными площадками). Размер СЗЗ должен обеспечить уменьшение воздействия загрязнения на атмосферный воздух до значений, установленных гигиеническими нормативами. Согласно проектной документации размер СЗЗ для основной промплощадки ООО «Сода-хлорат» составляет 1000 метров. Определение границ ориентировочных санитарно-защитных зон проведено согласно требованиям СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов». На рис. 1 граница СЗЗ в пределах макета отмечена зеленым.

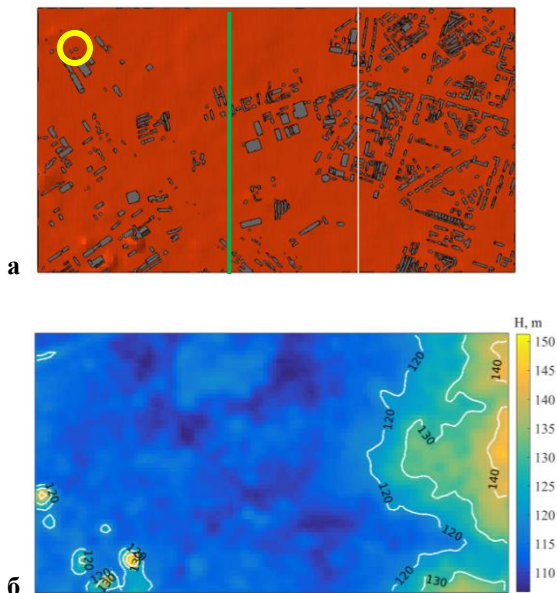


Рис. 1 Карта исследуемой области (а); распределение высоты поверхности (б). Белой линией обозначена граница жилых кварталов (цветной в электронной версии)

В ходе эксперимента макет помещался в герметичный контейнер, заполненный дистиллированной водой. Хлор является тяжелой примесью, поэтому влияние толщины слоя жидкости на процесс распространения не рассматривается. В качестве аналога хлора в экспериментальных условиях использованы водные растворы NaCl массовой концентрации 1%. Распространение примесей в атмосфере существенно зависит от интенсивности внешней циркуляции воздуха. Наличие ветра определяет направление переноса примеси и приводит к достаточно быстрому снижению концентрации примеси вблизи источника загрязнений. В представленной работе влияние внешней циркуляции не исследуется и рассматривается один из наиболее неблагоприятных сценариев, а именно выброс примеси при отсутствии ветра (штиль), когда ее распространение полностью определяется диффузией или конвекцией, которая неизбежно возникает вследствие разницы плотностей примеси и окружающей среды. Следует отметить, что характерное время диффузионного процесса обычно существенно больше, чем соответствующее значение для конвекции. В данной работе мы полагаем, что основное движение примеси обусловлено исключительно конвекцией. Для визуализации течения примесь была подкрашена водорастворимым красителем. Процесс распространения примеси снимался на видеокамеру YI LITE, частота съемки 30 кадров в секунду, разрешение 3 пикселя на мм (в реальном масштабе около 1 пиксель на м).

В качестве безразмерного параметра будем использовать диффузионное число Грасгофа  $Gr_D$ :

$$Gr_D = \frac{g\beta_c L^3 \Delta C}{\nu^2} \quad (2.1)$$

где  $g$  – модуль вектора гравитационного ускорения,  $\beta_c$  – коэффициент изменения плотности за счет концентрации примеси,  $L$  – характерный размер,  $\Delta C$  – перепад концентрации. Атмосферные течения на исследуемых масштабах даже в условиях штиля (при отсутствии среднего потока) являются турбулентными, поэтому для оценки  $Gr_D$  в атмосфере будем использовать фоновое значение турбулентной вязкости  $\nu_t$ , а для оценки  $Gr_D$  в эксперименте – кинематическую вязкость  $\nu$ .

Проведем оценку параметров эксперимента для распространения хлора. Расчет безразмерного параметра  $Gr_D$  представлен в таблице. Согласно гигиеническим нормативам ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно-допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений», максимальная разовая предельно допустимая концентрация хлора в атмосферном воздухе составляет 0.1 мг/м<sup>3</sup>, что составляет 0.00001% по массовому содержанию. Содержание хлора в 0.01% провоцирует серьезный ожог дыхательной системы и отравление. Отметим, что турбулентная вязкость  $\nu_t$  в атмосфере, в отличие от

представленных экспериментов, не является постоянной величиной. Она изменяется в зависимости от расстояния до твердой поверхности и скорости ветра. Моделирование реальных течений при постоянном значении кинематической вязкости является необходимым допущением, однако мы полагаем, что это не приводит к принципиальным качественным изменениям в структуре течений. Данные по турбулентной вязкости взяты из работ [15, 16] для высоты 1 м. Для лабораторного эксперимента была использована кинематическая вязкость воды при температуре 20°C. Числа Грасгофа для атмосферы ( $Gr_D = 0.6 \cdot 10^5$ ) и для эксперимента ( $Gr_D = 6 \cdot 10^5$ ) отличаются на порядок. Для того, чтобы в лабораторных условиях приблизиться к нужным значениям безразмерного параметра  $Gr_D$ , необходимо значительно уменьшить масштаб экспериментального макета либо использовать более вязкую жидкость, что накладывает существенные ограничения на проведение измерений. Увеличение предполагаемого уровня хлора до 0.1% дает сравнимые в эксперименте и атмосфере числа  $Gr_D$ . Поэтому, в рамках еще одного допущения, рассматривается самый опасный из возможных вариантов – выброс хлора концентрации в 0.1 % как релевантный для здоровья в соответствии с принципом предосторожности.

К расчету значений  $Gr_D$

параметр	атм.	эсп.
$g$ , м/с	9.8	9.8
$\beta_c$	0.62	0.76
$L$ , м	100	0.02
$\Delta C$ , %	0.01	1
	$v_i$ [15, 16]	$v$ воды, 20°C
$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	0.1	$10^{-6}$
$Gr_D$	$0.6 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$

Были рассмотрены различные случаи выделения хлора: 1 – разовый выброс небольшого объема примеси, 2 – протяженный источник примеси с постоянным расходом примеси в течение 4 мин, 3 – локализованный источник примеси с постоянным расходом примеси в течение 2 мин. Если использовать в качестве характерной единицы времени, вязкое время:

$$t \sim \frac{L^2}{\nu}, \quad (2.2)$$

то 1 с в лабораторном эксперименте соответствует приблизительно 4 мин полномасштабного процесса.

Расположение источников примеси в экспериментах варьировалось. Рассмотрены три конфигурации выброса тяжелых примесей на территории предприятия.

Первая конфигурация соответствует кратковременному локализованному выбросу хлора. Объем вводимого в среду раствора был равен 1 мл.

Введение раствора производилось в трех различных точках макета вблизи его дна.

Вторая конфигурация включает протяженный источник примеси, который представляет собой ПВХ трубку диаметром 5 мм. Она имеет ряд отверстий диаметром около 0.5 миллиметра и соединяется с сосудом Мариотта, который содержит примесь. Сосуд Мариотта позволяет добиться постоянного расхода примеси из отверстий. Источник расположен на дне макета, поэтому высота выброса примеси не превышает половины диаметра трубки. Примесь подается непрерывно в течение 2 мин. Скорость движения примеси вблизи источника – около 0.7 мм/с.

В качестве третьей конфигурации рассмотрен случай непрерывного локализованного выброса хлора. Источник выброса располагается вблизи дна, его высота не превышает 1 мм над поверхностью макета. Примесь вводится в среду при помощи сосуда Мариотта в течение 2 мин. За это время успевает вытечь около 75 мл примеси. Скорость движения примеси вблизи источника может достигать нескольких сантиметров в секунду.

### 3. Результаты

На рис. 2 представлена визуализация течения для случая кратковременного локализованного выброса хлора и различного расположения источника. Граница санитарной зоны обозначена зеленым, жилых кварталов – белым. Величина  $P$  является относительной и определяется следующим образом:

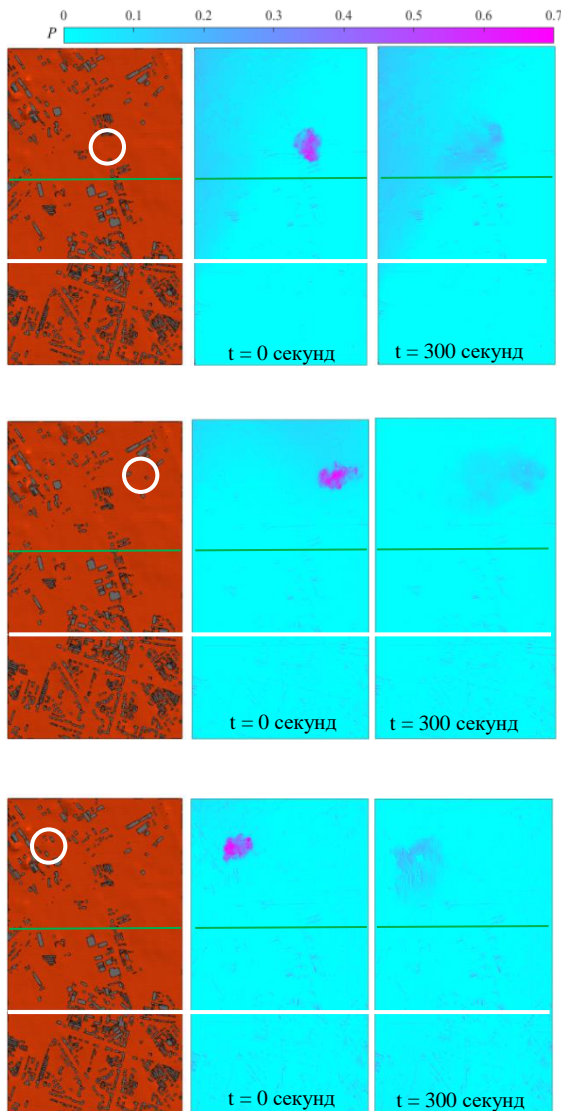
$$P_{ij} = 1 - \frac{I_{ij}(t)}{I_{ij}|_{t=0}}, \quad (3.1)$$

где  $I_{ij}$  – яркость изображения,  $I_{ij}$  – яркость изображения в отсутствие примеси, индексы  $i$  и  $j$  характеризуют положение пикселя изображения. Значение величины  $P$  численно равно доле примеси, приходящейся на каждую точку области.

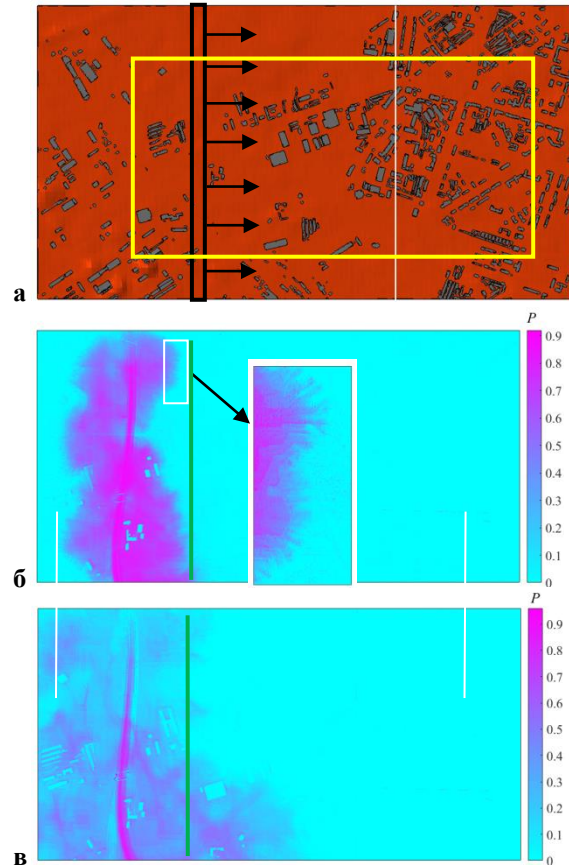
Видно, что для всех рассмотренных расположений источника примеси спустя 300 с (20 ч реального времени) концентрация падает больше чем в  $e$  раз. При этом примесь не выходит за границы СЗЗ. Как видно, определяющую роль при распространении примеси играет рельеф местности. Для первого варианта расположения источника примесь движется вниз по ложине, занимая самые низкие части макета. Во втором и третьем вариантах расположения примесь локализуется вблизи промышленных корпусов.

На рис. 3, б, в представлена визуализация течения для случая протяженного источника примеси. Расположение источника примеси указано на рис. 3, а черным цветом, желтым отмечена область наблюдения, зеленым – граница СЗЗ. На рис. 3, б представлена визуализация течения после окончания введения раствора в среду. Фронт примеси очень неоднороден. Можно также заметить, что на

границе фронта примеси образуются тонкие структуры. При этом фронт примеси даже спустя продолжительное время инъекции не достигает границы жилых кварталов. На рис. 3, в представлена визуализация течения спустя 800 с после начала введения примеси в среду. Концентрация примеси заметно снизилась. Вблизи источника много открытого пространства, постройки расположены редко. Примесь беспрепятственно заполняет свободные участки, конвективное движение ничем не ограничено и свободно перемешивает жидкость. Области с высокой концентрацией расположены вдоль самых низких участков рельефа, которые находятся в том числе и за границей СЗЗ.

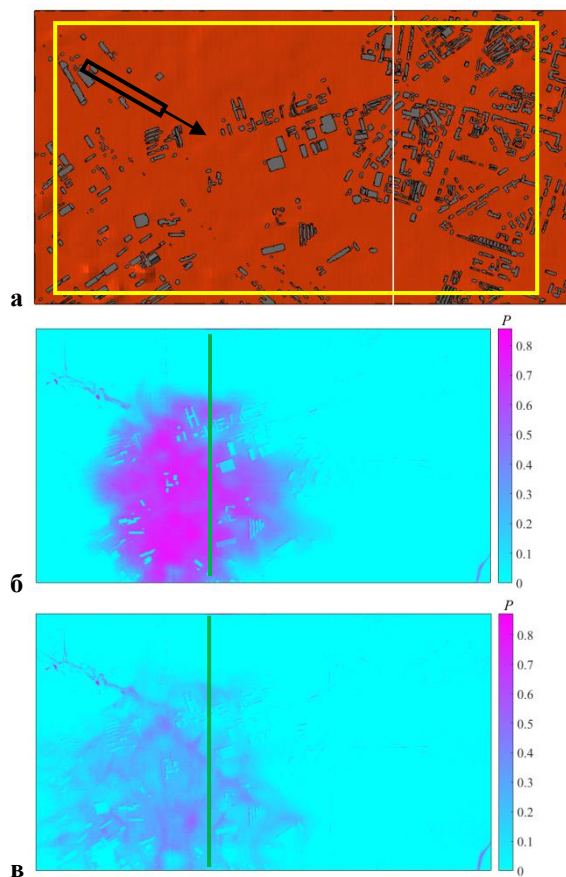


**Рис. 2.** Визуализация течения в случае локализованных источников примеси; сплошной линией указана граница жилых кварталов



**Рис. 3.** Расположение источников и область наблюдения для случая протяженного источника примеси (а). Визуализация течения спустя 120 (б) и 800 с (в) после начала введения раствора

На рис. 4, б, в представлена визуализации течения для случая непрерывной локализованной подачи примеси. Расположение источника и область наблюдения указаны на рис. 4, а. Картина распространения примеси сразу после окончания введения раствора в среду представлена на рис. 4, б. Здесь не удалось обнаружить тонкие структуры на границе фронта распространения. Скорость истечения жидкости была довольно высока, поэтому подобные структуры не успевали возникнуть. Данный вариант распространения описывает экстремально мощный выброс хлора. Поэтому можно видеть, что примесь проникла за границу СЗЗ. После окончания введения раствора жидкость активно перемешивается за счет естественной конвекции. На рис. 4, в представлена визуализация течения спустя 800 с после начала введения примеси в среду. Концентрация примеси заметно снизилась. Очаги концентрации, как и для случая протяженного источника, расположены вдоль самых низких участков рельефа.

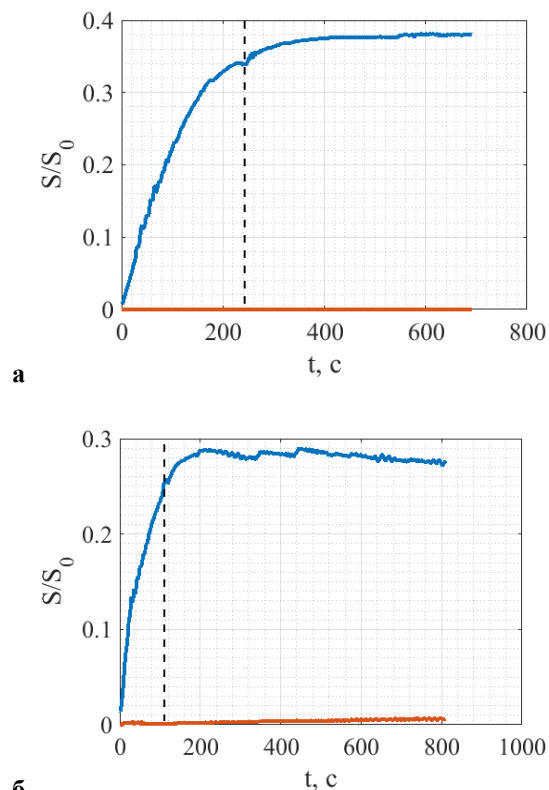


**Рис. 4** Расположение источников и область наблюдения для случая непрерывной локализованной подачи примеси (а). Визуализация течения спустя 120 (б) и 800 с (в) после начала введения раствора

Для всех случаев распространения качественно показано, что даже спустя продолжительный промежуток времени примесь не доходит до границы жилых кварталов. Существенное влияние на процесс распространения тяжелой примеси оказывает рельеф местности. На рис. 5 представлена временная зависимость площади поверхности  $S$ , занятой примесью с долей концентрации превышающей 10 %, для различных высот поверхности. Площадь  $S$  нормирована на общую площадь области наблюдения  $S_0$ . Штриховой линией отмечено окончание введения раствора в среду.

На рис. 1, б видно, что ООО «Сода-Хлорат» расположен на относительно пологом участке рельефа, который орографически находится ниже близлежащего населенного пункта. Высота местности жилых кварталов выше 120 м, поэтому на рис. 5 зависимости представлены для диапазонов высот рельефа выше и ниже этой высоты. Видно, что примесь преимущественно занимает участки рельефа ниже 120 м, что совпадает с качественной оценкой по визуализации течения. Незначительное заполнение участков рельефа выше 120 метров наблюдается для случая непрерывной локализованной подачи примеси (рис. 5, б). Однако это свя-

зано с наличием на территории промышленного комплекса технологических возвышенностей, которые захватывает область наблюдений.



**Рис. 5** Временная зависимость площади, занятой примесью (с долей примеси >10%), для случаев (а) протяженного источника примеси и (б) непрерывной локализованной подачи раствора. Синим цветом показано распространение примеси на высоте ниже 120 м, а красным цветом распространение примеси на высоты больше 120 м

## Заключение

В работе представлены результаты лабораторного моделирования последствий техногенной аварии на примере выброса хлора на ООО «Сода-Хлорат» г. Березники. На основе полученных данных можно утверждать, что орографическое расположение промышленного предприятия является удачным для различных сценариев распространения тяжелой примеси – область жилых кварталов остается в относительной безопасности (мы не рассматриваем случай ветреной погоды). Данный результат соответствует натурным наблюдениям, после аварии замеры уровня хлора были сделаны в различных точках города, уровень концентрации не превышал допустимых норм. Надо отметить, что результаты эксперимента соответствуют выбросу хлора с очень высокой массовой концентрацией равной 0.1 %, превышающей значения в результате известных выбросов. Можно сделать вывод о том, что при отсутствии ветра, направлен-

ного в сторону жилых кварталов, выбросы тяжелой газообразной примеси не должны достигнуть жилой застройки. При этом территория предприятия находится в опасной зоне. Как показали полученные результаты, распространение примеси существенно зависит от мощности выброса, его длительности и расположения. Возможны случаи, когда в зону риска попадают и относительно высокие технологические объекты. Это подразумевает наличие необходимых индивидуальных систем защиты для работников предприятия и эффективных планов эвакуации.

Основным достоинством предлагаемого подхода является то, что он несмотря на ряд допущений позволяет относительно быстро, с небольшими затратами исследовать процесс распространения примеси в условиях реального рельефа. Без учета подготовки макета один эксперимент занимает около часа. Для сравнения, расчет трехмерного выброса примеси в [8] длился 7 недель. Полученные данные могут быть использованы в качестве первого приближения для более детальных исследований, в том числе и при помощи математических моделей. Авторы надеются на широкое применение предлагаемого подхода для предотвращения катастроф как природного, так и техногенного характера.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012300246-9)

### Список литературы

1. *Маршалл В.* Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989. 672 с.
2. *Шаталов А. А., Лисанов М. В., Печеркин А. С., Пчельников А. В., Сумской С. И.* Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеяния тяжелого газа // *Безопасность труда в промышленности.* 2004. Т. 9. С. 46–52.
3. *Агапова Е. А., Сумской С. И.* Аналитический обзор математических моделей распространения облаков тяжелых газов // *Безопасность труда в промышленности.* 2017. №. 5. С. 23–31.
4. *Доброцеев О. В., Кулешов А. А., Савенкова Н. П., Филиппова С. В.* Двумерная модель рассеяния тяжелых газов на орографически неоднородной поверхности земли // *Математическое моделирование.* 1996. Т. 8. №. 5. С. 91–105.
5. *Кузьмин Р. Н., Кулешов А. А., Савенкова Н. П., Филиппова С. В.* Моделирование аварий на промышленном объекте с истечением тяжелых газов и жидкостей // *Математическое моделирование.* 1998. Т. 10. №. 8. С. 33–42.
6. *Кулешов А. А., Идальго Диас, Н. М., Махвиладзе Г. М., Якуш С. Е.* Моделирование техногенных аварий со сжиженными токсическими и

- горючими газами // *Математическое моделирование.* 2010. Т. 22. №. 4. С. 129–146.
7. *Nakayama H., Jurcakova K., Nagai H.* Large-Eddy Simulation of plume dispersion within various actual urban areas // *Advances in Science and Research.* 2013. Vol. 10. N. 1. P. 33–41.
  8. *Hertwig D., Patnaik G., Leidl B.* LES validation of urban flow, part I: flow statistics and frequency distributions // *Environmental Fluid Mechanics.* 2017. Vol. 17. P. 521–550.
  9. *Kastner-Klein P., Berkowicz R., Britter R.* The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons // *Meteorology and Atmospheric Physics.* 2004. Vol. 87. P. 121–131.
  10. *Yassin M. F., Kato S., Ooka R., Takahashi T., Kouno R.* Field and wind-tunnel study of pollutant dispersion in a built-up area under various meteorological conditions // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 2005. Vol. 93. N. 5. P. 361–382.
  11. *Klein P., Leidl B., Schatzmann M.* Concentration fluctuations in a downtown urban area. Part II: analysis of Joint Urban 2003 wind-tunnel measurements // *Environmental Fluid Mechanics.* 2011. Vol. 11. P. 43–60.
  12. *Евграфова А., Сухановский А.* Impact of complex relief on heat transfer in urban area // *Urban Climate.* 2022. Vol. 43, 101177.
  13. *Евграфова А. В., Сухановский А. Н.* Конвективный перенос условной примеси в пределах городской геометрии // *Вестник Пермского университета. Физика.* 2023. №. 2. С. 14–21.
  14. В связи с аварией на ООО «Сода-хлорат» состоялось внеочередное заседание КЧС и ПБ г. Березники // ГУ МЧС по Пермскому краю (Электронный ресурс). URL: <https://59.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/3189566> (Дата обращения: 07.10.2024)
  15. *Zonato A., Martilli A., Santiago J. L., Zardi, D., Giovannini L.* On a new one-dimensional k-ε turbulence closure for building-induced drag // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 2023. Vol. 149. N. 754. P. 1674–1689.
  16. *Rozoff C. M., Nolan D. S., Bryan G. H., Hendricks E. A., Knivvel J. C.* Large-eddy simulations of the tropical cyclone boundary layer at landfall in an idealized urban environment // *Journal of Applied Meteorology and Climatology.* 2023. Vol. 62. N. 11. P. 1457–1478.

### References

1. *Marshall V. C.* *Major Chemical Hazards.* Chichester: Ellis Horwood, 1987. 587 p.
2. *Shatalov A. A., Lisanov M. V., Pecherkin A. S., Sumskoi S. I.* Metodika rascheta rasprostraneniya avariynih vibrovov, osnovannaya na modeli tyazhelogo gaza [Methodology for calculating the propagation of accidental emissions based on the

- heavy gas dispersion model]. *Occupational Safety in Industry*, 2004, vol. 9, pp.46–52 (In Russian)
3. Agapova E. A., Sumskey S. I. Analiticheskiy obzor matematicheskikh modeley rasprostraneniya oblakov tyazhelykh gazov [Analytical review of mathematical models of heavy gas cloud propagation]. *Occupational Safety in Industry*, 2017, vol. 5, pp. 23–31. (In Russian)
  4. Dobrocheyev O. V., Kuleshov A. A., Savenkova N. P., Filippova S. V. 2-D model of heavy gas dispersion over rough bedding surface. *Matematicheskoye Modelirovaniye*, 1996, vol. 8, no. 5, pp. 91–105 (In Russian).
  5. Kuzmin R. N., Kuleshov A. A., Savenkova N. P., Filippova S. V. Modelling of heavy gas cloud dispersion under industrial accidents. *Matematicheskoye Modelirovaniye*, 1998, vol. 10, no. 8, pp. 33–42 (In Russian).
  6. Kuleshov A. A., Hidalgo Dias N. M., Makhviladze G. M., Yakush S. E. Modelling of industrial accidents with liquefied toxic and flammable gases. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2010, vol. 2, no. 6, pp. 691–703.
  7. Nakayama H., Jurcakova K., Nagai H. Large-Eddy Simulation of plume dispersion within various actual urban areas. *Advances in Science and Research*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 33–41.
  8. Hertwig D., Patnaik G., Leitl B. LES validation of urban flow, part I: flow statistics and frequency distributions. *Environmental Fluid Mechanics*, 2017, vol. 17, pp. 521–550.
  9. Kastner-Klein P., Berkowicz R., Britter R. The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2004, vol. 87, pp. 121–131.
  10. Yassin M. F., Kato S., Ooka R., Takahashi T., Kouno R. Field and wind-tunnel study of pollutant dispersion in a built-up area under various meteorological conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, vol. 93, no. 5, pp. 361–382.
  11. Klein P., Leitl B., Schatzmann M. Concentration fluctuations in a downtown urban area. Part II: analysis of Joint Urban 2003 wind-tunnel measurements. *Environmental Fluid Mechanics*, 2011, vol. 11, pp. 43–60.
  12. Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area. *Urban Climate*, 2022, vol. 43, 101177.
  13. Evgrafova A. V., Sukhanovskii A. N. Convective transfer of a conditional admixture within urban geometry. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 2, pp. 14–21 (In Russian).
  14. Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations for Perm Krai (Electronic resource). URL: <https://59.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/3189566> (Date access: 07 October 2024) (In Russian).
  15. Zonato A., Martilli A., Santiago J. L., Zardi D., Giovannini L. On a new one-dimensional  $k-\epsilon$  turbulence closure for building-induced drag. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2023, vol. 149, no. 754, pp. 1674–1689.
  16. Rozoff C. M., Nolan D. S., Bryan G. H., Hendricks E. A., Kniewel J. C. Large-eddy simulations of the tropical cyclone boundary layer at landfall in an idealized urban environment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2023, vol. 62, no. 11, pp. 1457–1478.

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Беляева А. В., Сухановский А. Н. Лабораторное моделирование в задачах промышленной безопасности // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. № 4. С. 14–21. doi: 10.17072/1994-3598-2024-4-14-21

**Please cite this article in English as:**

Belyaeva A. V., Sukhanovskii A. N. Laboratory modeling of man-made disasters. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 4, pp. 14–21. doi: 10.17072/1994-3598-2024-4-14-21

**Сведения об авторах**

1. Анна Валерьевна Беляева, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.
2. Андрей Николаевич Сухановский, д. физ.-мат. н.; с.н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013

**Author information**

1. Anna V. Belyaeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
2. Andrey N. Sukhanovskii, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia