

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТВАЛОВ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ СИМУЛЯЦИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

БАШИРОВ Н. Р.

Для оптимизации формирования отвалов произведена компьютерная симуляция движения воздуха при разной геометрии прикарьерного пространства и различных температурах воздуха. Поставлена цель обеспечить концентрацию и направление движения воздушного потока непосредственно в чашу карьера в условиях естественного проветривания путем формирования контуров отвалов. В процессе компьютерной симуляции реализована динамическая трансформация части поверхности. Проведено сравнение показателей и проанализированы результаты. Процесс компьютерной симуляции определен как вычисления с целью понимания поведения частиц (флюидов) под действием разных сил (гравитация, трение, давление, ускорение и т. д.). При симуляции учитывались: одна смесь газов – воздух, движение воздушных масс под влиянием энергии ветра, также рассматривался теплообмен холодных и теплых потоков. Для упрощения проводимого эксперимента и получения линий тока воздушных масс и связанных с ними показателей такие оказывающие определенное влияние на воздухообмен факторы, как повышение концентрации углекислого и прочих газов, выделение тепла карьерными механизмами, окислительные процессы и естественное тепло обнаженных горных пород, в симуляции не рассматривались.

Ключевые слова: отвал; карьер; симуляция; ретопология; система частиц; эмиттер; проран; трансформация каркаса; румб; роза ветров; температурная инверсия.

На большинстве глубоких карьеров наблюдаются простои производства по причине сильной запыленности и загазованности атмосферы. Одной из основных причин простоя является ухудшение условий естественного воздухообмена из-за увеличения глубины карьера, а также возможных штилей и температурных инверсий, когда практически отсутствует вертикальный воздухообмен из-за разности температур смешиваемых сред (потоков). Немаловажным фактором, который может оказать как позитивное, так и негативное влияние на естественный воздухообмен, является расположение отвалов. Один из основных критериев формирования отвалов и рудных складов при проектировании – это возможная интенсификация воздушных потоков, направленных в карьер, созданная за счет формирования отвалов по розе ветров. Формируя форму отвалов, необходимо создавать между ними направляющие воздухозаборные щели-прораны для струйных течений (прямоточных, возвратных, сложных) потоков воздуха [1].

В настоящее время существует множество экспериментальных методов, с помощью которых можно определить эффективность проветривания карьеров при разных вариантах формирования отвалов. Однако использование экспериментальных методов и технических средств сопряжено с принципиальными ограничениями, связанными в первую очередь со сложностью, уникальностью и высокой стоимостью современных установок и собственно эксперимента по

воспроизведению гидро- и аэродинамических процессов во всем их разнообразии. Возможной альтернативой является технология, основанная на вычислительных методах с использованием наукоемких пакетов прикладных программ. Сочетание адекватного количественного описания и визуального воспроизведения разнообразных гидро- и аэродинамических процессов, в том числе и обтекание предметов воздушным потоком, позволяет в максимально наглядном виде и условиях, приближенных к лабораторному эксперименту, изучить явление (процесс) и провести сопоставление с соответствующими теоретическими положениями [2].

Для достижения поставленной цели необходим программный продукт, способный трансформировать твердое тело-каркас во время симуляции движения воздушного потока для получения оптимальной (удовлетворяющей поставленным условиям) формы обдуваемой поверхности.

Выбрано нестандартное программное решение, позволяющее во время симуляции производить трансформацию каркаса в реальном времени, в ручном режиме, с определением потенциальных площадей к преобразованию. Положительной стороной данного выбора также является развитая система частиц и возможность симуляции потоков [3, 4]. При этом выбранный программный продукт является условно бесплатным.

Таким решением стала межплатформенная среда разработки компьютерных игр Unity. Это инструмент для разработки двух- и трехмерных приложений и игр, работающий с операционными системами Windows, Linux и OS X. Unity позволяет имитировать поверхности и текстуры твердых тел, а также поведение систем частиц с большим количеством настроек. Система частиц состоит из двух типов объектов: источника частиц (эмиттер) и самих частиц. Частицы – это небольшие объекты с ограниченным временем существования, выпускаемые эмиттером. Системами частиц могут быть реализованы различные эффекты: клубы дыма, капли жидкости, порывы ветра и пр.

Следует отметить, что данное программное обеспечение позволило произвести предварительную симуляцию, результаты которой проверялись посредством повторной симуляции в научном программном комплексе FlowVision. Работа данной связки программ создала предпосылки к появлению оптимального (с субъективной точки зрения) каркаса расположения и форм отвалов. Весь процесс симуляции необходимо поделить на два этапа:

- предварительная симуляция в Unity и получение каркаса отвалов;
- симуляция во FlowVision с применением полученного каркаса, последующая проверка интенсификации воздушных потоков, регистрация прогресса/регресса, сопоставление результатов.

В качестве расчетной и анализируемой области принимался правильный восьмиугольник фактически существующей земной поверхности с карьером в центре. Карьер представлен в конечном положении. Диаметр расчетной области – около 9,7 км. Каркасная поверхность создана на основании аэрофотографии в форме восьмиугольника для удобства продувки по ветровым румбам. Параметры рассматриваемого карьера: длина – 2,1 км; ширина – 1,4 км; глубина – 0,7 км.

Полученный первоначальный каркас имел 100 000 треугольников-фасеток. Общая площадь каркаса – 8 452 Га. Каркас получился детальным и весьма громоздким. При работе Unity с ним затрачивалось значительное количество времени. В связи с этим возникла необходимость в ретопологии – уменьшении количества треугольников за счет оптимизации сетки каркаса, при этом требовалось, чтобы изменения поверхности были минимальными. После проведения ретопологии полученный каркас повторял все основные формы рельефа и карьера, что

привело к снижению количества треугольников до 27 000. Сходимость каркасов до и после ретопологии приемлема для проведения макроанализа движения воздушных масс по такой большой анализируемой площади.

Таким образом, имея в наличии топографический сеточный каркас в среде Unity, можно изменять его структуру и параметры в соответствии с поставленной целью, например регулировать высоту отсыпки отвалов, сооружать щели-прораны. Динамическое моделирование топографической поверхности может происходить при непрерывном резонансе с симулируемыми воздушными процессами моделируемого субъекта [5]. Одним из решающих факторов контроля симулируемых потоков частиц является фиксация эмиттеров по определенным направлениям-румбам. В настройках системы частиц можно установить зависимость от скорости ветра и коэффициента турбулентности. Испускание частиц происходит при помощи непрерывного импульсного фона. Эти же возможности позволяют синхронизировать испускание частиц у нескольких эмиттеров, результат при этом может быть идентичен эффекту концентрации.

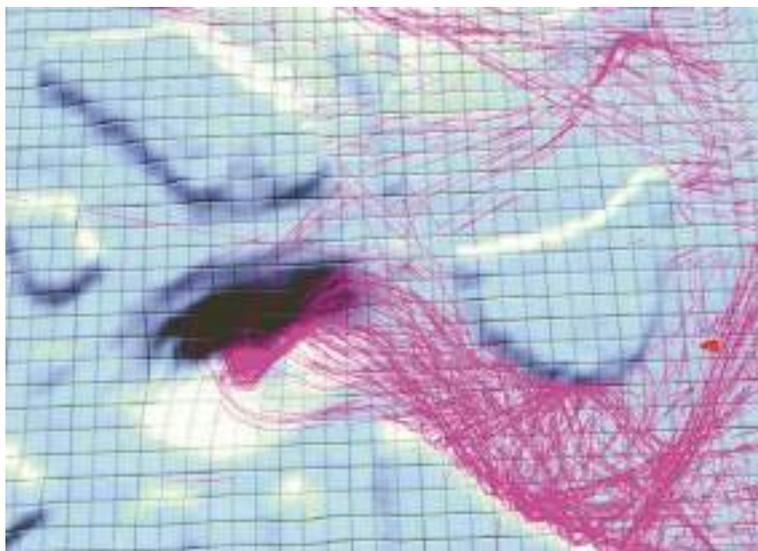


Рис. 1. Поток частиц в динамически формируемой поверхности

Первый этап симуляции. После импорта каркаса топоповерхности с карьером в Unity расставляются эмиттеры по анализируемым румбовым направлениям и распределяются ветровые зоны. После расстановки для каждого направления запускается свой процесс симуляции. Затем производится анализ полученных результатов.

Проведенный анализ показал неплохую сходимость теоретических данных [6, 7] и показателей отрыва имитируемого потока частиц, что позволило определить концентрационные зоны движения прирельефных воздушных потоков и приступить к динамическому проектированию.

Перед началом трансформации поверхности необходимо задать границы, в контурах которых отсыпка отвалов производиться не должна (площади с уже имеющимися строениями, сооружениями, озерно-речной сетью либо не предназначенные для отсыпки с целью снижения нагрузок на борта карьера).

Трансформация каркаса рельефа на проектную высотную отметку осуществлялась плагином редактором МТЕ, разработанным для трансформирования кар-

касных тел в среде Unity. За счет попеременного включения и отключения эмиттеров по каждому из румбов во время симуляции потока частиц производился процесс вытягивания рельефа в отвальные формы, обеспечивающие концентрацию потоков частиц непосредственно в чашу карьера. Рельеф можно вытягивать и опускать, регулируя высоту, а также сглаживать, придавая откосам отвалов более естественный угол. Частицы при этом взаимодействуют с изменяемой в реальном времени земной поверхностью и меняют свою траекторию движения, образуя направленные концентрационные струи.

На рис. 1 приведен пример сформированных отвалов, образующих прораны, в которых концентрируются потоки частиц по одному из румбов.

На рис. 2 приведены результаты первого этапа симуляции. Высота сформированных отвалов составляет не более 70–80 м. Заштрихованные контуры – это отвалы с малой мощностью отсыпки (около 10 м), которые играют приоритетную роль в формировании потоков, так как они направляют приземные потоки в сторону проранов и карьера.

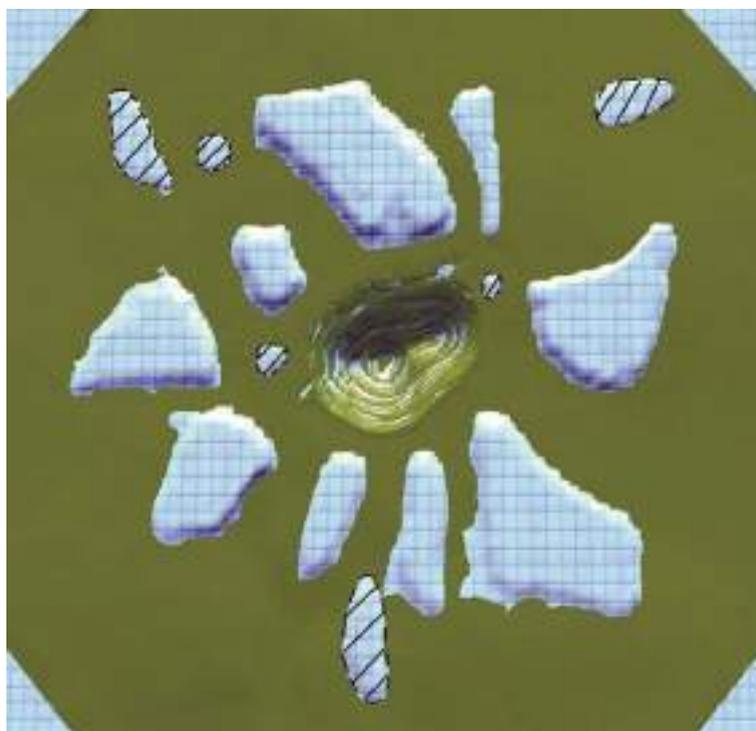


Рис. 2. Результаты первого этапа симуляции

Второй этап симуляции производился во FlowVision. Программный комплекс FlowVision компании ТЕСИС решает трехмерные уравнения динамики жидкости и газа: уравнения Навье–Стокса (законы сохранения массы и импульса) и уравнение переноса энтальпии (закон сохранения энергии). В поставленной задаче программой решались уравнения энергии (температуры), турбулентности и скорости, при этом характеристики и изменяющиеся значения этих переменных записывались и сохранялись в отдельных файлах [8, 9].

После назначения ключевых настроек программы также создаются слои визуализации вывода полученной информации и характеристик. Для каждого румба-направления истечения потока произведен свой расчет [10].

В ходе симуляции было показано хорошее качественное согласие динамики распределения температуры с естественной физикой процесса [11]. В случае поступления холодного воздуха происходит постепенное заполнение им чаши карьера, при этом более теплый воздух располагается в верхней части области моделирования с постепенным смещением вниз по потоку (рис. 3). Полное заполнение холодным воздухом чаши карьера (при средней скорости ветра 3 м/с) происходит за 70–200 мин.

В случае поступления теплого воздуха наблюдается его продвижение в верхней области моделирования. В результате в самой чаше карьера достаточно продолжительное время сохраняется охлажденный воздух. Полное заполнение теплым воздухом чаши карьера происходит примерно за 360 мин.

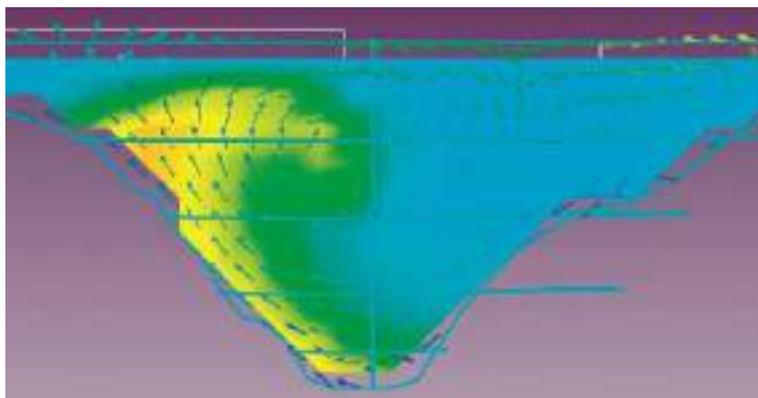


Рис. 3. Поступление холодного воздуха в карьер ($t = -5 \dots 0^\circ \text{C}$)

Для достижения объективности в программном комплексе FlowVision сравнивались три поверхности:

- без отвалов с карьером;
- базовый (исходный) вариант расположения отвалов;
- с отвалами, полученными на первом этапе симуляции в процессе динамического воздействия.

Расчеты производились до стабилизации температуры и профиля ветровых потоков непосредственно в чаше карьера.

Получены и проанализированы данные проверочной симуляции второго этапа во FlowVision по румбам северного, западного и южного направлений. Восточное направление не рассматривалось ввиду его низкой приоритетности, согласно розе ветров.

По каждой поверхности формировалась база данных скорости движения воздушных масс в пределах плоскостей горизонтов: +550; +350; +150; 0 м, которым соответствует глубина карьера от поверхности 70; 270; 470; 620 м (таблица, рис. 4).

Как следует из таблицы, данные базового варианта наиболее близки к показателям варианта поверхности без отвалов, это дает основание считать, что расположение отвалов базового варианта оказывает минимальное воздействие на скорость ветра в карьере. При анализе линий тока воздушных масс в вариантах базовом и без отвалов зафиксированы значительные рециркуляционные потоки, тогда как в динамически созданной поверхности они меньше за счет точечной концентрации линий тока в чаше карьера.

Анализ численных экспериментов свидетельствует о достаточно объективной физической картине распределения пространственно-временных аэродинамических параметров: температуры и скорости. Также симуляция, в соответствии с теорией, воспроизводит такие эффекты ветровых струй, как инверсия и циркуляция потоков в карьере, угол срыва потока с края карьера, теплообмен сред и пр.

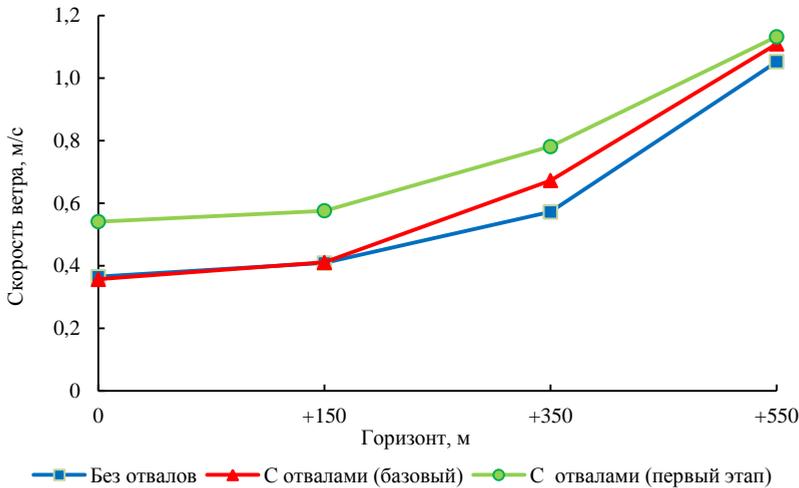


Рис. 4. Сравнительный график по данным проверочной симуляции во FlowVision

Таким образом, выявлено увеличение скорости потоков воздуха (в среднем на 40 %) в карьере на глубоких горизонтах динамически созданной поверхности относительно базового варианта. Также отмечено увеличение скорости ветра (на 10 %) на горизонте +550 м.

На базе реализованных компьютерных симуляций движения воздуха сделан вывод о потенциальной возможности применения в карьерах предварительной симуляции воздушных потоков при динамическом проектировании отвалов, что позволит обеспечить:

- сокращение расстояния транспортирования горной массы за счет оптимизации расположения отвалов на коротких плечах;
- оптимальную схему воздухозабора;

Показатели средней скорости ветра в пределах плоскости, м/с

Горизонт, м	Без отвалов			С отвалами (базовый)			С отвалами (первый этап)		
	Направление потока ветра								
	Север	Запад	Юг	Север	Запад	Юг	Север	Запад	Юг
0	0,43	0,23	0,43	0,35	0,23	0,49	0,57	0,37	0,68
+150	0,50	0,23	0,49	0,50	0,23	0,50	0,69	0,39	0,65
+350	0,65	0,47	0,60	0,74	0,48	0,79	0,91	0,71	0,73
+550	0,94	1,05	1,17	0,90	1,22	1,21	1,02	1,16	1,22

- интенсивность потоков в прикарьерных участках;
- улучшение экологической ситуации в карьере;
- сокращение простоев карьеров по причине загазованности;
- эффективность рассматриваемых технологических и технических сооружений воздухозабора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акишев А. Н., Забелин В. В. Пылегазоподавление и естественное проветривание карьеров: метод. указания по разделу // Разработка алмазородных месторождений открытым способом в криолитозоне. Требования к проектированию: разрабатываемый национальный стандарт РФ. Мирный: Якутнiproалмаз, 2015. 69 с.
2. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: учеб. пособие / Т. В. Кондранин [и др.]. М.: МФТИ, 2005. 104 с.
3. О возможности редактирования (скульптурирования) 3d-модели в процессе симуляции. URL: <http://cccp3d.ru/topic/85139-о-возможности-редактирования-скульптурирования-3d-модели-в-процессе-симуляции/#comment-818216> (дата обращения: 15.11.2017).
4. Игровой дизайн. Горный инженер спрашивает совета. Холмы и ветер. URL: <http://www.gamedev.ru/gamedesign/forum/?id=226326&page=1> (дата обращения: 15.11.2017).
5. Жаркова В. В., Щеляев А. Е., Фишер Ю. В. Численное моделирование внешнего обтекания спортсмена. М.: ТЕСИС, 2017. 14 с.
6. Трофимов В. А., Кавера А. Л. Аэрология горных предприятий: конспект лекций. Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2016. 122 с.
7. Левицкий Ж. Г. Основы аэрологии горных предприятий. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2009. 172 с.
8. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Версия 2.5.4. Руководство пользователя. М.: ТЕСИС, 2008. 285 с.
9. Омельчук М. В. Научное обоснование методики оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов в нештатных ситуациях: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2017. 177 с.
10. Федосов А. В., Журавлева Е. В. Моделирование воздушных потоков на нефтеперевалочном комплексе с целью определения оптимального расположения зданий и сооружений. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. 18 с.
11. Разработка методологии комплексного решения задач освоения месторождений твердых полезных ископаемых арктической зоны / Н. Н. Мельников [и др.]. Апатиты: Изд-во ГоИ КНЦ РАН, 2016. 10 с.

Поступила в редакцию 1 декабря 2017 года

METHOD FOR DYNAMIC DESIGN OF DUMPS IN PRELIMINARY SIMULATION OF AIRFLOW

Bashirov N. R. — ALROSA, PJSC, Mirny, Republic Sakha (Yakutia), the Russian Federation. E-mail: bashirov_n.r@mail.ru

The following goal was set to optimize formation of dumps: concentration and direction of airflow to the pit bowl in conditions of natural ventilation by forming dump contours in the course of computer simulation of the movement of air masses. The process of computer simulation is characterized as a calculation to understand the behavior of particles (fluids) under the action of different forces (gravity, friction, pressure, acceleration, etc.). A computer simulation of air movement is carried out for different geometry of the near-pit space and various air temperatures. Dynamic transformation of a part of the surface in the process of computer simulation is performed. The indicators are compared and the results are analyzed. Only one mixture of gases – air and air masses movement under the influence of wind energy was taken into account during simulation, and heat exchange was also considered when simulating cold and hot flows. In order to simplify the current experiment and to obtain precisely airflow lines and the associated parameters, such factors that have a certain influence on air exchange, such as increasing the concentration of carbon dioxide and other gases, heat release by open-pit machines, oxidation processes and natural heat of exposed rocks were not considered in the simulation.

Key words: dumps; open pit; simulation; retopology; particle system; emitters; channels; frame transformation; rhumbs; wind rose; temperature inversion.

REFERENCES

1. Akishev A. N., Zabelin V. V. *Metodicheskie ukazaniia po razdelu "Pylegazopodavlenie i estestvennoe provetrivanie kar'erov" v sostave razrabatyvaemogo natsional'nogo standarta RF "Razrabotka almazorudnykh mestorozhdenii otкрытым способом v kriolitozone. Trebovaniia k proektirovaniu"* [Methodological guidelines on the section "Dust and gas suppression and natural ventilation of pits" as part of developing national standard of the Russian Federation "Open-pit mining of diamond ore deposits in the cryolitozone. Design requirements"]. Mirny, 2015, 69 p.
2. Kondranin T. V., and others. *Primenenie paketov prikladnykh programm pri izuchenii kursov mekhaniki zhidkosti i gaza: ucheb. posobie* [Training manual "Use of application software packages in the study of fluid mechanics courses"]. Moscow, MIPT Publ., 2005, 104 p.
3. *O vozmozhnosti redaktirovaniia (skul'pturovaniia) 3d-modeli v protsesse simuliatsii* [On the possibility of modification (sculpture) of 3D model in the process of simulation]. Available at <http://cccp3d.ru/topic/85139-о-возможности-редактирования-скульптурирования-3d-модели-в-процессе-симуляции/#comment-818216> (Access date 15th November, 2017).
4. *Igrovoi dizain. Gornyi inzhener sprashivaet soveta. Kholmy i veter* [Game design. Mining engineer is asking for advice. Hills and wind]. Available at <http://www.gamedev.ru/gamedesign/forum/?id=226326&page=1> (Access date 15th November, 2017).

5. Zharkova V. V., Shcheliaev A. E., Fisher Iu. V. *Chislennoe modelirovanie vneshnego obtekaniia sportsmena* [Numerical simulation of sportsman's external flow]. Moscow, OOO TESIS Publ., 2017. 14 p.
 6. Trofimov V.A., Kavera A. L. *Aerologiya gornyykh predpriyatii. konspekt lektsii* [Aerology of mining enterprises. Lecture notes]. Donetsk, Donetsk National Technical University Publ., 2016, p. 122.
 7. Levitskii Zh. G. *Osnovy aerologii gornyykh predpriyatii* [Fundamentals of aerology of mining enterprises]. Karaganda, KarSTU Publ., 2009. 172 p.
 8. Fluid motion modeling system FlowVision. Version 2.5.4. User guide. Moscow, TESIS Publ. 285 p. (In Russ.)
 9. Omel'chuk M. V. *Nauchnoe obosnovanie metodiki otsenki bezopasnosti ob'ektov khraneniia legkikh uglevodorodov v neshtatnykh situatsiiakh: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Scientific substantiation of a safety assessment methodology of light hydrocarbons storage facilities in contingency situations. Cand. eng. sci. diss.]. Tyumen, 2017. 177 p.
 10. Fedosov A. V., Zhuravleva E. V. *Modelirovanie vozdushnykh potokov na nefteperevalochnom komplekse s tsel'iu opredeleniia optimal'nogo raspolozheniia zdanii i sooruzhenii* [Modeling of airflows at the oil transshipment complex in order to determine optimal location of buildings and structures]. Ufa, USPTU Publ., 2014. 18 p.
 11. Mel'nikov N. N., and others. *Razrabotka metodologii kompleksnogo resheniia zadach osvoeniia mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh arkticheskoi zony* [Development of a methodology for the comprehensive solution of issues of solid mineral deposits development in the Arctic zone]. Apatity, MI KSC RAS Publ., 2016. 10 p.
-