

УДК 550.361+550.362

Фадеева Ирина Игоревна

научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
СО РАН,
630091 г. Новосибирск, Красный пр., 54
инженер,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А.Трофимука СО РАН,
630090 г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3
e-mail: FadeevaII@ipgg.sbras.ru

Аюнов Дмитрий Евгеньевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А.Трофимука СО РАН
e-mail: AyunovDE@ipgg.sbras.ru

Романенко Виталий Владимирович

начальник группы,
Институт радиационной безопасности
и экологии Национального ядерного центра РК,
г. Курчатова, Республика Казахстан
e-mail: Romanenko@nnc.kz

**ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО ТЕПЛОВОГО
ЭФФЕКТА ОТ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО
ВЗРЫВА НА СЕМИПАЛАТИНСКОМ
ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ***Аннотация:*

В работе приведены результаты математического моделирования нестационарной естественной конвекции и сопряженного с ней теплопереноса в сферически симметричной, относительно центра подземного ядерного взрыва (ПЯВ), пористой породе с заданными параметрами пористости и проницаемости. Проанализировано влияние этих параметров на скорость теплопереноса в пористой среде. Отмечены особенности распределения температуры в верхней части разреза над ПЯВ, их временная динамика и зависимость от параметров проницаемости и пористости.

Ключевые слова: подземный ядерный взрыв, Семипалатинский испытательный полигон, трещиноватость, теплоперенос, температурный каротаж, пористая среда, численное моделирование, нестационарный режим, термогравитационная конвекция, приближение Бринкмана–Буссинеска

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.048

Fadeeva Irina I.

researcher,
The Chinakala Institute of Mining SB RAS,
630091, Novosibirsk, 54 Krasny pr.,
engineer,
The A.A. Trofimuk Institute of petroleum geology
and geo-physics SB RAS,
630090, Novosibirsk, 3 Akademik Koptug pr.
e-mail: FadeevaII@ipgg.sbras.ru

Ayunov Dmitry E.

candidate of physical and mathematical sciences,
senior researcher,
The A.A. Trofimuk Institute petroleum geology
and geo-physics SB RAS
e-mail: AyunovDE@ipgg.sbras.ru

Romanenko Vitaly V.

the group head,
The Institute of Radiation Safety and Ecology
of the National Nuclear Center RK,
Kurchatov. Kazakhstan
e-mail: Romanenko@nnc.kz

**ESTIMATION THE UP-TO-DATE
THERMAL EFFECT FROM
UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSION
IN THE SEMIPALATINSK TEST SITE***Abstract:*

The paper presents the numerical modeling results concerning natural convection and the conjugated heat transfer in porous medium, which is spherically symmetric relatively the center of an underground nuclear explosion (UNE). The porosity and permeability parameters of porous medium were determined. The effect of these parameters on the heat and mass transfer rate in porous media is considered. The features of the temperature distribution, their temporal dynamics and dependence on permeability and porosity parameters of the medium are denoted.

Key words: underground nuclear explosion, the Semipalatinsk test site, fracturing, heat transfer, temperature logging, porous media, numerical simulation, unsteady regime, natural convection, Brinkman–Boussinesq approximation

Введение

Исследования тепловых остаточных эффектов от подземных ядерных взрывов (ПЯВ) на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) велись на протяжении многих десятилетий. Использовалась тепловая съемка с летательных аппаратов, температурные измерения на поверхности, в штольнях, в скважинах и непосредственно в котловых

полостях, проводились исследования тепловых аномалий СИП по данным спутниковых снимков [1].

В частности, с помощью тепловой съемки эффектов от ПЯВ с летательного аппарата фиксировались температурные аномалии на поверхности земли как в течение первого года, так и по прошествии нескольких лет после испытания. В результате данных работ выявлялись тепловые аномалии с размерами от 80 до 250 м, при давности проведения испытаний до 26 лет. Обобщение материалов показывает, что котловые полости в течение многих лет сохраняют высокую внутреннюю температуру. Например, температура в полости взрыва "Рулисон" (США) через 6 лет упала лишь до 290 °С [2], при этом оценка начальной температуры в первое время после взрыва составляла 450°С [3].

В данной работе продолжена тема изучения тепловых аномалий от ПЯВ для оценки активности процессов, связанных с подземными испытаниями [4, 5, 6]. Серия температурных исследований в исследовательских скважинах, пробуренных вблизи ПЯВ, выявила наличие «горячих» скважин с резко выделяющимся по температуре и по высокому вертикальному температурному градиенту подземных вод (рис. 1).

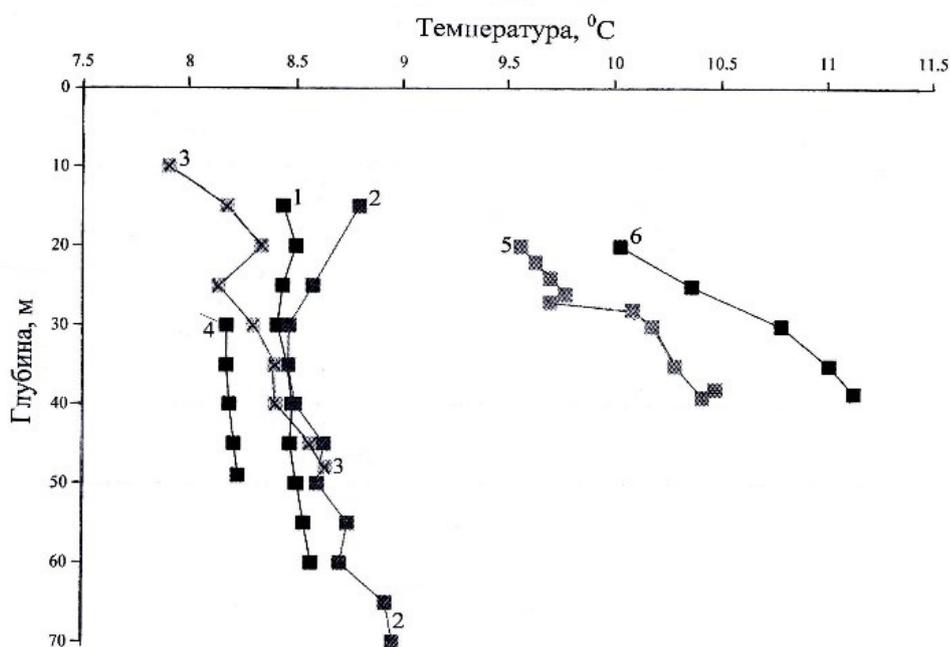


Рис. 1 – Термокаротаж в наблюдательных скважинах площадки Балапан СИП в 2010 г.
«Горячие» скважины соответствуют графикам 5 и 6 [7]

Природа этих тепловых аномалий в разрезе недостаточно изучена, но мы можем в качестве одного из объяснений предположить, что они обусловлены прогревом от ПЯВ.

Последующие более детальные исследования скважин в окрестностях некоторых боевых скважин показали сложное пространственное распределение температуры. В частности, на участке Сары-Узень у скв. 104 мы можем отметить, что вариации температуры от скважины к скважине (рис. 2) выявляют горизонтальный температурный градиент порядка 0,002 – 0,007 К/м, а также обнаружены особенности в вертикальном температурном градиенте (рис. 3).

По данным комплексного обследования на участке скважины 104 наблюдается струйная газопроницаемость пород по имеющимся ослабленным структурам, которые в результате способствуют вертикальной миграции газов и образованию на дневной поверхности газовых аномалий в почвенном воздухе, а также вертикального градиента температур [8].

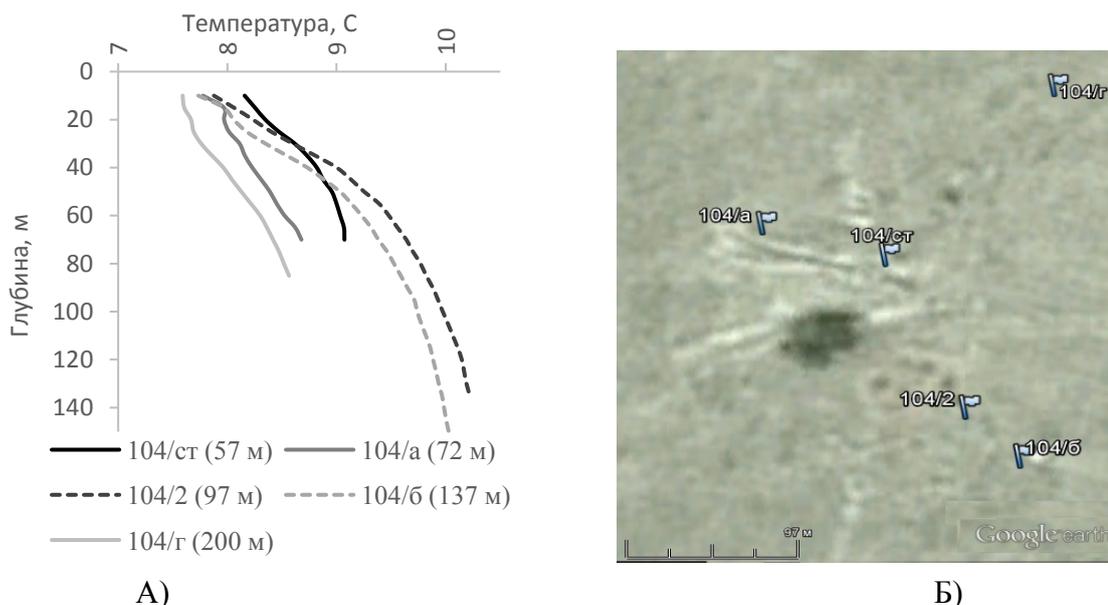


Рис. 2 – А) – температуры в скважинах в районе скв. 104 участка Сары-Узень в 2014 – 2015 гг. (в скобках указаны расстояния до боевой скважины); Б) – расположение скважин относительно боевой скважины (темное пятно – провал от ПЯВ)

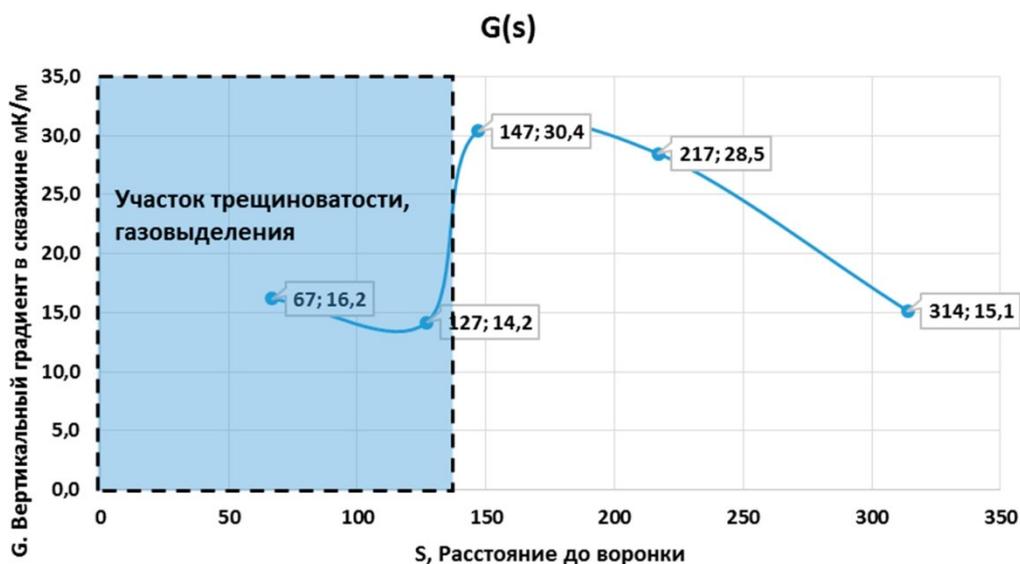


Рис. 3 – Вертикальный температурный градиент в районе скв. 104 участка Сары-Узень

В рамках исследования современного остаточного тепла от ПЯВ в данной работе мы рассмотрели модель перераспределения тепла от ПЯВ путем вывода тепла разогретыми газами к поверхности из остывающих полостей ПЯВ через поры и трещины горной породы.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу стабилизации температуры в безграничной, сферически симметричной относительно центра ПЯВ пористой породе с неравномерным начальным распределением температуры. Предполагается, что после взрыва порода имеет повышенную температуру и проницаемость вблизи полости взрыва, которые уменьшаются с увеличением расстояния от полости. Давление в полости взрыва и ближней зоне достаточно

быстро, по сравнению с температурой, уравнивается с фоновым значением давления.

Положим, что основным механизмом распространения тепла от прогретой области является свободно конвективное или термогравитационное течение газа в порах породы. Предлагается течение газа в высокопроницаемой пористой среде в условиях гравитационной силы описывать в рамках приближения Бринкмана–Буссинеска [9]. В данном приближении для нахождения поля скоростей в уравнение импульса Бринкмана вводится член плавучести Буссинеска [10], учитывающий подъемную силу, обусловленную тепловым расширением. Полученные скорости используются в уравнении теплопроводности для нахождения распределения температуры в породе. Таким образом, процесс переноса массы, импульса и энергии в пористой среде описывается системой нестационарных уравнений:

$$\frac{\partial \varphi \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\rho}{\varphi} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}}{\varphi} \right) + \nabla p + \frac{\eta}{K} \mathbf{u} - \nabla \frac{\eta}{\varphi} \nabla \mathbf{u} = \rho g \beta (T - T_0); \quad (2)$$

$$\overline{\rho C} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla(\lambda_{eff} \cdot \nabla T), \quad (3)$$

где t – время; ρ – плотность, φ – пористость; \mathbf{u} – вектор скорости фильтрации; p – давление; η – коэффициент динамической вязкости; K – проницаемость пористой среды; g – ускорение свободного падения; β – термический коэффициент объемного расширения; T – температура; T_0 – начальная температура области решения; $\overline{\rho C} = (1 - \varphi) \rho_{sk} C_{p,sk} + \varphi \rho_f C_{p,f}$ и $\lambda_{eff} = (1 - \varphi) \cdot \lambda_{sk} + \varphi \lambda_f$, где λ_{sk} , ρ_{sk} , $C_{p,sk}$ – теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость скелета пористой породы; λ_f , ρ_f , $C_{p,f}$ – теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость порового флюида. Теплообмен излучением не учитывался, так как пренебрежимо мал по сравнению с конвективным теплообменом.

Граничные условия. На достаточно большом расстоянии (можно рассматривать как бесконечность) от ПЯВ скорость газа $\mathbf{u} = 0$, фоновая температура постоянна $T = T_\infty$.

Начальные условия. Давление в пористой породе постоянное $p = p_0$, газ неподвижен $\mathbf{u} = 0$, задано начальное распределение температуры:

$$T_0(r) = T_\infty + (T_h - T_\infty) \cdot \exp(-r^2/1000), \quad (4)$$

где T_∞ – фоновая температура породы; T_h – начальная температура в центре взрыва; r – расстояние от центра взрыва.

Давление в системе отсчитывается относительно постоянного давления, заданного в точке на бесконечности $p = p_0$.

Параметры среды. Газ в порах породы считается вязкой, теплопроводной, ньютоновской жидкостью при постоянном давлении p_0 . Теплофизические свойства скелета пористой породы полагаются постоянными, не зависящими от температуры.

Рассматривались две модели пространственного распределения параметра проницаемости породы: некоторый объем, включающий область ПЯВ, однородный по параметру проницаемости ($K = \text{const}$) и линейное уменьшение проницаемости с удалением от ПЯВ, отражающее степень разрушенности породы в зависимости от расстояния r от центра ПЯВ:

$$K(r) = K_0 - \frac{K_0 - K_R}{R} \cdot r, \quad (5)$$

где K_0 – проницаемость в центре ПЯВ ($r=0$ м), K_R – проницаемость породы на расстоянии $r = R$ от эпицентра ПЯВ.

Результаты

Численно промоделированы термогравитационная конвекция газа CO_2 и сопряженный с ней теплоперенос в безграничной, сферически симметричной относительно центра ПЯВ породе, с заданными начальным распределением температуры (4), пористостью φ и проницаемостью (однородная K и линейная $K(r)$ модель).

Теплофизические свойства газа CO_2 взяты из справочных данных [11,12]. Теплофизические свойства твердого скелета следующие: $\lambda_{sk} = 3$ Вт/м/К, $\rho_{sk} = 3000$ кг/м³, $C_{p,sk} = 1000$ Дж/кг/К.

Начальное распределение температуры (4) условно было взято следующим: $T_\infty = 8^\circ\text{C}$ и $T_h = 350^\circ\text{C}$.

Рассматривались три варианта линейной проницаемости (5) с разной проницаемостью в эпицентре ПЯВ: А) $K_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ м², Б) $K_0 = 6 \cdot 10^{-7}$ м², С) $K_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ м² – и одним значением проницаемости породы на расстоянии $R = 500$ м от эпицентра $K_R = 10^{-14}$ м². Также рассматривались три однородные по проницаемости среды с приведенными на рис. 4 значениями K . Расчеты проводились для двух значений пористости: $\varphi = 0,3$ и $\varphi = 0,4$ (см. рис. 4).

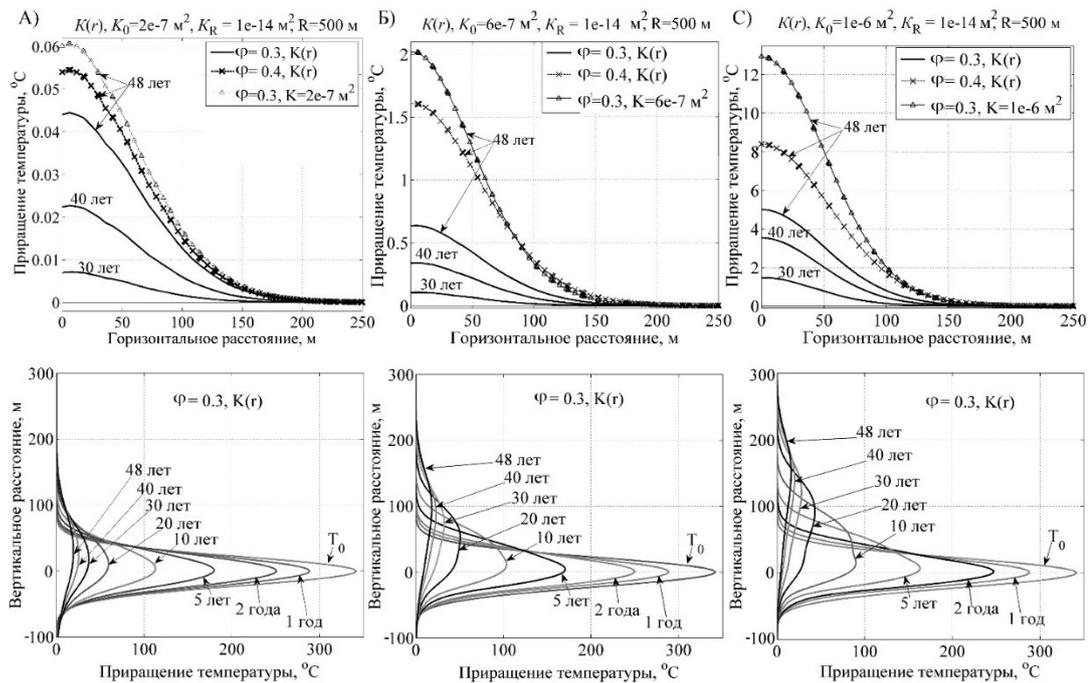


Рис. 4 – В первой строке представлено горизонтальное распределение температуры в зависимости от расстояния до эпицентра взрыва $\{0, 250\}$, находящегося на высоте 250 м над центром ПЯВ $\{0, 0\}$ в разные моменты времени, для разных параметров пористости φ , проницаемости: K – постоянная и $K(r)$ – линейно зависящая от r (5).

Во второй строке представлены графики изменения со временем распределения температуры вдоль вертикальной оси взрыва для трех вариантов проницаемости (5) (три столбца: А), Б), С)).

T_0 – начальное распределение температуры

Вертикальное распределение температуры. Из графиков приращения температуры $T - T_{\infty}$ вдоль вертикальной оси взрыва (нижняя строка рис. 4) видно, что при увеличении проницаемости в эпицентре K_0 (5) усиливается перенос тепла вверх, что связано с повышением скорости потока разогретого газа. Чем больше проницаемость, тем больше скорость потока газа в начальные моменты времени, далее процесс замедляется и переходит в стационарный режим истечения газа. Дополнительные расчеты с более высокими значениями проницаемости показывают, что в целом можно выделить два сценария тепломассопереноса: «медленный» – при низкой проницаемости породы (температура в эпицентре долгое время остается горячей) и «быстрый» – при высокой проницаемости породы ($K > 10^{-6} \text{ м}^2$) происходит быстрое остывание разогретой зоны ПЯВ. Это находит подтверждение в наблюдениях за температурами котловых полостей [2].

Горизонтальное распределение температуры. Рассмотрим тепловые процессы в «верхней части разреза», на определенном расстоянии над эпицентром ПЯВ, которые, как мы предполагаем, могут фиксироваться аппаратурно в виде тепловых аномалий. В верхней строке рис. 4 приведены графики приращения температуры $T - T_{\infty}$ вдоль горизонтального профиля, расположенного на высоте 250 м над эпицентром ПЯВ. Из графиков видно, что происходит прогрев горизонтальной зоны над ПЯВ, на рассматриваемом интервале времени. Изменение проницаемости с $K_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ до $K_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ увеличивает амплитуду температурной аномалии в зоне непосредственно над ПЯВ на два порядка. Разуплотнение породы также повышает вынос тепла с глубины. Так, изменение пористости с 0,3 до 0,4 увеличивает амплитуду прогрева этой зоны для рассматриваемых параметров модели в 1,2 – 1,7 раза.

Согласно результатам произведенных расчетов за период 30 – 48 лет после взрыва значения градиента примерно составляют: 0,001 - 0,018 К/м для $K_0 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ и 0,018 - 0,043 К/м для $K_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Радиус зоны температурной аномалии в целом не превышает 200 м для разных значений проницаемости и пористости. Дополнительно проводились расчеты для разных значений начальной температуры T_h и глубины. При этом размер зоны аномалии остается в тех же пределах даже при увеличении T_h до 900°C.

Заключение

Для оценки современного теплового эффекта от ПЯВ в верхней части разреза были проанализированы модели нестационарной естественной конвекции в пористой среде. Предложена и численно реализована модель термогравитационной конвекции Бринкмана–Буссинеска и сопряженного с ней теплопереноса от прогретой зоны в пористой породе. Результаты расчетов показывают, что в рассматриваемом диапазоне параметров среды современные температурные аномалии в верхней части разреза могут составлять от нескольких сотых до нескольких единиц градусов. При этом радиус аномалии по горизонтали в целом не превышает 200 м для разных значений проницаемости и пористости, что в целом согласуется с полевыми наблюдениями за температурными аномалиями на поверхности в первые годы после испытаний.

В целом совокупность методов программных расчетов и полевых исследований позволяет более детально подходить к оценке пространственно-временных конфигураций тепловых аномалий.

Литература

1. Исследование температурного режима территории Семипалатинского полигона с использованием пространственно-временной агрегации длинных рядов спутниковых измерений / Е.А. Мамаш, Д.Е. Аюнов, В.А. Кихтенко, В.В. Смирнов, Д.Л. Чубаров // Интерэкспо Гео-Сибирь. - 2015. - Т. 4. - № 2. - С. 39 - 44.
2. Бусыгин В.П. Локальные тепловые аномалии в эпицентральной зоне подземных ядерных взрывов, выполненных в штольнях / В.П. Бусыгин, А.И. Андреев // Вестник НЯЦРК. – 2004. - Вып. 3.
3. Тейлор Р.У. Тепловые эффекты подземных ядерных взрывов: пер. Н.И Шугаева / Р.У. Тейлор. – 1974.
4. Busygin V.P. Remote monitoring of former underground nuclear explosion sites predominantly in the former USSR. Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-Up Processes, Technologies and International Experience. A volume in Woodhead Publishing Series in Energy. 2013. - P. 833–851.
5. Исследование термальной активности эпицентральных зон подземных ядерных взрывов / В.В. Романенко, С.Б. Субботин, Д.Е. Аюнов, А.Д. Дучков, М.Е. Пермяков // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и проблемы нераспространения: тез. докл. VI междунар. науч.-практ. конф., 24-26 сентября 2014 г. - Павлодар: Дом печати, 2014. - С.131 - 133.
6. Шайторов В.Н. Геоэкологическое районирование территории СИП по геолого-геофизическим данным (на примере участков “Балапан” и “Сары-узен”) / В.Н. Шайторов // Вестник НЯЦ РК. - 2013. - Вып. 2.
7. Дучков А.Д. Результаты исследований температурного поля в наблюдательных скважинах Семипалатинского полигона (Восточно-Казахстанская область) / А.Д. Дучков, Д.Е. Аюнов, М.Е. Пермяков // ГЕО-Сибирь-2011. Т.2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Ч. 1: сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», 19 - 29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. - С. 42 - 47.
8. Геоэкологическое моделирование очаговых зон ПЯВ по геологогеофизическим данным / В.Н. Шайторов, А.В. Беляшов и др. // Вестник НЯЦ РК. - 2013.– Вып. 2(54).
9. Трифонова Т.А. Сравнительный анализ моделей Дарси и Бринкмана при исследовании нестационарных режимов сопряженной естественной конвекции в пористой цилиндрической области / Т.А. Трифонова, М.А. Шеремет // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. - Т. 5. - № 4. - С. 623 – 634.
10. Donald A. Nield and Adrian Bejan. Convection in Porous Media. Third Edition // USA, New York: Springer Science & Business Media, 2006. – 546.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: Наука, 1972. - 721 с.
12. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин. - М.: Атомиздат, 1967. - 474 с.