

Оценка влияния эффектов термо- и бародиффузии на перенос радона в пористой среде

В статье приводятся результаты экспериментального исследования влияния внешних факторов (разностей температур и давлений) на процесс переноса радона в пористой среде. С помощью разработанной физической модели показана необходимость учета термодиффузионных эффектов при математическом моделировании радоновой обстановки в здании. Обоснована целесообразность замены бинарного коэффициента диффузии радона в воздухе на «эквивалентный» при описании переноса радона в грунтовой массе и материалах ограждающих конструкций.

Ключевые слова:

радон, пористая среда, диффузия, разность температур, разность давлений.

Л.А.Гулабянц

А.В.Калайдо

ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко», г. Луганск

М.Н.Семенова

ФГБУ «НИИСФ РААСН» Минстроя России, г. Москва

Прогнозирование уровней радона в проектируемых и эксплуатируемых зданиях является актуальной научно-практической задачей. Однако многофакторность процесса формирования радоновой обстановки и разнонаправленность действия факторов, определяющих величину объемной активности радона в помещении, наряду с невозможностью инструментального контроля отдельных из них, приводят к потере или неверной интерпретации информации об особенностях данного процесса при натурных исследованиях. Поэтому математическое моделирование уровней радона более перспективно для существующих зданий, так как требует значительно меньших временных и материальных затрат, а на стадии проектирования является единственным выходом. Однако на

данный момент отсутствуют достоверные методы проектного расчета поступления радона в здания ввиду недостаточного понимания механизмов переноса и накопления радона в воздухе помещений [1,2].

К настоящему времени установлено, что перенос радона из грунтового основания через подземные ограждающие конструкции в воздух помещений нижнего этажа может осуществляться посредством диффузии и/или конвекции [3,4]. Движущей силой диффузионного поступления радона является разность объемных активностей (концентраций) радона в почвенном воздухе и воздухе помещения, составляющая десятки–сотни кБк/м³. Конвективный перенос радона вызывается разностью давлений на границах подземной горизонтальной ограждающей конструкции, которая индуцируется разностью температур воздуха в помещении и почвенного воздуха, ветровой нагрузкой на здание и его режимами эксплуатации. В реальных условиях разность температур в помещении и под зданием не превышает 20 °С, в результате перепад давлений на границах подземной ограждающей конструкции здания находится в пределах 2–5 Па.

Доминирующий механизм переноса радона определяется текущим состоянием системы сред «грунт–атмосфера–здание». Для данной системы характерна множественность возможных состояний, поэтому при нынешнем уровне знаний крайне проблематично построение универсальной модели формирования радоновой обстановки. В такой ситуации более перспективна разработка математической модели, адекватно описывающей поступление радона в помещения нижнего этажа в ограниченной области состояний данной системы сред.

Считается, что при проницаемостях пористой среды ниже 10⁻¹² м² перенос почвенного газа осуществляется посредством диффузии, в диапазоне воздухопроницаемостей 10⁻¹⁰ – 10⁻¹² м² значимую роль в пе-

реносе радона начинает играть конвекция, а при проницаемостях выше 10⁻¹⁰ м² она становится доминирующим механизмом [5,6]. В современном строительстве материалы подземных ограждающих конструкций имеют достаточно низкую воздухопроницаемость (10⁻¹⁴ – 10⁻¹⁶ м²), поэтому моделирование радоновой обстановки в проектируемых зданиях возможно в предположении чисто диффузионного механизма переноса радона.

Диффузионный поток радона через конструкцию пола $q_{диф}$ в основном определяется градиентом объемной активности радона ∇A , также на его величину могут влиять градиенты температур ∇T (термодиффузия) и давлений ∇P (бародиффузия) [7]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -q_{диф} = \nabla D \left(\nabla A + \frac{k_T}{T} \nabla T + \frac{k_P}{P} \nabla P \right), \quad (1)$$

где k_T и k_P – безразмерные коэффициенты термо- и бародиффузии соответственно; D – объемный коэффициент диффузии бинарной смеси, м²/с.

Считается, что эффекты бародиффузии на практике совершенно незначительны, а термодиффузия начинает играть ощутимую роль лишь при значительных температурных градиентах и существенно различных массах компонентов смеси [7]. В то же время, Minkin в [8] обосновывает необходимость включения термодиффузионного потока радона в математические модели наряду с потоком концентрационной диффузии. Поскольку результаты исследований по данному вопросу отсутствуют, значимость эффектов термо- и бародиффузии нуждается в экспериментальной проверке.

С целью исследования влияния разностей температур и давлений на процесс переноса радона в лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИСФ РААСН Минстроя России была разработана экспериментальная установка, представляющая физическую модель пористой среды (рис.1). Цилиндрическая

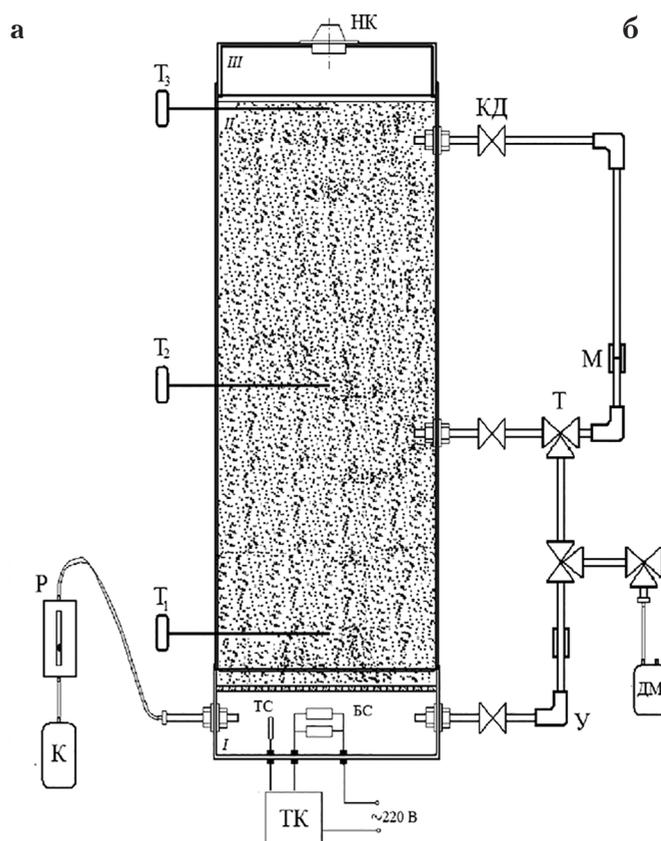


Рис.1. Экспериментальная установка: а – внешний вид; б – схема: НК – камера накопительная; T_1 , T_2 и T_3 – термометры погружные; Р – ротаметр поплавковый; К – компрессор; ТК – термоконтроллер ТСА5; ТС – термосопротивление; БС – блок сопротивлений; КД – кран двухходовой В-В 1/2"; Т – кран трехходовой В-В-В 1/2"; У – переходник угловой 90° 1/2"; М – муфта латунная; ДМ – манометр дифференциальный.

колонна концентрата циркониевого зернистого (КЦЗ) высотой 1500 мм помещалась в трубу из поливинилхлорида с наружным диаметром 160 мм и толщиной стенок 4 мм, длина трубы выбиралась близкой по величине к длине диффузии радона в большинстве грунтов. В данной физической модели КЦЗ не только формирует пористую среду, в которой происходит перенос почвенного газа, но и является мощным источником радона из-за высокого содержания в нем естественных радионуклидов.

По результатам гамма-спектрометрического анализа среднее значение удельной активности радия-226 в КЦЗ составило $C_{Ra} = 3263 \pm 339$ Бк/кг при удельной эффективной активности естественных радионуклидов $A_{эфф} = 4536,2 \pm 366,6$ Бк/кг.

Подобная удельная активность, с одной стороны, позволяет получать высокие значения плотности потока радона (ППР) с поверхности материала, а с другой – еще не достаточна для отнесения КЦЗ к радиоактивным материалам, требующим специального контроля их перемещения и особых условий обращения.

Заглушка III в верхней части установки (рис.1) служит для герметизации внутреннего объема трубы и измерения ППР с поверхности материала. В отверстие диаметром 70 мм, высверленном в заглушке, герметично вмонтирована накопительная камера НК-32 с сорбционной колонкой СК-13, заполненной активированным углем марки СКТ-3С ТУ N 6-16-1158-67 (рис.2). Определение по-

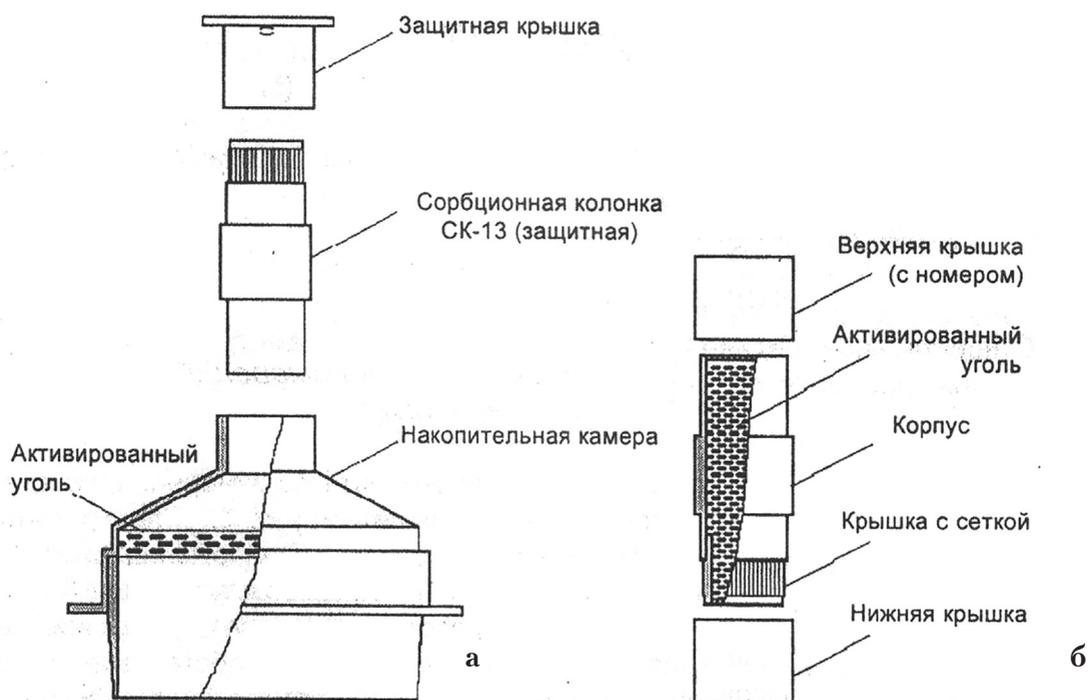


Рис.2. Средства измерения активности радона: а – накопительная камера НК-32; б – сорбционная колонка СК-13.

тока радона с поверхности пористой среды производилось методом пассивной сорбции, сорбционная колонка устанавливалась в накопительную камеру на 4 часа. По окончании экспонирования активированный уголь пересыпался в блок детектирования бета-радиометра РГБ 20П2 измерительного комплекса «Камера» для определения ППР радона.

В нижней камере I экспериментальной установки размещаются вводы пневматической и электрической систем, перепад температур по столбу пористой среды создается двумя соединенными параллельно керамическими сопротивлениями $R_1 = R_2 = 13$ кОм, которые включаются в сеть через температурный контроллер ТС4S, осуществлявший поддержание в объеме под пористой средой установленной температуры. В качестве чувствительного элемента температурного контроллера используется термосопротивление Pt-1000 в верхней части камеры I (рис.3), закрепленное на крышке. Измерение поля температур по оси установки осуществлялось тремя погружными

термометрами, обеспечивающими получение результатов с погрешностью не более $0,1^\circ\text{C}$.

Алюминиевая крышка диаметром 160 мм и толщиной 5 мм, установленная на специальной подставке из ПВХ, выполняет несущую функцию. Для того, чтобы крышка не оказывала сопротивления прохождению воздушного потока, в ней было высверлено 68 отверстий диаметром 10 мм (рис.3).

Также в нижней части камеры I располагается ввод пневматической системы, предназначенной для создания перепада давлений по столбу КЦЗ при исследовании бародиффузии. Пневматическая система включает малоомощный компрессор (2 Вт) постоянного действия, подающий поток воздуха через поплавковый ротаметр Ну-Lok, предназначенный для измерения потоков воздуха в диапазоне от $100\text{ см}^3/\text{мин}$. Для измерения величины избыточного давления в экспериментальной установке были реализованы три ввода, расположенные на расстоянии 0,7 м друг от друга. Посредством латунных труб диаметром

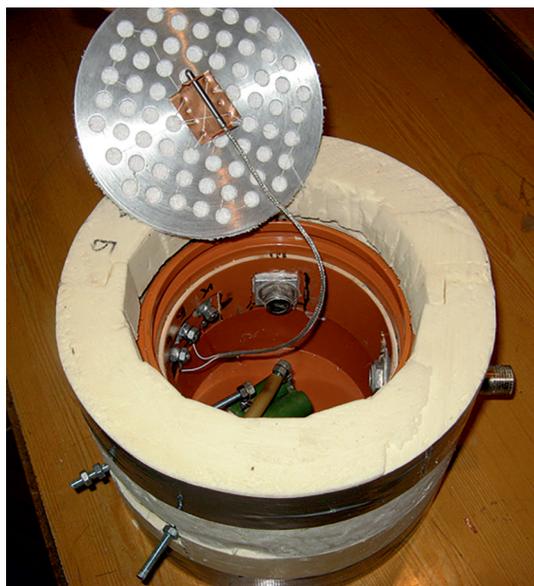


Рис.3. Нижняя камера 1 экспериментальной установки в сборе.

1/2" вводы объединены в пневматическую систему, подключенную к дифференциальному манометру высокой чувствительности Testo, позволяющему измерять разность давлений с точностью до 0,1 Па. Для удобства сборки пневматической системы на вертикальных участках имеются сгоны латунных труб муфтами.

На первом этапе экспериментального исследования плотность потока радона определялась в условиях чисто диффузионного переноса при отсутствии перепадов давлений и температур по высоте столба КЦЗ. Измерения проводились с момента сборки эксперимен-

тальной установки и до наступления радиоактивного равновесия в герметичной верхней камере. Наступление равновесия фиксировалось по прекращению нарастания средних за неделю значений ППР. Непосредственно после герметизации установки наблюдался достаточно быстрый рост ППР, выход на предельное значение имел место через три недели после начала исследований. Результаты измерений диффузионного потока радона представлены на рис.4, средняя величина ППР после наступления равновесия составила:

$$ППР_{\text{мол}} = 317,9 \pm 47,5 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Отмеченные высокие значения ППР объясняются «коэффициентом усиления» установки, заложенным на стадии ее проектирования. Поток радона с поверхности пористой среды радиусом $r_1 = 75$ мм поступал в накопительную камеру с входным сечением $r_2 = 32$ мм, то есть отношение площадей F_1/F_2 составляло 5,64. Наличие столь значительных потоков радона в экспериментальной установке повышает чувствительность метода регистрации эффектов, потенциально менее значимых, чем поток радона, вызванный молекулярной диффузией.

Второй этап представляет собой исследование влияния термодиффузии на перенос радона в пористой среде. Для этого в нижней камере устанавливалась избыточная температура, которая в дальнейшем поддерживалась

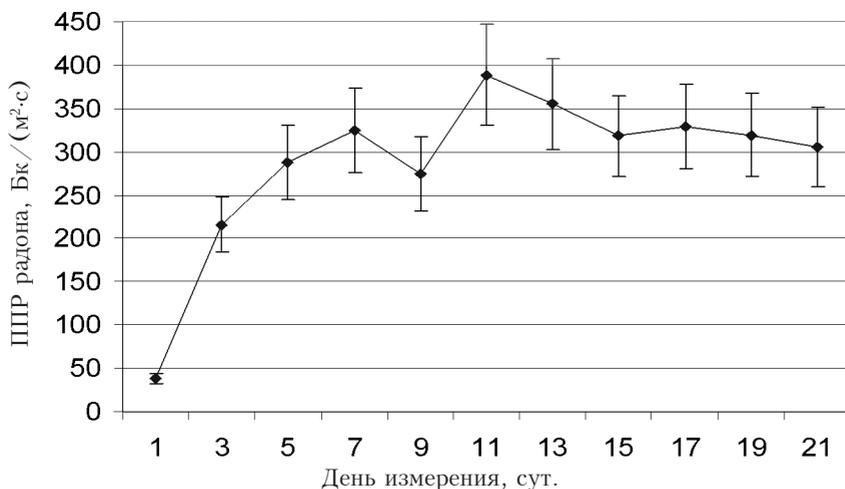


Рис.4. Результаты измерения плотности диффузионного потока радона.

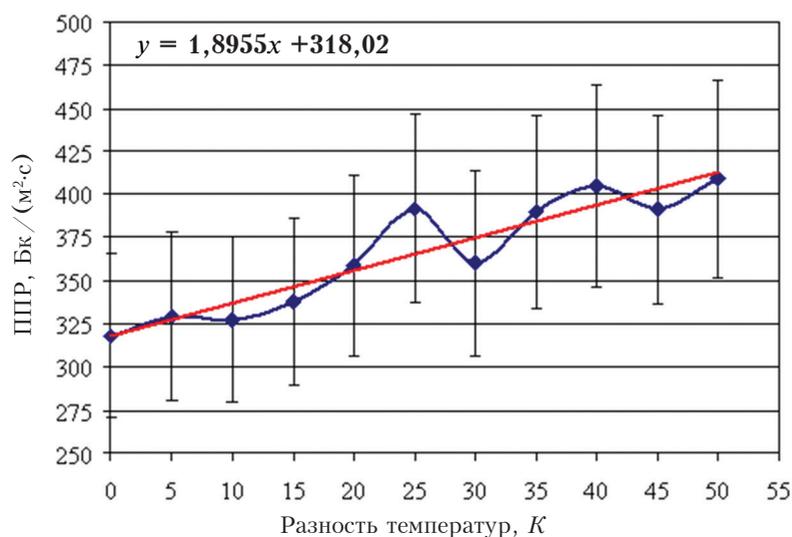


Рис.5. Результаты измерения плотности потока молекулярной и термической диффузии.

постоянной температурным регулятором. Перепад температур изменялся от 5 до 50 °С с шагом в 5 °С. Для каждой разности температур производилось 12 измерений (трое суток), зависимость среднего значения ППР радона от перепада температур по столбу пористой среды представлена на рис.5.

Результаты исследования влияния термодиффузии показали тенденцию к линейному росту ППР с увеличением разности температур на границах пористой среды (достоверность линейной аппроксимации $R^2 = 0,8768$). Таким образом, необходим учет влияния термодиффузионных эффектов на перенос радона в пористой среде, при этом из уравнения аппроксимирующей кривой получается следующее выражение для коэффициента термодиффузии:

$$k(\Delta T) = 1 + 0,006 \cdot \Delta T. \quad (2)$$

На третьем этапе исследовался вклад перепада давлений в перенос радона. Посредством компрессора в нижней камере экспериментальной установки создавалось избыточное давление, регулировавшееся ротаметром за счет изменения величины расхода подаваемого воздуха. Ввиду сложности точной установки постоянного перепада давлений ΔP в ходе эксперимента задавалась постоянная величина воздушного потока Q , поступающего в нижнюю камеру в единицу вре-

мени. Величины Q и ΔP однозначно связаны законом фильтрации Дарси:

$$\frac{Q}{S} = \frac{k\Delta P}{\eta L} \Rightarrow \Delta P = \frac{Q\eta L}{kS}. \quad (3)$$

Величина Q устанавливалась по шкале ротаметра в интервале от 100 до 1000 см³/мин с шагом в 100 см³/мин и поддерживалась неизменной на протяжении двух суток. При каждом перепаде давлений производилось 6 измерений, результаты которых представлены в табл.1.

Результаты исследования переноса радона под действием перепада давлений показали колебание значений ППР в пределах погрешности измерения данной величины при чисто молекулярной диффузии. Статистически значимая разница результатов измерений ППР имеет место при перепадах давлений $\Delta P \geq 50$ Па. Поскольку в реальных зданиях температурно-индуцированный перепад давлений не превышает 3–5 Па, то нет необходимости во введении коэффициента $k(\Delta P)$, учитывающего влияние бародиффузии на процесс поступления радона в здания.

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При математическом моделировании радоновой обстановки в проектируемых здани-

Табл.1. Результаты исследования бародиффузионного переноса радона.

Q, см ³ /мин	ΔP, Па	k, м ²	ППР, мБк/(м ² ·с)
0	0	10 ⁻¹⁰	317,9
100	8		310,6
200	16		325,4
300	24		320,4
400	32		335,0
500	40		333,7
600	48		329,5
700	56		334,1
800	64		355,5
900	72		369,3
1000	80		375,3

яx следует принять гипотезу о доминировании диффузионного механизма переноса радона из грунтового основания в воздух помещений. Однако использование уравнения диффузионного переноса в виде (1) достаточно трудоемко, более целесообразен учет баро- и термодиффузионных эффектов посредством введения «эквивалентного» коэффициента диффузии радона в материале в виде:

$$D_{\text{эkv}} = k(\Delta P) \cdot k(\Delta T) \cdot D, \quad (4)$$

Литература

1. Гулябянц Л.А. Математическая модель формирования радоновой обстановки в здании // АНРИ. 2017. N 2(53). С. 41-49.
2. Васильев А.В. Проблема облучения радоном в современных многоэтажных зданиях // Строительство и реконструкция. 2014. N 4(54). С. 37-44.
3. Ярошенко И.В. Моделирование поступления радона в жилища // АНРИ. 1999. N 4(19). С. 17-28.
4. Гулябянц Л.А. Определение радоновой нагрузки на подземные ограждающие конструкции здания // Академия. Строительные науки. 2016. N 1. С. 122-128.
5. T. Diallo, B. Collignan, F. Allard. «2D Semi-empirical models for predicting the entry of soil gas pollutants into buildings», *Building and Environment*, vol. 85, pp. 1-16, 2012.
6. T. Kohl, F. Medici, L. Rybach. «Numerical simulation of radon transport from subsurface to buildings», *Journal of Applied Geophysics*, no. 31, pp. 145-152, 1994.
7. Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцев Б.Т. и др. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник. Под общ. ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
8. L. Minkin. «Is diffusion, thermodiffusion or advection a primary mechanism of indoor radon entry?» *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 102, no. 2, pp. 153-162, 2002.

где $k(\Delta P)$ и $k(\Delta T)$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние баро- и термодиффузии на процесс переноса радона.

В таком случае, поступление радона в здание может быть описано законом Фика:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D_{\text{эkv}} \nabla^2 A - \lambda A + G, \quad (5)$$

где λ – постоянная распада радона, с⁻¹; G – генерация радона в материале, Бк/(м³·с).

2. Исследования с помощью физической модели показали несущественность вклада бародиффузии в процесс переноса радона в пористых средах, в то время как термодиффузионные эффекты приводят к статистически значимому увеличению плотности потока радона с поверхности грунта при перепадах температур, характерных для реальных условий эксплуатации зданий. В результате для «эквивалентного» коэффициента диффузии получено выражение:

$$D_{\text{эkv}} = k(\Delta T) \cdot D = (1 + 0,006 \Delta T) \cdot D.$$

Использование «эквивалентного» коэффициента диффузии существенно упрощает математическое описание процесса переноса радона в системе «грунт–атмосфера–здание».

Estimation of the Thermo- and Barodiffusion Effects on the Radon Transport in a Porous Media

Gulabyants Loren¹, Kalaydo Alexandr², Semenova Maria¹

¹ Russian Academy of Architecture and Building Science, Research Institute of Building Physics, The Russian Ministry of Construction, Moscow, Russia;

² Luhansk Taras Shevchenko National University, Luhansk.

Abstract. The results of an experimental study of external factors (temperature and pressure differences) influence on the radon transport in a porous medium are presents in this paper. The developed physical model of the porous media has shown the need to take into account the thermodiffusion effects at the mathematical modeling of the radon situation in buildings. The expediency of replacing the binary diffusion coefficient of radon in air with «equivalent» in describing radon transport in the soil and walling materials is substantiated.

Key words: radon, porous media, diffusion, temperature difference, pressure difference.

Л.А.Гулабянц (проф., д.т.н., зав.лаб.) – ФГБУ «НИИСФ РААСН» Минстроя России, г. Москва; А.В.Калайдо (нач.отд.) – ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко», г.Луганск; М.Н.Семенова (м.н.с.) – ФГБУ «НИИСФ РААСН» Минстроя России, г. Москва.

Контакты: тел.: +7 (495) 482-39-65; e-mail: kalaydo18@mail.ru.