

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ



УДК 697.137.5

DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.2

Ю. С. ВЫТЧИКОВ
М. Е. САПАРЁВ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БЕЗРАЗМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК К РАСЧЕТУ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

APPLICATION OF THE METHOD OF DIMENSIONAL CHARACTERISTICS TO
THE CALCULATION OF THE HUMIDITY MODE OF MULTI-LAYERED ENCLOSING
BUILDING STRUCTURES

Реализация программы энергосбережения в строительстве, принятая в Российской Федерации, привела к существенному изменению конструктивных решений строительных ограждающих конструкций. Для достижения нормативных значений сопротивления теплопередаче в настоящее время широко используются для утепления наружных стен различные фасадные системы с применением в качестве утеплителей полимерных материалов, обладающих низкими значениями коэффициента теплопроводности при относительно высоком значении коэффициента паропроницаемости. Поэтому при выборе фактурного слоя фасадных систем необходимо учитывать значение его сопротивления диффузии водяного пара во избежание накопления влаги в наружных стенах. Проблема, связанная с возможным накоплением влаги, особенно актуальна при проектировании как трехслойных наружных стен, так и стен с внутренним утеплением. Для устранения образования плесневых грибов на внутренних поверхностях ограждающих конструкций, приводящих к опасным кожным заболеваниям и органов дыхательных путей, а также разрушению строительных конструкций, необходимо с высокой точностью выполнить расчет влажностного режима ограждающих конструкций с целью защиты их от переувлажнения. В статье представлена методика определения положения плоскости возможной конденсации в многослойных ограждающих конструкциях, базирующаяся на использовании метода безразмерных характеристик.

The implementation of the energy saving program in construction, adopted in the Russian Federation, has led to a significant change in the design decisions of building envelopes. To achieve the normative values of heat transfer resistance, various facade systems are currently widely used for insulation of external walls using polymeric materials as heaters, which have low values of the coefficient of thermal conductivity with a relatively high value of the coefficient of vapor permeability. Therefore, when choosing a textured layer of facade systems, it is necessary to take into account the value of its resistance to diffusion of water vapor in order to avoid the accumulation of moisture in the outer walls. The problem associated with the possible accumulation of moisture is especially relevant when designing both three-layer exterior walls and walls with internal insulation. To eliminate the formation of molds on the inner surfaces of the enclosing structures, leading to dangerous diseases of skin and respiratory tract organs, as well as the destruction of building structures, it is necessary to accurately calculate the humidity mode of the enclosing structures in order to protect them from overmoistening. The article presents a methodology for determining the position of the plane of possible condensation in multilayer enclosing structures, based on the use of the dimensionless characteristics method.

Ключевые слова: плоскость конденсации, влажностный режим, диффузия, сопротивление теплопередаче, бесцементный керамзитобетон, метод безразмерных характеристик

Keywords: condensation plane, humidity mode, diffusion, heat transfer resistance, sandless expanded clay concrete, dimensionless characteristics method

Главной причиной многочисленных повреждений ограждающих конструкций зданий является в основном чрезмерное накопление в них диффузионной влаги в зимний период [1, 2]. Наличие биоповреждений на внутренних поверхностях наружных стен, покрытий и перекрытий может быть связано с допущенными ошибками при проектировании или некачественным выполнением строительных и теплоизоляционных работ. Чтобы исключить проектный брак, необходимо выполнить с высокой точностью расчет влажностного режима строительных ограждающих конструкций.

При выполнении расчета необходимо правильно определить положение плоскости возможной конденсации, т. е. наиболее опасное сечение в ограждающей конструкции с точки зрения возможного в ней накопления влаги. В работах [3–5] приводятся методики определения плоскости возможной конденсации графоаналитическими методами, весьма неточные и неприспособленные для компьютерного моделирования. В 1997 г. на кафедре гидравлики и теплотехники Самарского государственного архитектурно-строительного университета был разработан метод безразмерных характеристик, позволяющий существенно упростить задачу по определению плоскости возможной конденсации в многослойных ограждающих конструкциях. В работах [7, 8] изложено подробное описание данного метода. Позднее этот метод был включен в ТСН 23-346-2003 Самарской области «Энергетическая эффективность жилых и общественных зданий».

При разработке метода безразмерных характеристик использовалась исходная информация по строительной климатологии в соответствии с действующими нормативными документами. В качестве исходных данных для расчета влажностного режима ограждающих конструкций принимались значения средней температуры наружного воздуха t_n и относительной влажности φ_n для наиболее холодного месяца.

В настоящее время согласно СП 50.13330.2012 при выполнении расчёта влажностного режима используются средние параметры наружного воздуха периода месяцев с отрицательными температурами – средняя температура $t_{н.отр}$ и среднее парциальное давление водяного пара $e_{н.отр}$.

На точность расчета влажностного режима существенно влияет выбор аналитической

зависимости для парциального давления насыщенного водяного пара.

В табл. 1 приведены табличные значения парциального давления водяного пара, полученные экспериментальным путем, а также приближенные аналитические зависимости, приведённые в справочной и нормативной литературе.

Из приведенных данных следует, что наибольшей точностью обладают зависимости, представленные в справочнике [9] для положительных и отрицательных температур.

Используемая в работах [6, 7] зависимость, взятая из справочника [6], обладает высокой точностью в области положительных температур. В области отрицательных температур относительная погрешность колеблется от 9,9 до 31,8 % при изменении температуры наружного воздуха от -10 до -30 °С.

Для поиска плоскости возможной конденсации необходимо иметь непрерывную аналитическую зависимость, описывающую с достаточной точностью парциальное давление насыщенного водяного пара в диапазоне от -30 до $+25$ °С. Авторами настоящей статьи получена приближенная аналитическая зависимость, представленная в табл. 1, погрешность которой в области отрицательных температур не превышает 8,7 %.

При средней температуре наружного воздуха за период месяцев с отрицательными температурами для г. Самары, равной $t_{н.отр} = -7,18$ °С, предельная погрешность не превышает 5 %.

Полученная зависимость была использована при актуализации метода безразмерных характеристик. Сущность метода безразмерных характеристик заключается в установлении аналитической зависимости между безразмерным сопротивлением диффузии водяного пара и сопротивлением теплопередаче в многослойной ограждающей конструкции.

Условие отсутствия выпадения конденсата в ограждающей конструкции в безразмерных координатах согласно [4] запишем в виде

$$Y_i > Y_{ni}, Y_i > 0, i = 1 \dots n, \quad (1)$$

где $Y_i = \frac{\sum_{j=1}^i R_{n_j}}{R_{n_0}}$ – безразмерное сопротивление диффузии водяного пара; n – число слоев в ограждающей конструкции; $R_{n_i} = \frac{\delta_i}{\mu_i}$ – сопротивление паропроницанию слоя ограждающей

Таблица 1

Значения парциального давления насыщенного водяного пара E , Па, для температуры от -30 до $+30$ °С

Источник информации	Температура t , °С (в знаменателе приведена погрешность)						
	-30	-20	-10	0	+10	+20	+25
Экспериментальные значения (по методическому пособию «Расчет тепловой защиты зданий»)	38	103	260	611	1228	2338	3168
$E = 10^{2,125 + \frac{156+8,12t}{236+t}}$ согласно [8]	<u>50,1</u> 31,8	<u>124,5</u> 26,9	<u>285,8</u> 9,9	<u>610,9</u> 0	<u>1227,4</u> 0	<u>2339</u> 0	<u>3162</u> 0,18
$E = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5370}{273+t}\right)$ (СП 50.13330.2012)	<u>55,3</u> 45,5	<u>130,8</u> 27,0	<u>291,3</u> 12,0	<u>611,7</u> 0	<u>1221</u> -0,6	<u>2319,4</u> -0,8	<u>3146</u> 0,7
$E = 4,688 \left(1,486 + \frac{t}{100}\right)^{12,3}$ при $t \leq 0$ °С $E = 288,58 \left(1,098 + \frac{t}{100}\right)^{8,02}$ при $t \geq 0$ °С согласно [9]	<u>38,2</u> 0	<u>103</u> 0	<u>260</u> 0	<u>611</u> 0	<u>1228</u> 0	<u>2340</u> 0	<u>3169</u> 0
$E = 611 \left(1 + \frac{t}{100}\right)^{7,6}$ (данные авторов статьи)	<u>40,6</u> 6,8	<u>112</u> 8,7	<u>274,3</u> 5,5	<u>611</u> 0	<u>1260,7</u> 2,66	<u>2442</u> 4,4	<u>3331</u> 5,1

щей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$; δ_i – толщина слоя, м; μ_i – коэффициент паропроницаемости материала слоя, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$; $R_{n_0} = \sum_{i=1}^n R_{n_i}$ – сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$; Y_{n_i} – значение безразмерного сопротивления паропроницанию для состояния полного насыщения влажного воздуха водяным паром

$$Y_{n_i} = \frac{e_s - E}{e_s - e_{n_{\text{отп}}}}, \quad (2)$$

где e_s – упругость водяного пара внутреннего воздуха, Па; E – упругость насыщенного водяного пара, Па.

Температура в толще ограждающей конструкции рассчитывается по формуле

$$\tau_i = t_s - X_i(t_s - t_n), \quad (3)$$

где $X_i = \frac{1}{\alpha_s + \sum_{i=1}^i R_i} R_0^{\text{всл}}$ – безразмерное сопротивление теплопередаче в рассматриваемом сечении; α_s – коэффициент теплоотдачи со стороны внутренней поверхности ограждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – термическое сопротивление слоя, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; $R_0^{\text{всл}}$ – приведенное сопротивление

теплопередаче глади ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Значение упругости насыщения водяного пара с учётом формулы (3) определяется выражением

$$E = 611 \left\{ 1 + 0,01 \left[t_s - X(t_s - t_{n_{\text{отп}}}) \right] \right\}^{7,6}, \quad \text{Па.} \quad (4)$$

Установлена зависимость между безразмерными характеристиками Y_i и X_i следующего вида:

$$Y_i = \frac{\sum_{i=1}^{i-1} \frac{\delta_i}{\mu_i} + \frac{\lambda_i}{\mu_i} \left(X_i R_0^{\text{всл}} - \frac{1}{\alpha_s} - \sum_{i=1}^{i-1} R_i \right)}{R_{n_0}}, \quad i = 1 \dots n. \quad (5)$$

Расчет влажностного режима многослойной ограждающей конструкции выполняется в следующей последовательности:

1. По формулам (1) и (3) вычисляются значения безразмерных переменных X_i и Y_i на границах слоев.

2. Для найденных значений X_i ($i = 1, 2 \dots n$) определяются значения Y_{n_i} по формулам (2) и (4).

3. Проверяется выполнение неравенства (1) на границах слоев ограждения.

Если неравенство (1) выполнено, то выпадение конденсата в ограждении маловероятно и расчёт на этом заканчивается. Если неравенство (6) не выполнено, то следует определить положение плоскости конденсации водяного пара, используя зависимость $f = Y_n - Y_i$ на экстремум, полагая

$$\frac{df}{dX} = 0. \quad (6)$$

После выполнения преобразований получена аналитическая зависимость для определения безразмерной координаты X_i плоскости возможной конденсации вида

$$X_i = \frac{t_6 - 100 - 55,9 \left(\frac{e_6 - e_{н\text{омп}}}{t_6 - e_{н\text{омп}}} \frac{\lambda_i R_0^{\text{вст}}}{\mu_i R_{n_0}} \right)^{0,1515}}{t_6 - t_n}. \quad (7)$$

По величине безразмерной переменной X_i можно определить расстояние x_i от внутренней поверхности слоя до плоскости возможной конденсации по формуле

$$x_i = \lambda_i \left(X_i R_0^{\text{вст}} - \frac{1}{\alpha_6} - \sum_{i=1}^{i-1} R_i \right), \text{ м.} \quad (8)$$

Если расстояние x_i превышает толщину слоя δ_p , то за плоскость возможной конденсации принимают согласно СП 50.13330.2012 наружную поверхность слоя.

Для численной реализации метода безразмерных характеристик была разработана программа, позволяющая автоматизировать расчет влажностного режима.

После определения координаты плоскости конденсации выполняется расчет по проверке возможности накопления влаги в строительной ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации здания и за период месяцев с отрицательными температурами.

Согласно СП 50.13330.2012 не допускается накопление влаги за годовой период эксплуатации здания и ограничивается накопление влаги за холодный период. При этом допустимое накопление влаги не должно выходить за пределы сорбционного увлажнения используемых материалов.

В целях устранения накопления влаги в наружных стенах следует располагать более плотные слои ближе к внутренней поверхности, а рыхлые – к наружной. Указанные выше рекомендации реализуются в стенах, утепленных вентилируемыми фасадами.

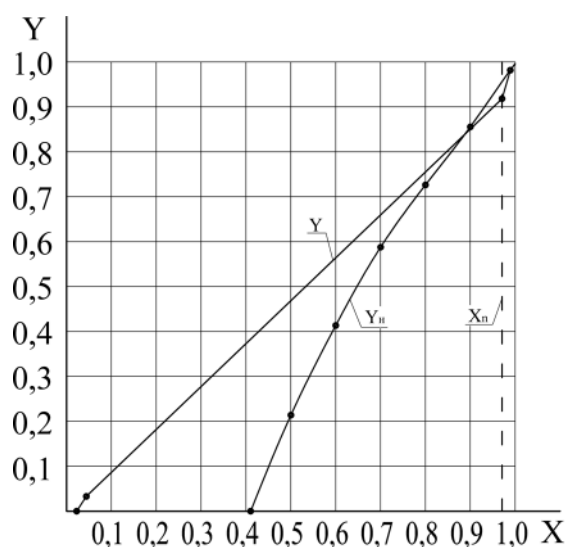
При использовании внутреннего утепления наружных стен или слоистых кладок довольно часто возникает необходимость в размещении пароизоляции с внутренней стороны теплоизоляционного материала. При этом величина требуемого сопротивления определяется по следующей формуле:

$$R_{n_{из}} = \frac{Y_{n_i} R_{n_0} \sum_{i=1}^m R_{n_i}}{1 - Y_{n_i}}, \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / мг,} \quad (9)$$

где $m \leq n$, m – количество слоев, расположенных между внутренней поверхностью стены и наружной поверхностью утеплителя.

На рисунке представлены результаты расчета влажностного режима для многослойной наружной стены жилого здания, состав которой показан в табл. 2. Район строительства – г. Самара.

Приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены, определенное по



Результаты расчета влажностного режима наружной стены: Y_n – безразмерное сопротивление парапролонгации для состояния полного насыщения влажного воздуха водяным паром; Y – безразмерное сопротивление диффузии водяного пара; X_n – координата плоскости возможной конденсации

Состав наружной стены

Таблица 2

№ слоя	Материал слоя	Толщина δ , м	Плотность ρ , кг/м ³	Расчетные коэффициенты	
				λ , Вт/(м·К)	μ , мг/(м·ч·Па)
1	Известково-песчаный раствор	0,02	1800	0,7	0,12
2	Монолитный беспесчаный керамзитобетон	0,50	600	0,14	0,155
3	Цементно-песчаный раствор	0,02	1800	0,76	0,09
4	Фактурный слой фасадной системы	0,0035	1600	0,7	0,05

методике, изложенной в СП 50.13330.2012, составило $R_{0}^{np} = 3,41$ (м²·К)/Вт, что превышает нормативное значение для наружной стены жилого здания, строящегося в Самарской области, равное 3,1 (м²·К)/Вт. Сопротивление теплопередаче глади наружной стены составило $R_{0}^{ysl} = 3,768$ (м²·К)/Вт, сопротивление паропроницанию – $R_{n_0} = 3,69$ (м²·ч·Па)/мг.

При температуре внутреннего воздуха $t_{в} = 20$ °С и относительной влажности $\varphi_{в} = 50$ % значение упругости водяного пара составило $e_{в} = 1169$ Па; значение средней температуры наружного воздуха за период месяцев с отрицательными температурами составило $t_{н.отпр} = -7,18$ °С; упругость водяного пара $e_{н.отпр} = 310$ Па.

По формуле (8) определяем значение безразмерной координаты плоскости возможной конденсации

$$X_2 = \frac{20 - 100 - 55,9 \left(\frac{1169 - 310}{20 - 7,18} \cdot \frac{3,768}{3,69} \cdot \frac{0,14}{0,155} \right)}{20 + 7,18} = 0,984.$$

$$x_2 = 0,14 \left(0,984 \cdot 3,788 - \frac{1}{8,7} - \frac{0,02}{0,7} \right) = 0,502.$$

Плоскость возможной конденсации совпадает с наружной поверхностью беспесчаного керамзитобетона, т. е. $x_2 = \delta_2 = 0,5$ м.

Для проверки возможности накопления влаги в наружной стене далее был выполнен расчет по методике, изложенной в СП 50.13330.2012, который показал на отсутствие накопления влаги за годовой период эксплуатации здания, а накопление влаги в зимний период не выходит за пределы сорбционного увлажнения керамзитобетона.

Выводы. 1. Представлена уточненная методика определения плоскости возможной конденсации в многослойных ограждающих конструкциях, базирующаяся на использовании метода безразмерных характеристик.

2. Получена приближенная аналитическая зависимость парциального давления насыщенного водяного пара от температуры, обладающая достаточной точностью для инженерных расчетов.

3. Приведены результаты расчета влажностного режима наружной стены, выполненной из монолитного беспесчаного керамзитобетона, по предложенной авторами методике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гагарин В.Г., Zubarev K.П. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // Вестник МГСУ. 2019. № 4. С. 485–495.
2. Фролов М.В. Выявление причин возникновения влаги в ограждающей конструкции стены //

Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2017. С. 185–189.

3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.

4. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1974. 319 с.

5. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.

6. Выхчиков Ю.С. Определение плоскости конденсации для многослойных ограждающих конструкций // Строительные материалы. 2006. № 4. С. 92–94.

7. Выхчиков Ю.С., Беляков И.Г. Исследование влажностного режима строительных ограждающих конструкций с помощью метода безразмерных характеристик // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1998. № 3. С. 76–79.

8. Внутренние санитарно-технические устройства: справочник проектировщика / под ред.: И.Г. Старовойтова, И.Ю.Шиллера. Ч.1. Отопление. Кн.1. М.: Стройиздат, 1990.

9. Блази В. Справочник проектировщика: Строительная физика. М.: Техносфера, 2004. 480 с.

REFERENCES

1. Gagarin V. G., Zubarev K. P. Application of moisture potential theory to modeling of non-stationary humidity regime of fences. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], 2019, no. 4, pp. 485-495. (in Russian)
2. Frolov M. V. Identification of the causes of moisture in the wall enclosing structure. *Problemy jenergoberezhenija v promyshlennom i zhilishhno-kommunal'nom kompleksah: sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Problems of energy saving in industrial and housing and communal complexes: proceedings of the XVIII International scientific and practical conference], Penza, 2017, pp. 185-189. (in Russian)
3. Fokin K. F. *Stroitel'naja teplotehnika ograzhdajushhij chastej zdaniij* [Construction heat engineering of enclosing parts of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2006. 256 p.
4. Il'inskij V.M. *Stroitel'naja teplofizika* [Construction Thermophysics]. Vysshaja shkola Publ., 1974. 319 p.
5. Bogoslovskij V.N. *Teplovoj rezhim zdaniija* [Thermal regime of the building]. Moscow, Strojizdat Publ., 1979. 248 p.
6. Vytchikov Yu. S. Determination of the condensation plane for multilayer enclosing structures. *Stroitel'nye materialy* [Building material], 2006. no. 4, pp. 92-94. (in Russian)
7. Vytchikov Yu. S., Belyakov I. G. Investigation of the humidity regime of building enclosing structures using the method of dimensionless characteristics. *Izvestiya vyshje uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo* [Proceedings of higher educational institutions. Construction], Novosibirsk, 1998, no. 3, pp. 76-79. (in Russian)

8. *Vnutrennie sanitarno-tehnicheskie ustrojstva: Spravochnik proekti-rovshhika* [Internal sanitary-technical devices: a Guide designer] Part 1. Heating. Book 1, Moscow, Stroizdat Publ., 1990. 344 p.

9. Blasi V. *Spravochnik proektirovshhika. Stroitel'naja fizika* [Handbook of the designer. Building physics]. Moscow, Technosphere Publ., 2004. 480 pp.

Об авторах:

ВЫТЧИКОВ Юрий Серафимович

кандидат технических наук, профессор кафедры общей и прикладной физики и химии Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: git.2008@mail.ru

VYTCHEKOV Yuri S.

PhD in Engineering Science, Professor of the of Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: git.2008@mail.ru

САПАРЕВ Михаил Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогасоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: msx072007@yandex.ru

SAPAREV Mikhail Ye.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the of Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: msx072007@yandex.ru

Для цитирования: *Вытчиков Ю.С., Сапарёв М.Е.* Применение метода безразмерных характеристик к расчету влажностного режима многослойных строительных ограждающих конструкций // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 2. С. 10–15. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.2.

For citation: *Vytchikov Yu.S., Saparev M.Ye.* Application of the Method of Dimensional Characteristics to the Calculation of the Humidity Mode of Multi-layered Enclosing Building Structures. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, Vol. 10, no. 2, Pp. 10–15. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.2.

ПОДПИСКА – 2020

**на июль – декабрь по Объединенному каталогу
«Пресса России»**

Уважаемые читатели!

**Обратите внимание, что с 1 сентября 2019 г.
проводится подписная кампания второго полугодия 2020 г. на журнал
Самарского государственного технического университета**

«ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»

Подписной индекс нашего журнала в каталоге И70570

*Подробные условия оформления подписки и стоимость
Вы найдете в I томе каталога «Пресса России» на странице 178.
Также возможно оформить подписку онлайн на сайте <https://www.ppressa-rf.ru/>*