



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

**Кафедра «Гидротехническое и энергетическое
строительство»**

В. В. Ивашечкин

ГИДРАВЛИКА ВОДОЗАБОРНОЙ СКВАЖИНЫ

Пособие

**Минск
БНТУ
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Гидротехническое и энергетическое
строительство»

В. В. Ивашечкин

ГИДРАВЛИКА ВОДОЗАБОРНОЙ СКВАЖИНЫ

Пособие
по выполнению лабораторной работы по дисциплине
«Механика жидкости и газа»
для студентов специальности 1-70 04 01
«Водохозяйственное строительство»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2017

УДК 628.112(076.5)

ББК 38.774я7

И24

Рецензенты:

А. М. Кравцов, П. А. Автушко

Ивашечкин, В. В.

И24 Гидравлика водозаборной скважины: пособие по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Механика жидкости и газа» для студентов специальности 1-70 04 01 «Водохозяйственное строительство» / В. В. Ивашечкин. – Минск: БНТУ, 2017. – 16 с.

ISBN 978-985-550-620-2.

В пособии приведены цель, краткие теоретические сведения, описание экспериментальной установки, порядок выполнения измерений, указания по обработке экспериментальных данных. Издание охватывает круг вопросов, касающихся определения притока жидкости к совершенным водозаборным скважинам, вскрывающим напорные и безнапорные пласты, построения пьезометрических кривых и кривых депрессии.

УДК 628.112(076.5)

ББК 38.774я7

ISBN 978-985-550-620-2

© Ивашечкин, В. В., 2017

© Белорусский национальный

технический университет, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Бесперебойное снабжение питьевой водой населенных пунктов и промышленных предприятий различного назначения обеспечивается системами водоснабжения, в составе которых находятся водозаборные скважины. Обычно вода из скважин не требует специальной подготовки из-за ее хорошего качества. Это бывает возможно, если для водозаборов подземных вод выдерживаются расчетные значения радиусов зон санитарной охраны от химического и бактериологического загрязнения. Поэтому к фильтрационным расчетам на стадии проектирования местоположения и дебита водозаборных скважин предъявляются повышенные требования.

Пособие по выполнению лабораторной работы предназначено для углубления и закрепления знаний по разделу «Фильтрация» дисциплины «Механика жидкости и газа», изучаемой студентами специальности «Водохозяйственное строительство».

В пособии приводятся основные теоретические сведения, относящиеся к расчету притока воды к совершенным скважинам в безнапорных и напорных пластах, описание опытной установки и применяемых средств измерений, порядок выполнения и методика обработки полученных экспериментальных данных.

Цель лабораторной работы

1. По опытным точкам построить кривую напоров в водоносном слое при откачке воды из модели совершенной артезианской скважины и сопоставить ее с расчетной кривой.
2. По опытным данным рассчитать показатель обобщенного сопротивления фильтра и прифильтровой зоны.
3. Построить расчетную кривую депрессии в безнапорном водоносном слое при откачке воды из совершенной дренажной скважины.

Общие сведения

Водозаборная скважина – это вертикальная горная выработка с относительно малым поперечным размером по сравнению с глубиной, оборудованная обсадными трубами, предотвращающими обрушение пород, и водоприемным устройством из водоносного горизонта.

Водозаборные эксплуатационные скважины служат для удовлетворения производственных, питьевых и хозяйственно-бытовых нужд населения. Большую группу составляют технические водопонижающие скважины для защиты котлованов, промышленных, городских и сельскохозяйственных территорий от подтопления, а также скважины осушительно-оросительные вертикального дренажа, служащие для регулирования водного режима в корнеобитаемом слое почв.

Различают два типа скважин: совершенные и несовершенные по степени вскрытия пласта. Под *совершенной* понимают такую скважину, которая вскрывает водоносный горизонт на полную мощность. В дальнейшем будем рассматривать только совершенные скважины, каптирующие воды из безнапорных и напорных водоносных пластов.

Совершенная скважина в безнапорном пласте

Пусть водоносный пласт толщиной H_0 располагается на горизонтальном водоупоре (рис. 1). Сверху пласт перекрыт водопроницаемым грунтом до дневной поверхности. Если откачивать воду из скважины, уровень в ней и грунте будет понижаться. Вокруг скважины образуется симметричная депрессионная воронка, которая является поверхностью вращения кривой депрессии вокруг оси скважины.



Рис. 1. Схема притока воды к совершенным скважинам в безнапорном пласте

На рис. 1:

Δh – скачок уровней воды в самой скважине и за ее наружными стенками;

∇_{st} , ∇_{dn} – отметки статического и динамического уровней в скважине.

Дебит совершенной скважины в безнапорном неограниченном водоносном горизонте при установившемся движении выбирается из [1].

Кривая депрессии описывается зависимостью

$$Q = \frac{\pi k (H_0^2 - h_c^2)}{\ln\left(\frac{R}{r_c}\right)} = \frac{\pi k S (2H_0 - S_0)}{\ln\left(\frac{R}{r_c}\right)}, \quad (1)$$

где k – коэффициент фильтрации пород;

H_0 – статический напор в водоносном горизонте;

h_c – глубина воды в скважине;

R – радиус влияния скважины,

r_c – радиус фильтра скважины;

S_0 – понижение уровня воды в скважине:

$$S_0 = H_0 - h_c.$$

Выражение $\ln\left(\frac{R}{r_c}\right)$ характеризует собой гидравлическое сопротивление в изолированном неограниченном пласте.

$$h_r = \sqrt{H_0^2 - \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r}}. \quad (2)$$

Задавая значение радиуса r живого сечения потока, находят глубину h_r в этом сечении и строят кривую депрессии.

Совершенная скважина в напорном пласте

Здесь водоносный пласт, расположенный на водоупоре, сверху перекрыт слоем слабопроницаемой породы, причем вода в пласте

находится под избыточным давлением. Уровень естественного напора ∇st находится выше кровли пласта (рис. 2).

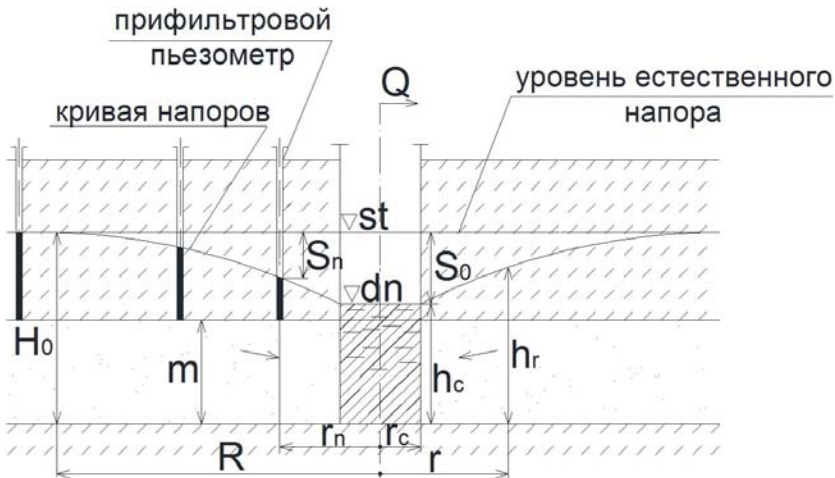


Рис. 2. Схема притока воды к совершенным скважинам в напорном пласте

При откачке воды из скважины сверху образуется депрессионная воронка, но в этом случае она создается вращением кривой напоров вокруг оси скважины. Очертание кривой можно получить по уровням воды в скважинах (пьезометрах), доведенных до кровли пласта.

Если считать, что мощность пластов m (расстояние по вертикали между кровлей и подошвой) постоянна, то дебит скважины при установившемся движении можно найти из формулы Дюпюи

$$Q = \frac{2\pi km(H_0 - h_c)}{\ln \frac{R}{r_c}} = \frac{2\pi km S_0}{\ln \frac{R}{r_c}}. \quad (3)$$

Удельный дебит скважины (дебит на 1 м водопонижения) определяется по формуле

$$q = \frac{Q}{S_0} \quad (4)$$

и характеризует собой качество бурения и потери напора в пласте при движении воды к скважине.

Кривая напоров описывается зависимостью, которую можно получить из выражения (3), если вместо h_c и r_c на стенке скважины подставить их текущие значения h_r и r в пласте, тогда получим

$$h_r = H_0 - \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R}{r}, \quad (5)$$

где h_r – пьезометрический напор в данном сечении;

r – текущая координата рассматриваемого живого сечения фильтрационного потока.

Задавая произвольные значения r на отрезке $r_c < r < R$, можно построить кривую напоров.

При выводе основных расчетных зависимостей (1) и (3) предполагалось, что движение в грунтовом потоке установившееся, т. е. не изменяющееся во времени. В действительности, если производить откачку из скважины с постоянным дебитом $Q = \text{const}$, кривая напоров либо кривая депрессии в безнапорном пласте будут понижаться во времени, т. е. движение воды в пласте будет неустановившимся.

В условиях откачки из бассейна подземных вод конечных размеров, хотя бы и достаточно значительных, естественный уровень будет понижаться, что обуславливает увеличение «радиуса действия» скважины.

Для устранения этого противоречия рассматривают «радиус действия» (условный радиус влияния) в изолированном пласте как функцию времени $R = f(t)$ [2]:

$$R = 1,5\sqrt{at}, \quad (6)$$

где a – коэффициент пьезопроводности пласта;

t – расчетное время эксплуатации скважины от включения ее в работу.

Значения a даны в [2].

Из выражения (6) следует, что условный радиус влияния увеличивается за счет сработки запасов воды в пласте. Подстановка (6) в выражения (1) и (3) показывает, что с ростом R дебит скважины Q

уменьшается. При поддержании дебита Q постоянным будет снижаться отметка динамического уровня ∇n в скважине. Поэтому при проектировании скважин их рассчитывают на определенный срок эксплуатации, равный 25 годам, проверяют положение динамического уровня, чтобы он не снижался ниже допустимого значения. В случае поступления воды в эксплуатируемый горизонт мощностью m с коэффициентом фильтрации k из соседних пластов через слабопроницаемую кровлю и подошву условный радиус влияния приближенно можно вычислить по формуле [3]

$$R = 1,12 \sqrt{kmm_{кр} / \left(k_{кр} + k_{под} \frac{m_{кр}}{m_{под}} \right)},$$

где $k_{кр}$, $k_{под}$, $m_{кр}$, $m_{под}$ – соответственно коэффициенты фильтрации и мощности слабопроницаемых слоев в кровле и подошве.

Ориентировочные значения радиусов влияния R_k , полученные по данным большого ряда откачек, в зависимости от крупности песчано-гравийных отложений, слагающих водоносный пласт, приведены в табл. 1 [3]. Здесь же приведены значения k и $i_{кр}$, соответствующие допустимым скоростям фильтрации при входе воды в фильтр.

Таблица 1

Значения радиуса влияния коэффициентов фильтрации, допустимых уклонов и скоростей для песков разной крупности [3]

Параметры	Песок				
	Тонкозернистый	Мелкозернистый	Среднезернистый	Крупнозернистый	Гравелистый
R , м	–	100	300	600	1000
k , м/сут	1–10	10–40	40–70	70–200	200–400
$i_{кр}$	11	11–6	6–4	4–2	2–1
$v_{доп}$, м/сут	11–110	110–240	240–280	280–400	400

При откачке воды из скважины, пробуренной в безнапорном водоносном горизонте, между уровнями воды в самой скважине и за ее наружными стенками наблюдается скачок уровней [3]:

$$\Delta h = \Delta h_{\text{в}} + \Delta h_{\text{ф}}, \quad (7)$$

где $\Delta h_{\text{в}}$ – промежуток высачивания воды;

$\Delta h_{\text{ф}}$ – потери напора в фильтре.

С. А. Абрамовым предложена эмпирическая формула для определения величины скачка Δh с учетом конструкции фильтра

$$\Delta h = 0,01a_{\text{к}} \sqrt{Q \frac{S_0}{kF_{\text{ф}}}}, \text{ м}, \quad (8)$$

где $a_{\text{к}}$ – коэффициент, учитывающий влияние конструкции фильтра: $a_{\text{к}} \approx 20 \text{ м}^{0,5}$ для сетчатых и гравийных фильтров, $a_{\text{к}} \approx 7 \text{ м}^{0,5}$ для дырчатого, щелистого и проволочного фильтров;

Q – расход через фильтр, $\text{м}^3/\text{сут}$;

S_0 – понижение в скважине, м;

k – коэффициент фильтрации грунта, $\text{м}/\text{сут}$;

$F_{\text{ф}}$ – рабочая площадь фильтра.

Понижение S уровня воды в скважине рекомендуется принимать, исходя из предельно допустимого понижения уровня воды в пласте. В частности, для напорных пластов S принимают не ниже кровли пласта, для безнапорных – не ниже половины мощности пласта H_0 ($S < 0,5H_0$).

В процессе эксплуатации в фильтре и порах грунта прифильтровой зоны и пласта откладываются различные осадки. Это неизбежный процесс, так как в результате работы скважины в пласте снижается давление и нарушается газовое равновесие в жидкости. Это приводит к образованию нерастворимых в воде соединений Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$, CaCO_3 , MgCO_3 и др., которые засоряют поры грунта, увеличивают гидравлическое сопротивление фильтра и снижают коэффициент фильтрации грунта в прифильтровой зоне.

Установлено, что в скважинах с небольшим диаметром фильтра уже после непродолжительного периода эксплуатации (1,5–3 года) вследствие кольматации фильтра и прифильтровой зоны потери напора составляют 75–80 % от общего понижения уровня воды.

Скважины больших диаметров (800–1200 мм) в тех же гидрогеологических условиях в три–четыре раза более эффективны [4].

Для мониторинга обобщенного сопротивления фильтра и прифильтровой зоны в процессе эксплуатации, при сооружении скважины в ее затрубном пространстве размещают прифильтровой пьезометр, который устанавливают на максимально возможном удалении от стенок фильтра [5]. Поскольку вблизи скважины поток радиальный, то здесь справедлива формула Дюпюи. Коэффициент фильтрации пород в фрагменте «пьезометр–скважина» (см. рис. 2), который характеризует состояние пород (гидрохимическое зарастание, заиление) и сопротивление фильтра:

$$k_{\Pi} = \frac{Q \ln \left(\frac{r_{\Pi}}{r_c} \right)}{2\pi m (S_0 - S_{\Pi})}, \quad (9)$$

где Q – откачиваемый расход воды;

r_{Π} – расстояние от оси скважины до пьезометра;

r_c – внутренний радиус фильтра;

S_0 – понижение уровня воды в скважине;

S_{Π} – понижение уровня воды в пьезометре.

При известном коэффициенте фильтрации пород пласта k показатель обобщенного сопротивления фильтра и прифильтровой зоны может быть рассчитан по формуле [5]

$$\zeta = \left(\frac{k}{k_{\Pi}} - 1 \right) \ln \frac{r_{\Pi}}{r_c}. \quad (10)$$

В безнапорном пласте разность понижения уровней ($S_0 - S_{\Pi}$) в скважине и пьезометре включает величину разрыва уровня («скачка») Δh , обусловленную деформацией линий тока в связи с нелинейным характером свободной поверхности подземных вод. Величину Δh необходимо вычесть из разности понижения уровней, определив ее, например, по формуле (7).

Как правило, фильтры для увеличения диаметра оборудуют контуром гравийной обсыпки толщиной 50–300 мм. Это позволяет обеспечить начальную проницаемость прифильтровой зоны выше,

чем проницаемость пласта: $\frac{k}{k_{\Pi}} < 1$. И при этом $\zeta_0 < 0$, т. е. отрица-

тельно. В скважинах с гравийными фильтрами сопротивление фильтра растет менее интенсивно, чем в скважинах с ухудшенной начальной проницаемостью $\frac{k}{k_{\Pi}} > 1$ ($\zeta_0 > 0$). Это неоднократно под-

тверждено на практике, и скважины с фильтрами, имеющими начальное сопротивление $\zeta_0 > 0$, значительно быстрее выходят из строя, чем скважины с фильтрами, у которых $\zeta_0 < 0$.

Для регенерации гравийных фильтров скважин в БНТУ [6] предложено в затрубном пространстве скважины (на внешнем контуре гравийной обсыпки) устанавливать четыре–пять пьезометров с перфорированной частью, равной длине фильтра скважины. Подавая в пьезометры реагент из бака и откачивая продукты реакции назад в бак из скважины, отложения растворяют и восстанавливают производительность скважины.

Описание экспериментальной установки

Работа производится в радиальном фильтрационном лотке *1* с кольцевым бьефом *3*. В центре лотка установлена модель совершенной водозаборной скважины в напорном пласте (рис. 3).

Фильтр скважины представляет собой трубчатый перфорированный каркас с водоприемной поверхностью из полимерной сетки или проволоочной обмотки. На всю высоту фильтр обсыпан водовмещающим грунтом *12* (песком), который засыпали между фильтром и перфорированным цилиндром *2* в воду с послойным уплотнением. На него сверху помещен водоупорный грунт *13* (глина, суглинок).

Если водозаборная скважина моделируется в безнапорном пласте, водоупорный грунт выгружают и заменяют его на водовмещающий грунт.

Водоприемники пьезометров *5* с помощью шлангов *7* выведены на щит пьезометров *6*. «Нуль» шкалы пьезометров на шкале совпадает с плоскостью сравнения, расположенной на уровне подошвы пласта.

В скважину опущен насос *8* с нагнетательным трубопроводом *9*, счетчиком воды *10* и вентилем *11*, который служит для регулирования подачи насоса. Насос откачивает воду из скважины и подает в кольце-

вой бьеф 3, откуда она под действием перепада уровней в кольцевом бьефе 3 и скважине 4 проходит через водовмещающий грунт 12 пласта и через фильтр поступает назад в скважину. Таким образом насос создает непрерывную циркуляцию воды в системе «скважина–пласт».



Рис. 3. Схема лабораторной установки: модель совершенной водозаборной скважины в напорном пласте:

- 1 – фильтрационный лоток; 2 – перфорированный цилиндр; 3 – кольцевой бьеф; 4 – модель скважины; 5 – пьезометр; 6 – щит пьезометров; 7 – шланг; 8 – погружной насос; 9 – нагнетательный трубопровод; 10 – счетчик воды; 11 – вентиль; 12 – водовмещающий грунт; 13 – водоупорный грунт

Движение в системе будет установившимся: $Q = \text{const}$; $S_0 = \text{const}$. Счетчик воды 10 используют для измерения дебита скважины.

Порядок выполнения работы

1. Включить погружной насос 8 и подать воду из модели скважины 4 в кольцевой бьеф 3. Когда фильтрационный расход от кольцевого бьефа к модели скважины установится, о чем судят по стабилизации показаний пьезометров на щите 5, с помощью счетчика воды 10 и секундомера измерить дебит скважины Q .

2. Снять показания пьезометров. Поскольку «нуль» их шкалы совпадает с подошвой водоносного пласта, показания пьезометров определяют глубины фильтрационного потока h_{r_i} в соответствующих цилиндрических сечениях радиусами r_i .

3. Вентилем *11* на нагнетательном трубопроводе *9* погружного насоса *8* последовательно установить несколько различных фильтрационных расходов и все измерения повторить заново.

Обработка экспериментальных данных

1. По объему V прошедшей через счетчик воды и времени измерения t для каждого опыта подсчитать дебит скважины Q . Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

Результаты опытов

Результаты измерений и расчетов	Ед. изм.	Опыты		
		1	2	3
I	2	3	4	5
1. Результаты измерений				
Объем воды, поданной насосом, V	дм ³			
Время измерения t	с			
Дебит скважины Q	дм ³ /с			
Показания пьезометров:	м			
$П_0 - h_e$	- «-			
$П_1 - h_{r_1}$	- «-			
$П_2 - h_{r_2}$	- «-			
$П_3 - h_{r_3}$	- «-			
$П_4 - H_0$	- «-			
Понижение в скважине S_0	м			
Понижение в пьезометре $П_1 S_1$	м			
Опытный коэффициент фильтрации при- фильтровой зоны $k_{п}$	м/сут			
Опытный показатель обобщенного сопро- тивления фильтра и прифильтровой зоны $\zeta_{п}$				
Удельный дебит скважины q	м ² /с			

Результаты измерений и расчетов	Ед. изм.	Опыты		
		1	2	3
<i>l</i>	2	3	4	5
Результаты расчетов координат кривой напоров по формуле (5):				
h_{r_1}	м			
h_{r_2}	м			
h_{r_3}	м			
Результаты расчетов координат кривой депрессии скважины в безнапорном пласте по формуле (2):				
h_{r_1}	м			
h_{r_2}	м			
h_{r_3}	м			
Δh – по формуле (8)	м			

2. Определить понижение в скважине S_0 как разность показаний пьезометров Π_4 и Π_c : $S_0 = \Pi_4 - \Pi_c$, и понижение в сечении $l-l$ как разность показаний пьезометров Π_4 и Π_1 ; $S_1 = \Pi_4 - \Pi_1$. И далее при известной мощности пласта m и коэффициенте фильтрации песка по формулам (9) и (10) определить коэффициент фильтрации прифильтровой зоны $k_{\text{п}}$ и обобщенный показатель сопротивления ζ фильтра и прифильтровой зоны.

3. По формуле (4) определить удельный дебит скважины.

4. По формуле (5), задавая значения r_1 , r_2 и r_3 , определить значения h_1 , h_2 и h_3 и построить на миллиметровой бумаге теоретическую кривую напоров $h = f(r)$ для одного из расходов Q . Здесь же в координатах $h-r$ построить экспериментальную кривую.

5. По формуле (2), задавая значения r_1 , r_2 и r_3 , вычислить значения h_1 , h_2 и h_3 , а по формуле (8) – скачок уровня Δh для скважины в безнапорном пласте. В координатах $h-r$ построить расчетную кривую.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чертоусов, М.Д. Гидравлика. Специальный курс / М.Д. Чертоусов. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 630 с.
2. Проектирование водозаборов подземных вод / А. И. Арцев [и др.]; под ред. Ф. М. Бочевера. – Москва: Стройиздат, 1976. – 292 с.
3. Курганов, А.М. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: справочник/ А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров; под общ. ред. А. М. Курганова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Стройиздат; Ленингр. отд-ние, 1986. – 440 с.
4. Старинский, В. П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов / В. П. Старинский, Л. Г. Михайлик. – Минск: Вышэйшая школа, 1989. – 269 с.
5. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Недра, 1985. – 334 с.
6. Ивашечкин, В.В. Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин. – Минск: БНТУ, 2005. – 270 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Общие сведения.....	3
Порядок выполнения работы	12
Обработка экспериментальных данных	13
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	15

Учебное издание

ИВАШЕЧКИН Владимир Васильевич

ГИДРАВЛИКА ВОДОЗАБОРНОЙ СКВАЖИНЫ

Пособие

по выполнению лабораторной работы по дисциплине

«Механика жидкости и газа»

для студентов специальности 1-70 04 01

«Водохозяйственное строительство»

Редактор *Т. Н. Микулик*

Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 26.12.2017. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,73. Тираж 60. Заказ 821.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.