

УДК 628.112.2

**В. И. ЛЕСНОЙ, В. И. НЕЗДОЙМИНОВ, П. А. ДМИТРОВ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

**ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПНЕВМОВЗРЫВА НА  
ФИЛЬТР И ПРИФИЛЬТРОВУЮ ОБЛАСТЬ ВОДОЗАБОРНОЙ  
СКВАЖИНЫ**

В статье рассмотрены вопросы параметров пневмоимпульсного воздействия на фильтр и прифильтровую область водозаборной скважины с целью интенсификации работы водозаборных сооружений из подземных источников, снизивших свою производительность в связи с кольматацией фильтров и прифильтровой зоны скважин. Получены зависимости по определению давления и импульса давления на фильтре водозаборных скважин при пневмоимпульсном воздействии.

**водозаборные скважины, кольматация, пневмовзрыв, импульс давления****АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Подземные воды, как правило, бесцветны и не содержат взвешенных веществ, защищены от попадания загрязненных поверхностных стоков и, являясь пригодными для централизованного питьевого водоснабжения, относятся к водным объектам общегосударственного значения [1]. Использование подземных вод в Украине в 2012 году по данным [2] составило 3 505,5 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. В 2012 году использование подземных вод на хозяйственно-питьевые нужды составило 2 645,59 тыс. м<sup>3</sup>/сут., на производственно-технические нужды – 477,3 тыс. м<sup>3</sup>/сут., на орошение – 52,36 тыс. м<sup>3</sup>/сут., объем использования подземных вод на сельскохозяйственные нужды – 323,26 тыс. м<sup>3</sup>/сут., на промышленный разлив и изготовления напитков – 6,99 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

В процессе эксплуатации водозаборных скважин их производительность может значительно снижаться. Основной причиной снижения производительности водозаборных скважин является кольматация фильтров и прифильтровой зоны. Одним из основных методов воздействия на фильтр и прифильтровую область скважины с целью увеличения её дебита является пневмовзрыв, который осуществляется с помощью специального устройства – пневмопатрона. Пневмопатрон с определённой периодичностью автоматически выбрасывает в воду сжатый до высокого давления воздух, а пульсации воздушного пузыря в воде создают необходимые условия для декольматации фильтра и прифильтровой области водозаборных скважин [3, 4].

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Определить основные параметры пневмоимпульсного воздействия на фильтр и прифильтровую зону водозаборной скважины для восстановления её производительности.

*Определение давления в ресивере пневмопатрона, необходимого для разрушения кольматирующих отложений*

Выбор необходимого режима обработки скважины пневмопатроном необходимо производить на основе анализа энергии, необходимой для разрушения кольматирующих отложений с заданной степенью дробления в зависимости от размеров частиц гравия или песка в призабойной зоне фильтра. При воздействии импульсных нагрузок разрушение твердых конгломератовидных осадков определяется их максимальной прочностью, напряжением на фронте ударной волны и временем приложения нагрузки. При этом следует учесть срок службы скважины и, следовательно, минимальную прочность фильтра скважины.

© В. И. Лесной, В. И. Нездойминов, П. А. Дмитров, 2013

Для определения величины энергии, необходимой для разрушения кольматанта, воспользуемся теорией хрупкого разрушения А. А. Гриффитса. Разница между теоретической и практической прочностями по Гриффитсу заключается в том, что в реальных телах имеются многочисленные трещины, концентрирующие напряжения так, что на участках, свободных от трещин, напряжения достигают критических значений, равных и превышающих теоретическую прочность. При сравнительно небольшой величине среднего напряжения в материале на кончике трещины возникает большое локальное напряжение, приводящее к росту трещины. Поры не только концентрируют напряжения, но и экранируют часть материала от напряжений. Известно, что материал, непосредственно расположенный над порой или под порой, испытывает гораздо меньшее напряжение, чем остальной материал, а материал между порами при этом будет испытывать еще большее напряжение [5].

Следовательно, если рассматривать кольматант в отверстиях фильтра как трещину и кольматант в прифильтровой зоне скважины как пористую среду, то можно сделать следующие выводы:

- фактически отложения имеют прочность меньше теоретической;
- ударная нагрузка при пневмовзрыве, действующая на существующие поры и трещины, работает как клин, увеличивая их размер до критического, после чего кольматант мгновенно разделяется на части;
- последующие импульсы, создаваемые пневмопатроном (даже при меньшем ударном давлении), позволят раздробить кольматант на более мелкие фракции;
- пульсации воздушного пузыря и его вертикальный подъем, за счет разности плотностей воды и воздуха, способствует выносу мелких частичек кольматанта из прифильтровой зоны в ствол скважины и, при соответствующих условиях, на поверхность.

Полная энергия для образования трещин определяется по формуле, Дж:

$$\mathcal{E} = \varepsilon \cdot \omega_{оме}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – поверхностная энергия на единицу площади, Дж/м<sup>2</sup>;

$$\varepsilon = \frac{\pi \cdot x \cdot \sigma^2}{E}, \quad (2)$$

- $\omega_{оме}$  – площадь поперечного сечения отверстий фильтра, м<sup>2</sup>;
- $\sigma$  – среднее напряжение для образования трещины, МПа;
- $E$  – модуль Юнга, МПа;
- $x$  – радиус трещины, м;
- $d$  – диаметр отверстий фильтра, м<sup>2</sup>.

С другой стороны, энергия сжатого воздуха, находящегося в пневмопатроне перед выхлопом, определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{nn} = \frac{p_n \cdot V_n}{(k-1)}, \quad (3)$$

- где  $p_n$  – давление в пневмопатроне перед выхлопом, Па;
- $V_n$  – объем ресивера пневмопатрона, м<sup>3</sup>;
- $k$  – коэффициент адиабаты, для воздуха  $k = 1,4$ .

С учетом затрат энергии на преодоление гидростатического давления  $\mathcal{E}_{сст}$ , получим остаточную энергию пузыря к концу расширения:

$$\mathcal{E}_{ост} = \frac{p_{min} \cdot V_{max}}{(k-1)} = \mathcal{E}_{nn} - \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{сст}}{k}, \quad (4)$$

где  $p_{min}, V_{max}$  – давление и объем пузыря к концу его расширения.

Таким образом, можно определить давление в ресивере пневмопатрона, необходимое для разрушения кольматанта с заданной прочностью, подставив (1) и (3) в (4). После преобразований получим:

$$p_n = \frac{0,4}{V_n} \cdot \left( \frac{p_{min} \cdot V_{max}}{0,4} + \frac{\frac{\pi \cdot x \cdot \sigma^2}{E} \omega_{оме} + p_0 (V_{max} - V_n)}{1,4} \right), \quad (5)$$

где  $p_0$  – гидростатическое давление в зоне работы пневмопатрона, м.

Известно [6], что прочность осадков, кольматирующих фильтры водозаборных скважин, может составлять 0,5–3,0 МПа. Если принять давление волны сжатия на стенку фильтра равное расчетной прочности кольматанта, то можно, используя зависимость (5), определить давление, которое нужно получить после пневмовзрыва в воздушном пузыре, радиусом  $a$ .

*Определение давления и объема воздушного пузыря в момент его пульсации, и времени расширения от начального объема до максимального*

Давление в воздушном пузыре в момент времени  $t$  можно найти из соотношения для адиабатического процесса:

$$p_n V_n^k = p_n (V_n + Q \cdot t)^k, \quad (6)$$

где  $p_n$  – давление в пузыре в момент времени  $t$ , Па;  
 $p_n, V_n$  – объем пузыря и давление в нем в начальный момент времени, м<sup>3</sup>;  
 $k$  – коэффициент адиабаты, для воздуха  $k = 1,4$ ;  
 $Q$  – расход воды из скважины в призабойную зону и вдоль скважины на поверхность за период времени  $t$ , м<sup>3</sup>/с:

$$Q = q_1 + q_2; \quad (7)$$

где  $q_1$  – расход воды из скважины в пласт, м<sup>3</sup>/с;  
 $q_2$  – расход воды при вертикальном подъеме, м<sup>3</sup>/с.

Расход  $q_1$  найдем, используя закон истечения через малое отверстие в тонкой стенке:

$$q_1 = \mu \omega_{oms} \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}, \quad (8)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода при истечении через отверстие в тонкой стенке;  
 $\omega_{oms}$  – площадь поперечного сечения отверстий фильтра, м<sup>2</sup>;  
 $\Delta p$  – расчетная разница давлений до отверстия и после, Па:

$$\Delta p = \frac{P_n + P_{min}}{2} - P_0; \quad (9)$$

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

На основе формул гидродинамики для вертикального движения воды в скважине получим:

$$\frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \lambda \frac{l}{d^5} \frac{8 \cdot q_2^2}{g \cdot \pi^2}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  
 $l$  – длина трубопровода, принимается равной глубине скважины, м;  
 $d$  – диаметр водоподъемной трубы, принимается равным диаметру скважины, м;  
 $\Delta_3$  – эквивалентная шероховатость материала трубопровода, м.

После преобразований получим:

$$q_1 = 0,03483 \cdot r_\phi \cdot H_{oz} \cdot \sqrt{\Delta p}, \quad (11)$$

$$q_2 = 10,4786 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot d^{5,25}}{P_0 \cdot \Delta_3^{0,25}}}, \quad (12)$$

где  $H_{oz}$  – высота обрабатываемой зоны фильтра скважины, м.

Выразим объем пузыря  $p_n$  и время расширения от начального объема до максимального  $t_{max}$ :

$$p_n = \frac{P_n}{\left( 1 + t \frac{0,03483 \cdot r_\phi \cdot H_{oz} \cdot \sqrt{\Delta p} + 10,4786 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot d^{5,25}}{P_0 \cdot \Delta_3^{0,25}}}}{V_n} \right)^k}, \quad (13)$$

$$t_{\max} = \frac{V_{\max} - V_n}{0,03483 \cdot r_{\phi} \cdot H_{oz} \cdot \sqrt{\Delta p} + 10,4786 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot d^{5,25}}{p_0 \cdot \Delta_s^{0,25}}}} \quad (14)$$

*Определение давления и импульса давления на фильтр и прифилтровую зону скважины*

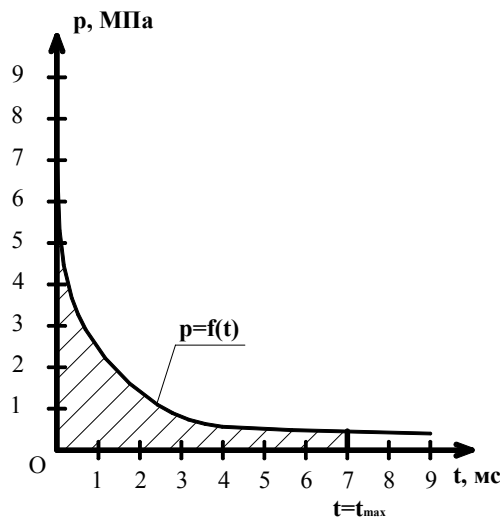
Давление ударной волны  $p$  и время ее действия  $t$  учитываются импульсом, который следует рассматривать как основной фактор в процессе разрушения твердых колюматизирующих образований на внутренней стенке фильтра и в призабойной зоне скважины. Эффективность ударной волны зависит от импульса – интеграла давления по времени [7, 8]:

$$I(t) = \int_0^t p(t) dt. \quad (15)$$

Предельная величина импульсов давления для скважин, эксплуатировавшихся длительное время, не должна превышать 400 кПа·с.

Величину импульсного давления численно можно определить как площадь фигуры (рис. 1), ограниченной сверху – графиком подынтегральной функции  $p(t)$  (зависимость давления на стенку фильтра скважины от времени), снизу – осью абсцисс (От), слева – осью ординат (Ор), справа – значением  $t = t_{\max}$ , соответствующим времени, затраченному на изменение объема воздушного пузыря от начального  $V_n$  до максимального  $V_{\max}$ . Максимальный объем определяется из соотношения [8]:

$$V_{\max} = 2,5 V_n p_n / p_0. \quad (16)$$



**Рисунок 1** – График зависимости давления на стенку фильтра скважины от времени.

Для оценки пневмоимпульсного воздействия на фильтр и прифилтровую зону скважины необходимо определить давление и импульс давления волны сжатия на обрабатываемую поверхность фильтра.

При определении площади обрабатываемой зоны фильтра сделаны следующие допущения:

1. Если максимальный радиус пузыря  $r_{\max}$  меньше радиуса фильтра  $r_{\phi}$  скважины, то площадь обрабатываемой зоны фильтра определяется как поверхность цилиндра радиусом  $r_{\phi}$  и высотой  $H_{oz} = 2 r_{\max}$ .

2. Если в процессе расширения воздушного пузыря граница раздела воздух-вода достигнет стенки фильтра скважины, то произойдет его расширение вдоль фильтра скважины. Следовательно, увеличится площадь обрабатываемой зоны фильтра.

Тогда максимальный радиус  $r_{\max}$  пузыря необходимо приравнять внутреннему радиусу  $r_{\phi}$  фильтра скважины и площадь обрабатываемой зоны фильтра будет равна поверхности цилиндра радиусом  $r_{\phi}$  и высотой  $H_{oz}$ :

$$H_{oz} = V_{\max} / \pi r_{\phi}^2. \quad (17)$$

Минимальное давление в воздушном пузыре  $p_{\min}$ , соответствующее максимальному объему  $V_{\max}$ , определяется из условия адиабатического процесса:

$$p_{\min} = p_n \left( \frac{V_n}{V_{\max}} \right)^k, \quad (18)$$

где  $k$  – коэффициент адиабаты воздуха.

Давление на стенку фильтра в начальный момент образования пузыря  $p_{\phi}^{\max}$ , при давлении в пузыре  $p_n$  можно найти из соотношения:

$$p_{\phi}^{\max} - p_0 = \frac{r_n}{r_{\phi}} [p_n - p_0]. \quad (19)$$

Тогда импульс давления на фильтр скважины следует определять для промежутка времени  $t[0; t_{\max}]$  с помощью зависимости:

$$I_{\phi}(t) = \int_0^{t_{\max}} p_{\phi}(t) dt = \int_0^{t_{\max}} \left( \frac{a}{r_{\phi}} [p_n - p_0] + p_0 \right) dt, \quad (20)$$

где  $a$  – радиус воздушного пузыря в момент времени  $t$ , м.

Подставляя (13) в (20), получим:

$$I = \int_0^{t_{\max}} \left[ \frac{a}{r_{\phi}} \left( \frac{p_n}{\left( 1 + t \frac{0,03483 \cdot r_{\phi} \cdot H_{os} \cdot \sqrt{\Delta p} + 10,4786 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot d^{5,25}}{p_0 \cdot \Delta_s^{0,25}}}} \right)^k - p_0} + p_0 \right) dt \right] \quad (21)$$

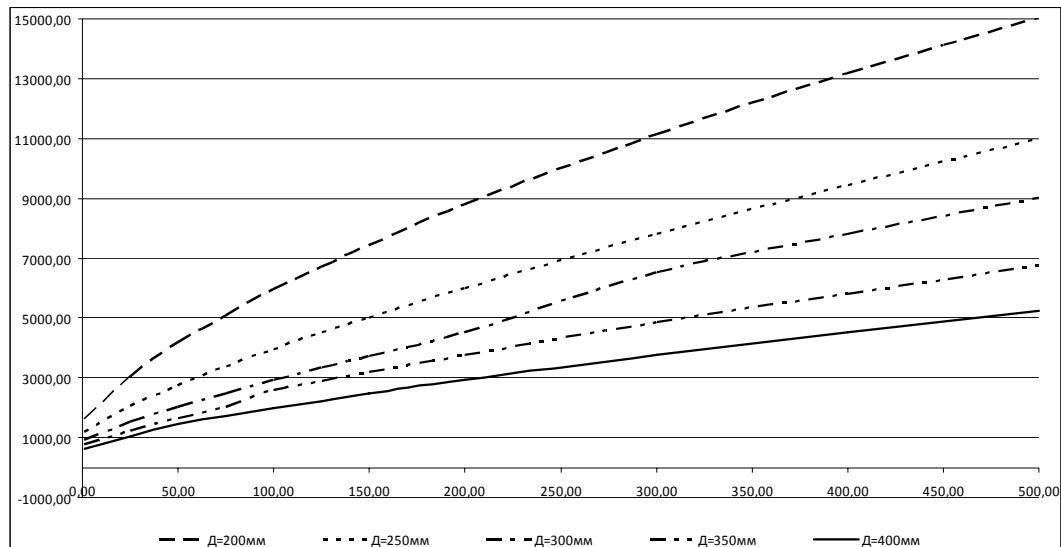
Вычисление импульса давления производилось для следующих исходных данных:

1. Работа расширения пузыря не изменяется с увеличением глубины заложения фильтра скважины.
2. Радиус фильтра скважины принят 100, 125, 150, 175, 200 мм.
3. Прочность отложений, кольматирующих фильтр водозаборной скважины 3 МПа.
4. Максимальное давление на фильтр скважины при глубине 1 м принято равным прочности кольматанта.

Величина импульса давления определена вычислением значения интеграла (20) по методу трапеций. По результатам вычислений построены графики зависимости импульса давления от глубины скважины при сохранении работы расширения воздушного пузыря для различных диаметров фильтров скважин (рис. 2). В результате вычислений было установлено, что импульс давления на стенку фильтра, при воздействии на него глубинным пневмопатроном, не превышает 100 кПа·с, что является допустимым при обработке скважин импульсными методами [7].

## ВЫВОДЫ

1. Определены параметры изменения воздушного пузыря в жидкости: начальный объем пузыря и давление в нем, максимальный объем пузыря и давление в нем, время расширения пузыря в зависимости от гидростатического давления в скважине.
2. Получены зависимости для расчета основных параметров пневмоимпульсного воздействия глубинным пневмопатроном – давления и импульса давления на фильтр и прифилтровую зону скважины.
3. Теоретически установлено, что импульс давления на стенку фильтра, при его обработке глубинным пневмопатроном, не превышает 100 кПа·с, что является допустимым при обработке скважин импульсными методами.



**Рисунок 2** – Зависимость импульса давления от глубины скважины при сохранении работы расширения воздушного пузыря  $A = f(H_{\text{гст}} = 1 \text{ м}, p_{\text{ин}} = 3 \text{ МПа}) = \text{const}$  для диаметра фильтра от 200 до 400 мм.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Водний кодекс України [Текст] : [Постанова Верховної Ради України від 6 червня 1995 року N 214/95-ВР із змінами і доповненнями, внесеними Законами України від 2 липня 2013 року N 365-VII] : офіц. текст : станом на 27 липня 2013 р. // Відомості Верховної Ради України. – 1995. – № 24. – С. 12–41.
2. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2012 році [Текст] / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – К. : МРРБЖК, 2013. – 450 с.
3. Лесной, В. И. Обзор существующих методов восстановления дебита водяных скважин [Текст] / В. И. Лесной // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2007. – Том 3, № 4. – С. 198–202.
4. Lesnoy, V. The mechanism of «pneumoexplosion» in water well conditions [Текст] / Vyacheslav Lesnoy, Leonid Slyoz // Innovative technologies in water management complex : Collected articles of young scientists. – Rivne : National University of Water Management and Nature Resources Use, 2012. – Issue II. – P. 137–139.
5. Разрушение : [В 7 т.] : Пер. с англ. Т. 7: Разрушение неметаллов и композитных материалов. Ч. II. Органические материалы (стеклообразные полимеры, эластомеры, кость) / [Дж. Берри, Н. Джент, Ф. Рюйрих; Под ред. Ю. Н. Работнова]. – М. : Мир, 1976. – 470 с.
6. Романенко, В. А. Электрофизические способы восстановления производительности водозаборных скважин [Текст] / В. А. Романенко. – Л. : Недра, 1980. – 79 с.
7. Рекомендации по импульсным методам восстановления производительности скважин на воду [Текст] / К. С. Боголюбов [и др.] ; ВНИИ «ВОДГЕО» ; под общей ред. К. С. Боголюбова. – М. : ВНИИ «ВОДГЕО», 1979. – 114 с.
8. Склянський, В. Г. Временная инструкция по применению пневмовзрыва для увеличения производительности скважин на воду [Текст] / В. Г. Склянський. – Баку : АзНИИ водных проблем, 1975. – 74 с.

Получено 07.10.2013

#### В. І. ЛЕСНОЙ, В. І. НЕЗДОЙМІНОВ, П. О. ДМІТРОВ ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ВПЛИВУ ПНЕВМОВИБУХУ НА ФІЛЬТР І ПРИФІЛЬТРОВУ ЗОНУ ВОДОЗАБІРНОЇ СВЕРДЛОВИНИ Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У статті розглянуті питання параметрів пневмоімпульсного впливу на фільтр і прифільтрову зону водозабірної свердловини з метою інтенсифікації роботи водозабірних споруд з підземних джерел, що знизили свою продуктивність у зв'язку з кольматацією фільтрів і прифільтрової зони свердловин. Отримано залежності з визначення тиску та імпульсу тиску на фільтрі водозабірних свердловин при пневмоімпульсному впливі.

**водозабірні свердловини, кольматація, пневмовибух, імпульс тиску**

VIACHESLAV LESNOY, VIKTOR NEZDOYMINOV, PAVLO DMITROV  
BASIC PARAMETERS OF INFLUENCE OF PNEUMOEXPLOSION ON THE  
FILTER AND AROUND-FILTER ZONES OF A WATER WELLS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The paper deals with the impact on the parameters of pneumatic impulse filter and around-filter area water well to intensify work intakes from underground sources to reduce its performance due to clogging of filters and around-filter zone wells. The dependencies to determine the pressure and pulse pressure on the filter of water wells pneumatic impulse exposure have been taken.

**water wells , mudding (mud grouting process) , pneumoexplosion, the pulse pressure**

**Лесной Вячеслав Иванович** – асистент кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: інтенсифікація роботи водозабірних споруд з підземних джерел.

**Нездойминов Віктор Іванович** – доктор технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси : біологічна очистка стічних вод.

**Дмитров Павло Олександрович** – студент Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: інтенсифікація роботи водозабірних споруд з підземних джерел.

**Лесной Вячеслав Иванович** – асистент кафедри водоснабження, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: интенсификация работы водозаборных сооружений из подземных источников.

**Нездойминов Виктор Иванович** – доктор технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: биологическая очистка сточных вод.

**Дмитров Павел Александрович** – студент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: интенсификация работы водозаборных сооружений из подземных источников.

**Lesnoy Viacheslav** – the assistant, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: intensification of work of water intake from underground sources.

**Nezdoyminov Viktor** – DcS (Eng.), Assistant Professor, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological treatment of wastewater.

**Dmitrov Pavlo** – a student of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: intensification of work of water intake from underground sources.