

**В.А. Малашкина****ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ  
НА КАЧЕСТВО МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ,  
ПОДАВАЕМОЙ ОТ СКВАЖИН НА ПОВЕРХНОСТЬ  
УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ ПО ГАЗОПРОВОДУ  
ИЗ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА**

В настоящее время применение эффективных способов дегазации источников газовой выделения позволяет получать метановоздушную смесь на выходе из дегазационных скважин угольных шахт с высокой концентрацией метана. Но сохранить достигнутый уровень качества капируемой метановоздушной смеси при ее транспортировании от скважин до вакуум-насосной станции и последующей утилизации не представляется возможным. При использовании стеклопластиковых трубопроводов в системах дегазации процесс транспортирования метановоздушной смеси от скважин на поверхность имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при выборе режимов эксплуатации дегазационных установок. Вопрос ранжирования причин потерь давления по длине вакуумного подземного дегазационного трубопровода вследствие изменения его гидравлического сопротивления является актуальным как для стальных так и для стеклопластиковых газопроводов. В большинстве случаев разность давлений на вакуум-насосной станции и у устья удаленной скважины превышает допустимую расчетную величину, и для создания у скважины необходимого разрежения, вводят в эксплуатацию большее количество вакуум-насосов. Это влечет за собой увеличение количества потребляемой электроэнергии и снижение эффективности работы вакуум-насосной станции. При этом ожидаемого увеличения объема капируемого метана не происходит, в то время как возрастают подсосы воздуха в трубопроводную сеть, приводя к увеличению ее сопротивления. Очевидно, что с уменьшением сопротивления трубопровода потери давления по длине снижаются, и для формирования величины разрежения в устье удаленной скважины, необходимой для отсоса расчетного количества метана, возможно использование меньшего числа вакуум-насосов.

*Ключевые слова:* дегазация, конденсация, гидравлическое сопротивление, подземный вакуумный газопровод, метановоздушная смесь, коэффициент Дарси, стеклопластиковый трубопровод.

**В** настоящее время применение на угольных шахтах эффективных способов дегазации источников газовой выделения позволяет получать метановоздушную смесь на выходе из дегазационных скважин с высокой концентрацией метана. Но сохранить достигнутый уровень качества капируемой метановоздушной смеси при ее транспортировании от скважин до вакуум-насосной станции и последующей утилизации не представляется возможным.

Основными особенностями транспортирования метановоздушной смеси по подземному вакуумному трубопроводу являются: значительная протяженность подземной трубопроводной сети; движение газовой смеси в условиях вакуума; присутствие в составе капируемой смеси паров воды, капельной жидкости, угольной и породной пыли; наличие притечек воздуха через неплотности фланцевых соединений звеньев труб вакуумного трубопровода внутри системы по всей

его длине. При превышении установленных норм величины удельного объема подсасываемого из атмосферы горных выработок воздуха наблюдается увеличение удельных потерь давления в трубопроводной сети по сравнению с расчетными величинами, увеличение дебита метановоздушной смеси с одновременным уменьшением в ней концентрации метана, а в связи с образованием скоплений капельной жидкости в пониженных местах трубопровода – уменьшение гидравлического сечения труб. Эти факторы являются основной причиной увеличения затрат электроэнергии на транспортировку метановоздушной смеси по сети дегазационных трубопроводов, уменьшения дебита метана, отсасываемого из скважин, увеличения абсолютного метановыделения в атмосферу очистных выработок и выемочных участков, снижение возможности полезного использования шахтного метана.

Увеличение протяженности функционирующей трубопроводной сети, согласно технологическому процессу дегазации, влечет за собой рост потерь разрежения, создаваемого вакуум-насосами. Так как на один километр длины дегазационного трубопровода приходится 200–250 соединений звеньев труб, то с ростом протяженности трубопровода увеличивается объем подсасываемого воздуха в дегазационную систему через неплотности соединений, повышая гидравлическое сопротивление системы и значительно снижая концентрацию метана в каптируемой смеси.

Кроме того, с развитием горных работ возрастает величина дебита метана, который необходимо каптировать дегазационной установкой из источников метановыделения для достижения требуемой эффективности дегазации. Поэтому, для увеличения пропускной способности дегазационной системы при ее реконструкции производится

прокладка параллельных участков газопровода. Это приводит к росту фактической длины подземного газопровода и увеличению числа соединений труб.

Согласно «Инструкции по дегазации угольных шахт» подземные дегазационные газопроводы разрешено монтировать из стальных труб с толщиной стенок не менее 2,5 мм или из труб других материалов, допущенных к применению в подземных выработках для целей дегазации [1].

В настоящее время для монтажа подземных дегазационных вакуумных газопроводов используются стальные трубы и в некоторых случаях из композитных материалов, то есть стеклопластиковые.

При использовании стеклопластиковых трубопроводов в системах дегазации процесс транспортирования метановоздушной смеси от скважин на поверхность имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при выборе режимов работы дегазационных установок.

Одной из особенностей транспортирования метановоздушной смеси по подземному трубопроводу является колебание параметров смеси, в связи с разным числом одновременно работающих скважин (а, соответственно, и с меняющимися во времени величинами параметров откачиваемой из скважин смеси: расхода метана и его концентрации), и различным количеством воздуха, поступающего в систему через неплотности соединений труб. В то же время, для возможности утилизации добываемого метана необходимо поддержание стабильных параметров каптируемой из источников метана смеси.

При транспортировании каптируемой метановоздушной смеси по вакуумному трубопроводу от скважин на поверхность в результате подсосов воздуха внутрь системы из окружаю-

шей шахтной атмосферы плотность и динамическая вязкость смеси увеличиваются (массовый расход метана при этом остается постоянным), а температура – уменьшается в результате теплообмена с окружающей средой, что также влияет на сопротивление трубопроводной сети. Но такая зависимость не одинакова.

Средняя скорость перемещения влажной газозвушной смеси по вакуумному подземному дегазационному трубопроводу является параметром, характеризующим эффективность функционирования дегазационных установок, и не превышает 20–25 м/с [2]. Средняя скорость газового потока определяется зависимостью [3]

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2},$$

где  $v$  – средняя скорость движения смеси, м/мин;  $Q$  – объемный расход влажной метановоздушной смеси, м<sup>3</sup>/мин;  $S$  – площадь поперечного сечения потока смеси, м<sup>2</sup>;  $d$  – гидравлический диаметр участка или магистрального вакуумного подземного дегазационного трубопровода, м.

Таким образом, величина средней скорости движения влажной метановоздушной смеси зависит от объемного расхода смеси и гидравлического диаметра трубопровода, что опреде-

ляет силы инерции, действующие в движущемся потоке.

Давление в начале и конце участков трубопровода является важным показателем, характеризующим состояние трубопровода, его гидравлическое сопротивление и наличие в нем водяных пробок, ненормируемых подсосов воздуха из атмосферы горных выработок в дегазационную систему или мест с другими отклонениями от рационального режима работы, а также пропускную способность трубопроводной сети.

В настоящее время вопрос ранжирования причин потерь давления по длине вакуумного подземного дегазационного трубопровода вследствие изменения его гидравлического сопротивления является актуальным как для стальных так и для стеклопластиковых газопроводов. В большинстве случаев разность давлений на вакуумнасосной станции и у устья удаленной скважины превышает допустимую расчетную величину, и для создания у скважины необходимого разрежения, вводят в эксплуатацию большее количество вакуумнасосов. Это влечет за собой увеличение количества потребляемой электроэнергии и снижение эффективности работы вакуумнасосной станции. При этом ожидаемого увеличения объема каптируемого ме-

**Типичные значения шероховатости (чистоты обработки) поверхности для основных материалов труб в системах дегазации**

Трубы (материал) / состояние	Шероховатость, мм
Сталь цельнотянутая новая	0,02–0,1
Сталь электросварная новая	0,05–0,1
Сталь оцинкованная новая	0,15
Сталь б/у очищенная	0,15–0,2
Сталь слегка ржавая	0,1–0,4
Сталь очень ржавая	0,4–3
Сталь ржавые	1–2
Сталь с накипью	1–4
Стеклопластик	0,0001–0,0015

тана не происходит, в то время как возрастают подсосы воздуха в трубопроводную сеть, приводя к увеличению ее сопротивления. Очевидно, что с уменьшением сопротивления трубопровода потери давления по длине снижаются, и для формирования величины разрежения в устье удаленной скважины, необходимой для отсоса расчетного количества метана, возможно использование меньшего числа вакуум-насосов.

Используемые в настоящее время в системах дегазации некоторых угольных шахт стеклопластиковые трубы имеют отличающиеся от стальных труб гидравлические характеристики (таблица), которые оказывают существенное влияние на гидродинамические режимы движения метановоздушной смеси по подземному вакуумному газопроводу.

Преимущество стеклопластика очевидно. Трубы из стеклопластика, имеют очень гладкую обтекаемую поверхность. Гидравлические расчеты могут быть выполнены по формуле, которая учитывает абсолютную шероховатость стенки трубы. Расчетная шероховатость для стальной трубы, с учетом локализованных разрывов на стыках, обычно между 0,05 и 0,10 мм, как для новой трубы, так и для трубы, которая много лет находится в эксплуатации.

Установлено, что метановоздушная смесь, откачиваемая из угольных шахт является трехфазной, давление которой создается, в основном, молекулами метана и воздуха [2]. Это связано с тем, что при температуре смеси 10...28 °С парциальное давление водяного пара не превышает 3,78 кПа [3].

Часть энергии, переносимой метановоздушной смесью вдоль газопровода, расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений трубопроводной сети, преобразуясь в тепловую [3]. В основном это сопротивления, происходящие по длине, так как

подземный вакуумный дегазационный газопровод относится, с гидравлической точки зрения, к длинным трубопроводам. Тепловая энергия рассеивается во внешнюю среду, но часть ее остается в газозвушном потоке, изменяя внутреннюю энергию молекул движущейся смеси. Увеличение турбулентности движущейся смеси является одной из причин увеличения сопротивления и, как следствие, – потерь давления в вакуумном подземном дегазационном трубопроводе.

Абсолютное давление влажной метановоздушной смеси в конце участка  $p_2$  определяется зависимостью [2]

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - \frac{4,5 \cdot 10^{-4} Q_m^2 R \lambda l T}{d^5}},$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – абсолютное давление влажной метановоздушной смеси соответственно в начале и конце участка трубопровода, Па;  $Q_m$  – массовый расход метановоздушной смеси на участке, кг/мин;  $R$  – газовая постоянная метановоздушной смеси в начале участка;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения, или коэффициент Дарси;  $l$  – длина участка, м;  $T$  – температура метановоздушной смеси, К;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода на участке, м.

Между молекулами газовой смеси нет взаимодействия, и в промежутках между столкновениями друг с другом или со стенками труб движение их прямолинейно [4]. Сталкиваясь, молекулы смеси теряют часть энергии и, меняя направление движения, способствуют перемешиванию. В области влажного газозвушного потока, непосредственно прилегающего к стенке трубы, турбулентные пульсации минимальны или полностью исчезают. В этом районе вязкость смеси определяется динамической вязкостью входящих в состав смеси веществ, что и вызывает появление касательных на-

пряжений, причем их величина тем больше, чем больше концентрация молекул воздуха. Немного дальше от стенок трубы – в переходной зоне потока – движение отдельных молекул газовой смеси становится беспорядочным, интенсивно возрастают пульсационные скорости. В ядре потока полное касательное напряжение определяется в основном турбулентным трением, создаваемым интенсивным перемешиванием молекул газа вследствие возрастания поперечных составляющих скоростей.

Причина возрастания сопротивления вакуумного трубопровода при увеличении касательных напряжений в следующем. Движущаяся молекула метановоздушной смеси переносится пульсационной составляющей скорости из слоя с меньшей средней скоростью (вблизи стенок труб) в слой, средняя скорость которого больше. Переход молекулы сопровождается увеличением скорости оставленного слоя, т.к. происходит передача последнему импульса, имеющего составляющую, совпадающую с вектором скорости этого слоя. В результате столкновений с окружающими молекулами слоя смеси, в который совершен переход, и движущихся быстрее, – рассматриваемая молекула приобретает ускорение, и ее количество движения увеличивается. Это увеличение происходит за счет того, что у принявшего слоя отнимается соответствующее количество движения, то есть это приводит к его торможению.

Так как молекулярная масса подсымаемого в дегазационную систему воздуха больше молекулярной массы каптируемого метана и паров воды, поступающих в трубопроводную сеть из скважин вместе с газом, – то и силы инерции, возникающие при движении молекул воздуха, больше. Следовательно, соударения, происходящие между отдельными молекулами сме-

си, а также молекулами и стенками трубопровода, влекут за собой более интенсивное перемешивание. Такой процесс вызывает появление касательных составляющих напряжения, за счет чего разности скоростей слоев в ядре потока движущейся смеси будут сглаживаться, приводя к уменьшению неравномерности распределения скоростей движения. В результате возникают внутренние силы трения, препятствующие перемещению молекул смеси.

Таким образом, при движении метановоздушной смеси по вакуумному газопроводу от дегазационных скважин до вакуум-насосной станции увеличение концентрации воздуха в смеси приводит к возрастанию сил инерции, действующих в смеси; увеличению динамической вязкости, влияние которой на гидравлическое трение значимо непосредственно у стенок труб и снижается к середине сечения. Основную роль в образовании потерь энергии играют перемешивание и соударения молекул смеси друг о друга, приводящие к рассеиванию кинетической энергии завихренных частиц. Увеличение турбулентности является одной из основных причин увеличения гидравлического сопротивления вакуумного трубопровода и, как следствие, возрастания потерь давления в дегазационной системе. Касательные напряжения при этом в основном определяются турбулентной вязкостью, обусловленной турбулентными пульсациями.

Влияние гидравлического сопротивления трубопроводной сети на потери давления в дегазационной системе характеризуется коэффициентом Дарси (коэффициентом гидравлического сопротивления). Т. Карманом и Л. Прандтлем доказано влияние на закон распределения скоростей в ядре турбулентного потока переменной величины турбулентной вязкости,

а также установлена зависимость отношения средней скорости потока к максимальной величине местной осредненной скорости  $\bar{u}_{max}$  от коэффициента Дарси [5].

Коэффициент Дарси определяется зависимостью

$$p_1 - p_2 = \lambda \frac{16p_1 l Q_m^2}{(p_1 + p_2)\rho_1 \pi^2 d^5},$$

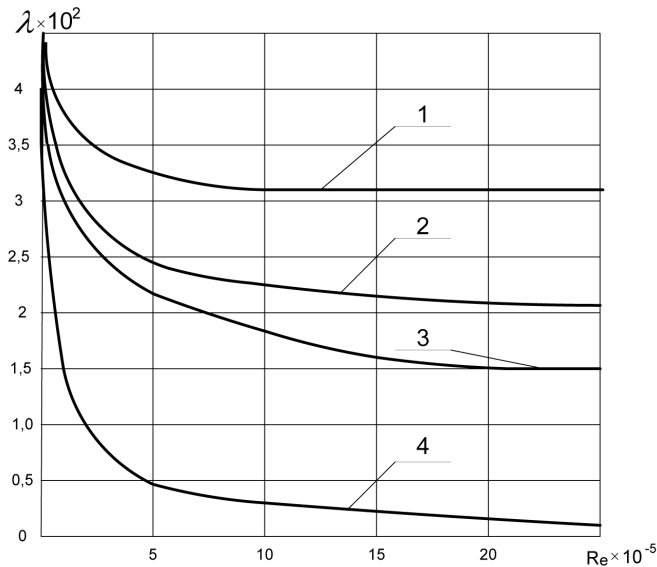
где  $p_1, p_2$  – абсолютное давление в вакуумном трубопроводе соответственно в начале и конце участка, Па;  $\lambda$  – коэффициент Дарси;  $l$  – длина участка, м;  $\rho_1$  – плотность метановоздушной смеси в начале участка, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр трубопровода на участке, м;  $Q_m$  – массовый расход метановоздушной смеси на участке, кг/с.

Согласно формуле А.Д. Альтшуля [3], коэффициент Дарси определяется

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25},$$

где  $\Delta_3$  – эквивалентная шероховатость, м;  $Re$  – число Рейнольдса.

Отсюда следует, что при турбулентном режиме движения коэффициент Дарси зависит от числа Рейнольдса, относительной шероховатости внутренних стенок труб ( $\Delta/d$ , где  $\Delta$  – абсолютная шероховатость, м) и от характера этой шероховатости [6]. Графическая зависимость коэффициента Дарси от числа Рейнольдса и эквивалентной шероховатости приведена на рисунке при абсолютном давлении в дегазационном трубопроводе  $p_1 = 93\,300$  Па, температуре метановоздушной смеси  $T = 288$  К, массовом расходе метана  $Q_{mm} = 0,7167$  кг/с, диаметре трубопровода  $d = 0,309$  м, длине участка газопровода  $l = 950$  м и отсутствии скоплений капельной жидкости. Здесь эквивалентная шероховатость – это шероховатость стенок труб, при которой потери разрежения на участке трубопровода такие же, как и при неоднородной фактической шероховатости. По графиче-



**Графическая зависимость  $\lambda = f(Re, \Delta_3)$ :** 1 –  $\Delta_3 = 2,0$  мм (для стальных труб после длительной эксплуатации); 2 –  $\Delta_3 = 0,3$  мм (для стальных труб после нескольких лет эксплуатации); 3 –  $\Delta_3 = 0,01$  мм (для новых стальных труб); 4 –  $\Delta_3 = 0,0015$  мм (для стеклопластиковых труб)

ской зависимости можно определить, что из-за образования неровностей стенок стальных труб после длительной эксплуатации коэффициент сопротивления на таких участках возрастает в 1,5...2,0 раза по сравнению с его величиной при использовании новых труб. Так, например, при значении числа Рейнольдса  $10^6$  коэффициент Дарси равен: для новых труб  $\lambda = 0,0179$ ; для труб после длительной эксплуатации  $\lambda = 0,032$ , а для стеклопластиковых  $\lambda = 0,0031$ .

Для стеклопластиковых труб, имеющих шероховатость внутренней поверхности значительно меньше чем у

стальных, коэффициент Дарси также имеет более низкие значения. Следовательно, при транспортировании метановоздушной смеси от скважин угольных шахт на поверхность по газопроводам из композитных материалов необходимо режимы работы дегазационной установки выбирать с учетом существенного изменения коэффициента Дарси. В случае, если участковый газопровод собран из труб из композитных материалов необходимо учитывать, что изменение режимов движения смеси будет происходить скачкообразно в месте перехода от стальных труб к композитным.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Вып. 22. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 250 с.
2. Малашкина В.А. Дегазационные установки: Учебное пособие. 2-е изд. – М.: изд-во МГТУ, 2012 – 190 с.
3. Ушаков К.З., Малашкина В.А. Гидравлика. Учебник. – М.: изд-во МГТУ, изд-во «Горная книга», 2009. – 414 с.
4. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1985. – 520 с.
5. Аверин С.И., Минаев А.К., Швыдкий В.С. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 304 с.
6. Малашкина В.А., Вострикова Н.А. Выбор режимов транспортирования метановоздушной смеси по подземному дегазационному трубопроводу // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № . Отдельные статьи (специальный выпуск). – С. 13–18. **ГИАБ**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Малашкина Валентина Александровна – доктор технических наук, профессор, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

---

UDC 622.411.33:533.17

### STUDY OF FACTORS AFFECTING THE QUALITY OF THE METHANE-AIR MIXTURE FLOWING FROM THE WELLS TO THE SURFACE COAL MINE BY PIPELINE OF COMPOSITE MATERIAL

Malashkina V.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

---

Currently the use of effective methods of degassing sources of gas evolution allows to obtain a methane-air mixture at the exit of the degassing wells coal mines with high methane concentrations. But to keep this level of quality captured methane-air mixture during the transportation from the wells to the vacuum pumping station and subsequent disposal is not possible.

When using fiberglass piping systems in the degassing process of the transportation of methane-air mixture from the wells to the surface has a number of features that must be considered when choosing a mode of operation of MDU.

The question of ranking the causes of pressure losses along the length of the underground vacuum degassing pipeline due to changes in its hydraulic resistance is relevant for both steel and fiberglass pipelines. In most cases, the pressure difference between the vacuum-pump station and near the mouth of the remote wells exceeds the allowable design value, and to create at the well necessary dilution, introducing a greater number of vacuum pumps. This entails increasing the amount of electricity consumed and the reduction efficiency of the vacuum pump station. The expected increase in the volume of captured methane does not occur, while increasing the leak of air into the pipe network, resulting in an increase of its resistance. It is obvious that with the decrease of the resistance of the pipeline pressure losses along the length of the fall, and for the formation of the magnitude of the dilution in the estuary of the remote wells required to exhaust the estimated amount of methane, perhaps using a smaller number of vacuum pumps not occur, while increasing the leak of air into the pipe network, resulting in an increase of its resistance. It is obvious that with the decrease of the resistance of the pipeline pressure losses along the length of the fall, and for the formation of the magnitude of the dilution in the estuary of the remote wells required to exhaust the estimated amount of methane, perhaps using a smaller number of vacuum pumps.

*Key words:* degassing, condensation, hydraulic co-resisting, underground vacuum gas pipeline, methane-air mixture, Darcy coefficient, fiberglass pipeline.

## REFERENCES

1. *Instruktsiya po degazatsii ugol'nykh shakht*. Seriya 05. Vyp. 22 (Instructions for the degassing of coal mines. Series 05. Issue 22), Moscow, ЗАО «NTTs issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti», 2012, 250 p.
2. Malashkina V.A. *Degazatsionnye ustanovki*. Uchebnoe posobie. 2-e izd. (Degassing unit. Educational aid, 2nd edition), Moscow, izd-vo MGGU, 2012, 190 p.
3. Ushakov K.Z., Malashkina V.A. *Gidravlika*. Uchebnik (Hydraulics. Textbook), Moscow, izd-vo MGGU, izd-vo «Gornaya kniga», 2009, 414 p.
4. Kukhling Kh. *Spravochnik po fizike*. Per. s nem (Handbook of physics. Translated from German), Moscow, Mir, 1985, 520 p.
5. Averin S.I., Minaev A.K., Shvydkiy V.S. *Mekhanika zhidkosti i gaza: uchebnik dlya vuzov* (Fluid and gas mechanics. Textbook for high schools), Moscow, Metallurgiya, 1987, 304 p.
6. Malashkina V.A., Vostrikova N.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2003, no . Special Edition, pp. 13–18.



## УМНАЯ КНИГА – ПРЕДМЕТ ПЕРВОЙ НЕОБХОДИМОСТИ

### АННОТАЦИЯ С ПОДПИСЬЮ

Одного из наших авторов коллега попросил написать аннотацию к своей книге, выходящей в другом изда-тельстве, сам почему-то не смог. Аннотация была написана, книга вышла в свет, и наш изумленный автор увидел под ней свою подпись – проф. Выпирайло. Приученный к издательской культуре и соблюдению стандартов, он спросил у автора книги: «Зачем ты поставил мою подпись под аннотацией? Это противоречит книжным правилам и смотрится как-то нелепо».

В ответ услышал: «Надо же, я этого не знал. У нас такое издательство, что скажешь – то и делают. Мне казалось, что так солиднее будет». Выпирайло: «Чудак-человек, аннотации пишут редакторы, и они привыкли к анонимности, чтобы читатель верил в объективность информации». Автор: «А у моей книги не было редактора, так, коллега с кафедры посмотрела, и ей понравилось».

Такая вот халтура.

Продолжение на с. 310