

УДК 621.18

А.А. Гусев¹, А.В. Локтев², А.В. Малахов²**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ
НА ОБВОДНЕННЫХ УЧАСТКАХ**ОАО "Гипрогазцентр", г. Нижний Новгород¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Приводится специфика расчётов магистральных газопроводов при прокладке на обводнённых участках.

Ключевые слова: магистральный газопровод, сопротивление грунта, выталкивающая сила, устойчивость газопровода.

Газопроводы на территории России пролегают как в сухих, суглинистых почвах, так и торфяных и обводнённых. Трассы газопроводов пересекают заболоченную Тундру на тысячи километров. Данная статья раскрывает всю специфику прокладки газопроводов в грунтах, обладающих слабой удерживающей способностью.

При проектировании газопровода на обводнённых участках необходимо учитывать дополнительные нагрузки от выталкивающей силы воды. Возникает опасность изменения проектного положения газопровода, в результате потери продольной устойчивости с выходом (всплытием) на поверхность участков газопровода. В результате выхода (всплытия) газопровода на поверхность образуются арки и гофры, что, в конечном итоге, провоцирует отказы и может привести к аварии на трассе. В связи с этим для обеспечения устойчивости положения газопровода в траншее на проектных отметках производится его балластировка или закрепление. Для этой цели используются конструкции, создающие давление на газопровод (пригрузку), а также конструкции, использующие давление грунта в основании траншеи.

Опыт эксплуатации показал, что расчет таких трубопроводов с учетом действительных условий их работы приобретает важнейшее значение.

Учитывая, что возможно возникновение больших перемещений газопровода при малом сопротивлении грунта, обязательна проверка деформаций трубы при действии всех нагрузок и воздействий. Это в особенности относится к участкам газопровода, имеющим начальный изгиб в вертикальной плоскости или относительно большие углы поворота в горизонтальной плоскости.

Для балластировки и закрепления газопроводов должны применяться способы и конструкции, допущенные к применению в соответствии с действующими нормами и стандартами и имеющие ТУ на их изготовление.

Применяемые для изготовления конструкций материалы должны обладать стойкостью по отношению к агрессивным компонентам грунтов.

Выбор конструкции или способа балластировки газопровода проводится с учетом следующих основных факторов:

- категории местности;
- характера и типа грунтов;
- уровня грунтовых вод;
- рельефа местности;
- схем прокладки, наличия углов поворотов, кривых искусственного гнущья;
- методов производства строительно-монтажных работ;
- условий эксплуатации;
- технико-экономической целесообразности их применения.

В зависимости от конкретных условий строительства газопровода на отдельных участках трассы, строительного сезона, характеристик грунтов, уровня грунтовых вод и схем прокладки должны применяться следующие конструкции и способы балластировки и закрепления газопроводов:

- сборные кольцевые железобетонные или чугунные утяжелители;
- железобетонные утяжелители охватывающего типа;
- анкерные устройства, заполняемые грунтом полимерконтейнеры, а также грунты засыпки, в том числе с использованием полотнищ из нетканого синтетического материала.

Определение нагрузки от выталкивающей силы воды

На газопровод, прокладываемый на обводнённых участках трассы, действует выталкивающая сила воды. Если на каком-то участке трассы эта сила окажется больше силы тяжести газопровода, вместе с удерживающей способностью грунта, то произойдет всплытие данного участка. Сначала выходят на поверхность углы поворота, а затем примыкающие к ним прямолинейные участки. Это приводит, как правило, к серьёзным последствиям, не редко становясь причиной аварии.

Приведем расчетные формулы для определения нагрузки от выталкивающей силы воды.

Поперечная нагрузка на газопровод от выталкивающей силы воды зависит от уровня воды относительно трубы. Если пренебречь кривизной газопровода, то выталкивающая сила, действующая на единицу длины газопровода, определяется по формуле:

$$q_{\text{в}} = \gamma_{\text{в}} \cdot F_{\text{о}}; F_{\text{о}} = \frac{D_{\text{н}}^2}{8} (\alpha - \sin \alpha),$$

где $\gamma_{\text{в}}$ - удельный вес воды с учетом растворенных и взвешенных в ней веществ;
 $D_{\text{н}}$ - наружный диаметр трубы с учетом изоляционного покрытия и футеровки;
 α - угол, характеризующий уровень воды относительно оси трубы:

$$\alpha = 2\pi, \text{ если } h_{\text{Е}} \leq h;$$

$$\alpha = 2\pi - \arccos \frac{2 \cdot (h_{\text{о}} - h_{\text{в}})}{D_{\text{н}}}, \text{ если } h < h_{\text{в}} \leq h_{\text{о}};$$

$$\alpha = 2 \arccos \frac{2 \cdot (h_{\text{в}} - h_{\text{о}})}{D_{\text{н}}}, \text{ если } h_{\text{о}} < h_{\text{в}} \leq H;$$

$$\alpha = 0 \text{ если } h > H,$$

где $h_{\text{Е}}$ - расстояние от верха засыпки до уровня воды; h , $h_{\text{о}}$ - расстояние от верха засыпки до верхней образующей и оси газопровода; H - расстояние от верха засыпки до нижней образующей газопровода.

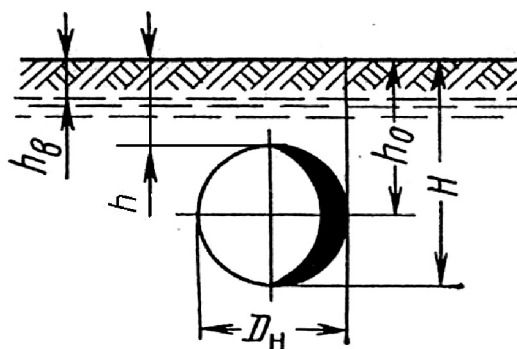


Рис. 1. Принятые обозначения подземного газопровода при обводнении

При $h_E \leq h$ формула записывается в виде:

$$q_B = \frac{\pi D_H^2}{4} \cdot \gamma_B \approx 0,8 D_H^2 \gamma_B.$$

Сопrotивление грунта перемещениям трубы

Кроме расчетного веса трубы, на газопровод действует нагрузка от грунта, которым засыпан этот газопровод. Грунт обладает удерживающей способностью, которая как вес трубы препятствует всплыванию газопровода на поверхность. Далее приведём расчетные формулы для определения сопротивления грунта вертикальным перемещениям трубы.

При расчетах подземных газопроводов, прокладываемых на обводненных участках, можно пользоваться теми же моделями грунта, что и для газопроводов в обычных условиях. При этом изменяются только количественные параметры модели.

На основании проведенных экспериментов установлены эмпирические формулы для определения предельной удерживающей способности грунта. В зависимости от уровня воды предельное сопротивление грунта вертикальным перемещениям трубы определяется по формулам, при $h_E \leq h$:

$$q_{\text{пр.гр}} = D_H \left[\gamma_{\text{гр}} \cdot h_B + \gamma_{\text{взв}} \cdot \left(h - h_0 - \frac{\pi \cdot D_H}{8} \right) \right] + k \cdot \{ [\gamma_{\text{гр}} \cdot h_B \cdot (2 \cdot h_0 + h_B) + \gamma_{\text{взв}} \cdot (h_0 - h_B)^2] \cdot \text{tg} 0,7 \cdot \varphi_{\text{гр}} + \frac{0,7 \cdot h_0 \cdot c_{\text{гр}}}{\cos 0,7 \cdot \varphi_{\text{гр}}} \};$$

$$q_{\text{пр.гр}} = \gamma_{\text{гр}} \cdot \left(h_B \cdot D_H - \frac{\pi \cdot D_H^2}{4} + F_{\text{обв}} \right) + \gamma_{\text{взв}} \cdot \left[(h_0 - h_B) \cdot D_H + \frac{\pi \cdot D_H^2}{8} - F_{\text{обв}} \right] + k \cdot \left[\gamma_{\text{гр}} \cdot h_B \cdot (2 \cdot h_0 - h_B) \cdot \text{tg} 0,7 \cdot \varphi_{\text{гр}} + \gamma_{\text{взв}} \cdot (h_0 - h_B)^2 \right] \cdot \text{tg} 0,7 \cdot \varphi_{\text{гр}} + \frac{0,7 \cdot h_0 \cdot c_{\text{гр}}}{\cos 0,7 \cdot \varphi_{\text{гр}}};$$

$$q_{\text{пр.гр}} = \gamma_{\text{гр}} \cdot D_H \cdot \left(h_0 - \frac{\pi \cdot D_H}{8} \right) + k \cdot \left[\gamma_{\text{гр}} \cdot h_0^2 \cdot \text{tg} 0,7 \cdot \varphi_{\text{гр}} + \frac{0,7 \cdot h_0 \cdot c_{\text{гр}}}{\cos 0,7 \cdot \varphi_{\text{гр}}} \right],$$

где D_H - наружный диаметр трубы;

$\gamma_{\text{гр}}$ - объемный вес грунта в естественном (необводненном) состоянии;

$\gamma_{\text{взв}}$ - объемный вес грунта во взвешенном состоянии;

k - коэффициент, характеризующий призму выпора, принимаемый равным единице для газопроводов условным диаметром от 100 см и более и меньше единицы - для трубопроводов меньших диаметров ($k = D_H / 100$);

$\varphi_{\text{гр}}$ - угол внутреннего трения грунта;

$c_{\text{гр}}$ - сцепление грунта;

$F_{\text{обв}}$ - площадь сечения трубы, находящейся в обводненном состоянии.

Объемный вес грунта во взвешенном состоянии определяется по формуле:

$$\gamma_{\text{взв}} = \frac{\gamma_y - \gamma_B}{1 + \varepsilon},$$

где γ_y - удельный вес грунта (скелета);

γ_B - удельный вес воды;

ε - коэффициент пористости.

При назначении уровня обводнения рассчитываемого участка газопровода следует исходить не только из данных непосредственных изысканий трассы трубопровода, но и учи-

тывать прогнозируемый уровень воды, связанный с гидрогеологическими условиями и их изменениями во времени. При назначении объемного веса необводненного грунта необходимо учитывать изменение его влажности за счет капиллярного подсоса из нижней обводненной части грунта. Коэффициент пористости грунта должен отражать не только результаты изысканий, но и способ и время обратной засыпки траншеи грунтом.

При проектировании газопроводов на участках, сложенных грунтами, которые могут перейти в жидкопластическое состояние, при определении выталкивающей силы следует вместо плотности воды принимать объемный вес разжиженного грунта, определяемый по данным инженерных изысканий.

Кроме поперечных перемещений газопровода, большую опасность представляет его продольное перемещение, которое может вызвать значительные деформации самого газопровода, а при прокладке в насыпи (что характерно в местах пересечения с другими газо- и нефтепроводами) её разрушение.

Сопротивление грунта продольным перемещениям трубы зависит от уровня воды и относительной глубины заложения газопровода. Предельное сопротивление грунта продольным перемещениям трубы на единицу ее длины можно определить по следующей формуле:

$$t_{\text{пр.гр}} = 2 \cdot \pi \cdot D_{\text{н}}^2 \cdot c_h \cdot \left(\gamma_{\text{гр}} \frac{h_{\text{в}}}{h_{\text{о}}} + \gamma_{\text{взв}} \frac{h_{\text{о}} - h_{\text{в}}}{h_{\text{о}}} \right) \cdot \text{tg} \cdot \varphi_{\text{гр}} + 0,6 \cdot \pi \cdot D_{\text{н}} \cdot c_{\text{гр}}.$$

При расчетах следует учитывать, что если $h_{\text{в}} > h_{\text{о}}$, то необходимо принимать $h_{\text{в}} = h_{\text{о}}$. Коэффициент c_h , учитывающий образование свода естественного равновесия при продольных перемещениях трубы, определяется по следующим зависимостям:

– для песчаных грунтов:

$$c_h = 0,416 \cdot \frac{h}{D_{\text{н}}} - 0,056 \cdot \frac{h^2}{D_{\text{н}}^2} + 0,095;$$

– для глинистых грунтов:

$$c_h = 0,367 \cdot \frac{h}{D_{\text{н}}} - 0,046 \cdot \frac{h^2}{D_{\text{н}}^2} + 0,06.$$

Сопротивление перемещениям трубы при наличии балластировки

Если удерживающая способность грунта и собственный вес трубы недостаточны для обеспечения заданного положения газопровода, то необходимо использовать разного рода пригрузки, которые создают дополнительную нагрузку, препятствующую вертикальному перемещению трубы.

Таким образом, при определении сопротивления поперечным перемещениям трубы необходимо учитывать не только сопротивление грунта, но и сопротивление, оказываемое дополнительными закрепляющими устройствами. Расчетное предельное сопротивление перемещениям трубы вверх можно записать в виде:

$$q_{\text{пр}} = q_{\text{п.т}} + n_{\text{гр}} \cdot q_{\text{пр.гр}},$$

где $q_{\text{пт}}$ - положительная плавучесть газопровода;

$n_{\text{гр}}$ - коэффициент перегрузки для грунта, принимаемый согласно СНиП II-45-75 равным 0,8;

$q_{\text{пр.гр}}$ - предельное сопротивление грунта.

Расчетная положительная плавучесть газопровода определяется по формуле:

$$q_{\text{п.т}} = q_{\text{тр}} + q_{\text{доп}} - q_{\text{выт}},$$

где $q_{\text{тр}}$ - расчетный вес единицы длины газопровода;

$q_{\text{выт}}$ - расчетная выталкивающая сила на единицу длины газопровода.

Под $q_{доп}$ следует понимать величину пригрузки на единицу длины газопровода. При расчете на эксплуатационный период в $q_{доп}$ включается расчетный вес продукта. Если балластировка осуществляется с помощью грузов, то при вычислении $q_{доп}$ следует учитывать выталкивающую силу воды, действующую на данную конструкцию.

При вычислении расчетной положительной плавучести по приведённой ранее формуле необходимо нормативные значения всех составляющих умножать на коэффициент перегрузки, который в соответствии с нормами следует принимать:

- для собственного веса газопровода равным единице;
- выталкивающей силы воды – 1,05 – 1,15;
- для веса железобетонных грузов – 0,95;
- для сплошного обетонирования – 0,93 – 0,9;
- для веса продукта – 0,95.

Если газопровод закрепляется анкерами, то величина $q_{доп}$ вычисляется по формуле:

$$q_{доп} = B_{анк} / l,$$

где $B_{анк}$ - расчетное усилие (допускаемая нагрузка) на анкерное устройство;

l - расстояние между анкерами.

Для винтовых анкеров согласно СНиП 2.05.06-85 расчетное усилие ($B_{анк}$) определяется по формуле:

$$B_{анк} = z \cdot k_{гр} \cdot N_{анк} \cdot m_{анк},$$

где z - число анкеров в одном анкерном устройстве;

$k_{гр}$ - коэффициент несущей способности грунта, в котором находятся лопасти анкеров, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Группа грунта	Грунты	$k_{гр}$
I	Мягкопластичные глины и суглинки, пластичные супеси	1
II	Пески мелкие, плотные и средней плотности, маловлажные, влажные и водонасыщенные; полутвердые, тугопластичные глины и суглинки	2
III	Пески гравелистые, крупные и средней зернистости, маловлажные, влажные и водонасыщенные; твердые супеси, глины и суглинки	3

$N_{анк}$ - максимальная (критическая) нагрузка на один винтовой анкер, завинченный в грунт I группы на глубину не менее шести диаметров лопасти, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Диаметр анкера, мм	$N_{анк}$, Н	Диаметр анкера, мм	$N_{анк}$, Н
100	6 500	300	30 000
150	7 500	400	53 000
200	13 500	500	83 000
250	21 000	600	120 000

$m_{анк}$ - коэффициент условий работы анкерного устройства, принимаемый равным 0,5 при $z \leq 2$ и 0,4 – при $z > 2$.

Устойчивость положения и продольная устойчивость газопровода

Расчет газопровода, как и любой другой строительной конструкции, должен производиться на нагрузки и воздействие в условиях строительства и эксплуатации. В процессе строительства должно обеспечиваться проектное положение подземного газопровода. Не касаясь технологии производства работ по укладке газопровода на дно траншеи, рассмотрим те нагрузки и воздействия, которые действуют при этом, а также условия обеспечения проектного положения газопровода.

Укладка газопровода на дно траншеи может производиться при отсутствии обводнения траншеи, причем обводнение может быть уже после засыпки газопровода грунтом. Укладка газопровода в некоторых случаях может производиться и в обводненную траншею. В связи с этим в различный период действуют и различные сочетания нагрузок. В общем случае будем исходить из того, что обводненный грунт обладает определенной удерживающей способностью против поперечных вертикальных (вверх) перемещений трубы. Удерживающая способность определяется расчетом на основании данных гидрогеологических изысканий и прогноза изменения свойств грунтов. В ряде случаев, исходя из возможной недостоверности исходных данных по грунтам, а также с целью обеспечения надежности трубопроводов больших диаметров, согласно нормам, «балластировка грунтом» не учитывается.

При укладке газопровода на дно необводненной траншеи необходимо обеспечить проектное положение газопровода, т.е. соответствующие углы поворота газопровода в вертикальной плоскости при ограничениях по изгибным напряжениям. Углы поворота газопровода часто выполняются упругим изгибом трубопровода под действием собственного веса трубы. Исходя из этого, определяется профиль газопровода. Для обеспечения устойчивости положения газопровода в этом случае необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$B_{изг} \leq m \cdot q_{тр}, (*)$$

где $B_{изг}$ - интенсивность упругих сил;

m - коэффициент условия работы газопровода;

$q_{тр}$ - расчетный вес единицы длины трубы.

Интенсивность упругих сил может определяться в зависимости от направления угла поворота. Отметим, что $B_{изг}$ зависит не только от угла поворота, но и уровня максимальных напряжений, характеризуемых минимальным радиусом упругого изгиба. Исходя из последнего, ограничивается область применения упругого изгиба газопровода для осуществления поворота газопровода. Профиль траншеи определяется в зависимости от угла поворота и минимального радиуса упругого изгиба оси газопровода. Если в соответствии с принятым в проекте углом поворота и минимальным радиусом упругого изгиба оси трубы условие (*) не выполняется, то для изгиба трубопровода он может пригружаться балластом. В этом случае условие (*) запишется в виде:

$$B_{изг} \leq m \cdot (q_{тр} + q_{бал}), (**)$$

где $q_{бал}$ - расчетная интенсивность поперечной нагрузки от балласта с учетом коэффициента перегрузки.

Если до начала эксплуатации газопровода, возможно его обводнение, то устойчивость положения для этого периода проверяют по условию:

$$B_{изг} + q_{в.т} + q_{в.б} \leq m \cdot (q_{тр} + q_{бал} + q_{пр.гр}), (***)$$

где $q_{вт}$ - расчетная интенсивность выталкивающей силы, действующей на трубу с учетом коэффициента перегрузки;

$q_{вб}$ - расчетная выталкивающая сила, действующая на конструкцию балластировки с учетом коэффициента перегрузки;

$q_{пр гр}$ - расчетное предельное сопротивление грунта поперечным вертикальным (вверх) перемещениям трубы, с учетом коэффициента перегрузки, равного 0,8.

Левая часть условия (***) отражает интенсивность нагрузок, действующих в поперечном направлении оси газопровода вверх, правая – вниз.

Отметим, что при расчете устойчивости положения на период последующего (после укладки газопровода в сухую траншею) обводнения траншеи в предэксплуатационный период в $q_{бал}$ включается также при наличии анкеров, их удерживающая способность.

При укладке газопровода в обводненную траншею устойчивость его положения на период строительства проверяют по условию:

$$B_{изг} + q_{в.г} + q_{в.б} \leq m \cdot (q_{тр} + q_{бал}).$$

В отличие от предыдущего случая, здесь не учитывается удерживающая способность анкеров и грунта.

При укладке газопровода в необводненную траншею и закреплении его анкерами повышенной несущей способности при последующем обводнении в газопроводе могут возникнуть значительные изгибные напряжения. В связи с этим необходимо произвести проверку против развития чрезмерных деформаций. Особенно это относится к участкам газопроводов, имеющих упругий изгиб выпуклостью вверх. Условия для ограничения деформаций:

$$\sigma_{пр}^H \leq \frac{c}{k} \cdot R_2^H,$$

где $\sigma_{пр}^H$ - максимальные продольные напряжения от нормативных нагрузок;

R_2^H - нормативный предел текучести металла труб.

При определении продольных напряжений для рассматриваемого периода считается, что пролет газопровода равен расстоянию между анкерами, а в пролете действует соответствующая поперечная нагрузка, направленная вверх. Кроме того, учитываются и продольные напряжения, связанные с упругим изгибом трубы по заданному профилю.

В записанных формулах, определяющих устойчивость положения газопровода в период строительства (до эксплуатации), не отражены нагрузки, связанные с воздействиями деформаций грунта, сопровождающихся изменением его структуры, например, пучение и др. При их наличии необходим расчет, учитывающий действие дополнительных нагрузок. Отметим также, что здесь не учитывается изменение температуры стенок трубы в течение времени от укладки газопровода в траншею и засыпки его грунтом до начала эксплуатации газопроводной системы. Обычно изменение температуры в этот период меньше, чем изменение температуры стенок труб, связанное с температурой транспортируемого продукта. Однако в некоторых случаях, например, если температурные перепады для периода строительства и эксплуатации отличаются по знаку, необходимо и для случая строительства проверять продольную устойчивость газопровода.

Библиографический список

1. **Айнбиндер, А.Б.** Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость: справочное пособие / А.Б. Айнбиндер. – М.: Недра, 1982. – 341 с.
2. ВСН 39-1.9-003-98. Ведомственные строительные нормы. Конструкции и способы балластировки и закрепления подземных газопроводов. – М.: ИРЦ Газпром, 1998.
3. СНиП 2.05.06-85* "Магистральные трубопроводы". – М., 1985.
4. СНиП III-42-80* "Магистральные трубопроводы". – М., 1980.
5. СТО Газпром 2-2.1-459-2010 Нормы проектирования переходов трубопроводов через водные преграды, в том числе в условиях Крайнего Севера. – М., 2010.

6. СТО Газпром 2-2.2-577-2011 Средства балластировки и закрепления газопроводов в проектном положении. Типовые методики испытаний. – М., 2011.
7. СТО Газпром 2-2.2-578-2011 Средства балластировки и закрепления газопроводов в проектном положении. Типовые методики испытаний. – М., 2011.

*Дата поступления
в редакцию 05.08.2017*

A.A. Gusev¹, A.V. Loktev², A.V. Malakhov²

THE DESIGN DETAILS OF GAS MAIN PIPELINES FOR THE WATERED GROUNDS

JSC “Giprogazcenter”, Nizhny Novgorod¹,
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev²

Subject: This article reveals the specifics of natural gas pipelines in soils with weak retention capacity. The pipeline in flooded areas should take into account the additional load from the lifting force of the water and the resistance to vertical movement of the pipe. In some cases it is necessary to use ballast to create an additional force that prevents the vertical movement of the pipe.

Results: Loads are found from the lifting force of the water, the resistance of the soil to the movement of the pipe, the resistance to movement of the pipe in the presence of ballasting. The stability of the position and the longitudinal stability of the pipeline are calculated.

Key words: Gas-main pipeline, resistance of soil, buoyant force, pipeline stability.