

УДК 621.643

Исследование лобового сопротивления трубопровода, оснащенного кольцевыми утяжелителями

И.И. Велиюлин (ОАО «Оргэнергогаз», РФ, Москва), **Э.И. Велиюлин** (ООО «Эксиком», РФ, Москва), **А.Д. Никоненко** (ООО «Подводгазэнергосервис», РФ, Москва)
E-mail: veliyulin@oeg.gazprom.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований обтекания водным потоком трубопровода с балластировкой кольцевыми утяжелителями. Исследования проведены на экспериментальном стенде ОАО «Оргэнергогаз» – гидрометрическом лотке. Для оценки результатов экспериментальных работ в качестве контрольного образца использована модель трубопровода, оснащенная деревянными рейками. Для проведения эксперимента была разработана измерительная система, позволяющая с высокой точностью определять силы, действующие на модель трубопровода в водном потоке. Экспериментальным путем впервые получены зависимости коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы от числа Рейнольдса для трубопровода с кольцевыми утяжелителями. Показано, что оснащение трубопровода кольцевыми утяжелителями существенно влияет на количественные показатели его лобового сопротивления. Определено предельное соотношение между расстоянием «трубопровод – дно» и диаметром трубы, при меньших значениях которого обтекание становится несимметричным с возникновением подъемной силы. Результаты работы могут быть полезны при разработке нормативных рекомендаций по расчетам силовых воздействий, распределенных по внешней поверхности подводного трубопровода на участках свободных пролетов речных подводных переходов.

Ключевые слова: газопровод, речной подводный переход, свободный пролет, обтекание, лобовое сопротивление, подъемная сила.

Размытый участок речного подводного перехода магистрального газопровода (МГ) подвергается силовому воздействию со стороны речного течения, способному при определенных обстоятельствах вызвать значительные изменения пространственного положения трубопровода. Распределенное по внешней поверхности трубопровода, это воздействие имеет горизонтальную (лобовое сопротивление) и вертикальную (подъемная сила) составляющие.

Сила лобового сопротивления F_x и подъемная сила F_y формально описываются

одинаковыми зависимостями от скоростного напора водного потока и от размеров обтекаемого тела:

$$F_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} DL;$$

$$F_y = C_y \frac{\rho v^2}{2} DL.$$

Здесь C_x и C_y – соответственно, безразмерные коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы, определяемые формой обтекаемого тела; ρ – плотность

воды, кг/м³; v – средняя скорость течения, м/с; D и L – соответственно, максимальный диаметр и длина обтекаемого тела, м.

В свою очередь, коэффициенты C_x и C_y являются функцией числа Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu},$$

где μ – динамический коэффициент вязкости воды, зависящий от ее температуры, Па·с.

Знание коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы необходимо для расчетов силового воздействия речного течения и общего напряженно-деформированного состояния (НДС) открытых участков речных подводных переходов.

Для получения коэффициентов лобового сопротивления различных тел предпочтение отдается экспериментальным методам даже для тел с простым профилем обтекания, так как до настоящего времени нет общепризнанного теоретического описания турбулентного обтекания.

Зависимости коэффициента лобового сопротивления C_x от числа Рейнольдса Re для цилиндрических тел изучались рядом исследователей. Результаты этих исследований в виде обобщенного графика представлены в [1]. Общим для тел цилиндрической формы является так называемый эффект «кризиса сопротивления», заключающийся в довольно резком падении коэффициента C_x в определенной области значений числа Re . Положение такой области по оси Re определяется состоянием обтекаемой поверхности, причем при большей шероховатости поверхности область «кризиса сопротивления» смещается в сторону меньших чисел Re .

В соответствии с нормативно-технической документацией в части, касаю-

щейся балластировки трубопроводов речных подводных переходов (СТО Газпром 2-2.2-577-2011. Средства балластировки и закрепления газопроводов в проектом положении. Технические требования), в русловой зоне балластировка производится железобетонными кольцевыми утяжелителями либо сплошным обетонированием. Балластирующие устройства, расположенные на трубопроводе с определенным просветом между ними, выполняя свою основную функцию подавления плавучести трубопровода, вместе с тем значительно изменяют форму профиля обтекания.

Экспериментальные данные по обтеканию трубопроводов с кольцевыми утяжелителями отсутствуют, и поэтому в научно-технической литературе (например, [1]) рекомендовано к использованию значение коэффициента лобового сопротивления для всех труб $C_x = 1,0$, а коэффициента подъемной силы $C_y = 0,6$.

Однако вполне ожидаемо, что для трубопровода с кольцевыми утяжелителями значения этих коэффициентов могут оказаться достаточно далекими от рекомендуемых из-за существенного отклонения формы обтекаемого профиля от цилиндрической.

В представляемой работе исследованы зависимости коэффициентов лобового сопротивления C_x и подъемной силы C_y трубопровода с кольцевыми утяжелителями от числа Рейнольдса Re . Параллельно для сравнения и контроля результатов зависимость C_x от Re изучена в проведенном эксперименте еще для трех модификаций трубопровода без утяжелителей: с необработанной поверхностью, с поверхностью шлифованной и рифленой и с поверхностью, покрытой гладкими футеровочными деревянными рейками.

Изготовленная для исследований основная сборная модель трубопровода с деревянными футеровочными рейками и съемными полукольцами утяжелителей, скрепленными между собой болтами и гайками, показана на рис. 1. Полукольца утяжелителей выполнены из тонкой арматурной сетки с последующим заполнением заданной формы бетоном. Модель, построенная с соблюдением геометрического подобия с натурным объектом, должна функционировать так же, как и реальный объект (натура). Это означает, что харак-

теристики потоков, в которых находятся модель и натура, должны описываться одинаковыми закономерностями.

Таким условиям отвечает действующий в ОАО «Оргэнергогаз» исследовательский комплекс «Гидрометрический лоток», с помощью которого проведены экспериментальные измерения. Краткое описание этого комплекса, обеспечивающего непрерывную циркуляцию воды и дистанционное управление скоростью потока, дано в работе [2].

Для проведения эксперимента была разработана измерительная система, позволяющая с достаточно высокой точностью измерять силы, действующие на модель трубопровода в водном потоке.

Находящаяся в русле лотка исследуемая модель трубопровода с помощью двух тонких стальных стержней жестко связана с двуслойной тележкой на роликах, способной легко передвигаться по пластиковым дорожкам (желобам), установленным на горизонтальных продольных гранях верхней рамы каркаса рабочего блока лотка. Силы, действующие на модель трубопровода, изменяются с помощью набора чувствительных динамометров (SF Frederiksen), перекрывающих диапазоны до 10 Н, до 50 Н и до 100 Н. При этом нагрузочный крюк динамометра соединен с тележкой с ее тыльной стороны, а статический крюк – с поперечной планкой, прикрепленной к верхней раме каркаса лотка.

Осредненная скорость течения воды измерялась с помощью микровертушки ГМЦМ-1 с индикацией мгновенной и осредненной скоростей на мониторе.

Рабочий блок лотка (русло) имеет небольшой варьируемый угол наклона к горизонту, поэтому была необходимость предварительного измерения не только силы трения между тележкой и желобами, но и скатывающей силы, действующей на систему «модель – тележка». Однако этих измерений можно было избежать, подобрав угол наклона русла лотка таким, чтобы уравнивать противоположные силы – трения и скатывающей (при этом тележка с находящейся в стоячей воде моделью скатывается по желобам без ускорения). В таких установленных начальных условиях при действии водного потока на модель динамометр измеряет силу ее лобового сопротивления.



Рис. 1. Изготовленная модель футерованного трубопровода со съемными железобетонными кольцевыми утяжелителями:

длина модели – 500 мм; длина утяжелителя – 167 мм; диаметр утяжелителей – 152 мм; диаметр трубы с футеровкой – 112 мм; расстояние между утяжелителями – 60 мм; размеры футеровочных реек – 100 x 7 x 2 мм

Для минимизации влияния шероховатости дна лотка и получения симметричного обтекания модель трубопровода при этих измерениях устанавливалась на уровне середины глубины потока.

Экспериментальные измерения с помощью гидрометрического лотка сил лобового сопротивления и скоростей течения могут быть проведены в двух вариантах:

- скорость течения перед моделью и сила лобового сопротивления измеряются одновременно, при этом присутствие в водном потоке модели трубопровода частично гасит скорость течения даже на значительном расстоянии до модели;
- когда модель в потоке, измеряется только сила лобового сопротивления, а при измерениях скорости течения модель выводится из потока.

Наши измерения проводились по обоим этим вариантам, но в данной публикации мы представляем результаты, полученные по второму варианту измерений, который точнее отражает взаимосвязь между лобовым сопротивлением и скоростью набегающего потока.

Результатами нескольких серий измерений и соответствующих расчетов стали зависимости коэффициентов лобового сопротивления C_x от числа Рейнольдса Re для трубопровода с кольцевыми утяжелителями (рис. 2, кривые 1). На этом же рисунке показаны подобные зависимости, полученные и для трубопроводов с различным состоянием поверхности без утяжелителей (кривые 2–4).