

---

## НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

---

УДК: 532.5

### АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ДВУХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ИХ РАСПОЛОЖЕНИИ В ПОТОКЕ

© 2024 г. Т. Н. Фесенко<sup>1,\*</sup>, В. Ю. Фурсов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: ftat50@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024 г.

После доработки 13.08.2024 г.

Принята к публикации 15.08.2024 г.

В статье исследованы подводные транспортные трубопроводы, элементы газонефтехимического машиностроения, теплообменное оборудование. Рассматривается гидроупругое возбуждение с периодическим вихревым отрывом. Определяются параметры воздействия на две трубы в потоке, и на их основе выбирается лучший вариант их расположения из условия выносливости материала при асимметричном цикле нагружения. Определены параметры напряженно-деформированного состояния элементов конструкций для выбранного расположения труб и проведено сравнение с допустимыми значениями.

**Ключевые слова:** трубная конструкция, пара труб, угол выноса, вихревой отрыв, механизм возбуждения, напряженно-деформированное состояние

**DOI:** 10.31857/S0235711924060083, **EDN:** NOUGGD

Предложенная модель численного эксперимента позволяет воспроизвести основные механизмы возбуждения колебаний трубных конструкций, а именно: периодический вихревой отрыв и гидроупругое возбуждение. Результаты исследования можно использовать при расчете на прочность подводных транспортных трубопроводов, элементов газонефтехимического машиностроения, теплообменного оборудования.

Так как ставится задача расчета параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопроводов для различного расположения их в потоке, то в отличие от других задач, где мы можем регулировать скорость обтекания конструкции потоком жидкости или газа, в данной задаче мы не можем изменить скорость воды или воздуха, обтекающего конструкцию из нескольких труб. Поэтому вопросу взаимного расположения труб нужно придать наибольшее значение и именно таким образом регулировать гидродинамические силы, действующие на конструкцию, а следовательно их параметры НДС [1].

**Цель исследования** — разработка методики определения оптимального взаимного расположения пар подводных трубопроводов, определение напряженно-деформированного состояния (НДС) в них для обеспечения безопасной эксплуатации.

Взаимодействие между двумя цилиндрами с углом выноса в потоке кардинально меняет картину НДС. В настоящей статье приведены численные исследования определяемых параметров циклических напряжений труб колцевого сечения и влияния

угла выноса и расстояния между трубами на фибровые напряжения. Углом выноса является угол между линией скорости потока и линией, соединяющей центры цилиндров. Для расчета гидродинамических нагрузок, действующих на элементы конструкций, взаимодействующих в потоке, можно использовать вихревые методы вычислительной гидродинамики [2–4]. Качественный и быстрый вычислительный метод оценки параметров обтекания системы транспортных трубопроводов был подобран в результате трудоемких вычислений коэффициентов сил, действующих на цилиндры с выносом в поперечном потоке. Результаты, полученные численным методом, представлены на рис. 1 в плоскости  $L/D - T/D$ , где  $D$  — диаметр трубы,  $L$  — проекция расстояния между центрами цилиндров на ось  $OX$ ,  $T$  — проекция расстояния между центрами цилиндров на ось  $OY$ . Расчет коэффициентов сил, действующих на пару цилиндров, проводился методом вязких вихревых доменов МВВД [4] и продублирован модернизированным методом дискретных вихрей ММДВ [2].

На рис. 1 проведены линии постоянных значений амплитуд величин коэффициентов подъемной силы при условиях обтекания соответствующими числу Рейнольдса  $Re = 61000$  и максимальные напряжения на второй трубе на этих линиях.

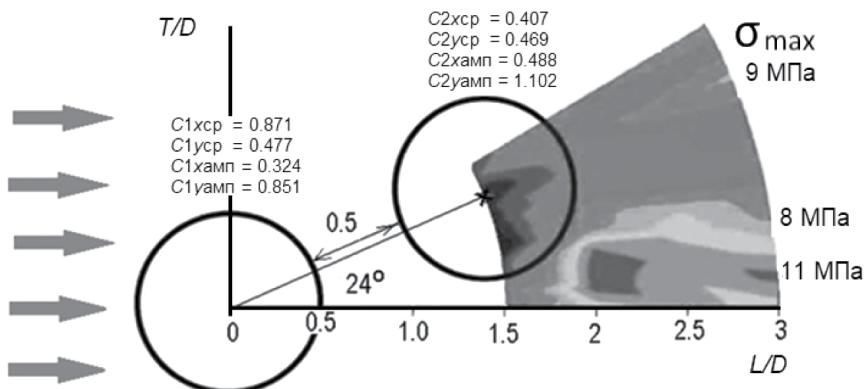


Рис. 1. Результаты численного эксперимента.

Результаты хорошо согласуются с данными Здравковича [5]. Приведенные результаты свидетельствуют о решении задачи выбора наиболее эффективного взаимного расположения tandemных пар подводных трубопроводов. Определим параметры НДС для различных вариантов расположения пар труб.

При воздействии гидродинамических сил труба деформируется и возникают упругие напряжения. Для расчета этих напряжений представим трубу в виде балки круглого сечения с тонкой стенкой и защемленной на концах.

Разобьем гидродинамические силы на три составляющие: средняя сила сопротивления, малоамплитудная периодическая сила сопротивления и периодическая подъемная сила. Будем рассматривать случай равномерного распределения этих сил по длине трубы, т.к. равномерное раскачивание трубы более опасно, чем разноправленные силы от срывов трехмерных вихрей. Используя принцип суперпозиций, будем складывать изгибные соосные напряжения от этих сил.

**Параметры трубы и потока.** Все участки балочных переходов относятся к категории III–IV. Материал труб диаметром 720 мм — сталь марки 17ГС; диаметром 530 мм — сталь марки 17Г1С. Нормативные механические характеристики трубных сталей приняты в соответствии с Техническими условиями ТУ 14-1446-72, по которым поставлены трубы на обследованные участки газопровода: временное сопро-

тивление  $\sigma_B = 510.0$  МПа; плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; диаметр трубы  $D = 720$  мм; толщина трубы  $t = 8$  мм; скорость потока  $V = 1$  м/с; число Струхала  $Sh = 0.2$ .

**Результаты численного эксперимента.** Коэффициент силы сопротивления и подъемной силы взяты из численного эксперимента [1]. В табл. 1 приведен небольшой фрагмент расчета.  $X$ ,  $Y$  — координаты центра второго (подветренный) цилиндра (трубы);  $C_{xcp}$ ,  $C_{ycp}$  — составляющие вектора среднего коэффициента силы сопротивления;  $C_{xамп}$ ,  $C_{yамп}$  — составляющие вектора полуаплитуды коэффициента подъемной силы.

**Таблица 1.** Результаты численного эксперимента

Угол отрыва	$X$	$Y$	$C_{xcp}$	$C_{ycp}$	$C_{xамп}$	$C_{y2амп}$
80	2.4	0	0.469136	-0.06903	0.864570	0.821895
80	2.4	0.2	0.245711	-0.31505	0.236133	0.825624
80	2.4	0.4	0.313361	-0.46966	0.192549	0.887535
80	2.4	0.6	0.195986	-0.59688	0.232262	0.815306
80	2.4	0.8	0.309951	-0.68689	0.254617	0.878664
80	2.4	1.0	0.354282	-0.73262	0.249139	0.942289
80	2.4	1.2	0.366781	-0.77304	0.916803	0.921930
80	2.4	1.4	0.495797	-0.75528	0.236150	0.988450
80	2.4	1.6	0.579591	-0.74372	0.291190	0.949261
80	2.4	1.8	0.72854	-0.62299	0.967072	0.997854
80	2.4	2	0.84822	-0.54594	0.348270	1.085486

Нагрузка на второй (подветренный) цилиндр оказалась большей, поэтому его и будем использовать в дальнейших расчетах.

**Средняя сила сопротивления.** Максимальное напряжение возникает в заделке на поверхности на уровне средней оси трубы. Таких точек две, одна с растяжением (подветренная сторона), другая со сжатием (надветренная). Точки сдвинуты выше или ниже оси трубы в зависимости от угла выноса.

Максимальное значение  $C_x$  равно 1.

Распределенная по длине сила сопротивления

$$q_{xcp} = C_x \left( \rho \frac{V^2}{2} D \right) = 360 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

**Периодическая сила сопротивления.** Эта сила добавляет изгибные напряжения на поверхности цилиндра вдоль его оси. Частота колебания силы в направлении потока в 2 раза больше частоты подъемной силы.

**Периодическая подъемная сила.** Эта сила добавляет изгибные напряжения на поверхности цилиндра вдоль его оси. Частота колебания подъемной силы совпадла с частотой срыва вихрей

$$f_{\text{срыва вихрей}} = Sh \frac{V}{D + T} = \text{от } 0.14 \frac{1}{\text{с}} \text{ до } 0.28 \frac{1}{\text{с}}.$$

Максимальное значение согласно численному эксперименту  $C_y = 2$

$$q_{yамп} = C_y \left( \rho \frac{V^2}{2} D \right) = 720 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

**Суммарное напряжение.** Суммарный вектор сил выписывает восьмерку в плоскости сечения. Максимум напряжения при раскачивании возникает для расположения второй трубы в красной зоне (рис. 1). Моменты сил создают асимметричное периодическое напряжение. Суммарный коэффициент сил изменяется от  $-0.63$  до  $1.81$ , что соответствует распределенным силам  $q_{\min} = -220 \text{ Н/м}$  и  $q_{\max} = 650 \text{ Н/м}$ , что соответствует фибральным напряжениям  $\sigma_{\max}$ :

$$q_{\max} = 1.81 \left( \rho \frac{V^2}{2} D \right) = 651.6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, M_{\max} = q_{\max} \frac{l^2}{12},$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = 11.3 \text{ МПа}.$$

Эпюра напряжений для балки (трубы), заделанной по концам, показана на рис. 2.

При расположении труб, дающем максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$  в самой нагруженной точке на поверхности, напряжение будет изменяться гармонически несимметрично от  $\sigma_{\min} = -7.4 \text{ МПа}$  до  $\sigma_{\max} = 11.3 \text{ МПа}$ .

Максимальный (по длине трубы) момент достигается в заделках.

На рис. 3 представлены результаты расчета максимальных амплитуд напряжений для различных углов выноса труб и расстояний между ними.

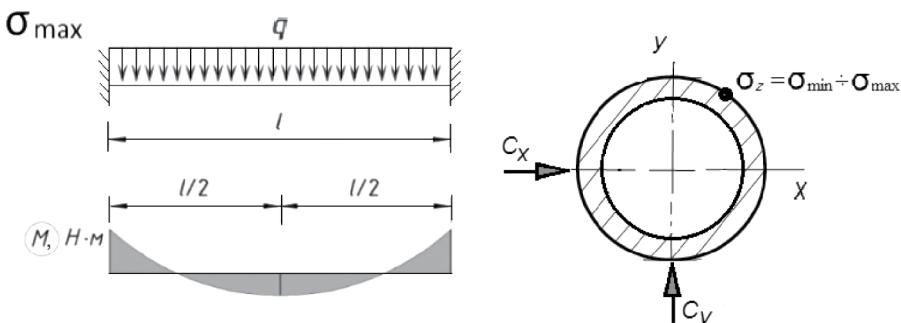


Рис. 2. Максимальное напряжение.

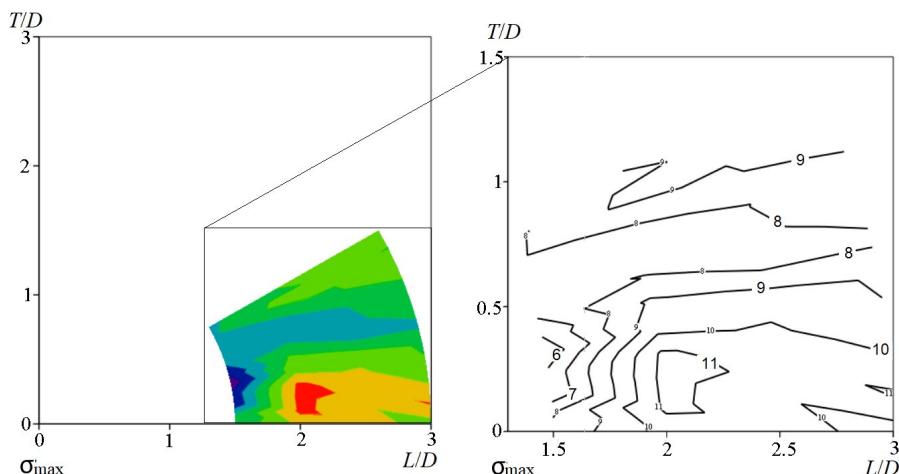


Рис. 3. Максимальные напряжения при различных расположениях труб.

**Предел выносливости.** Предел выносливости при симметричном цикле нагружения нашей стали составляет  $\sigma_1 = 0.4\sigma_B = 200.0$  МПа. Сравним предел выносливости материала стали с фибральным напряжением [ГОСТ 19281-2014]:

200 МПа  $\gg$  11.3 МПа — при тандемном расположении;

200 МПа  $\gg$  5.3 МПа — при расположении с выносом.

**Асимметричное нагружение.** Если сравнить влияние асимметрии по сравнению с симметричным нагружением при одинаковых  $\sigma_{max}$ , то известно, что асимметрия не ухудшает показатель  $N$  (количество циклов до разрушения).

**Вычисление допустимого напряжения [6].** Коэффициент асимметрии  $r = \sigma_{min}/\sigma_{max} = -7.4/11.3 = -0.65$ .

Количество циклов до разрушения  $N$  возьмем 107, что в нашем случае соответствует 10 годам непрерывных вынужденных колебаний с частотой срыва вихрей.

Коэффициент запаса по напряжению по возьмем равным 1. Тогда, согласно методике вычислений, получим

$$\sigma_{\text{допустимое}} = \frac{\sigma_B}{n_\sigma (4N)^{0.053} + \frac{(1+r)}{(1-r)}} = 164 \text{ МПа.}$$

Сравним предел выносливости материала сталь с фибральным напряжением:

164 МПа  $\gg$  11.4 МПа — при тандемном расположении;

164 МПа  $\gg$  5.3 МПа — при расположении с выносом.

**Квазистатическое приближение.** Понятие квазистатического приближения подразумевает, что изменения во времени происходят медленно по сравнению с характерным временем релаксации системы. В случае первой формы колебаний балки при условии, что она жестко закреплена на концах и не подвержена резонансным эффектам, амплитуды колебаний могут быть малыми, что позволяет считать процесс квазистатическим.

В нашем случае собственные частоты отстроены от частоты срыва, т. е. резонанса нет. Энергия распределенной силы не переходит в колебания балки. Неустойчивость из-за воздействия силы не возникает. Таким образом, если амплитуды колебаний балки остаются небольшими и нет резонанса, то использование квазистатического приближения может быть обоснованным. Однако всегда следует быть внимательным к условиям применимости таких приближений и оценивать их в каждой конкретной ситуации.

Напряжения для двух ниток трубопровода от течения реки малы, и определять их следует только при дополнительных нагрузках от провиса труб или движения диагностического оборудования в них, или при наличии дефектов [7].

**Заключение.** Для ниток трубопроводов в потоке, в целях снижения динамических нагрузок на вторую трубу, предлагается правильно расположить пару труб относительно потока и выбирать расстояние между ними только в случае, если существуют дополнительные нагрузки на трубу, создающие фибральные напряжения в районе 200 МПа.

**Финансирование.** Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Махутов Н.А., Каплунов С.М., Вальес Н.Г., Марчевский И.К., Фурсов В.Ю.* Расчет гидродинамических сил, действующих на конструкцию из двух трубопроводов при различном их расположении // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 4. С. 9.
2. *Kaplunov S., Valles N., Shitova L., Foursov V.* Application of numerical Experiment to Determine the Parameters of Pipeline Transport Depending on the Flow Stream Velocity // J. of Mach. Manuf. and Reliab. 2020. V. 49 (9). P. 817.
3. *Девнин С.И.* Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций. Справочник. Ленинград: Судостроение, 1983. 192 с.
4. *Kuzmina K., Marchevsky I., Soldatova I., Izmaylova Y.* On the scope of Lagrangian vortex methods for two-dimensional flow simulations and the POD technique application for data storing and analyzing // Entropy. 2021. V. 23. Art. 118.  
<https://doi.org/10.3390/e23010118>
5. *Здравкович М.М.* Обзор исследований интерференции между двумя круглыми цилиндрами при различном их взаимном расположении // Теоретические основы инженерных расчетов. 1977. № 4. С. 119.
6. Нормы расчета на прочность элементов оборудования и трубопроводов корабельных атомных паропроизводящих установок с водо-водяными реакторами Н-ППУ-01, 2005. 13 с.
7. *Фесенко Т.Н., Дронова Е.А.* Методика определения и оценки напряженного состояния балочных переходов магистральных газопроводов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 2. С. 59.
8. Расчетные нормы прочности оборудования и трубопроводов атомных электростанций. PNG-7-002-86. М.: Энергоатомиздат, 1989. 527 с. С. 59.