

УДК 004.925.8:519.876.5

## **СРЕДСТВО ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЫ РЕЗЕРВУАРОВ ОТ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ В УСЛОВИЯХ АНТАРКТИКИ**

*Н.И. Бурау<sup>1</sup>, А.В. Кузько<sup>2</sup>, С.А. Цибульник<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, 03056, +38(044)406-85-02, burau@pson.ntu-kpi.kiev.ua*

<sup>2</sup>*Национальный антарктический научный центр, бульвар Тараса Шевченко, 16, г. Киев, 01601, +38(044) 246-38-80, uac@uac.gov.ua*

**Реферат.** Рассмотрены аварийные ситуации и причины их возникновения на некоторых антарктических станциях. Показано, что в регионе Антарктики скорость ветра может достигать значений в 50–90 м/сек. Эта нагрузка может оказывать значительное влияние на резервуары с нефтепродуктами, которые установлены вне помещений. Проведен анализ причин выхода подобных резервуаров из строя. Для примера рассмотрен резервуар с Украинской антарктической станции Академик Вернадский. Показано, что рассмотренный резервуар находится в неблагоприятных климатических условиях, которые со временем могут привести к аварийным ситуациям. Предложено средство пассивной защиты от ветровой нагрузки. Проанализированы результаты имитационного моделирования в программном комплексе ANSYS. Рассмотрены поля скоростей и давлений. На примере резервуара с Украинской антарктической станции Академик Вернадский показана эффективность предложенного средства пассивной защиты резервуаров от ветровой нагрузки.

### **Засіб пасивного захисту резервуарів від вітрового навантаження в умовах Антарктики**

*Н.І. Бурау, О.В. Кузько, С.О. Цибульник*

**Реферат.** Розглянуто аварійні ситуації і причини їх виникнення на деяких антарктичних станціях. Показано, що в регіоні Антарктики швидкість вітру може досягати значень у 50–90 м/сек. Це навантаження може мати значний вплив на резервуари з нафтопродуктами, які встановлені поза приміщеннями. Проведено аналіз причин виходу подібних резервуарів з ладу. Для прикладу розглянуто резервуар з Української антарктичної станції Академік Вернадський. Показано, що розглянутий резервуар знаходиться в несприятливих кліматичних умовах, які з часом можуть спричинити аварійні ситуації. Запропоновано засіб пасивного захисту від вітрового навантаження. Проаналізовано результати імітаційного моделювання у програмному комплексі ANSYS. Розглянуто поля швидкостей та тиску. На прикладі резервуара з Української антарктичної станції Академік Вернадський показано ефективність запропонованого засобу пасивного захисту резервуарів від вітрового навантаження.

### **The way of passive protection of fuel tanks against the wind load in the Antarctic**

*N.I. Bouraou, A.V. Kuzko, S.A. Tsybulnik*

**Abstract.** Accidents and their causes at some Antarctic stations are considered. It is shown, that the wind speed can reach 50-90m/s in the Antarctic region. This load can have a significant impact on the fuel tanks that are installed outdoors. Tank from the Ukrainian Antarctic Vernadsky Station is considered as example. Causes of failure of such tanks are analyzed. It is shown that the tank (which is considered) is in adverse climatic conditions, which may eventually lead to its destruction. The way of passive protection of fuel tanks against the wind load is proposed. The results of the simulation in the ANSYS software package are analyzed. Velocity and pressure fields are considered. The effectiveness of the proposed way of passive protection of fuel tanks against wind load is shown by the example of the tank from the Ukrainian Antarctic Vernadsky Station.

**Key words:** vertical steel tank, the reliability of fuel tanks in Antarctica, CAD/CAE, wind load simulation.

## 1. Введение

Очень часто строительные и инженерные конструкции прямо или косвенно влияют на людей и окружающую среду. С каждым годом напряженно-деформированное состояние этих объектов претерпевает значительные изменения, уменьшая их остаточный ресурс, поэтому в условиях Антарктики вопросы надежности особенно актуальны. Примером могут служить инциденты, которые возникли на различных антарктических станциях, таких как:

- недавно (2005 г., [1]) открытая европейская станция Конкордия, на которой из-за невнимательности одного из сотрудников в апреле 2012 года произошел небольшой бытовой взрыв (рис. 1, [2]) (рис. 1, 2, 4-9 см. на цв. вклейке 6), не вызвавший значительных последствий;

- российская станция Восток, на которой в апреле 1982 года в результате пожара полностью вышли из строя основные и резервные дизель-генераторы [3]. Станция была обесточена, в результате чего 20 человек на протяжении 8 месяцев зимовки согревались самодельными буржуйками на дизельном топливе, пока из Мирного не пришёл санно-гусеничный поезд с новой дизель-электрической установкой;

- бразильская станция Команданте Феррас, которая 25 февраля 2012 года была практически полностью уничтожена пожаром (рис. 2, [4]), возникшим в помещении с генераторами и забравшим жизни двоих сотрудников.

Это далеко не полный перечень аварийных ситуаций, которые имели место за более чем 30 последних лет и продолжают возникать в наше время на территории Антарктики. Во многих случаях аварии происходили внутри помещений с генераторными установками, защищенными от большинства серьезных внешних воздействий, например, ветровой и снеговой нагрузок. Однако же основные резервуары с нефтепродуктами находятся вне помещений и подвержены всему спектру неблагоприятных внешних воздействий. Например, холодный воздух может стекать из центральных районов материка, образуя стоковые ветры, которые у побережья достигают больших скоростей (средняя годовая – до 12 м/сек), а при слиянии с циклоническими воздушными потоками превращаются в ураганные (до 50–60, а иногда и 90 м/сек, [5, 6]), что делает ветровую нагрузку одним из наиболее опасных внешних воздействий на объекты такого рода.

В начале 2007 года на Украинской антарктической станции Академик Вернадский был установлен и запущен в эксплуатацию новый резервуар для топлива цилиндрической формы объемом 200 м<sup>3</sup>. Однако из-за риска возникновения чрезвычайных ситуаций существует вероятность утечки топлива из этого резервуара или трубопроводов, что в зависимости от масштабов может привести к ухудшению экологического состояния вблизи станции или даже к экологической катастрофе. Именно поэтому обеспечение безаварийной эксплуатации резервуара с горючим является важной проблемой Украины в ее деятельности в Антарктике.

## 2. Анализ рисков в условиях Антарктики

В период эксплуатации инженерных и строительных сооружений, в частности резервуаров с экологически-опасными веществами, возможно накопление различных дефектов, имеющих случайный характер возникновения и развития, которые за счет взаимодействия между собой вызывают местные дополнительные напряжения. Сочетание различных дефектов в зоне зарождения разрушения является одной из наименее изученных проблем в сфере диагностики технического состояния объектов. Результаты анализа дефектов и отказов резервуаров свидетельствуют о таком явлении, как совместное действие вмятины на стенке и технологического дефекта сварного шва. На практике большинство разрушений при длительной эксплуатации стальных вертикальных резервуаров возникает из-за сварочных дефектов или трещин малоциклового усталости, образующихся вблизи мест концентрации напряжений, особенно при значительном понижении температуры внешней

среды [7-14]. Следует заметить, что информация о причинах возникновения и последствиях аварий не является полной. Как у нас в стране, так и за рубежом фирмы-владельцы разрушенных резервуаров не заинтересованы в распространении достоверной информации об истинных причинах и экологических последствиях аварий, о масштабах причиненного ими ущерба и часто предоставляют недостоверную информацию [8].

В случае возникновения незначительного дефекта не всегда есть возможность заменить нужный элемент конструкции, поэтому целесообразней заранее обеспечить безопасность использования резервуаров, потенциально содержащих некоторые начальные дефекты. В предыдущих работах [15, 16] авторами было показано (на примере Украинской антарктической станции Академик Вернадский), насколько надежность эксплуатации резервуара зависит от ветровой нагрузки (рис. 3). В зависимости от скорости ветра выделены три эксплуатационных случая:

- 1) Нормальная (безопасная) эксплуатация (до 25 м/сек).
- 2) Появление нежелательных (остаточных) напряжений и деформаций (25–50 м/сек), что может привести к необходимости вывода резервуара из эксплуатации для проведения текущего ремонта.
- 3) Аварийное состояние или потеря несущей способности (свыше 50 м/сек).

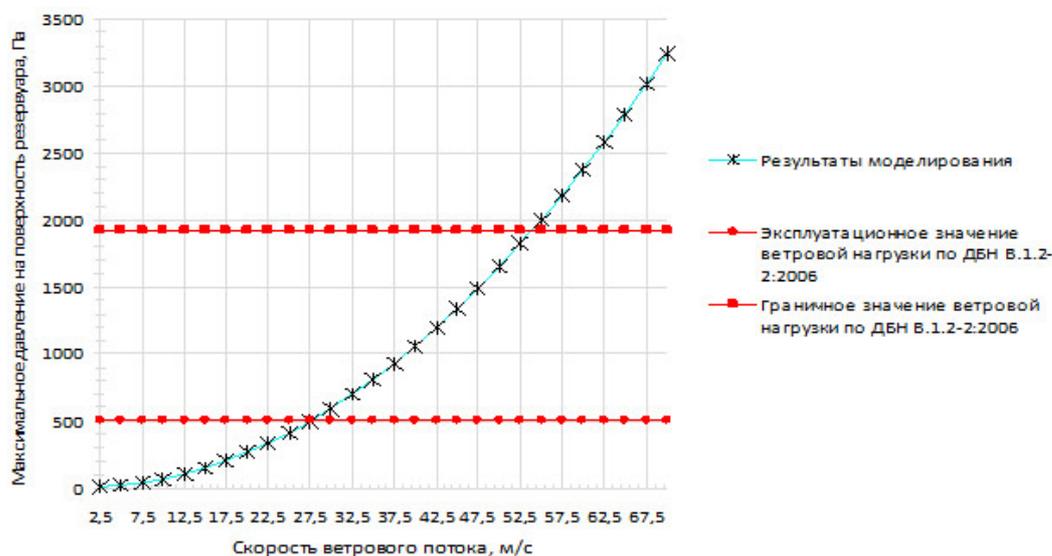


Рис. 3. График зависимости максимального давления на резервуар от скорости ветра

Согласно [17], средняя скорость ветра в районе станции Академик Вернадский составляет 35 м/сек, а максимальная – 45 м/сек. Итак, резервуар находится в неблагоприятных условиях эксплуатации, так как длительное воздействие чрезмерных напряжений и деформаций может привести к изменению механических характеристик материалов, использованных в его строительстве, появлению и развитию трещин, остаточных деформаций и других дефектов, которые при взаимодействии и дальнейшем развитии могут снизить остаточный ресурс и вызвать потерю несущей способности.

### 3. Результаты исследований

Для уменьшения ветровой нагрузки предложено установить вблизи резервуара стальные или железобетонные обтекатели. Обтекатель – конструкция определенной геометрической

кой формы и размеров, установленная с наветренной стороны резервуара [16]. Вследствие трудности постановки эксперимента и наблюдения явлений в реальных условиях принято решение воспользоваться имитационным моделированием для воспроизведения внешних нагрузок и исследования реакции резервуара на них. Имитационное моделирование дает более простой и быстрый способ решения поставленной задачи, чем аналитические методы, но следует понимать, что в процессе моделирования не представляется возможным получить на 100% точный результат. Это связано с тем, что в большинстве случаев имитационная модель – идеализированное представление технического состояния объекта, которого у него может не быть даже в первые секунды эксплуатации. Оценка точности может быть выполнена путем анализа чувствительности (к изменению некоторых параметров) модели и сходимости результатов.

При помощи программного комплекса ANSYS в два этапа проведено имитационное моделирование воздействия ветровой нагрузки на резервуар при наличии обтекателя различных форм и размеров. Всего на первом этапе было проведено более двухсот моделирований с использованием грубой сетки (около 1 миллиона тетраэдров). Второй этап заключался в исследовании наиболее эффективных комбинаций параметров модели с использованием качественной сетки (более 2 миллионов шестигранников). С количественными характеристиками эффективности предложенного средства защиты можно ознакомиться в работе [18].

Для анализа качественных характеристик в первую очередь необходимо определить исходное состояние резервуара. Из рис. 4 (на всех рисунках вектор воздушного потока направлен вдоль оси Y) видно, что при отсутствии каких-либо средств защиты при увеличении скорости ветра от 20 до 45 м/сек распределение нагрузки по резервуару практически не меняется, растет только значение давления ветра. Таким образом, можно сделать вывод, что при наличии в этой области дополнительного концентратора напряжений (патрубков, сварных швов и т.д.) шанс зарождения и дальнейшего развития дефектов повышается.

Распределение давления от воздушного потока меняется значительным образом при использовании обтекателя звездообразной формы [16, 18]. Из рис. 5 видно, что обтекатель принимает на себя большую часть давления ветра. При этом на резервуаре присутствуют две зоны, которые воспринимают остаточную величину (в среднем на 60% меньше, чем без обтекателя) давления воздушного потока, так как в этих местах векторы скорости направлены не по касательной к резервуару (рис. 6). Этого можно избежать, если увеличить диаметр обтекателя, но исходя из полученных в [18] данных, даже при максимальной скорости ветра в районе Украинской антарктической станции Академик Вернадский резервуар будет находиться в пределах зоны безопасной эксплуатации.

Установлено, что эффективность обтекателей начинает проявляться при их высоте, составляющей 3/4 высоты резервуара, но принимает оптимальные значения в случаях, когда обтекатель как минимум равен по высоте с исследуемым объектом. Звездообразная форма средства защиты от ветровой нагрузки сравнительно с другими обтекателями позволяет добиться наибольшего понижения давления на резервуар при меньших размерах. При этом в некоторых случаях могут возникнуть проблемы с физической реализацией такого обтекателя, что приведет к увеличению затрат материальных средств.

Альтернативой звездообразному может служить обтекатель квадратной формы, который, однако, показал несколько худший результат (40% по сравнению с 60% у звездообразного, [18]). Благодаря простой геометрической форме его изготовление не вызовет затруднений, а значит и дополнительных затрат. При этом следует помнить, что чем меньшие нагрузки испытывает резервуар, тем больший остаточный ресурс он будет иметь. Решение в каждом конкретном случае следует принимать отдельно, основываясь на имеющейся информации о текущем техническом состоянии объекта и нагрузках, которые на него действуют.

На рис. 7–9 показаны поля скоростей и давлений воздушного потока в горизонтальной плоскости, пересекающей резервуар. Без наличия обтекателя резервуар воспринимает

ветровую нагрузку в полной мере. Как говорилось выше, распределение давления по резервуару с увеличением скорости воздушного потока не меняется. Это связано с тем, что геометрические характеристики резервуара остаются прежними, а значит, неизменна и обтекаемость его формы. В случае наличия обтекателя распределение потоков воздуха и ветрового давления происходит иначе.

Благодаря своей искривленной по радиусу форме звездообразный обтекатель рассекает поток воздуха и одновременно отклоняет его, создавая при этом широкий воздушный коридор. Скорость ветра в этом коридоре в полтора раза меньше начальной. При этом между обтекателем и резервуаром возможно образование циркулирующих потоков воздуха, которые создают незначительные динамические возмущения в виде вибрации (рис. 6). Тем не менее эти потоки повторно рассекаются (теряя при этом скорость) за счет симметричной конструкции обтекателя и либо отклоняются в общий поток, либо спускаются под основание резервуара.

Обтекатель квадратной формы также создает воздушный коридор, но значительно более узкий за счет того, что потоки воздуха огибают его по касательной и сохраняют большую часть своей скорости. Именно поэтому зона непосредственного воздействия потоков воздуха и их давление на резервуар больше. Следует отметить, что величина отрицательного давления, которое испытывает резервуар в перпендикулярной вектору исходной скорости ветра плоскости, тоже значительно снижается при использовании обтекателей.

#### 4. Выводы

Резервуары, эксплуатируемые в климатических условиях региона Антарктики, подвержены воздействию значительных ветровых нагрузок, поэтому предложено средство пассивной защиты таких объектов. На базе конструкции резервуара и данных о скорости ветра на Украинской антарктической станции Академик Вернадский проведен ряд имитационных моделирований в программном комплексе ANSYS. Показано, что при неизменной геометрии резервуара, а значит и его обтекаемой формы, с ростом скорости воздушного потока зона распределения ветровой нагрузки не меняется. Анализ результатов также показал, что обтекатель принимает на себя большую часть давления воздушного потока и создает перед резервуаром воздушный коридор с более низкой скоростью ветра (понижение в полтора раза и больше). При этом величина отрицательного давления, которое испытывает резервуар в перпендикулярной вектору исходной скорости ветра плоскости, тоже значительно снижается.

Таким образом, моделирование показало, что предложенное средство пассивной защиты резервуаров от ветровой нагрузки является достаточно эффективным и может быть рекомендовано для практического применения, в частности, на антарктической станции Академик Вернадский.

**Работа выполнена при поддержке Государственного учреждения Украинский антарктический научный центр с использованием данных, полученных во время проведения украинских антарктических экспедиций на УАС Академик Вернадский.**

#### Литература

1. **Concordia Station** [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Concordia\\_Station](http://en.wikipedia.org/wiki/Concordia_Station)
2. **Cronicles from Concordia**. Accidents can happen [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://blogs.esa.int/concordia/2012/04/04/accidents-can-happen/>
3. **Восток (антарктическая станция)** [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Восток\\_\(антарктическая\\_станция\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Восток_(антарктическая_станция))

4. **Comandante Ferraz** Antarctic Station [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Comandante\\_Ferraz\\_Antarctic\\_Station](http://en.wikipedia.org/wiki/Comandante_Ferraz_Antarctic_Station)
5. **Антарктический климат** [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Антарктический\\_климат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Антарктический_климат)
6. **Ветер** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ветер>
7. **Афонская, Г.П.** Влияние дефектов на несущую способность резервуаров, эксплуатируемых в условиях Севера [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Афонская Галина Петровна. – Якутск, 2000. – 141 с. РГБ ОД, 61:00-5/2035-2.
8. **Макаренко, О.А.** Управление ресурсом безопасной эксплуатации стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.26.03, 25.00.19 / Макаренко Олег Анатольевич. – Уфа, 2010. – 342 с.: ил. РГБ ОД, 71:10-5/416.
9. **Купреишвили С.М.** Разрушения в процессе эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров со стационарной крышей [Текст] / С.М. Купреишвили // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – №7. – С. 8–14.
10. **Причинно-следственный анализ** аварий вертикальных стальных резервуаров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ogbus.ru/authors/Kondrashova/Kondrashova\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Kondrashova/Kondrashova_1.pdf)
11. **Галеев В.Б.** Аварии резервуаров и способы их предупреждения: научно-техническое издание / В.Б. Галеев, Д.Ю. Гарин, О.А. Закиров и др. Под ред. проф. Галеева В.Б. и Шарафиева Р.Г. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2004. – 164 с.
12. **Монбаева Г.Ч.** Анализ формирования отказов резервуаров / Г.Ч. Монбаева, В.А. Прохоров // Контроль. Диагностика. – 1998. – № 1. – С. 17–21
13. **Баширова Э.М., Свободина Н.И.** Оценка текущего состояния металла нефтегазового оборудования с помощью параметров передаточной функции // Нефтегазовое дело. – 2004. – С. 1–16
14. **Землянский А.А., Вертыньски О.С.** Опыт выявления дефектов и трещин в крупноразмерных резервуарах для хранения нефтепродуктов // Magazine of Civil Engineering. – 2001. – С. 40–44.
15. **Tsybulnik S.A.** Simulation of the impact of wind load on the vertical steel tank [Текст] / N.I. Bouraou, Y.G. Zsukovskiy, A.V. Kuzko, S.A. Tsybulnik, D.V. Shevchuk // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 70–80.
16. **Цыбульник С.А.** Эффективное средство защиты резервуаров от ветровой нагрузки. Часть 1. Построение геометрической модели обтекателя / С.А. Цыбульник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2013. – Вип. 46. – С. 80–85.
17. **The Replacement** of Fuel Tanks at Vernadsky Station [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.uac.gov.ua/images/intcoop/ATCM30\\_ip030\\_e.doc](http://www.uac.gov.ua/images/intcoop/ATCM30_ip030_e.doc)
18. **Цыбульник С.А.** Эффективное средство защиты резервуаров от ветровой нагрузки. Часть 2. Моделирование ветровой нагрузки / С.А. Цыбульник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2014. – Вип. 47. – С. 119–126.