

УДК 629.039.58

**К ВОПРОСУ ИЗМЕНЕНИЯ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ТРУБОПРОВОДНОЙ ОБВЯЗКИ С УЧЕТОМ ПОТЕРИ  
УСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТОВ КОЛОННОГО ТИПА  
НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ  
НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

**TO THE QUESTION OF CHANGING THE STRESSED-STRAIN STATE  
OF PIPING WITH THE LOSS OF STABILITY OF COLUMN TYPE  
APPARATUSES AT THE HAZARDOUS INDUSTRIAL  
INSTALLATIONS OF THE OIL AND GAS INDUSTRY**

**Мазина З.Р., Тляшева Р.Р., Кузеев И.Р., Мазин А.В.**

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
г. Уфа, Российская Федерация**

**Z.R. Mazina, R.R. Tlyasheva, I.R. Kuzeev, A.V. Mazin**

**Ufa State Petroleum Technological University,  
Ufa, Russian Federation**

**e-mail: zarina\_rafikova@mail.ru**

**Аннотация.** Любая аварийная ситуация на опасных производственных объектах нефтегазовой отрасли может привести к поражению персонала производства, а также населения, проживающего вблизи данного предприятия. Ввиду высокой потенциальной опасности объектов нефтегазовой отрасли остается актуальным вопрос об обеспечении безопасной эксплуатации существующих и находящихся на стадии проектирования нефтеперерабатывающих предприятий.

Анализ аварийности на опасных производственных объектах нефтегазовой отрасли показал, что наиболее распространенной причиной возникновения негативных факторов, приводящих к крупным авариям и катастрофам, является разгерметизация трубопроводов в результате низкого уровня организации контроля за надежной и безопасной эксплуатацией участков трубопроводов, работающих в наиболее сложных условиях.

В процессе эксплуатации технологические трубопроводы испытывают значительные внутренние и внешние нагрузки и воздействия. Это связано как с неустойчивой работой системы, так и с особенностями ее эксплуатации. Нагрузки, превосходящие допускаемые, могут привести к разгерметизации трубопроводов, что при близком расположении оборудования может привести к развитию аварии с эффектом домино. В связи с этим возникла необходимость в разработке метода, который позволит оценить вероятность разрушения трубопроводов при реализации каскадного развития аварий.

В работе представлены результаты исследования влияния отклонения оси реактора от вертикали на напряженно-деформированное состояние трубопроводной обвязки (ПК Solid Works), а также определены зоны безопасного отклонения оси реактора от вертикали.

**Abstract.** Any emergency at hazardous industrial installations in the oil and gas industry can potentially lead to the destruction of personnel of production, neighboring enterprises, the population living in the geographical location of the enterprise. Thus, in view of the oil and gas facilities high potential danger, the task of ensuring the functioning safety of undergoing refining and petrochemical enterprises design remains urgent.

The analysis of accidents at hazardous industrial units in the oil and gas industry has shown that the most common cause of the negative factors occurrence and leading to major accidents and catastrophes is the depressurization of pipelines, as a result of the low control organization level

over the pipeline sections reliable and safe operation under the most difficult conditions.

During operation, process pipelines experience significant internal and external loads and impacts. This is due both to the instability of the system operating modes, and to the functional features of its operation. Loads that exceed the tolerances can lead to depressurization of pipelines, which, if the equipment is located close to one another, can lead to the development of an accident with a domino effect. In this regard, there was a need to develop a method that will assess the possibility of damage of pipelines in the implementation of cascade development of accidents.

The work presents the study of the reactor axis deviation influence from the vertical on the piping stress-strain state (PC Solid Works) and identified the reactor axis safe deflection zones of from the vertical.

**Ключевые слова:** трубопроводная обвязка, реактор, напряженно-деформированное состояние, эффект домино, промышленная безопасность, метод конечных элементов, Solid Works.

**Key words:** piping, reactor, stress-strain state, domino effect, industrial safety, finite element method, Solid Works.

Примерно 80 % оборудования объектов нефтегазовой отрасли России расположены на открытых площадках и по габаритным размерам имеют большую высоту [1]. Разрушение или потеря устойчивости аппаратов колонного типа может повлечь за собой каскадное развитие аварии [2, 3].

Каскадное развитие аварий (или эффект домино по зарубежной терминологии) – это неблагоприятный сценарий развития аварийной ситуации, при котором (вследствие несовершенства систем защиты и (или) неверных действий персонала) возможен выход поражающих факторов аварий за пределы аварийного блока, оборудования или объекта,

находящихся в расположенном рядом неаварийном оборудовании, в последующую стадию развития аварии [4].

Эффект домино отличается смещением спектра вероятных сценариев аварий в сторону наиболее неблагоприятных моментов [4-8].

Результаты исследований частоты реализации эффекта домино от вида оборудования приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1. Результаты исследований частоты реализации эффекта домино от вида оборудования

Параметр	Технологическое оборудование	Трубопроводы	Вспомогательное оборудование	Резервуары для хранения	
				Под избыточным давлением	Под атмосферным давлением
Оборудование, участвующие в авариях, %: первичных, т.е. тех, которые в дальнейшем развиваются с «эффектом домино»	30	12	<1	30	28
вторичных, т.е. тех, которые уже развиваются с «эффектом домино»	12	<1	9	33	46

В работе [6] рассмотрены результаты статической обработки данных об авариях, которые произошли с эффектом домино. Авторы исследовали зависимость между частотой аварий с эффектом домино и видом опасного вещества.

Авариям, произошедшим с эффектом домино, способствует близость расположения оборудования и горючесть вещества. Для каскадного развития аварии необязательно полное разрушение оборудования или обрушение, достаточно разгерметизации одного из элементов трубопроводной обвязки, обрыва штуцера, что соответствует слабой степени повреждения. При этом полного мгновенного вовлечения в аварию опасного вещества из оборудования скорее всего не произойдет, однако возникнет риск дальнейшего развития аварии. Исход такого

сценария будет зависеть от многих факторов: вида вещества и его параметров, наличия и работоспособности средств противоаварийной защиты, готовности персонала к локализации и ликвидации аварии [4].

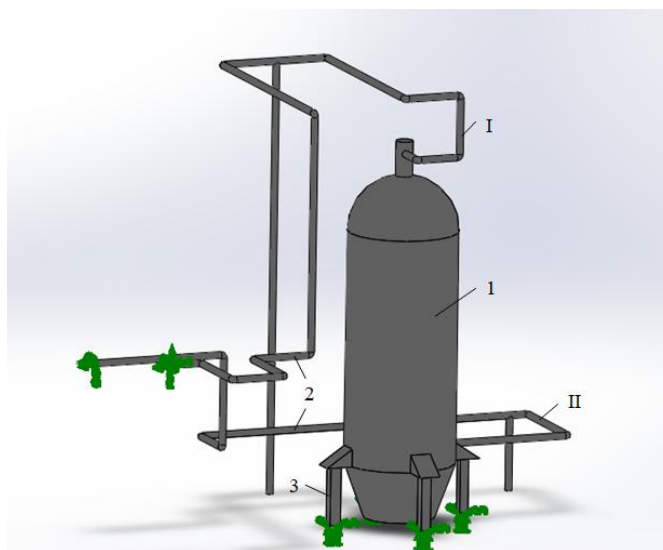
Технологические трубопроводы, предназначены для транспортировки сред, которые являются пожаро- и взрывоопасными, считается опасными для предприятий нефтегазовой отрасли [9]. В процессе эксплуатации технологические трубопроводы испытывают значительные внутренние и внешние нагрузки и воздействия. Это связано как с неустойчивой работой системы, так и с особенностями ее эксплуатации. Нагрузки, превосходящие допустимые, могут вызвать разгерметизацию трубопроводов, что при близком расположении оборудования может привести к развитию аварии с «эффектом домино».

На сегодняшний день существуют методы, позволяющие произвести расчеты технологических трубопроводов, оценить нагрузки, действующие на них, рассчитать основные характеристики при нормальном протекании технологического процесса и при возникновении нештатных ситуаций. На основе конечно-элементного анализа разработаны программные комплексы, которые в короткие сроки позволяют провести расчеты с достаточной степенью адекватности, такие как Solid Works, Abaqus, Ansys и др. [10].

Авторами [11] проведена верификация результатов расчета перемещения трубопроводной обвязки при отклонении оси реактора от вертикали, полученных в программном комплексе Solid Works, и сравнение их с результатами, полученными при экспериментальных исследованиях на лабораторной установке «Макет реактора с трубопроводной обвязкой». Однако в данной работе не учитывалось напряжено-деформированное состояние (НДС) трубопроводной обвязки. В связи с этим возникла необходимость в проведении исследования влияния отклонения оси реактора от вертикали на НДС трубопроводной обвязки.

В качестве метода был выбран конечный элементный анализ, реализованный в программном комплексе Solid Works. Система автоматизации проектных работ (САПР) Solid Works является популярной за счет простого интерфейса пользователя. В отличие от программных комплексов Ansys, Abaqus Solid Works дает возможность различного комбинирования параметрического моделирования, а также автоматизации проектирования деталей и сборок. В модуле Solid Works Simulation есть возможность определения деформаций, напряжений и других физических величин.

Первой задачей было построение геометрической модели, представленной на рисунке 1.



1 – реактор, 2 – трубопроводная обвязка, 3 – опоры  
 Рисунок 1. Построение геометрической модели

Основные конструктивные параметры модели: внешний диаметр оболочки реактора 300 мм, высота цилиндрической части аппарата 670 мм, высота конического днища 150 мм, толщина оболочки реактора 5 мм. Реактор установлен на четырех опорах, которые зафиксированы на основании.

Обвязка состоит из двух трубопроводов: общая длина первого трубопровода составляет 3857 мм, второго трубопровода – 2475 мм,

диаметр – 25 мм. Толщина стенки трубопроводов – 5 мм. Трубопроводная обвязка жестко закреплена на концах.

Расчет конечно-элементной модели производился в модуле Simulation. Имея поверхностную модель, для расчета методом конечных элементов, задаются граничные условия и нагружения. Принималось, что материал всех деталей модели имеет свойства стали марки Ст3:

- плотность  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ ;
- коэффициент Пуассона 0,26;
- предел текучести при 20°  $\sigma_T = 250 \text{ МПа}$ ;
- модуль упругости при 20 °  $E = 200000 \text{ МПа}$ ;
- предел прочности при 20°  $\sigma_B = 400 \text{ МПа}$ .

Расчет производился с учетом собственного веса аппарата и трубопроводной обвязки.

Отклонение оси реактора от вертикали моделировалось с помощью поочередного перемещения опор на 2, 4 и 6 мм.

Для исследования влияния отклонения оси аппарата от вертикали на НДС трубопроводной обвязки было выбрано 9 направлений угла наклона реактора, которые представлены на рисунке 2.

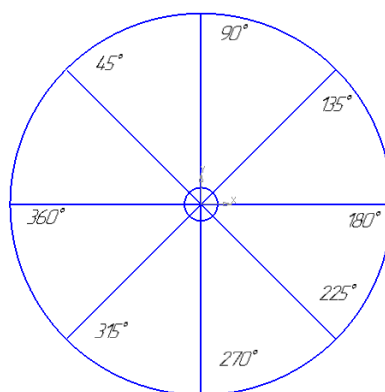


Рисунок 2. Направления угла наклона реактора

Расчеты напряженно-деформированного состояния учитывались только для первого трубопровода. Участки, в которых происходил замер НДС, представлены на рисунке 3.

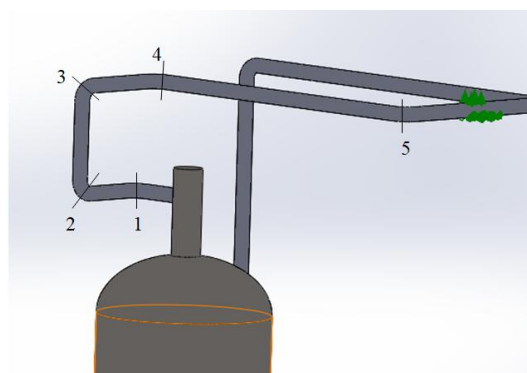
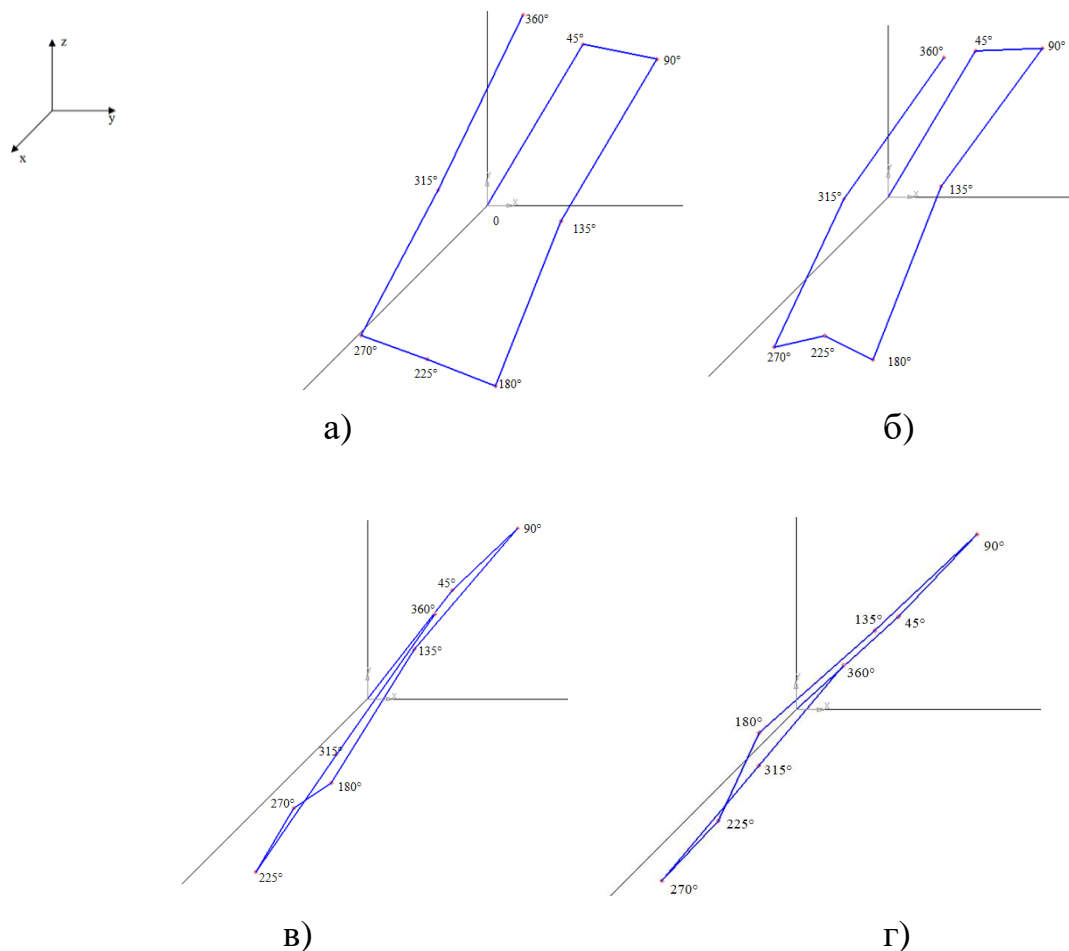


Рисунок 3. Участки определения НДС

На рисунке 4 представлены траектории движения точек в трех проекциях, при каждом угле наклона. В точке 5 перемещение равно 0.



а) точка 1; б) точка 2; в) точка 3; г) точка 4  
 Рисунок 4. Траектория движения точек

На рисунках 5-7 представлены зависимости напряжения верхнего трубопровода в зависимости от угла наклона оси реактора при поднятии опор на 2, 4 и 6 мм.



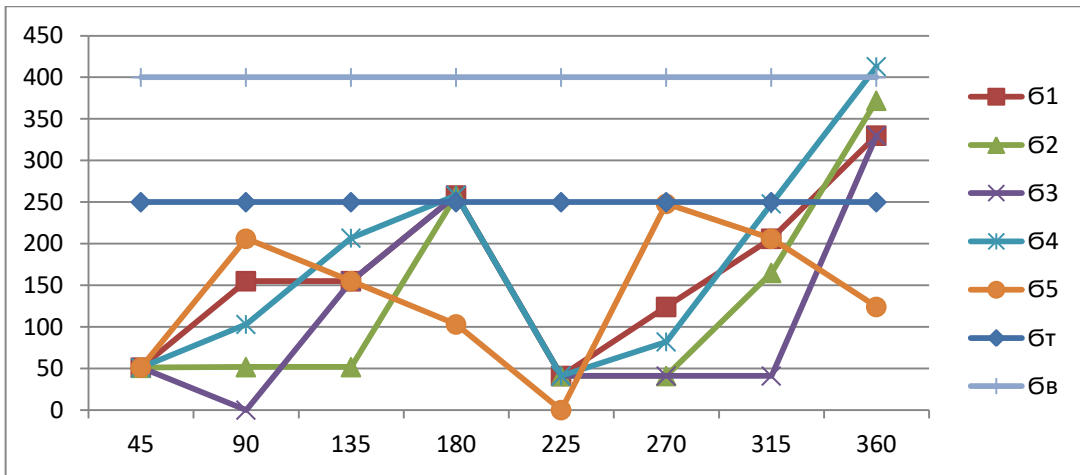


Рисунок 5. Распределение напряжений первого трубопровода в зависимости от угла наклона оси реактора при поднятии опор на 2 мм

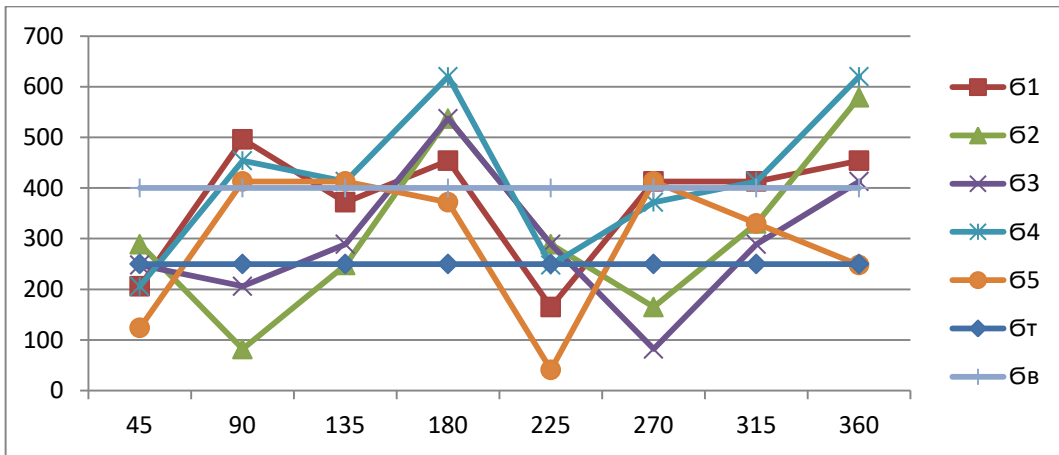


Рисунок 6. Распределение напряжений первого трубопровода в зависимости от угла наклона оси реактора при поднятии опор на 4 мм

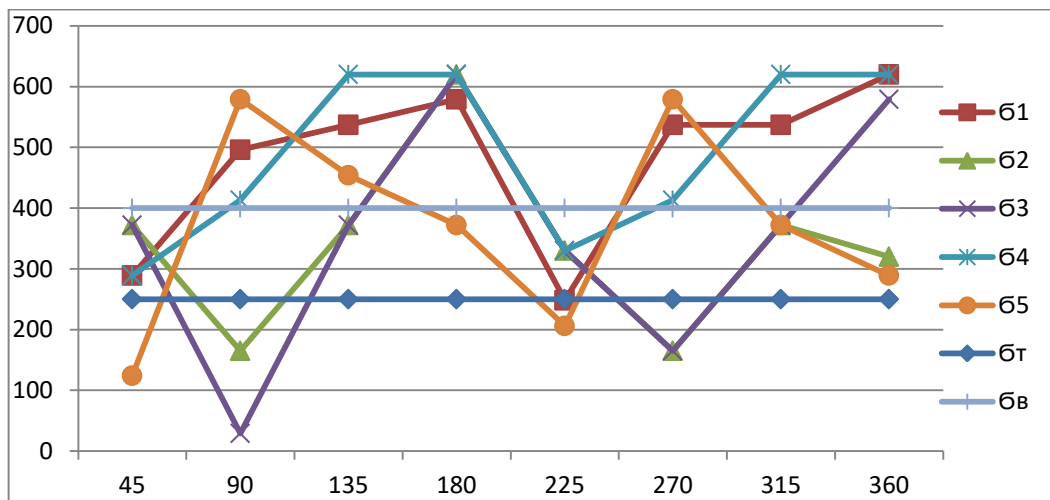


Рисунок 7. Распределение напряжений первого трубопровода в зависимости от угла наклона оси реактора при поднятии опор на 6 мм

Наиболее опасной для данной конфигурации трубопроводной обвязки является ситуация, когда ось реактора отклоняется от вертикали в направлениях на 135°, 180°, 315° и 360°.

Критерием для оценки степени опасности деформирования трубопровода может служить отношение напряжения, возникающее в трубопроводе при нештатных ситуациях, к пределу текучести материала.

Критерий для оценки степени опасности деформирования трубопровода при нештатных ситуациях

$$n = \sigma / \sigma_T,$$

где  $\sigma$  – напряжение, возникающее в трубопроводе при нештатных ситуациях;

$\sigma_T$  – предел текучести материала.

Если  $n < 0,66$ , то трубопровод пригоден для дальнейшей эксплуатации, присваивается категория III.

Если  $0,66 < n < 1$ , состояние трубопровода неустойчивое и может произойти разрушение из-за наличия дефектов основного металла, присваивается категория II.

Если  $n > 1$ , то состояние трубопровода критическое, может возникнуть разрушение трубопровода, присваивается категория I (таблица 2).

Таблица 2. Категории опасности трубопровода

Категория опасности	n
I	$n > 1$
II	$0,66 < n < 1$
III	$n < 0,66$

В зависимости от направления угла наклона аппарата участки трубопроводной обвязки могут иметь различную категорию.

Были определены зоны безопасного отклонения оси аппарата от вертикали в зависимости от критерия оценки степени опасности

деформирования трубопровода при нештатных ситуациях., которые представлены на рисунке 8.

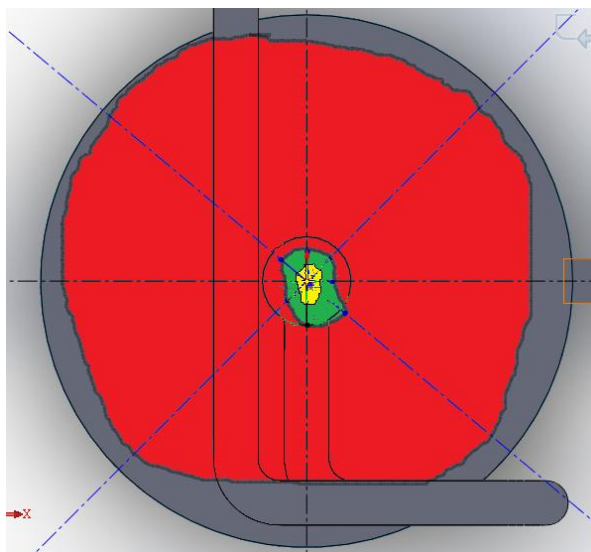


Рисунок 8. Зоны безопасного отклонения оси реактора от вертикали

Желтым цветом обозначена область, которая соответствует III категории опасности трубопроводов. Зеленым цветом обозначена область, которая соответствует II категории опасности трубопроводов. Красным цветом обозначена область, которая соответствует I категории опасности трубопроводов.

### **Вывод**

Таким образом, можно сделать вывод о значительном влиянии отклонения оси реактора от вертикали на напряженно-деформированное состояние трубопроводной обвязки, что может быть причиной разгерметизации одного или нескольких элементов трубопроводной обвязки, что при близком расположении оборудования может привести к развитию аварии с эффектом домино.

## Список используемых источников

1. Кузеев И.Р., Тляшева Р.Р., Ильин К.А. Управление промышленной безопасностью опасных производственных объектов нефтегазовой отрасли // Нефтегазовое дело. 2007. Т. 5. № 1. С. 203-218.

2. Ковалев Е.М., Тляшева Р.Р., Чиркова А.Г. Оптимизация расположения оборудования опасных производственных объектов нефтеперерабатывающей промышленности // Мировое сообщество: проблемы и пути решения. Уфа, 2005. С. 176-180.

3. Ковалев Е.М. Оптимизация безопасного расположения оборудования установок нефтеперерабатывающих предприятий: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2006. 112 с.

4. Азаров Н.И., Давинюк О.В., Кошовец Н.В., Лисанов М.В. Анализ возможности каскадного развития аварий на взрывопожароопасных объектах // Безопасность труда в промышленности. 2007. № 5. С. 42-47.

5. Delvossalle C. Development of a Methodology for the Identification of Potential Domino Effects on Analysis of Past Accidents. Dr. in. Christian DEL VOSALLE, Paper Presented at the First Eur. Symp. on Domino Effect, Leuven, Sept. 1996.

6. Kourtniotis S.P., Kiranoudis C.T., Markatos N.C. Statistical Analysis of Domino Chemical Accidents // Journal of Hazardous Materials. 2000. No. 71.

7. Jakomeit J.U. Storfalloblaufanalyse Domino-Effecten. Studien-arbeit, Fachgebiet Anlagen-und Sicherheitstechnik, Technische Universitet Berlin, 2001.

8. Рашитов Р.Ф. Обеспечение защищенности обслуживающего персонала установок нефтеперерабатывающих предприятий от воздействия ударной волны: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2008. 145 с.

9. Шайбаков Р.А. Разработка метода оценки влияния пожара пролива на технологические трубопроводы: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2009. 118 с.

10. Гостенова Е.А., Тляшева Р.Р., Кузеев И.Р. Оценка влияния трубопроводной обвязки на взрывоустойчивость аппаратов колонного типа // Нефтегазовое дело. 2010. Т. 1. URL:

[http://ogbus.ru/authors/Gostenova/Gostenova\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Gostenova/Gostenova_1.pdf).

11. Мазина З.Р., Яковлева В.В., Кульшарипов И.М., Тляшева Р.Р. Оценка перемещений трубопроводной обвязки реактора в условиях нестационарного технологического режима // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2017. № 5. С. 125-137. URL: [http://ogbus.ru/issues/5\\_2017/ogbus\\_5\\_2017\\_p125-137\\_MazinaZR\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/5_2017/ogbus_5_2017_p125-137_MazinaZR_ru.pdf).

### References

1. Kuzeev I.R., Tlyasheva R.R., Il'in K.A. Upravlenie promyshlennoi bezopasnost'yu opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov neftegazovoi otrasli [Management of Industrial Safety of Hazardous Oil and Gas Production Facilities]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2007, Vol. 5, No. 1, pp. 203-218. [in Russian].

2. Kovalev E.M., Tlyasheva R.R., Chirkova A.G. Optimizatsiya raspolozheniya oborudovaniya opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov neftepererabatyvayushchei promyshlennosti [Location Optimization of the Equipment of Hazardous Production Facilities of the Oil Refining Industry]. *Mirovoe soobshchestvo: problemy i puti resheniya* [World Community: Problems and Solutions]. Ufa, 2005, pp. 176-180. [in Russian].

3. Kovalev E.M. *Optimizatsiya bezopasnogo raspolozheniya oborudovaniya ustanovok neftepererabatyvayushchikh predpriyatii: diss. kand. tekhn. nauk* [Optimization of the Safe Location of Equipment for Oil Refinery Plants: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU, 2006. 112 p. [in Russian].

4. Azarov N.I., Davinyuk O.V., Koshovets N.V., Lisanov M.V. Analiz vozmozhnosti kaskadnogo razvitiya avarii na vzryvopozharoopasnykh ob"ektakh [Analysis of the Possibility of Cascade Development of Accidents at Explosive and Fire Hazardous Facilities]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Industrial Safety in Industry*, 2007, No. 5, pp. 42-47. [in Russian].

5. Delvossalle C. Development of a Methodology for the Identification of Potential Domino Effects on Analysis of Past Accidents. *Dr. in. Christian DEL VOSALLE, Paper Presented at the First Eur. Symp. on Domino Effect*, Leuven, Sept. 1996.

6. Kourtniotis S.P., Kiranoudis C.T., Markatos N.C. Statistical Analysis of Domino Chemical Accidents. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, No. 71.

7. Jakomeit J.U. Storfalloblaufanalyse Domino-Effecten. *Studien-arbeit, Fachgebiet Anlagen-und Sicherheitstechnik*, Technische Universitet Berlin, 2001.

8. Rashitov R.F. *Obespechenie zashchishchennosti obsluzhivayushchego personala ustanovok neftepererabatyvayushchikh predpriyatii ot vozdeistviya udarnoi volny: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Safety Ensuring of Maintenance of Oil Refinery Installations Personnel from the Shock Wave Impact: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU, 2008. 145 p. [in Russian].

9. Shaibakov R.A. *Razrabotka metoda otsenki vliyaniya pozhara proliva na tekhnologicheskie truboprovody: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a Method for Assessing the Impact of a Strait Fire on Process Pipelines]. Ufa, UGNTU, 2009. 118 p. [in Russian].

10. Gostenova E.A., Tlyasheva R.R., Kuzeev I.R. Otsenka vliyaniya truboprovodnoi obvyazki na vzryvoustoichivost' apparatov kolonnogo tipa [The Estimation of Piping Manifold Influence on Explosion Resistance of Column Type Apparatus]. *Neftgazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2010, Vol. 1. URL: [http://ogbus.ru/authors/Gostenova/Gostenova\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Gostenova/Gostenova_1.pdf). [in Russian].

11. Mazina Z.R., Yakovleva V.V., Kul'sharipov I.M., Tlyasheva R.R. Otsenka peremeshchenii truboprovodnoi obvyazki reaktora v usloviyakh nestatsionarnogo tekhnologicheskogo rezhima [Reactor Process Piping Displacement Assessment in the Context of Nonstationary Operating Practices]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2017, No. 5, pp. 125-137. URL: [http://ogbus.ru/issues/5\\_2017/ogbus\\_5\\_2017\\_p125-137\\_MazinaZR\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/5_2017/ogbus_5_2017_p125-137_MazinaZR_ru.pdf). [in Russian].

### **Сведения об авторах**

#### **About the authors**

Мазина З.Р., преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

Z.R. Mazina, Lecturer of Technological Machinery and Equipment Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: [zarina\\_rafikova@mail.ru](mailto:zarina_rafikova@mail.ru)

Тляшева Р.Р., д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

R.R. Tlyasheva, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Technological Machinery and Equipment Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

Кузеев И.Р., д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

I.R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Technological Machinery and Equipment Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

Мазин А.В., магистрант кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

A.V. Mazin, Undergraduate Student of Technological Machinery and Equipment Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation