

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ

В.Н. Сызранцев, В.Н. Пермяков, В.В. Новоселов, С.Л. Голофаст

(Тюменский государственный нефтегазовый университет)

*Надежность, трубопровод, вероятность безотказной работы,
закон распределения случайной величины, непараметрическая статистика
Safety, pipeline, failure-free operation probability, random value distribution law, non-parametric statistics*

Probabilistic approach to evaluation of pipelines strength safety. V.N. Syzrantsev, S.L. Golofast

V.N. Prmyakov, V.V. Novoselov,

A probabilistic approach is reviewed to the evaluation of pipelines strength safety which, unlike the deterministic methods, permits to estimate the probability of pipeline sections linear portion failures taking into account a random spectrum of external loads, static nature of metal mechanical properties and pipes geometrics. The paper presents an example estimation of probability of failures of two sections of the gas pipeline Urengoy-Surgut-Chelyabinsk based on the actual data on working pressure and temperature of the transported gas. The proposed approach realization allows for an on-line evaluation of the gas pipeline separate sections safety, identification of first-priority sections for creation of emergency stock of pipes, carrying out of diagnostic and repairs jobs. Fig. 7, table 1, ref. 8.

Формирование нормативной базы, определяющей работоспособность сосудов и трубопроводов на стадии проектирования и эксплуатации, на сегодняшний день осуществляется на основе четырех подходов [1] (рис. 1).

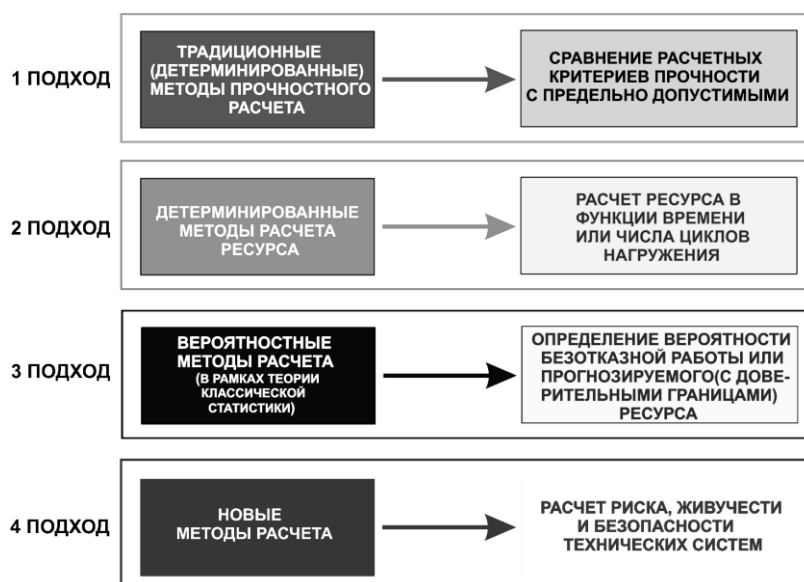


Рис.1. Основные подходы к определению работоспособности оборудования

Два первых подхода представляют традиционные детерминированные методы, позволяющие произвести прочностной расчет объекта и его ресурс в функции времени или числа циклов нагружения. Их реализация в расчетной практике обеспечивает минимальную вероятность возникновения аварий и катастроф потенциально опасных объектов из-за применения завышенных коэффициентов запаса прочности.

Вероятностные методы расчета, составляющие основу третьего подхода, позволяют оценить надежность оборудования. В отличие от детерминированных методов они предполагают не сравнение рассчитанных критериев прочности с предельно допустимыми значениями, а определение вероятности безотказной работы и вероятного ресурса оборудования. Степень их применения по ряду причин, которые будут рассмотрены ниже, не превышает на практике 1%.

Новые методы, представляющие четвертый подход и позволяющие рассчитывать риск, живучесть и безопасность сложных технических систем в настоящее время только разрабатываются.

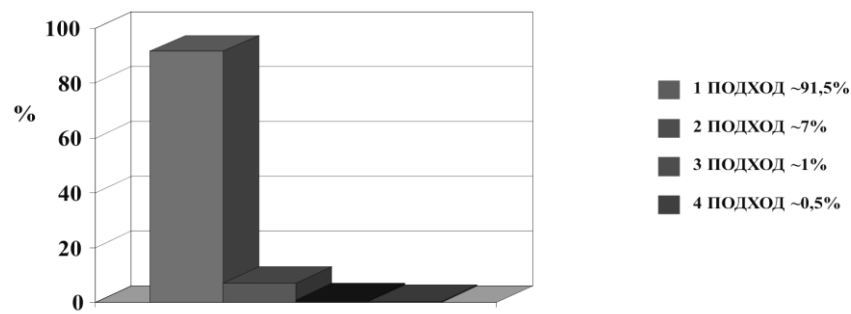


Рис.2. Доли применения основных подходов в практике оценки работоспособности сосудов и трубопроводов

При вероятностных расчетах σ – напряжение, возникающее в исследуемом объекте под действием внешней нагрузки, принимается величиной случайной. В общем случае σ является функцией от внешней случайной нагрузки (давление, воздействие грунта, изгибающий и скручивающий моменты), случайной вариации размеров (диаметр трубопровода, толщина его стенки), а также других случайных воздействий, например, температурных. Предельное напряжение s , в качестве которого выбирают в зависимости от принятых норм расчета предел текучести, предел прочности, предел выносливости и т.д., также является величиной случайной. Характеристики случайной величины s определяются механическими свойствами и качеством используемого материала, их изменением в процессе эксплуатации изделия.

Оценка прочностной надежности изделия на этапе его проектирования и эксплуатации заключается в определении вероятности безотказной работы (R) решением следующего уравнения [1,2,4]:

$$R = \Pr(y \geq 0), \quad (1)$$

где $y = S - \sigma$ – разность двух независимых случайных величин s и σ .

Решение уравнения (1) требует знания законов распределения случайных величин s и σ . Основной характеристикой закона распределения вероятности случайной величины, позволяющей решать задачи статистического анализа, включая уравнение (1), является ее плотность. Восстановление плотности распределения вероятностей случайных величин s и σ выполняется на основе выборок значений $\sigma_i, i = \overline{1, n}$ и $s_j, j = \overline{1, m}$. Для получения таких выборок применяются следующие способы:

- непосредственная регистрация напряжений в исследуемом месте трубопровода с помощью экспериментальных средств, обработка информации с которых позволяет получить выборку $\sigma_i, i = \overline{1, n}$;
- расчет на основе результатов измерения случайных величин (давления в трубопроводе g , диаметра d и толщины стенки трубопровода δ) по известным [3,5] функциональным зависимостям $\sigma = \sigma(g, \delta, d)$ для напряжений, возникающих в стенке трубопровода, значений выборки $\sigma_i, i = \overline{1, n}$;
- статистическое моделирование случайных величин g, δ, d и расчет на основе зависимости $\sigma = \sigma(g, \delta, d)$ выборки $\sigma_i, i = \overline{1, n}$;
- комплекс экспериментальных работ по разрушению образцов из материала трубы, в результате которого, например, если в качестве предельного напряжения $s_j, j = \overline{1, m}$ используется предел прочности материала (σ_s), определяют выборку $\sigma_{sj} \equiv s_j, j = \overline{1, m}$.

Статистическая обработка выборок $\sigma_i, i = \overline{1, n}$ и $s_j, j = \overline{1, m}$ позволяет получить искомые функции плотности распределения $f_\sigma(\sigma)$ и $f_s(s)$ случайных величин σ и s , примеры которых приведены на рисунках 3 и 4.

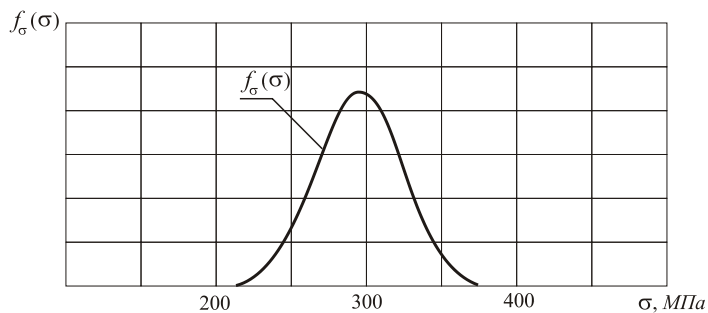


Рис.3.
Функция
плотности
вероятности
возникающих
в стенке
трубопровода
напряжений σ

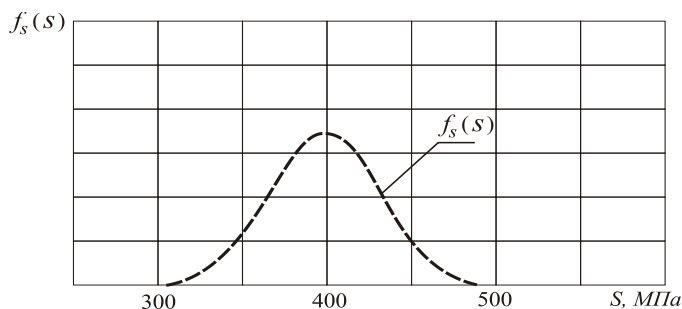


Рис.4.
Функция
плотности
вероятности
допускаемых
для материала
трубопровода
напряжений s

На совмещенном графике функций $f_\sigma(\sigma)$ и $f_s(s)$, значения которых отложены по оси ординат, а величины σ и S – по оси абсцисс (рис. 5, область перекрытия функций плотности распределения напряжений и допускаемых напряжений (прочности) характеризует определенную вероятность отказа.

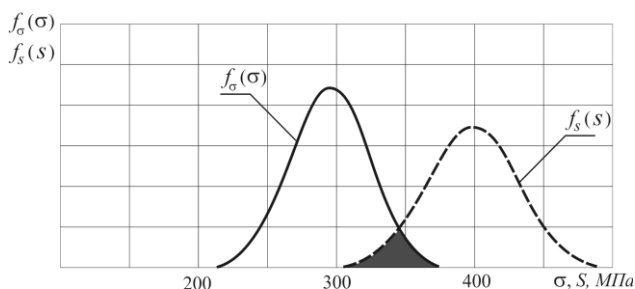


Рис.5.
К определению
вероятности отказа

Следуя зависимости (1), искомая вероятность безотказной работы (R) оборудования по критерию прочности определяется в результате вычисления интеграла [2,4]:

$$R = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_s(s + \sigma) \cdot f_\sigma(\sigma) d\sigma ds. \quad (2)$$

Корректность результатов оценки прочностной надежности оборудования, решения задач определения рисков при его проектировании и эксплуатации зависит от принятых при расчетах законов распределения случайных величин, входящих в условия прочности. Традиционные методики вероятностного прочностного расчета оперируют с законами распределения случайных величин, предложенными и исследованными в рамках теории параметрической статистики. К настоящему времени число таких законов приближается к 100, что требует для инженеров специальной подготовки, чтобы ориентироваться в тонкостях их применения. Уже на этапе принятия того или иного закона распределения возникает проблема, не имеющая корректного решения. Для одной и той же выборки случайных величин s и σ , насчитывающей, как правило, несколько десятков (реже сотен) значений, с помощью критериев согласия может быть принят ряд законов распределения, отличающихся «тяжестью» хвостов, которые и определяют конечный результат решения уравнения (1). Не менее важным моментом является идентификация закона распределения с помощью критериев согласия (например, Колмогорова-Смирнова, критерия χ^2 , критерия ω^2). Данные критерии устанавливают только вероятность отклонения эмпирического распределения от предполагаемого, но не обосновывают ее критическую величину, что может привести к ошибке 2-го рода (принятый закон распределения не соответствует фактическому распределению случайной величины).

Следующей проблемой, возникающей при решении задачи (1), является невозможность в ряде случаев сформулировать условия отнесения выборки при обработке результатов измерений конкретной случайной величины к какому-либо параметрическому закону. Примеры таких данных [6] по давлению и температуре нагнетаемого газа, регистрируемых на компрессорных станциях магистральных газопроводов, приведены на рисунках 6 и 7.

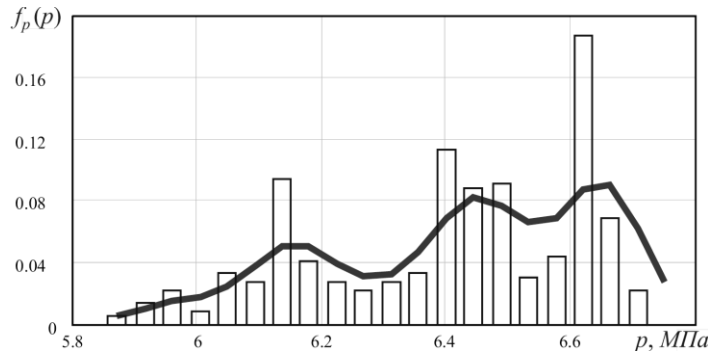


Рис.6. Функция плотности вероятности давления нагнетания (КС «Ягнетская», магистральный газопровод Уренгой-Сургут-Челябинск)

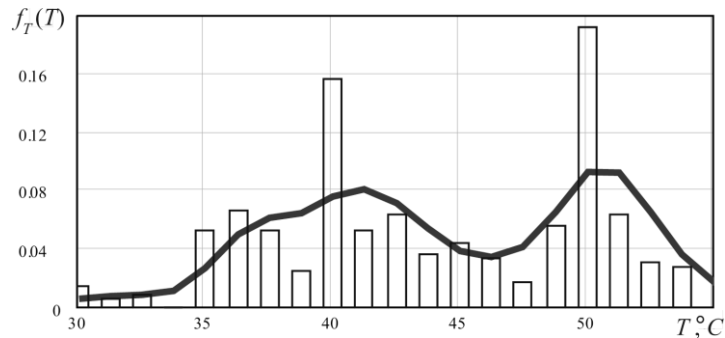


Рис.7. Функция плотности вероятности температуры нагнетаемого газа (КС «Богдинская», магистральный газопровод Уренгой-Сургут-Челябинск)

Более того, модели, применяемые при расчете надежности, требуют математических действий с параметрами, имеющими случайную природу. Почти все вероятностные модели содержат не только элементарные математические операции, но и различные функции, что исключает возможность корректного отнесения результирующей функции к какому-либо параметрическому семейству.

Перечисленные проблемы являются основной причиной, сдерживающей внедрение вероятностных методов расчета надежности оборудования на основе аппарата классической статистики в практику.

В отличие от сложившихся к настоящему времени традиционных, базирующихся на применении известных с точностью до параметров законов распределения случайных величин σ и S , методов решения задачи (1), к настоящему времени разработан иной подход, основанный на применении аппарата непараметрической статистики [4]. Для восстановления неизвестной функции плотности распределения в рамках теории непараметрической статистики разработаны методы [7,8], изначально полагающие, что вид распределения случайной величины или неизвестен, или может быть определен лишь приближенно.

В решении практических задач наибольшее распространение получили два из них. Первый метод [7] основан на использовании для оценки функции плотности распределения вероятности эмпирической функции Розенблатта-Парзена, на базе которого разработаны адаптивные оценки плотности вероятности на основе набора ядерных функций. В качестве критерия, обеспечивающего выбор лучшей (наиболее корректно) описывающей ядерной функции, применяется информационный функционал качества:

$$J = \int \ln[k(t)]f(t)dt = \int \ln[k(t)]dF(t), \quad (3)$$

где $F(t)$, $f(t)$ – функция и плотность распределения случайной величины t ;

$k(t)$ – некоторая плотность распределения, для оценки которой используется имеющаяся выборка случайной величины $t_i, i = \overline{1, N}$ и набор $g_k(t), k = \overline{1, n}$ ядерных функций: $k(t) = f_{kN}(t, h_N, g_k(t))$, где h_N – параметр размытости.

Вторым методом восстановления неизвестной функции плотности распределения является метод, предложенный в работе [8]. Здесь оценка неизвестной функции плотности $f_N(t)$ находится в виде разложения по системе тригонометрических функций:

$$f_N(t) = \sum_{j=1}^M \lambda_j \cdot \varphi_j(t), \quad (4)$$

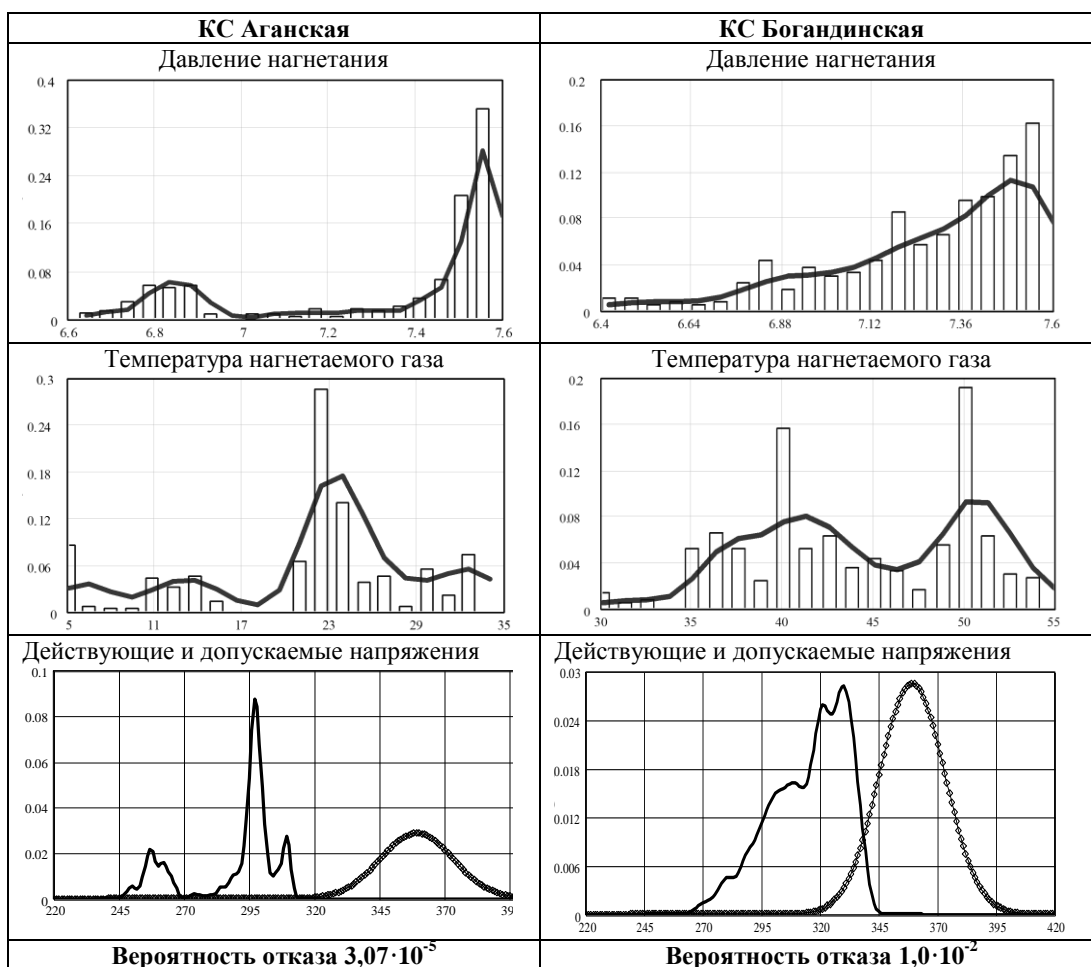
где $\varphi_j(t) = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cos \left[(2 \cdot j - 1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t \right]; t \in [0, 1]; \lambda_j$ – коэффициенты; $j = \overline{1, M}$.

При имеющейся выборке $t_i, i = \overline{1, N}$ случайной величины выбор степени «сложности» оценки (3), – числа членов разложения M , с учетом ее объема (N), определяется на основе метода структурной минимизации риска [8].

На основе данных методов разработано программное и методическое обеспечение для восстановления функции плотности распределения случайных величин и решения задач оценки прочностной надежности оборудования и трубопроводов [4]. Принципиальным отличием данного подхода к решению задачи (1) является то, что методами непараметрической статистики не только восстанавливаются функции распределения случайных величин, входящих в расчетные зависимости критериев прочности (независимо от их сложности), но и функции плотности распределения самих критериев, что позволяет оценивать прочностную надежность объектов в условиях реальных спектров воздействия внешних нагрузок и естественных законов изменения предельного состояния материала.

Для примера приведены результаты оценки на основе разработанных методов вероятности отказа для двух линейных участков газопровода Уренгой-Сургут-Челябинск (таблица).

Результаты оценки вероятности отказа участков газопровода



При решении задачи использованы выборки ежедневно фиксированных в течение 2006г. значений давления нагнетания и температуры транспортируемого газа на каждой из компрессорных станций. При расчетах принято, что линейные участки изготовлены из трубы с одинаковыми геометрическими размерами и механическими свойствами материала, а предельные напряжения распределены по нормальному закону. Анализ представленных результатов свидетельствует, что только вследствие статистического разброса внутреннего давления и температуры транспортируемого газа, определяющих в данном примере спектр возникающих в стенке газопровода напряжений, вероятность возникновения отказа для различных участков линейной части *отличается на порядки*.

Вывод

В отличие от детерминированных методов прочностного расчета реализация разработанного подхода позволяет определить фактическую нагруженность исследуемого участка линейной части с учетом случайного спектра внешних нагрузок, статистической природы геометрических параметров и механических характеристик материала трубопровода, глубин, форм, протяженности и мест расположения коррозионных дефектов, и в результате, более *корректно* оценить индивидуальную прочностную надежность отдельных участков газопровода.

Список литературы

1. Махутов Н.А., Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 516 с.
2. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
3. Харионовский В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов – М.: ОАО "Издательство "Недра", 2000. – 467 с.

4. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Невелев Я.П. Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики. – Новосибирск: Наука, 2008. – 218 с.
5. И.Н.Бирилло, А.Я. Яковлев, Ю.А.Теплинский, И.Ю.Быков, В.Н.Воронин. Оценка прочностного ресурса газопроводных труб с коррозионными повреждениями / Под общей редакцией докт. техн. наук, профессора И.Ю.Быкова. – М: Изд. ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 168 с.
6. Черпаков В.В. Разработка методики формирования аварийных запасов труб (на примере газопроводов Западной Сибири) Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: Дис.... канд. техн. наук. – Тюмень, 2007. – 122 с.
7. Деврой Л., Дьёрфи Л. Непараметрическое оценивание плотности. L_1 -подход: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 408 с.
8. Алгоритмы и программы восстановления зависимостей: Под редакцией В.Н.Валника. – М.: Наука, Главн. ред.физ.-мат.литературы, 1984. – 816 с.

Сведения об авторах

Сызранцев В. Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности», Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел.: (3452)-41-46-46; e-mail: V_Syzrantsev@mail.ru

Пермяков В. Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Промышленная экология», Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел.: (3452)-46-54-27, e-mail: V.N.Permakov@mail.ru

Новоселов В. В., д.т.н., профессор, ректор, Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел.: (3452)-25-69-49, e-mail: nov@tsogu.ru

Голофаст С.Л., д.т.н., профессор, кафедра «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности», Тюменский государственный нефтегазовый университет», тел.: (3452)-41-46-46, e-mail: trasser@inbox.ru

Syzrantsev V. N., dr. of technical sciences, Prof., Chief of the Department «Machines and Equipment of oil and gas industry», Tyumen state oil and gas university, tel.: (3452)-41-46-46, e-mail: V_Syzrantsev@mail.ru

Permyakov V. N., dr. of technical sciences, Prof., Chief of the Department «Industry ecology», Tyumen state oil and gas university, tel.: (3452)-46-54-27, e-mail: V.N.Permakov@mail.ru

Novoselov V. N., dr. of technical sciences, Prof., Rector, Tyumen state oil and gas university, tel.: (3452)-25-69-49, e-mail: nov@tsogu.ru

Golofast S. L., dr. of technical sciences, Prof. of the Department «Machines and Equipment of oil and gas industry, «Tyumen state oil and gas university», tel.: (3452)-41-46-46, e-mail: trasser@inbox.ru