

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕСА УСТЬЕВОЙ УРАВНОВЕШИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СТАНКА-КАЧАЛКИ

Агамалов Г.Б.

*ЗАО «Уралнефтегазпром»
ungp@mail.ru*

Алиев З.З.

*ТПП «Когалымнефтегаз»
VAlieva@incom.kng.wsnet.ru*

Романова Н.А., Ризванов Р.Р.

*ГОУ ВПО УГНТУ
natar18@mail.ru, ramil@rbcmail.ru*

Для выравнивания нагрузки на приводной двигатель станка-качалки предлагается оборудовать станок-качалку устьевым уравновешивающим грузом. Приводится методика расчета веса предлагаемого устьевого уравновешивающего груза для статического, динамического режима работы скважины и в период релаксации откачиваемой продукции. Изучено влияние изменения вязкости эмульсии в процессе релаксации после запуска скважины в работу на силы трения, входящие в уравнение баланса, а следовательно, на вес уравновешивающего груза.

Ключевые слова: *станок-качалка, штанга, балансир, плунжер, скважин.*

Введение

Наиболее распространенным приводом глубоких штанговых насосов является станок-качалка. При движении полированного штока усилие на головку балансира постоянно направлено вниз, что обусловлено весом колонны штанг, а при ходе вверх и жидкости над плунжером насоса. При этом величина усилия при ходе полированного штока вверх и вниз отличается на 30 - 50 %, что приводит к неравномерной нагрузке приводного двигателя. Во время хода колонны вверх полезная работа расходуется на подъем жидкости, а на входе вниз двигатель работает вхолостую. Для выравнивания нагрузки на двигатель за время одного цикла работы установку комплектуют уравновешивающим устройством: кривошипным, балансирным или комбинированным. Однако в этих случаях нагружается все узлы станка-качалки, весом, компенсирующих нагрузку на головку балансира, грузов. Для разгрузки узлов предложено оборудовать станок-качалку устьевым уравновешивающим грузом [1].

Для эффективного использования нового привода необходимо разработать методику расчета веса устьевого уравнивающего груза для статического, динамического режимов и в период релаксации откачиваемой продукции после запуска скважины в работу.

Расчет веса уравнивающей системы для статического режима работы скважины

Рассмотрим статический режим работы скважины, когда действием динамических составляющих общей нагрузки можно пренебречь ввиду их относительной малости. В случае статического режима работы можно исключить силы инерции и вибрационные нагрузки. Согласно [2] для определения режима работы необходимо вычислить параметр Коши:

$$\varphi = \frac{\pi n H_{cn}}{30 V}, \quad (1)$$

где φ – величина параметра Коши;

n – число качаний, 1/мин;

H_{cn} – глубина спуска насоса, м;

V – скорость звука в колонне штанг, которая зависит от конструкции колонны и принимается равной для одноразмерной колонны 4600 м/с, для двухразмерной – 4900 м/с, для трехразмерной – 5300 м/с.

Граничная величина параметра Коши принята равной 0,3 [2]. В случае, когда параметр Коши меньше предельной величины, режим работы скважины относится к статическим, а если больше – то к динамическим.

Исследуя силы, действующие на колонну штанг, ограничимся исследованием только хода вниз, поскольку необходимо обеспечить синхронность перемещения головки балансира и полированного штока при их ходе вниз. При ходе вниз нагрузка на штанги минимальна. Запишем уравнение баланса сил для этого случая:

$$F_{мин} = F_{в,шт} - F_{тр}, \quad (2)$$

где $F_{мин}$ – минимальная нагрузка на головку балансира;

$F_{в,шт}$ – сила тяжести штанг в смеси (жидкости);

$F_{тр}$ – сила трения.

Сила трения $F_{тр}$ имеет несколько слагаемых, а именно:

$F_{тр.шт}$ – сила трения штанг о трубы;

$F_{тр.гидр}$ – сила гидродинамического сопротивления движению колонны штанг;

$F_{тр.пл}$ – сила трения между плунжером и цилиндром и;

$F_{тр.кл}$ – сила сопротивления в клапанах.

С учетом этого имеем

$$F_{мин} = F_{в,шт} - F_{тр.шт} - F_{тр.гидр} - F_{тр.пл} - F_{тр.кл} \quad (3)$$

Входящие в уравнение (3) силы можно рассчитать по следующим формулам.

Сила тяжести многоступенчатой колонны штанг [4]:

$$F_{т.шт} = \rho_{шт} g \left(1 - \frac{\rho_{см}}{\rho_{шт}} \left(1 + \frac{P_{уст}}{\rho_{см} g H_{сн}} \right) \right) \sum_{i=1}^N \ell_i S_{шт,i}, \quad (4)$$

где $\rho_{шт}$ – плотность материала штанг;

$\rho_{см}$ – средняя по длине колонны НКТ плотность газожидкостной смеси;

$P_{уст}$ – устьевое давление;

ℓ_i и $S_{шт,i}$ – длина и площадь поперечного сечения i -ой ступени штанг;

N – общее число ступеней.

Сила трения штанг о стенки НКТ [3]:

$$F_{тр.шт} = \sum_{i=1}^N f_i \ell_i N_i, \quad (5)$$

где f_i – коэффициент трения;

N_i – прижимающая сила на единицу длины i -ой ступени штанг.

Коэффициент трения рассчитывается в соответствии с формулой [3]:

$$f_i = a \sqrt{So_i} + b + \frac{c}{1 + d \sqrt{So_i}}, \quad (6)$$

где

$$So_i = \frac{\mu u}{N_i} \quad (7)$$

– число Зоммерфельда;

μ – коэффициент динамической вязкости смеси, Па·с;

u – максимальная скорость движения штанг, м/с;

a , b , c и d – безразмерные эмпирические коэффициенты, значения которых для пар трения труба - муфта и труба - штанга представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты граничного трения

Пара трения	a	b	c	d
труба–муфта	7,01	0,1	0,54	$9,13 \cdot 10^3$
труба–штанга	30,51	0,06	0,49	$5,77 \cdot 10^3$

Прижимающая сила вычисляется по формуле [3]:

$$N_i = \sum_{j=1}^M \sqrt{\left(T_{\text{эф}} d \alpha_j / dl_j - (\rho_{\text{ум}} - \rho_{\text{см}}) g \sin \alpha_j \right)^2 + \left(T_{\text{эф}} \sin \alpha_j d \varphi_j / dl_j \right)^2}, \quad (8)$$

где α_j и φ_j – зенитный и азимутальный углы скважины на j -ом участке инклинограммы.

$T_{\text{эф}}$ – эффективная продольная сила, действующая вдоль участка трения.

Сила гидродинамического трения, полученная при ходе штанговой колонны вниз [3]:

$$F_{\text{тр.гидр}} = 16,9 \mu u \sum_{i=1}^N \ell_i \left(\frac{d_{\text{ум}, i}}{d_{\text{НКТ}}} \right)^{5,49}, \quad (9)$$

где $d_{\text{ум}, i}$ и $d_{\text{НКТ}}$ – диаметры i -ой ступени колонны штанг и НКТ.

Сила трения в плунжерной паре:

$$F_{\text{тр.пл}} = 2,45 \cdot 10^4 d_n, \quad (10)$$

где d_n – диаметр насоса, м.

Сила сопротивления в нагнетательном клапане была рассчитана по формуле И.С. Степановой [3]:

$$F_{\text{тр.кл}} = \frac{2,62 \cdot 10^{-3} k \mu S n d_n^2 (d_n^2 - d_o^2)}{d_o \rho_{\text{см}}}, \quad (11)$$

где n – число качаний в минуту;

S – длина хода;

k – число клапанов;

d_o – диаметр отверстия в седле клапана.

Таким образом, искомый вес груза в случае статического режима работы равен:

$$P_{z.cm.} = 0,75 \left(\rho_{ум} g \left(1 - \frac{\rho_{см}}{\rho_{ум}} \left(1 + \frac{P_{ycm}}{\rho_{см} g H_{cn}} \right) \right) \sum_{i=1}^N \ell_i S_{ум, i} + \sum_{i=1}^N f_i \ell_i N_i + \right. \\ \left. + \frac{2,62 \cdot 10^{-3} k\mu Snd_n^2 (d_n^2 - d_o^2)}{d_o \rho_{см}} + 2,45 \cdot 10^4 d_n + 16,9 \mu \sum_{i=1}^N \ell_i \left(\frac{d_{ум, i}}{d_{HKT}} \right)^{5,49} \right) \quad (12)$$

Вес уравновешивающей системы для динамического режима работы скважины

В случае динамического режима работы необходимо учитывать также инерционные $F_{ин}$ и вибрационные $F_{вибр}$ нагрузки.

Вычислить их можно следующим образом.

Инерционная нагрузка при ходе вниз [2]:

$$F_{инт} = \frac{F_{ум} \cdot v \cdot \pi^2 n^2}{2 \cdot 900 \cdot g} S \left(1 - \frac{r}{l} \right), \quad (13)$$

где v – коэффициент плавучести штанг в продукции скважины, рассчитываемый по формуле [2]:

$$v = 1 - \frac{\rho_{см}}{\rho_{ум}} \left(1 + \frac{P_y}{\rho_{см} g \cdot H_{cn}} \right). \quad (14)$$

Силы инерции кроме участия в формировании нагрузок на головку балансира влияют на эффективную длину хода плунжера. При ходе вниз направление действия сил инерции штанг совпадает с направлением действия силы тяжести. Под действием этой нагрузки колонна штанг растягивается, что приводит к дополнительному пробегу плунжера в цилиндре в сравнении с ходом полированного штока. Этот дополнительный пробег e_n за счет растяжения колонны штанг при ходе плунжера вниз таков:

$$e_B = \frac{F_{ум} \cdot v \cdot \pi^2 n^2}{2 \cdot 2 \cdot 900 \cdot E \cdot f_{ум} \cdot g} S \left(1 - \frac{r}{l} \right) H_{cn}, \quad (15)$$

где F_n – вес продукции, кН;

где E – модуль Юнга материала штанг и труб (сталь), Н/м²;

H_{cn} – глубина спуска насоса, м.

Вибрационная нагрузка определяется по формуле [5]:

$$F_{\text{вибр}} = P_{\text{ж}} \mu_{\text{д}} \sqrt{\frac{S}{\lambda}} K, \quad (16)$$

где $P_{\text{ж}}$ – нагрузка от веса столба жидкости над плунжером насоса, определяемая с учетом динамического уровня;

μ – коэффициент динамичности:

$$\mu = \frac{\omega L}{a}; \quad (17)$$

ω – угловая скорость:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}; \quad (18)$$

λ – совместная деформация штанг и труб:

$$\lambda = \frac{P_{\text{ж}} L}{E} \left(\frac{1}{f'_{\text{ш}}} + \frac{1}{f'_m} \right); \quad (19)$$

$f'_{\text{ш}}$ – площадь поперечного сечения ступенчатой колоны штанг;

$$f'_{\text{ш}} = \frac{f_{\text{ш}1} l_1 + f_{\text{ш}2} l_2 + f_{\text{ш}3} l_3}{L}; \quad (20)$$

$f_{\text{ш}1} l_1$, $f_{\text{ш}2} l_2$, $f_{\text{ш}3} l_3$ – площади поперечных сечений штанг соответственно по первой, второй и третьей ступеням

K – коэффициент, определяемый из условия:

$$K = \begin{cases} 1,01 & \text{если } d_{\text{нл}} < 44 \\ 1,05 & \text{если } d_{\text{нл}} = 44 \\ 1,03 & \text{если } d_{\text{нл}} > 44 \end{cases}.$$

Вес устьевое уравнивающего устройства должен составлять $P_z = P_{\text{мин}} - 0,25 P_{\text{мин}} = 0,75 P_{\text{мин}}$, где $0,25 P_{\text{мин}}$ – запас веса, который необходим в связи с тем, что возможно изменение минимальной нагрузки.

Таким образом, формула для расчета веса груза в динамическом режиме работы выглядит так:

$$\begin{aligned} P_{z, \text{дин.}} = & 0,75 \left(\rho_{\text{ум}} g \left(1 - \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_{\text{ум}}} \left(1 + \frac{P_{\text{уем}}}{\rho_{\text{см}} g H_{\text{сн}}} \right) \right) \sum_{i=1}^N \ell_i S_{\text{ум}, i} + \sum_{i=1}^N f_i \ell_i N_i + \right. \\ & + \frac{2,62 \cdot 10^{-3} \text{ к} \mu \text{ Snd}_n^2 (d_n^2 - d_o^2)}{d_o \rho_{\text{см}}} + 2,45 \cdot 10^4 d_n + 16,9 \mu u \sum_{i=1}^N \ell_i \left(\frac{d_{\text{ум}, i}}{d_{\text{НКТ}}} \right)^{5,49} - \\ & \left. - \frac{F_{\text{ум}} \cdot b \cdot \pi^2 n^2}{2 \cdot 900 \cdot g} S \left(1 - \frac{r}{l} \right) + P_{\text{ж}} \mu_{\text{д}} \sqrt{\frac{S}{\lambda}} K \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Влияние эффекта релаксации высоковязкой эмульсии на вес уравновешивающего груза

Как следует из уравнения баланса, сила трения, а следовательно и вес груза зависит от вязкости добываемой продукции. При запуске станка-качалки в первые минуты или даже часы работы происходит большое количество аварий, которые возникают вследствие резкого увеличения вязкости эмульсии, обусловленного структурированием из-за высокого содержания в нефтяной фазе парафинов, смол и асфальтенов. Происходит так называемое «старение эмульсии». В результате действия этого эффекта, величина минимальной нагрузки может изменяться в широких пределах [6].

Установившееся движение можно описать уравнением Навье-Стокса, имеющим следующий вид:

$$\frac{\mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right]}{r} - \frac{\partial P}{\partial z} - \rho g = 0, \quad (22)$$

где r – координата по радиусу трубы, v – скорость жидкости, м/с;

P – давление, Па;

z – координата глубины скважины;

ρ – плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения.

Вязкость μ в этом уравнении принимается переменной величиной, зависящей от градиента скорости, поэтому уравнение (22) запишем в виде:

$$\frac{\frac{\partial}{\partial r} (\mu \cdot r \cdot \frac{\partial v}{\partial r})}{r} - \frac{\partial P}{\partial z} - \rho g = 0. \quad (23)$$

Зависимость вязкости от градиента скорости аппроксимируется уравнением:

$$\mu = a + b \cdot \exp \left(c \left| \frac{\partial v}{\partial r} \right| \right), \quad (24)$$

где r – координата по радиусу трубы, м;

v – скорость жидкости, м/с;

μ – динамическая вязкость нефти, Па·с;

a, b, c – безразмерные коэффициенты.

Перепишем уравнение (23) в следующем виде, подставив вместо вязкости выражение (24) и продифференцировав его, считая вязкость переменной величиной:

$$\frac{1}{r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial r} + \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial r} + \mu \cdot r \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right) - \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} = 0, \quad (25)$$

где вязкость μ определяется выражением (24), а производная вязкости по радиусу кольцевого пространства:

$$\frac{\partial \mu}{\partial r} = b \cdot e^{c \cdot \left| \frac{\partial v(r)}{\partial r} \right|} \cdot c \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial r^2}. \quad (26)$$

Решением дифференциального уравнения (26) можно получить распределение скорости течения жидкости по радиусу насосно-компрессорных труб (НКТ) и построить эпюру по заданному перепаду давления.

Построена зависимость силы трения, действующей на штанговую колонну, от времени после запуска скважины в работ (рис. 1):

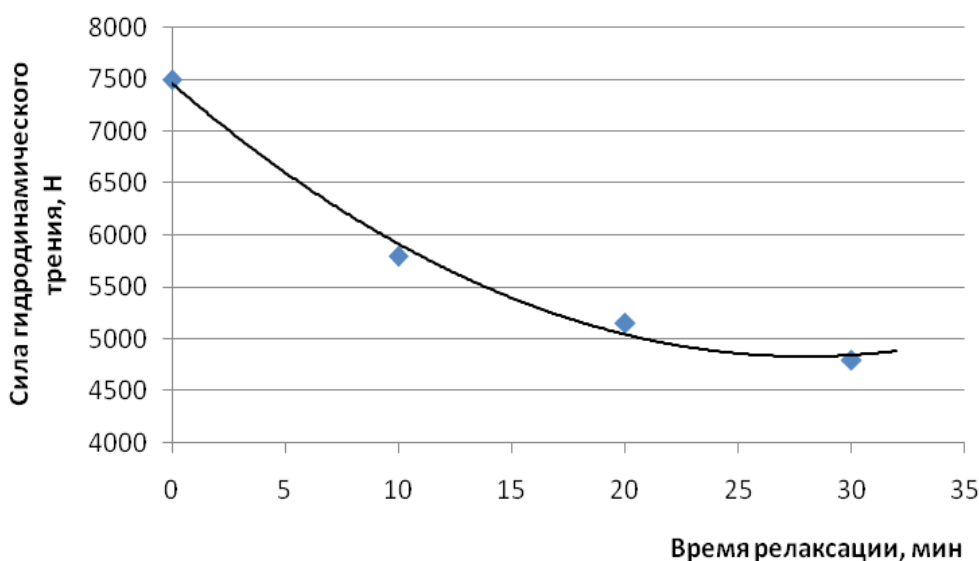


Рисунок 1. Зависимость силы гидродинамического трения от времени релаксации

Сила сопротивления в первые пять минут снижается наиболее значительно, а через тридцать минут – практически не меняется. Это объясняется тем, что большинство связей в структуре, образованной при старении во время остановки скважины, разрушается в первые несколько минут работы.

Графики, отражающие зависимость минимальной нагрузки от времени релаксации приведены на рис. 2 и от вязкости эмульсии на рис. 3. Из них в зависимости от вязкости эмульсии определяется минимальная нагрузка на колонну штанг и необходимый вес уравнивающего груза.

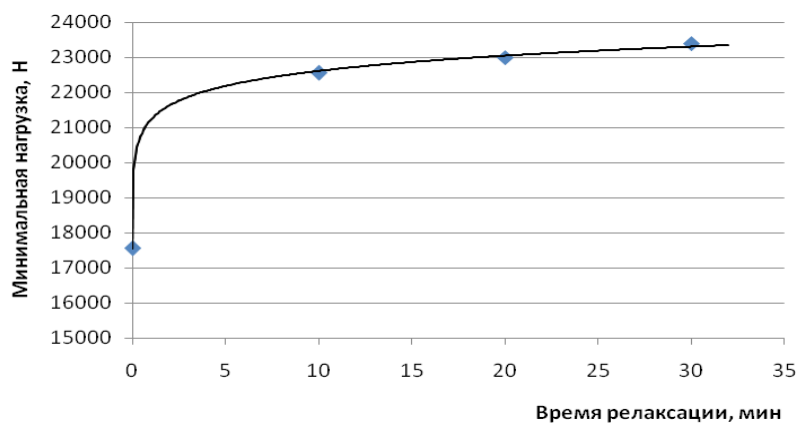


Рисунок 2. Зависимость минимальной нагрузки от времени релаксации

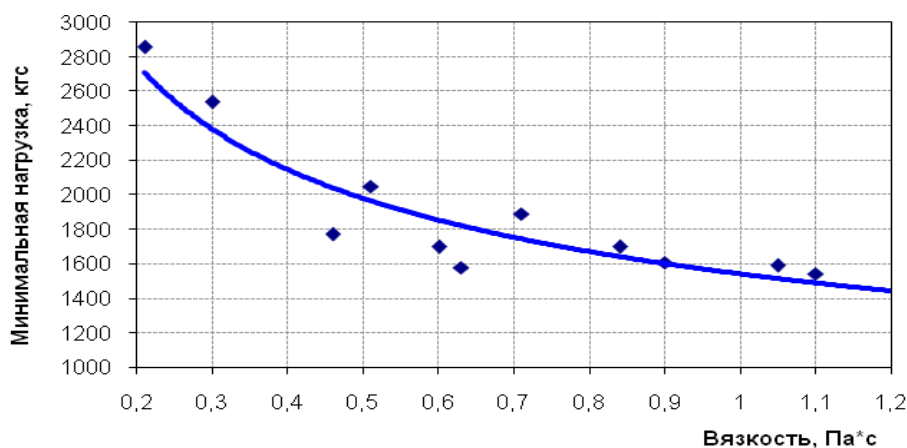


Рисунок 3. Изменение минимальной нагрузки в зависимости от вязкости

Таким образом, показано, что вязкость эмульсии зависит от времени релаксации, следовательно и минимальная нагрузка значительно меняется в первые минуты работы скважины после запуска.

Ниже приведены формулы для расчета веса уравнивающего груза с учётом изменения реологических свойств эмульсии при старении.

Для статического режима:

$$P_{z.ст.стар.} = 0,75 \left(\rho_{ум} g \left(1 - \frac{\rho_{см}}{\rho_{ум}} \left(1 + \frac{P_{уем}}{\rho_{см} g H_{сн}} \right) \right) \sum_{i=1}^N \ell_i S_{ум, i} + \sum_{i=1}^N f_i \ell_i N_i + \right. \\ \left. + \frac{2,62 \cdot 10^{-3} k \mu_{см} S n d_n^2 (d_n^2 - d_o^2)}{d_o \rho_{см}} + 2,45 \cdot 10^4 d_n + 16,9 \mu_{см} u \sum_{i=1}^N \ell_i \left(\frac{d_{ум, i}}{d_{HKT}} \right)^{5,49} \right), \quad (27)$$

где $\mu_{см}$ – вязкость эмульсии после старения.

Для динамического режима работы:

$$P_{z.дин.стар.} = 0,75 \left(\rho_{ум} g \left(1 - \frac{\rho_{см}}{\rho_{ум}} \left(1 + \frac{P_{уем}}{\rho_{см} g H_{сн}} \right) \right) \sum_{i=1}^N \ell_i S_{ум, i} + \sum_{i=1}^N f_i \ell_i N_i + \right. \\ \left. + \frac{2,62 \cdot 10^{-3} k \mu_{см} S n d_n^2 (d_n^2 - d_o^2)}{d_o \rho_{см}} + 2,45 \cdot 10^4 d_n + 16,9 \mu_{см} u \sum_{i=1}^N \ell_i \left(\frac{d_{ум, i}}{d_{HKT}} \right)^{5,49} \right) - \quad (28) \\ - \frac{F_{ум} \cdot b \cdot \pi^2 n^2}{2 \cdot 900 \cdot g} S \left(1 - \frac{r}{l} \right) + P_{ж} \mu_o \sqrt{\frac{S}{\lambda} K}.$$

Выводы

Разработана методика расчета веса устьевого уравновешивающего устройства для статического, динамического режима работы скважины и в период релаксации откачиваемой продукции. Методика основана на исследовании баланса сил, действующих на колонну штанг при ходе вниз.

Изучено влияние изменения вязкости эмульсии в процессе релаксации после запуска скважины в работу на силы трения, входящие в уравнение баланса, а следовательно, на вес уравновешивающего груза

Литература

1. Патент РФ №2317444 Станок-качалка, Уразаков К.Р., Гилаев Г.Г., Алиева З.З, Иконников И.И., Молчанова В.А., 2с.
2. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007. – 826 с.
3. Уразаков К.Р. Эксплуатация наклонно направленных насосных скважин. М.: Недра, 1993. – 169 с.

4. Лесин В.И. Особенности релаксации вязкости неньютоновской нефти после воздействия градиентами скорости и магнитными полями // Нефтепромышленное дело. – № 1. – 2008. – с. 43 - 46.

5. Залялиев М.А. Формулы для расчета нагрузок в точке подвеса колонны штанг установок СШН условно вертикальных скважин / Эксплуатация нефтяных месторождений Западной Сибири // Сборник научных трудов. М: ВНИИОЭНГ. – 1991. – с. 47-54.

6. Романова Н.А., Алиев З.З. Влияние периода релаксации водогазонефтяных эмульсий на величину сил гидродинамического трения // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2010. 8 с. // URL: http://www.ogbus.ru/authors/Romanova/Romanova_2.pdf (дата обращения: 19.08.10).