

## ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ НЕФТЯНЫХ МАСЕЛ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТРАКТОРАХ

Е. А. МАЖУГИН, В. И. КОЦУБА, С. Н. НИЧИПОРУК

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: tech\_service@baa.by

(Поступила в редакцию 21.08.2023)

*Нефтяные масла, используемые в качестве рабочих жидкостей гидросистем, трансмиссионных и моторных масел, в процессе доставки, хранения и эксплуатации постепенно насыщаются водой. В работающих машинах масла интенсивно перемешиваются, вода при этом дробится, образуя тонкодисперсные устойчивые эмульсии, что ведет к нежелательным химическим превращениям масел, ускорению коррозии деталей, нарушению работы масляных насосов, ускорению изнашивания трущихся поверхностей. Одним из возможных способов обезвоживания масел является их термическая обработка, т.е. нагрев, при котором температура масла должна превышать температуру кипения воды. Однако системы с высокой степенью дисперсности имеют свои особенности.*

*В статье приведены результаты исследования зависимости температуры кипения воды от внешнего давления, а также температуры кипения воды в микрокаплях эмульсии от их размеров при нормальном внешнем давлении. Результаты исследования показали, что давление в микрокаплях выше нормального атмосферного давления, что приводит к повышению температуры вскипания воды в микрокаплях по сравнению с температурой кипения воды при нормальном давлении.*

*На основании приведенных данных и зависимостей, были построены графики, описывающие особенности уточненной методики термического обезвоживания углеводородов с температурой кипения, существенно превосходящей температуру кипения воды. Графики позволяют определить необходимое количество теплоты для испарения воды из масла по трем моделям: вода находится в неэмульгированном состоянии в виде отстоя в масле, вода с маслом образует монодисперсную обратную эмульсию, вода с маслом образует полидисперсную обратную эмульсию.*

*Таким образом, разработанные подходы могут быть использованы для обоснования уточненной методики и расчетов энергетических затрат при термическом обезвоживании нефтяных масел и им подобных жидкостей.*

**Ключевые слова:** нефтяные масла, обезвоживание масла, эмульсия, нагрев, теплота.

*Petroleum oils used as working fluids for hydraulic systems, transmission and motor oils are gradually saturated with water during delivery, storage and operation. In operating machines, oils are intensively mixed, while water is crushed, forming finely dispersed stable emulsions, which leads to undesirable chemical transformations of oils, accelerated corrosion of parts, disruption of oil pumps, and accelerated wear of rubbing surfaces. One of the possible ways to dehydrate oils is their heat treatment, i.e. heating in which the temperature of the oil must exceed the boiling point of water. However, systems with a high degree of dispersion have their own characteristics.*

*The article presents the results of a study of the dependence of the boiling point of water on external pressure, as well as the boiling point of water in microdroplets of an emulsion on their size at normal external pressure. The results of the study showed that the pressure in the microdroplets is higher than normal atmospheric pressure, which leads to an increase in the boiling point of water in the microdroplets compared to the boiling point of water at normal pressure.*

*Based on the given data and dependencies, graphs were constructed that describe the features of the refined method of thermal dehydration of hydrocarbons with a boiling point significantly higher than the boiling point of water. The graphs allow you to determine the required amount of heat to evaporate water from oil using three models: water is in a non-emulsified state as sludge in oil, water with oil forms a monodisperse inverse emulsion, water with oil forms a polydisperse inverse emulsion.*

*Thus, the developed approaches can be used to substantiate the refined methodology and calculations of energy costs during the thermal dehydration of petroleum oils and similar liquids.*

**Key words:** petroleum oils, oil dehydration, emulsion, heating, heat.

### Введение

Нефтяные масла, используемые в качестве рабочих жидкостей гидросистем, трансмиссионных и моторных масел, в процессе доставки, хранения и эксплуатации постепенно насыщаются водой. Вода может находиться в растворенном, эмульгированном и выпавшем в отстой состояниях. В работающих машинах масла интенсивно перемешиваются, вода при этом дробится, образуя тонкодисперсные устойчивые эмульсии.

Современные фильтры и центрифуги, применяющиеся на тракторах, автомобилях, строительных и сельскохозяйственных машинах, имеют очень низкую эффективность по отношению к выделению диспергированной воды, которая ведет к нежелательным химическим превращениям масел, ускорению коррозии деталей, нарушению работы масляных насосов, ускорению изнашивания трущихся поверхностей [1, 2].

Особенно активно из-за особенностей условий работы насыщается водой моторное масло. Причем капли воды в нем активно дробятся при перемешивании масла коленчатым валом, шестернями масляного насоса, приводными зубчатыми колесами. В центробежных очистителях капли дробятся в ро-

торе центрифуги в струях масла, истекающего из сопл ротора и клапанов. Измельчение капель происходит в масляных пленках, разделяющих трущиеся поверхности [1, 2].

### Основная часть

Одним из возможных способов обезвоживания масел является их термическая обработка, т.е. нагрев, при котором температура масла должна превышать температуру кипения воды. Однако системы с высокой степенью дисперсности имеют свои особенности. В данном случае следует учитывать, что микрокапли воды благодаря большой кривизне поверхности и существующим на поверхностях раздела фаз поверхностным силам, имеют повышенное внутреннее давление, которое изменяет реальную температуру вскипания эмульгированных капель воды, поскольку повышение давления ведет к повышению температуры кипения жидкостей.

Зависимость температуры кипения  $t_k$  дистиллированной воды от внешнего давления  $p$ , построенная по известным данным [3], приведена на рис. 1.

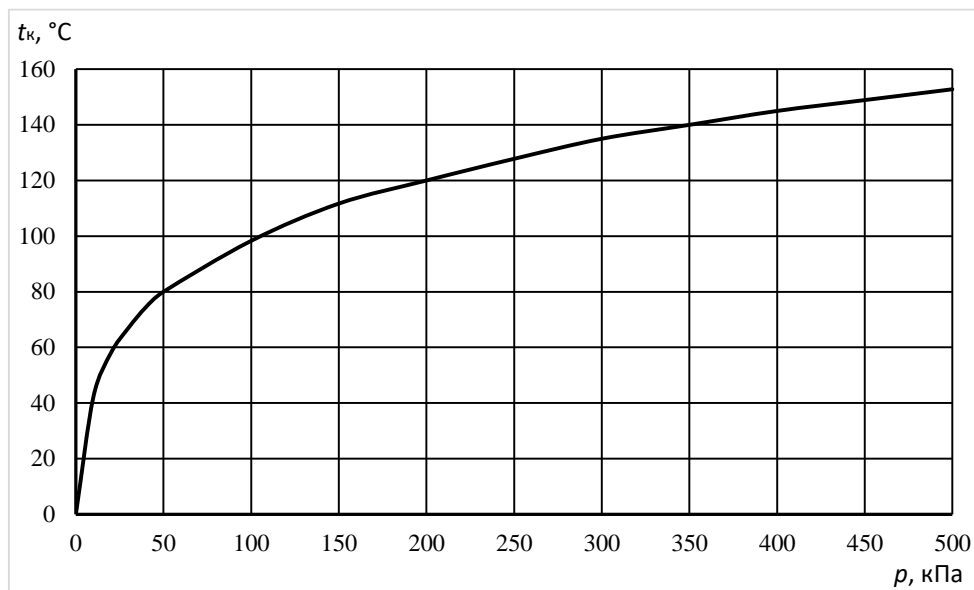


Рис. 1. Зависимость температуры кипения воды от внешнего давления

Давление на микрокапли эмульсии, обусловленное поверхностными силами, можно рассчитать по формуле Лапласа [4]:

$$p_{\sigma} = 4\sigma / d, \text{ кПа}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – межфазное натяжение на границе между водой и маслом, мН/м;  $d$  – диаметр микрокапли воды, мкм.

Межфазное натяжение может быть определено как разность между поверхностным натяжением воды и поверхностным натяжением масла. Изменение поверхностного натяжения воды при разных температурах при нормальном давлении исследовано достаточно точно [5]. Поверхностное натяжение масла, кроме внешних условий, зависит от его марки, времени и условий использования, обусловивших его состав. Сведения по поверхностному натяжению нефти и ряда нефтепродуктов приведены в справочной литературе [6].

При температуре 20 °C и атмосферном давлении значение поверхностного натяжения нефти составляет 26 мН/м, реактивных топлив 22,6–28,5 мН/м. Здесь же [6] приводится формула для ориентировочного расчета поверхностного натяжения нефтепродуктов  $\sigma_n$  при температуре 20 °C и атмосферном давлении:

$$\sigma_n = 51,5\rho - 16,6, \text{ мН/м}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность нефтепродукта при 20 °C, г/см<sup>3</sup>.

Проведенный нами замер поверхностного натяжения  $\sigma_n$  пробы отработанного масла М-10Г2 дал значение 23 мН/м. Значение поверхностного натяжения воды при 20 °C составляет 72,7 мН/м. С ростом температуры поверхностное натяжение жидкостей снижается. Приняв для ориентировочных предварительных расчетов  $\sigma = 50$  мН/м и воспользовавшись формулой (1), рассчитаем внутреннее давление в микрокаплях  $p_{\sigma}$  в зависимости от диаметра микрокапель воды  $d$  (табл. 1).

Таблица 1. Результаты расчета внутреннего давления в микрокаплях эмульгированной в масле воды

$d$ , мкм	0,5	1	2	3	5	8	10	15	20
$p_{\sigma}$ , кПа	400	200	100	67	40	25	20	13	10

Из табл. 1. следует, что давление в микрокаплях выше нормального атмосферного давления на величину  $p_{\sigma}$ . Это приводит к повышению температуры вскипания воды в микрокаплях по сравнению с температурой кипения воды при нормальном давлении. Используя данные, представленные на рис. 1, и данные по температуре насыщенного пара [1], можно построить график, отображающий данное явление (рис. 2).

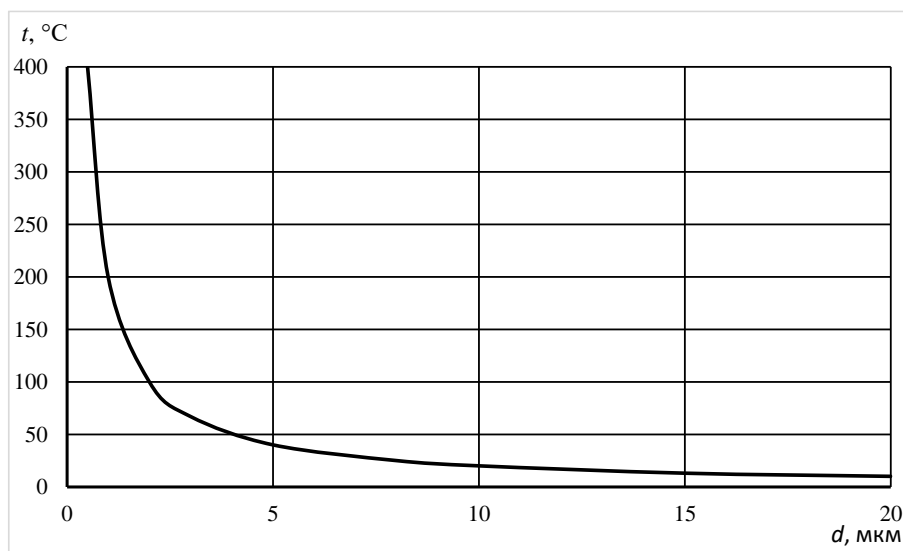


Рис. 2. Расчетная зависимость температуры кипения воды в микрокаплях эмульсии от их размеров при нормальном внешнем давлении

График показывает, что с уменьшением размеров микрокапель температура кипения при нормальном внешнем давлении заключенной в них воды резко возрастает. Данное явление необходимо учитывать при термическом обезвоживании масел.

Для оценки значимости данного явления рассмотрим процесс выпаривания воды из водомасляной системы, состоящей из 1 кг масла и 0,1 кг воды. Оценка будем вести, сопоставляя три модели системы:

- 1 – вода находится в неэмульгированном состоянии в виде отстоя в масле;
- 2 – вода с маслом образует монодисперсную обратную эмульсию;
- 3 – вода с маслом образует полидисперсную обратную эмульсию.

Для упрощения исследования исключим из учитываемых процессов нагрев сосуда, в котором находится жидкая система, затраты энергии на испарение фаз, происходящих при температуре ниже температуры кипения, влияние взаимного растворения фаз, конденсацию жидкостей, перешедших в газообразное состояние, и изменение теплоемкости и теплопроводности жидкости при насыщении их водяным паром.

Теплоемкость воды  $C_v$  по рекомендации [3] будем считать постоянной и равной 4,19 кДж/кг·°C. Теплоемкость нефтепродуктов в зависимости от температуры может рассчитываться по ряду зависимостей, которые получили Л. М. Караваев, Эккарт, Форш и Уитмен, Кратоз, Крауссольд [6, 7]. Одной из наиболее простых и достаточно точных является формула Л. М. Караваева, которая при переходе с расчета энергии в кал на Дж приобретает вид:

$$C_n = 2,02 + 0,00161 (t-100), \quad (3)$$

где  $C_n$  – теплоемкость нефтепродукта, кДж/кг·°C;  $t$  – температура, при которой рассчитывается теплоемкость нефтепродукта, °C.

Расчет теплоты  $Q_v$ , необходимой на нагрев воды до требуемой температуры, производится по формуле:

$$Q_v = C_v m_v (t_k - t_n), \quad \text{кДж}, \quad (4)$$

где  $m_v$  – масса воды, кг;  $t_k$  – конечная температура нагрева, °C;  $t_n$  – начальная температура, °C. Соответственно при нагреве нефтепродукта (масла):

$$Q_n = C_n m_n (t_k - t_n), \text{ кДж}, \quad (5)$$

где  $m_n$  – масса нагреваемого нефтепродукта, кг.

Для перевода кипящей воды в пар требуется теплота  $Q_n$ , количество которой можно рассчитать по формуле:

$$Q_n = r m_n, \text{ кДж}, \quad (6)$$

где  $r$  – теплота парообразования, кДж/кг.

Значение  $r$  не является величиной постоянной. С ростом внешнего давления и, следовательно, температуры кипения оно несколько уменьшается. Для диапазона  $0 \dots 140$  °С, обработав приводимые данные для  $r$  [1], можно получить следующую приблизительную зависимость:

$$r = 2,501 - 2,54 t, \text{ кДж/кг}. \quad (7)$$

Объединив формулы (6) и (7), можно получить зависимость:

$$Q_n = (2,501 - 2,54t) m_n. \quad (8)$$

Располагая приведенными данными и зависимостями, можно построить график, показывающий особенности уточненной методики термического обезвоживания углеводородов с температурой кипения, существенно превосходящей температуру кипения воды (рис. 5).

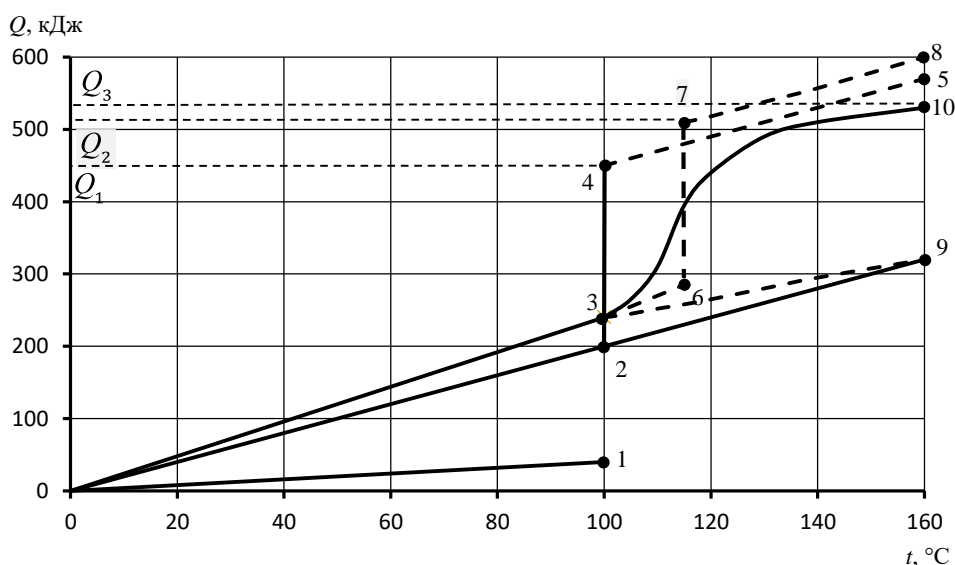


Рис. 3. Графики для определения необходимого количества теплоты по трем рассматриваемым моделям

График отражает ориентировочные расчетные зависимости для определения количества теплоты  $Q$ , необходимой для доведения жидких систем по трем моделям до температуры кипения воды и для завершения процесса ее выкипания. Здесь линия 0–1 описывает процесс нагрева до 100 °С, соответствующий формуле (4), линия 0–2 описывает процесс нагрева масла. Она построена по формуле (5) с учетом формулы (3). Линия 0–3 описывает суммарное количество теплоты, необходимой на нагрев системы (воды и масла) независимо от модели до 100°С. Линия 3–4 соответствует выкипанию воды из системы по первой модели. На этом участке расход теплоты не ведет к повышению температуры системы. После выкипания воды начинается повышение температуры системы (линия 4–5). Из-за отсутствия воды в системе линия 4–5 становится параллельной линии 0–2. Для нагрева системы и окончания процесса выпаривания воды необходимо  $Q_1$  теплоты.

Для рассмотрения процесса выпаривания воды по второй модели предположим, что эмульгированная вода представляет собой микрокапли одного размера, например, 3 мкм. Тогда в соответствии с рис. 2 процесс выкипания воды будет протекать при 114 °С, для чего систему следует довести до этой температуры (линия 3–6), затратив дополнительную теплоту  $Q_n$ , рассчитываемую по формуле (8). Освобождению системы от воды при кипении последней соответствует линия 6–7. Окончанию процесса соответствует расход теплоты  $Q_2$ . Далее будет происходить нагрев масла (линия 7–8).

Для анализа процесса обработки полидисперсной эмульсии необходимо иметь дисперсную характеристику дисперсной фазы. Пусть, например, она имеет данные, приведенные в табл. 2, которые со-

ответствуют обычному логарифмическому распределению дисперсной фазы при модальном значении размера капель 3 мкм.

Таблица 2. Дисперсная характеристика воды, эмульгированной в масле

Размерный интервал, мкм	До 1	1-2	2-3	3-4	4-5	св. 5
Процентное объемное содержание, %	5	20	25	25	40	5

Для такой системы выпаривание (в результате кипения) будет идти постепенно – при меньшей температуре будут выкипать и испаряться микрокапли большего размерного интервала в соответствии с рис. 2, а затем с повышением температуры – меньшего. В связи с постепенным уменьшением количества воды в системе количество тепла, необходимого на увеличение температуры, начинает снижаться, и линия 0–3 продолжается по кривой 3–9, которая после полного испарения воды превращается в продолжение линии 0–2.

Расчет тепла, необходимого на испарение воды каждого размерного интервала, выполним по формуле (3), учитывая объемную долю воды этого интервала в ее общем объеме. Температуру кипения принимаем по рис. 2, ориентируясь по значению диаметра микрокапель  $d$ , соответствующему середине размерного интервала. Рассчитанное значение  $Q_{\text{п}}$  откладываем нарастающим итогом от линии 3–9, для каждого значения  $t$ , соответствующего температуре кипения микрокапель каждого размерного интервала.

Полученные значения описываются кривой 3–10. Окончанию процесса выкипания воды соответствует значение теплоты  $Q_3$ , которая для данного отношения воды в масле и дисперсной характеристики дисперсной фазы получилась близкой к значению  $Q_2$ . Но для второй и третьей модели затраты тепла по выпариванию воды получились заметно большими, чем для первой, что необходимо учитывать при энергетических расчетах. Анализ линий 0–3–10 и 0–3–6–7 показывает, что снижению энергозатрат могут способствовать мероприятия по уменьшению степени дисперсности эмульгированной воды и снижению внешнего давления.

При другом соотношении масс воды и масла и иной гранулометрической характеристике дисперсной фазы описанный процесс может существенно отличаться по своим значениям, но принципиально остается аналогичным описанному.

### Заключение

Изложенные расчеты показывают, что в тонкодисперсных эмульсиях вода в масле должна вскипать при температуре, превышающей 100 °С.

На испарение эмульгированной воды требуется больше энергии, чем на испарение отстоявшейся неэмульгированной воды.

Разработанные подходы могут быть использованы для обоснования уточненной методики и расчетов энергетических затрат при термическом обезвоживании нефтяных масел и им подобных жидкостей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коцуба, В. И. Влияние обводненности нефтяных масел на их эксплуатационные показатели / В. И. Коцуба, С. Н. Ничипорук // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / ред. кол.: В. Р. Петровец (гд. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2021. – Вып. 6. – С. 114–119.
2. Влияние содержания воды в нефтяных маслах на их показатели / В. И. Коцуба, С. Н. Ничипорук, Н. А. Радионов // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. тр. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2020. – С. 100–107.
3. Орлов, М. Е. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен: учеб. пособие / М. Е. Орлов. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 204 с.
4. Кривошапкин, П. В. Основы коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / П. В. Кривошапкин, Е. Ф. Кривошапкина, Е. А. Назарова, В. В. Сталюгин. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. – 138 с.
5. Хайдаров, Г. Г. Физическая природа поверхностного натяжения жидкости / Г. Г. Хайдаров, А. Г. Хайдаров, А. Ч. Машек // Вестник Санкт-Петербургского университета. – Сер. 4. 2011. – Вып. 1. – С. 3–8.
6. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочник / И. Г. Анисимов, К. М. Бадыштова, С. А. Бнатов [и др.]; под ред. В. М. Школьников. Изд. 2-е перераб. и доп. – Москва: Издательский центр «Техинформ», 1999. – 596 с.
7. Лиханов, В. А. Справочник по топливам и маслам: учеб. пособие / В. А. Лиханов, Р. Р. Девятьяров, С. А. Романов. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2015. – 164 с.