

УВЕЛИЧЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ ПУТЕМ КАВИТАЦИОННОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ КРЕКИНГА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Украинский государственный химико-технологический университет, г. Днепропетровск

Использование кавитации позволяет увеличить выход светлых нефтепродуктов при термическом крекинге нефтяного сырья. Экспериментально установлено, что выход дизельных фракций зависит от многих факторов: состава и свойств нефтяного сырья; параметров кавитационного воздействия (температуры, давления, вязкости, объемного расхода, числа кавитационных циклов, геометрии ЦВК и др.). Это, а также высокая температура, давление и агрессивность сырья составляют объективные трудности на пути детальных экспериментальных исследований влияния кавитации. Поэтому было проведено компьютерное моделирование процесса. Показано, что осевая, радиальная и окружная скорости сырья в центробежной вихревой камере резко отличаются по величине. Полная скорость велика и достигает величины 43 м/с у поверхности вихря. Сделан вывод, что кавитационная область должна существовать у самой поверхности вихря, где и происходит интенсификация крекинга углеводородов. Параметры же кавитационной области определены по величине статического давления жидкости во всех точках кавитационного аппарата. Распределение статического давления жидкости в центробежной вихревой камере имеет сложный характер: кавитационная область представляет собой полый усеченный конус, внутри которого находится цилиндрический паровой вихрь. Образование турбулентного слоя увеличивает кавитационную область, форма и размеры которой рассчитаны на основе параметров реальной центробежной камеры.

Ключевые слова: кавитация; глубина переработки; термический крекинг; нефтепродукты; кавитационные циклы.

Введение

Увеличение выхода светлых нефтепродуктов является актуальной задачей нефтеперерабатывающей промышленности. Поэтому усилия многочисленных исследователей направлены на создание нетрадиционных технологий, которые дают возможность получить дополнительное количество моторных топлив при термокрекинге нефтепродуктов. Так использование физических методов воздействия на химико-технологические процессы может дать возможность реализовывать химические реакции, протекание которых в обычных условиях затруднено или, вообще, невозможно. Одним из таких методов является кавитация [1], с которой приходится бороться как с негативным явлением, приводящим к разрушению различных рабочих поверхностей. Очевидно, что колоссальная плотность энергии, которая выделяется в окрестности точки схлопывания кавитационного пузырька, может сделать кавитацию эффективным методом интенсификации многих технологических процес-

сов. Так в работе [1], при термокрекинге нефтяных остатков в условиях кавитации, стимулированной ультразвуком, выход светлых продуктов реакции увеличивается в 1,3 раза по сравнению с обычным термическим разложением. Кавитацию можно генерировать гидродинамически, например, прогоняя нефтепродукты через центробежную вихревую камеру (ЦВК), что по энергозатратам является наиболее оптимальным способом.

Экспериментально этот способ был апробирован авторами [2–4]. Результаты эксперимента показали, что после привентивной обработки мазута в ЦВК термическое крекинг при 380–400°C приводит к увеличению выхода дизельных фракций на 15–38%. Было показано, что выход дизельных фракций зависит от многих факторов: состава и свойств мазута; параметров кавитационного воздействия (температуры, давления, вязкости, объемного расхода, числа кавитационных циклов, геометрии ЦВК и др.); особенностей технологического процесса. Это, а так-

же высокая температура, давление и агрессивность мазута составляют объективные трудности на пути экспериментальных исследований влияния кавитации. Поэтому было принято решение разработать физико-химический механизм взаимодействия, построить его математическую модель, составить программу расчета и провести компьютерное моделирование процесса для реальной лабораторной установки [4].

1. Построение физико-химического механизма взаимодействия

Для построения физико-химического механизма взаимодействия нужно проанализировать ряд вопросов.

1.1. Количественная энергетическая оценка возможности использования явления кавитации для крекинга углеводородов нефти

В общем случае явление кавитации связывают с появлением в жидкости (при определённых условиях) многочисленных кавитационных пузырьков, которые пульсируют, осциллируют, растут, уменьшаются и схлопываются, при этом они могут перемещаться вместе с потоком жидкости.

Необходимыми и достаточными условиями возникновения кавитационных пузырьков является:

- 1) наличие в жидкости зародышей пузырьков;
- 2) статическое давление в жидкости должно быть ниже давления насыщенных паров.

Так как в реальной жидкости плотность сверхкритических зародышей достаточно высока, то для возникновения кавитации необходимо, чтобы статическое давление в жидкости стало ниже давления насыщенных паров этой жидкости при данной температуре. Каким способом будет понижаться статическое давление, принципиального значения не имеет.

Понижения статического давления до значений ниже давления насыщенных паров можно достичь гидродинамическим путём, увеличивая скорость жидкости за счёт уменьшения площади живого сечения её потока: в трубке Вентури; в ЦВК и т.д.

Согласно классическим представлениям [5], явление кавитации условно делится на три стадии:

- I. зарождение (образование сверхкритических пузырьков);
- II. стадия развитой кавитации;
- III. исчезновение кавитации (схлопывание пузырьков).

Стадия возникновения и развития кавитации зависит от физико-химических свойств жидкости, наличия в ней твёрдых или газообразных примесей (зародышей), температуры жидкости, давления в зоне кавитации и целого

ряда других факторов.

Если после реализации первых двух стадий каким-либо образом резко повысить статическое давление в жидкости выше давления насыщенных паров газовой смеси, заполняющей кавитационные пузырьки (каверны), то наблюдается практически мгновенная конденсация этих паров на стенках пузырька и его схлопывание. При схлопывании пузырька в окрестности места исчезновения пузырька выделяется энергия. При этом температура в точке схлопывания пузырька может достигать 10^4 К, а давление порядка 2000–4000 атм. Именно возникновение экстремально высоких значений параметров является причиной локальных разрушений лопастей гребных валов, лопаток турбин и т. д. [5].

Проведем количественную энергетическую оценку возможности использования кавитации для крекинга углеводородов, входящих в состав нефти и нефтепродуктов [6].

Согласно [5] энергия, которая выделяется при схлопывании одного кавитационного пузырька, составляет:

$$E_k = \frac{4}{3} \pi R_0^3 p_\infty, \quad (1)$$

где R_0 – начальный радиус пузырька, м; p_∞ – давление жидкости вдали от пузырька, Па.

Для количественной оценки, примем: $R_0 = 1$ мм, $p_\infty = 10$ атм = 10^6 Па. Тогда, согласно (1) будем иметь энергию, выделяющуюся при схлопывании одного кавитационного пузырька:

$$E_k = \frac{4}{3} \pi R_0^3 p_\infty = 4 \cdot 3,14 / 3 \cdot 10^{-9} \cdot 10^6 \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Энергия ($E_{св.}$) разрыва связи типа С–С для одного моля парафиновых углеводородов равна 332 кДж/моль [6]. Тогда для разрыва связи типа С–С в одной молекуле парафиновых углеводородов, необходимо потратить энергию ($E_{св.м.}$), равную:

$$E_{св.м.} = \frac{E_{св.}}{N_A} = \frac{332000}{6,022 \cdot 10^{23}} \approx 5,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж,}$$

где N_A – число Авогадро.

Таким образом, число молекул (N), в которых может быть разорвана связь, при схлопывании одного кавитационного пузырька составляет:

$$N = \frac{E_k}{E_{св.м.}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{5,5 \cdot 10^{-19}} \approx 7 \cdot 10^{15} \approx 10^{16}.$$

То есть, при схлопывании одного пузырька

ка $R=1$ мм выделяется энергия достаточная для крекинга 10^6 молекул углеводородов. Тогда, на разрыв связей типа С–С в каждой из молекул одного моля углеводородов потребуется захлопнуть N_μ пузырьков:

$$N_\mu = \frac{N_A}{N} = \frac{6,022 \cdot 10^{23}}{10^{16}} \approx 10^7.$$

Это количество пузырьков N_μ занимает объём V_μ :

$$V_\mu = \frac{4}{3} \pi R_0^3 N_\mu = 4 \cdot 3,14 / 3 \cdot 10^{-9} \cdot 10^7 \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \approx 40 \text{ л}.$$

Пусть объёмная доля кавитационных пузырьков в потоке нефтепродукта составляет 10% от его общего объёма. Тогда для крекинга одного моля углеводородов необходимо “прокачать” через кавитационный аппарат 360 кг нефтепродукта. Если молекулярную массу углеводородов принять $\mu=100\text{--}300$, а плотность $\rho=700\text{--}900$ кг/м³, то, прокачав через кавитатор 360 кг нефтепродукта можно подвергнуть крекингу примерно 0,1–0,3 кг углеводородов.

Таким образом, выполненные расчёты показали возможность крекинга углеводородов нефти путём гидродинамической кавитации. Для увеличения выхода продуктов крекинга необходимо, чтобы конструкция кавитационного аппарата предусматривала многоцикловость кавитационного процесса и параметры, обеспечивающие максимальную плотность кавитационных пузырьков в потоке нефтепродукта. Оценим пороговое значение объёмной доли пузырьков в начале III стадии кавитации

1.2. Количественная оценка порогового значения начальной объёмной доли каверн, при схлопывании которых выделяется максимальная энергия

Рассмотрим более детально стадии кавитации как явления.

I стадия. Зарождение пузырьков

На самом деле, в реальной жидкости всегда существует высокая концентрация зародышей пузырьков докритического и околокритического радиусов. То есть, если значение статического давления ниже давления насыщенных паров жидкости при данной температуре, то зародыши пузырьков возникают, растут (иногда до критических размеров), уменьшаются и исчезают, не превращаясь в каверны (мерцают).

II стадия. Развитая кавитация

При понижении статического давления жидкости ниже давления насыщенных паров зародыши пузырьков развиваются в каверны

(сферические пузырьки сверхкритического радиуса). Каверны непрерывно растут до тех пор, пока статическое давление в жидкости не сравняется с давлением насыщенных паров p_s этой жидкости при данной температуре.

III стадия. Исчезновение кавитации

При повышении статического давления жидкости (безотносительно к тому, каким из способов это реализовано) выше давления насыщенных паров происходит практически мгновенная конденсация этих паров на стенках каверны и она очень быстро ($\approx 0,5$ мс) схлопывается. Уменьшающаяся каверна увлекает в направлении центра схлопывания близлежащие слои жидкости. Кинетическая энергия жидкости (особенно в окрестности схлопывающейся каверны) резко возрастает. В момент схлопывания каверны кинетическая энергия практически мгновенно превращается в другие виды энергии, чем и объясняется возникновение в окрестности точки схлопывания экстремально высоких значений [5] давления (2000–4000 атм) и температуры (10000 К). Генерация этих условий в окрестностях точек схлопывания каверн и является принципиальной основой процесса интенсификации крекинга углеводородов нефти.

Резюмируя можно сказать, что источником энергии, выделяющейся при схлопывании каверн, есть кинетическая энергия жидкости, окружающей эти каверны.

В [5] решена сферичесносимметричная задача о схлопывании сферической каверны в бесконечно большом объеме однородной несжимаемой жидкости. В этой постановке задачи считалось, что на бесконечно большом удалении от центра каверны скоростью жидкости можно пренебречь. Это условие выполнимо только в том случае, когда каверны расположены достаточно далеко, чтобы можно было пренебречь взаимодействием между соседними кавернами. Если же схлопывающиеся каверны расположены близко, то вовлекающиеся в движение слои жидкости взаимодействуют между собой и, как следствие, энергия, выделяющаяся при схлопывании каверн, значительно уменьшается.

Проведем количественный анализ влияния взаимного расположения каверн на энергию, выделяемую при их схлопывании [5]. Жидкость, содержащую каверны, в начале III стадии будем моделировать системой координационных сфер (рис. 1).

Координационной (рис. 2) будем называть: а) сферу радиуса r_0 , потоком жидкости через которую можно пренебречь; б) содержащую в начальный момент времени каверну радиуса R_0 , концентричную координационной сфере. При этом область решения задачи лежит между теку-

щим радиусом каверны $R=R(t)$ и радиусом координационной сферы r_∞ , то есть в интервале $R \leq r \leq r_\infty$.

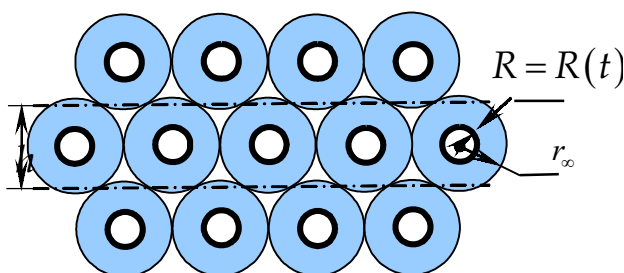


Рис. 1. Моделирование струйки жидкости, заполненной схлопывающимися кавернами, системой координационных сфер радиуса $r=r_\infty$, каждая из которых содержит концентрическую сферическую каверну радиуса $R=R(t)$

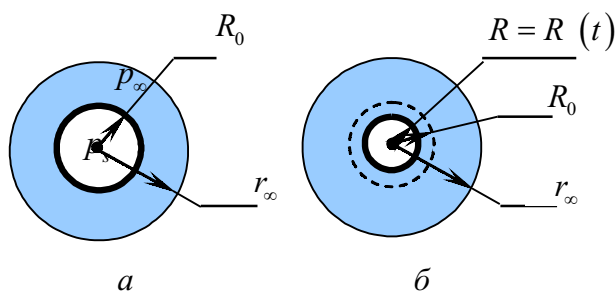


Рис. 2. Принципиальная схема координационной сферы: r_∞ – радиус координационной сферы; R_0 – начальный радиус сферической каверны (перед схлопыванием, рис. 2,а); R – текущий радиус сферической каверны – рис. 2,б

Запишем уравнение непрерывности для двух сферических сечений: поверхности схлопывающейся каверны радиуса R и некоторой сферы текущего радиуса r :

$$u4\pi r^2 = U4\pi R^2,$$

где u – радиальная скорость жидкости через сферическую поверхность, имеющую текущий радиус r ; U – радиальная скорость поверхности каверны радиуса $R=R(t)$.

Отсюда:

$$u = \frac{UR^2}{r^2}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что при $r \rightarrow \infty$ скорость $u \rightarrow 0$ что соответствует условиям моделирования.

Тогда кинетическая энергия E_k жидкости, окружающей схлопывающуюся каверну, с учетом (2), определится как:

$$E_k = \int_R^\infty 4\pi r^2 u^2 dr = 2\pi \rho U^2 R^3, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости.

В первом приближении [5] давление на стенке каверны предполагалось равным нулю, поэтому никакой работы не совершается. В то же время, работа, совершаемая всей жидкостью, содержащейся в координационной сфере, равна:

$$A = p_\infty \Delta V = \frac{4}{3} \pi p_\infty (R_0^3 - R), \quad (4)$$

где p_∞ – статическое давление жидкости при $r=\infty$; ΔV – изменение объема каверны.

Эта работа пойдет на увеличение кинетической энергии (3), которая трансформируется в другие виды энергии (тепловую, упругого сжатия, свечения...) при схлопывании каверны.

Так как в момент схлопывания радиус каверны можно (в первом приближении) считать равным нулю ($R=0$), то энергия, выделяемая при схлопывании каверны, начальный радиус которой был равен R_0 , согласно (3) и (4), будет:

$$E = \frac{4}{3} \pi p_\infty R_0^3. \quad (5)$$

Кроме того, считается [5], что

$$E_k = E$$

Эти выводы справедливы, если радиус координационной сферы бесконечен.

Статическое давление на поверхности сферы p_∞ равно статическому давлению в жидкости. Статическое давление внутри каверны ($p \leq p_s$) меньше давления насыщенных паров p_s , что и приводит к схлопыванию каверны.

Из условия неразрывности жидкости вытекает зависимость, выполняющаяся в процессе схлопывания каверны радиуса R_0 за время схлопывания τ ($\tau \ll 1$):

$$\frac{4\pi R_0^3}{3\tau} = 4\pi r_\infty^2 u_\infty, \quad (6)$$

где u_∞ – скорость жидкости, пересекающей координационную сферу (т.е. скорость в точке с координатой $r=r_\infty$).

Пусть радиус координационной сферы в n раз больше начального радиуса R_0 каверны.

$$r_\infty = n R_0. \quad (7)$$

А скорость u_∞ , выраженная в радиусах R_0 , имеет вид:

$$u_{\infty} = \frac{mR_0}{\tau} \quad (8)$$

Подставим (7), (8) в (5). Будем иметь:

$$\frac{4\pi R_0^3}{3\tau} = 4\pi n^2 R_0^2 \frac{mR_0}{\tau}$$

Или после сокращений окончательно:

$$m = \frac{1}{3n^2} \quad (9)$$

График функции (9) приведен на рис. 3.

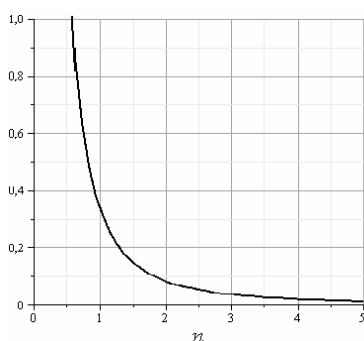


Рис. 3. График зависимости (9)

Из условия того, что поток жидкости через координационную сферу практически отсутствует (в идеальном случае поток равен нулю), должно выполняться условие:

$$m \ll 1.$$

Как видно из графика (рис.3), это условие удовлетворительно начинает выполняться при значениях $n > 2$.

Объёмная доля каверн (в начале III стадии: перед их схлопыванием), с учетом (7), определяется:

$$v = \frac{\frac{4}{3}\pi R_0^3}{\frac{4}{3}\pi r_{\infty}^3} = \left(\frac{R_0}{r_{\infty}}\right)^3 = \left(\frac{R_0}{nR_0}\right)^3 = \frac{1}{n^3} \quad (10)$$

Для $n=2$ объёмная доля каверн, согласно (10), будет составлять:

$$v = \frac{1}{2^3} \cdot 100\% = 12,5\% \quad (11)$$

При меньших значениях $n < 2$ значение m быстро возрастает, а, следовательно, грубо нарушается условие отсутствия потока жидкости через координационную сферу. Это значит, что все больше энергии будет расходоваться на вза-

имодействие между схлопывающимися кавернами, и всё меньше энергии будет выделяться в окрестностях точек схлопывания каверн.

Вывод (11) будет более корректным, если учесть объем жидкости, заполняющей (как это и есть на самом деле) пространство между плотноупакованными координационными сферами (рис. 4).

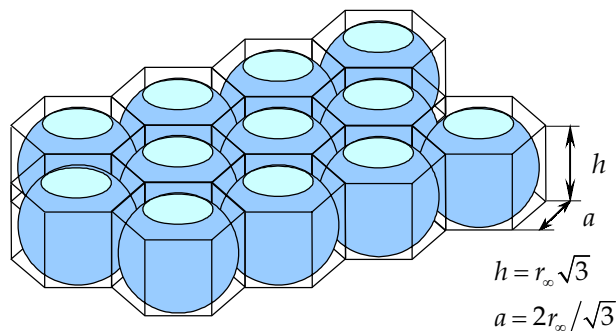


Рис. 4. Схема для расчета объема слоя, занимаемого плотноупакованными координационными сферами

Сделаем это. Как видно из рис. 4, слой жидкости, моделируемый системой плотноупакованных координационных сфер, можно представить в виде правильных прямых шестиугольных призм. Причем толщина слоя (высота призм) равна расстоянию между соседними плоскостями симметрии (пунктир на рис. 1 – следы этих плоскостей). Как видно из рис. 1, толщина слоя (высота призм) будет равна:

$$h = r_{\infty} \sqrt{3},$$

где h – высота призмы.

Если число координационных сфер равно N , то объем слоя жидкости будет:

$$V_{\text{сл}} = NSh = N \cdot 2r_{\infty}^2 \sqrt{3} \cdot r_{\infty} \sqrt{3} = 6Nr_{\infty}^3, \quad (12)$$

где S – площадь основания призмы.

Этот слой жидкости объемом $V_{\text{сл}}$ содержит N каверн. Отсюда можно определить объёмную долю каверн в начале III стадии кавитации. С учетом (7) и (12), будем иметь:

$$v = \frac{NV_{\text{к0}}}{V_{\text{сл}}} = \frac{N \cdot \frac{4}{3}\pi R_0^3}{6Nr_{\infty}^3} = \frac{0,7}{n^3}, \quad (13)$$

где $V_{\text{к0}}$ – объем каверны в начале III стадии кавитации.

В соответствии с проведенным анализом, параметр n должен удовлетворять условию: $n \geq 2$.

Тогда объемная доля каверн (перед схлопыванием), согласно (13), окончательно определится:

$$v_{\max} = \frac{0,7}{n^3} \cdot 100\% = \frac{0,7}{2^3} \cdot 100\% = 8,75\% .$$

Здесь v_{\max} – пороговое значение объемной доли каверн в начале III стадии кавитации.

Резюмируя можно сказать следующее.

1. В начале III стадии объемная доля каверн не должна превышать порогового значения (~10%). При увеличении объемной доли все большая часть энергии будет тратиться на взаимодействие каверн, а не на создание аномально высоких значений давления и температуры в окрестностях точек схлопывания каверн.

2. Согласно решению, полученному для идеального случая [5], энергия, выделяемая при схлопывании каверн, не зависит от их плотности, что не соответствует действительности, если абсолютные размеры каверн велики. Это объясняется тем, что сферическая симметрия (являющаяся главным допущением, принятым в [5] при постановке задачи) будет выполняться только при весьма малых абсолютных размерах каверн.

3. С учетом микроскопического масштаба процесса крекинга углеводородов нефти, абсолютные размеры областей с аномально высокими значениями давления и температуры должны быть весьма малы. Поэтому кроме выполнения условия, сформулированного в п.1, необходимо добиваться максимально высокой плотности каверн в жидкости.

1.3. Расчет средневзвешенного числа кавитационной обработки нефтяного сырья

Как показала количественная энергетическая оценка [6] одноразовое воздействие кавитации на мазут приводит к увеличению выхода дизельных фракций на 0,1%. Для увеличения выхода продуктов крекинга необходимо, чтобы конструкция кавитационного аппарата предусматривала многоцикловость кавитационного процесса и параметры, обеспечивающие максимальную плотность кавитационных пузырьков в потоке нефтепродукта.

Так как эксперимент всегда связан с проблемой нехватки (и дороговизны) сырья, то технологическая схема лабораторного эксперимента несколько отличается от схемы реального непрерывного технологического процесса переработки углеводородов нефти. Поэтому рассмотрим отдельно эти два случая.

Определение средневзвешенного числа циклов кавитационной обработки углеводородов нефти на лабораторной установке

По экономическим соображениям, а так-

же согласно требованиям по простоте и чистоте эксперимента, на лабораторной установке реализована схема с тарированной конечной сырьевой емкостью (рис. 5).

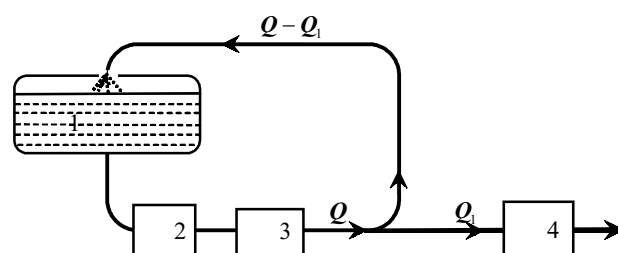


Рис. 5. Принципиальная гидравлическая схема лабораторной установки: 1 – сырьевая емкость; 2 – насос; 3 – кавитатор (ЦВК); 4 – электропечь

Из сырьевой емкости 1 углеводороды нефти прокачиваются насосом 2 (объемный расход равен $Q = \text{const}$) через (ЦВК) кавитатор 3. В кавитаторе генерируется гидродинамическая кавитация. На выходе из кавитатора статическое давление резко падает и пузырьки быстро схлопываются, – кавитационный цикл заканчивается. Далее меньшая часть углеводородов нефти, объемным расходом $Q_1 = \text{const}$, направляется в электропечь на традиционную термическую переработку. Большая же часть углеводородов нефти, объемным расходом $Q - Q_1$, возвращается в сырьевую емкость 1, – цикл полностью закончен. Таким образом, большая часть углеводородов многократно циркулирует по замкнутому контуру, в каждом цикле подвергаясь кавитации.

Как доказано в [8], время t , отсчитываемое от начала эксперимента определится как:

$$t = \sum_{i=1}^n T_i = \frac{V_0}{Q} \left(1 - \frac{Q_1}{Q} \right)^{i-1}, \quad i=1,2,3,\dots,n, \quad (14)$$

где T_i – период (длительность) i -того цикла; V_0 – объем сырья в емкости 1 в начальный момент времени; i – номер цикла; n – число циклов на данный момент времени t .

Отсюда, число кавитационных циклов n , которые прошли молекулы углеводородов, находящиеся в данный момент времени t в сырьевой емкости 1, может быть определено из трансцендентного уравнения (14).

Уравнение (14) решалось численно. При этом использовались основные технологические параметры реальной лабораторной установки:

$$V_0 = 500 \text{ л} = 0,5 \text{ м}^3;$$

$$Q_1 = 50 \text{ л/ч} = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q=5000 \text{ л/ч}=1,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для данного примера, согласно (14) можно записать:

$$t = \frac{500}{5000} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{50}{5000}\right)^{i-1} = 0,1 \sum_{i=1}^n 0,99^{i-1} \text{ (ч)} = 6 \sum_{i=1}^n 0,99^{i-1} \text{ (мин)} = 360 \sum_{i=1}^n 0,99^{i-1} \text{ (с)}. \quad (15)$$

Численное решение уравнения (15) получено в виде:

$$t=600-606,060606 \cdot 0,99^{n+1}, \text{ мин.} \quad (16)$$

График функции (16) приведен на рис. 6.

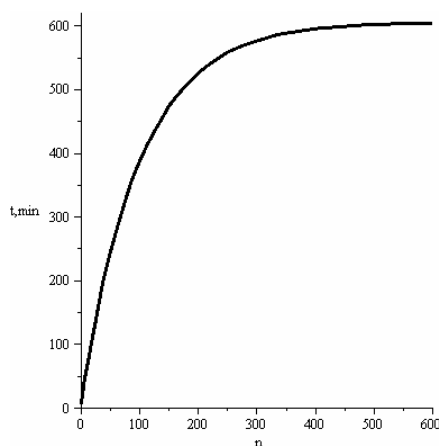


Рис. 6. Зависимость числа кавитационных циклов n , которые прошли молекулы углеводородов, находящиеся в данный момент времени t в сырьевой емкости

Как следует из графика (рис. 6), например, через $t=240$ мин прокачки в сырьевой емкости находятся углеводороды, которые претерпели $n=50$ кавитационных циклов, а через $t=520$ мин – $n=200$ кавитационных циклов.

Чтобы попасть в электропечь 4 углеводороды должны быть еще один раз прокачаны через кавитатор 3. Учитывая это, а также то, что $Q_1 = \text{const}$, средневзвешенное число кавитационных циклов $\langle n \rangle$ которое претерпели молекулы всех прокачанных через электропечь 4 за время t углеводородов, будет равно:

$$\langle n \rangle = 1 + \frac{n}{2}, \quad (17)$$

где n определяется из графика (рис. 6) для каждого текущего момента времени t .

Определение средневзвешенного числа циклов кавитационной обработки углеводородов нефти на реальной технологической установке

На реальной установке по переработке углеводородов нефти емкость 1 используется как циркуляционная. То есть, объем углеводородов нефти в емкости 1 остается неизменным за счет постоянной подпитки углеводородами нефти объемным расходом Q_1 (рис. 7), который в точности восполняет их отбор на традиционную переработку (электропечь 4 и так далее).

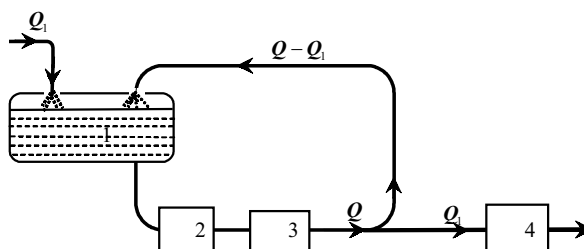


Рис. 7. Принципиальная гидравлическая схема реальной технологической установки (фрагмент):
1 – циркуляционная емкость; 2 – насос;
3 – кавитатор (ЦВК); 4 – электропечь

Рассчитаем средневзвешенное число циклов кавитационной обработки углеводородов для этого случая.

С учетом принятых ранее технологических параметров, для реальной установки конечное число циклов, которое претерпело сырье, запишется в виде:

$$n_k = 1 + \sum_{i=0}^n i \cdot 0,01 \cdot 0,99^i. \quad (18)$$

Численное решение уравнения (18) имеет вид:

$$n_k = 100 - (n+1) \cdot 0,99^{n+1} - 99 \cdot 0,99^{n+1}. \quad (19)$$

График этой функции представлен на рис. 8. Как видно из графика при установившемся режиме прокачки при данных технологических параметрах молекулы углеводородов в среднем претерпевают 100 циклов кавитационной обработки.

Как следует из графика время выхода установки на установившийся режим можно считать равным 600 периодам цикла:

$$t = 600T = 600 \frac{V_0}{Q} = 600 \frac{0,5}{0,00139} = 216000 \text{ с} = 60 \text{ ч}.$$

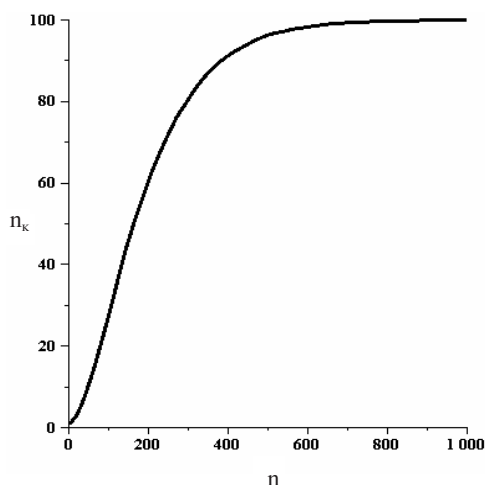


Рис. 8. График функции (19)

Число циклов n , свершившихся к моменту времени t , равно:

$$n = \frac{t}{T} = \frac{Qt}{V_0}$$

В рассматриваемом примере $n=0,00278t$, где t – время в секундах.

В зависимости от периода цикла T , объема циркуляционной емкости V_0 и соотношения расходов Q_1/Q среднее число циклов n_k , которым подвергается сырье, можно регулировать в широких пределах – до нескольких сотен циклов.

Как установлено в [6], в результате одного акта кавитационной обработки подвергаются крекингу порядка 0,1% прокачанного через кавитатор сырья. Выше показано, что предварительная кавитационная обработка сырья может достигать сотен циклов, что дает возможность сделать оптимистический прогноз о возможности увеличения глубины переработки нефти на 20–30% путем интенсификации процесса крекинга.

2. Моделирование влияния кавитации на крекинг углеводородов нефти

Количественный анализ, проведенный в п.п. 1.1–1.3 позволяет построить математическую модель и провести компьютерное моделирование влияния кавитации на крекинг углеводородов нефти.

2.1. Постановка задачи

В центробежной вихревой камере (ЦВК) в результате увеличения скорости движения жидкости происходит уменьшение статического давления до значения давления насыщенного пара, что и является причиной возникновения кавитации. В [9] разработана теория центробежных форсунок для вязких жидкостей. При решении

этой проблемы авторами делалось допущение о применимости уравнения движения Навье–Стокса к описанию течения жидкости в ЦВК с заменой кинематического коэффициента вязкости μ на турбулентный кинематический коэффициент вязкости f .

ЦВК была условно разделена на пять зон (рис. 9): I зона $R < r < R_k$; II зона $r_1 < r < R_k$; III зона $r_c < r < r_1$; IV зона $r_b < r < r_c$; V зона $0 < r < r_b$.

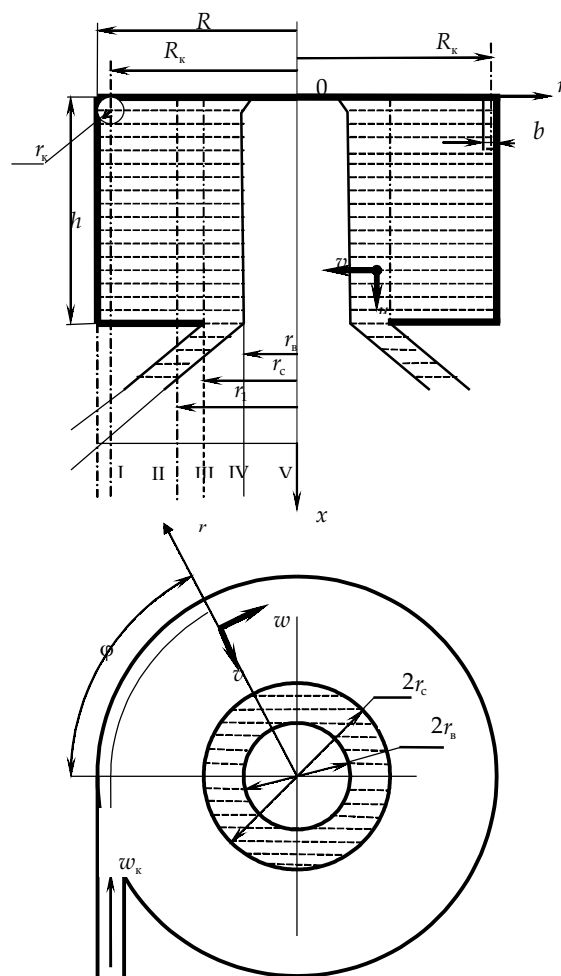


Рис. 9. Геометрия вихревого потока жидкости в ЦВК (заштрихованное пространство): R – внутренний радиус ЦВК; r – текущий радиус; R_k – радиус начальной закрутки; r_1 – определяется по эмпирической зависимости; r_c – радиус сопла ЦВК; r_b – радиус вихря; h – высота ЦВК; b – ширина тангенциального входного канала; u, v, w скорости движения жидкости: осевая, радиальная и окружная, соответственно; w_k – скорость на выходе из тангенциального входного канала; φ – угол поворота рассматриваемой частицы в произвольный момент времени

Принято, что в зонах I и II отсутствует осевая скорость u . Кроме того, в зоне I не происходит падения скорости из-за торможения о стенки.

Для II зоны считалось, что поля окружных и радиальных скоростей равномерны по высоте ЦВК, а это даёт возможность записать уравнения установившегося осесимметричного течения несжимаемой жидкости в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} v \frac{dv}{dr} - \frac{w^2}{r} &= \\ &= \frac{1}{r} \cdot \frac{dp}{dr} + f \cdot \left(\frac{d^2v}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dv}{dr} - \frac{v}{r^2} \right); \\ v \frac{dw}{dr} + \frac{vw}{r} &= f \cdot \left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dw}{dr} - \frac{w}{r^2} \right); \\ \frac{d(rv)}{dr} &= 0. \end{aligned} \right.$$

где p – давление.

Для IV зоны система уравнений для установившегося движения вязкой жидкости в ЦВК запишутся в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}; \\ v \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{w^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}; \\ v \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{vw}{r} &= f \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r^2} \right); \\ \frac{\partial(ru)}{\partial x} + \frac{\partial(rv)}{\partial r} &= 0. \end{aligned} \right.$$

где u – осевая скорость жидкости; ρ – плотность жидкости.

2.2. Компьютерное моделирование полей скоростей жидкости в ЦВК

Сделанные допущения позволили получить зависимости [9] для определения давления и составляющих скорости вязкой жидкости в ЦВК (детально в [10]), которые приведены в таблице.

Полная скорость V жидкости в любой точке вихревого потока в ЦВК, учитывая ортогональность ее составляющих u , v , и w , может быть определена по формуле:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}. \quad (20)$$

С использованием полученных формул, геометрических размеров и исходных гидродинамических параметров работы реальной ЦВК ($r_c=9$ мм; $Q=0,001$ м³; $R=20$ мм; $R_k=18$ мм; $a=5$ мм; $b=5$ мм; $h=15$ мм; $m=4$; $\nu=6 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\rho=935,2$ кг/м³) была построена численная модель и составлена программа расчета всех составляющих u , v , и w скорости и полной скорости V в любой точке вихревого потока в ЦВК.

Поле полной скорости V получено, согласно (20), и представлено на рис. 10 На этом рисунке для пространственной ориентации относительно направлений всех составляющих (u , v , и w) скорости наложено контурное изображение ЦВК.

По результатам численного моделирования можно сделать выводы:

1) Полная скорость велика и достигает 43 м/с у самой поверхности вихря.

2) Согласно этому, кавитационная область должна существовать у самой поверхности вихря.

2.3. Компьютерное моделирование распределения статического давления жидкости в ЦВК

Для подтверждения этого проведем расчет статического давления жидкости во всех токах ЦВК. Кавитационной областью будем называть множество точек, в которых статическое давление p жидкости равно давлению p_s ее насыщен-

Расчетные зависимости для определения составляющих скорости вязкой жидкости в ЦВК

Скорость	Номер зоны в ЦВК			
	I $R > r > R_k$	II $R_k > r > r_1$	III $r_1 > r > r_c$	IV $r_c > r > r_b$
Осевая u	0	0	0	$u = \frac{Q}{\pi r_c^2 \varepsilon h} \cdot x$
Радиальная v	0	$v = -\frac{Q}{2\pi h} \cdot \frac{1}{r}$	$v = -\frac{Q}{2\pi h} \cdot \frac{1}{r}$	$v = \frac{-Q}{2\pi r_c h \varepsilon} \left(\frac{r}{r_c} - \frac{(1-\varepsilon)r_c}{r} \right)$
Окружная w	w_k	$\frac{w}{w_k} = \left(\frac{R_k}{r} \right)^{k-1}$	$w = w_k \left(\frac{R_k}{r_1} \right)^{k-1}$	$w_c = w_k \left(\frac{R_k}{r_1} \right)^{k-1}$

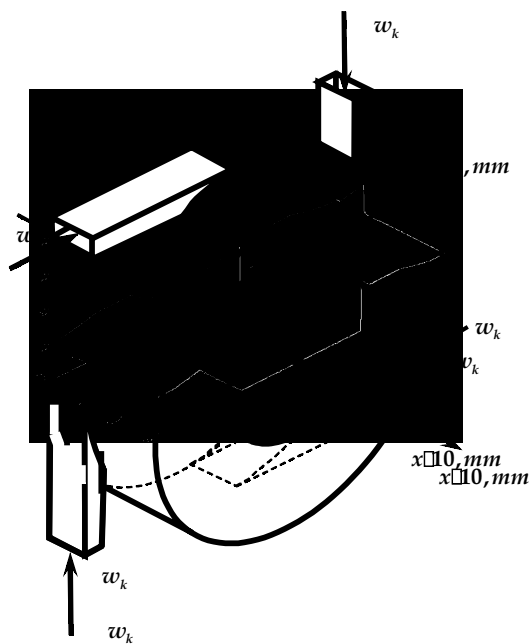


Рис. 10. Поле полной скорости V в ЦВК

ных паров при данной температуре или меньше этого давления, т.е. $p \leq p_s$.

В I зоне (рис. 9), при $b/h > 0,05$, что отвечает конструкции реальной ЦВК, падением скорости из-за торможения о стенку ЦВК можно пренебречь [5]. Согласно уравнению Бернулли, это означает, что статическое давление в I зоне остаётся постоянным и равным статическому давлению p_k жидкости на входе в ЦВК, т.е. $p = p_k$.

Во II зоне зависимость статического давления от координаты r получено в [5], имеет вид:

$$p = p_k - \left[\frac{\left(\frac{R_k}{r}\right)^2 - 1}{\left(2A\frac{h}{r_c}\right)^2} + \frac{\left(\frac{R_k}{r}\right)^{2(k-1)} - 1}{k-1} \right] \cdot \frac{\rho w_k^2}{2}, \quad (21)$$

где $A = R_k r_c / r_k^2$ – геометрическая характеристика ЦВК.

Зависимость статического давления p от координаты r в III зоне будет:

$$p = p_c + \left[\frac{1 - \left(\frac{r_c}{r}\right)^2}{\left(2\frac{h}{r_c}\right)^2} - \left(\frac{A}{a_0^{k-1}}\right)^2 \left(\frac{r_c}{R_k}\right)^{2-k} \ln\left(\frac{r_c}{r}\right)^2 \right] \cdot \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{\pi r_c^2}\right)^2, \quad (22)$$

где Q – объемный расход жидкости через ЦВК; p_c – статическое давление жидкости на срезе сопла ЦВК.

В IV зоне зависимость статического давления от координаты r имеет вид:

$$p(r_c, x) = p_s + \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{Q}{\pi r_c^2}\right)^2 \times \left\{ \frac{1}{\varepsilon^2} - \frac{1}{\left(\frac{2h}{r_c}\right)^2} + 2 \cdot \frac{\pi r_c^2}{mf_k \left(e^{\frac{1.132 r_c}{R_k} - 1} \right)^{k-1}} \times \left[\frac{1 - e^{-\frac{k}{2} \left(\frac{r}{r_c}\right)^2} \right]^2 \int_{\sqrt{1-\varepsilon}}^1 \frac{1}{\left(\frac{r}{r_c}\right)^3} d\left(\frac{r}{r_c}\right) \right\}, \quad (23)$$

С учетом условия $p = p_k$ и использованием решений (21)–(23), была построена численная модель и составлена программа расчета статического давления p жидкости в любой точке вихревого потока в ЦВК.

Результаты моделирования формы и геометрических размеров кавитационной области в вихревом потоке в ЦВК представлены на рис. 11. Для пространственной ориентации читателя относительно осей x и r цилиндрической системы координат на рис. 11 наложено контурное изображение ЦВК.

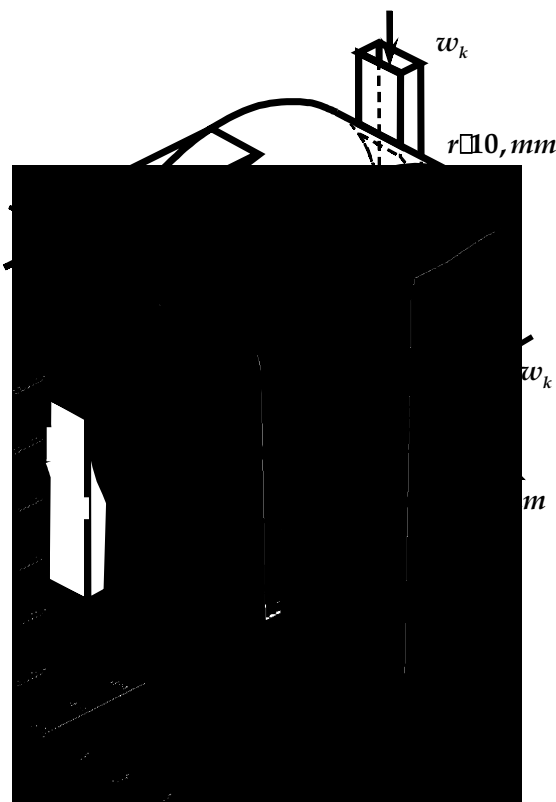


Рис. 11. Эюра статического давления p жидкости в ЦВК

Выводы

Анализ результатов моделирования позволяет резюмировать:

1. Распределение статического давления жидкости в ЦВК имеет сложный характер.

2. Кавитационная область, где выполняется условие $p \leq p_s$, очень мала и представляет собой полый усеченный конус, внутри которого находится цилиндрический паровой вихрь радиуса r_b .

3. Верхнее (меньшее) основание усеченного конуса ($x=0$) имеет радиус $\sim(r_b+0,1)$ мм, а нижнее основание (на срезе сопла ЦВК, $x=h=15$ мм) усеченного конуса имеет радиус $\sim(r_b+1,1)$ мм.

4. Скорость жидкости в кавитационной области достигает больших значений, что приводит к образованию турбулентного слоя толщиной порядка 1мм[11]. А это увеличивает размеры кавитационной области: радиус верхнего основания усеченного конуса – до $\sim(r_b+1)$ мм, радиус нижнего основания – до $\sim(r_b+2)$ мм.

Таким образом, разработанная модель позволяет вычислить форму и геометрические размеры кавитационной области в вихревом потоке ЦВК с учетом изменений температуры и гидродинамических характеристик процесса крекинга углеводородов нефти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Падалка Е.С. Ультразвук в нефтяной промышленности. – К.: Государственное издательство технической литературы УССР, 1962. – 67 с.
2. Берлизов Ю.С. В кн.: Збірка праць Міжнародної науково-дослідної конференції «Прогрес в технології горючих копалин та хімотології паливно-мастильних матеріалів», м. Дніпропетровськ, 2005. – С.147-149.
3. Пат. 77120 Украина. МПК В 06 В 1/20. Пристрій для обробки потоку рідини кавітацією. Берлизов Ю.С. (Украина) – Заявл. 17.05.2005; Надр.16.10.2006. Бюл. № 11. – 16 с.
4. Применение кавитации для получения светлых нефтепродуктов из мазута / Берлизов Ю.С., Нестеренко А.И., Павлик Р.Л., Берлизова Ю.Ю. В кн.: Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми хімотології» – К., 2008. – С.393-396.
5. Кнепп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 688 с.
6. Нестеренко А.И., Берлизов Ю.С. Возможность крекинга углеводородов под действием кавитации // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – №6. – С. 45-44.
7. Нестеренко А.И., Берлизов Ю.С. Об использовании явления кавитации для крекинга углеводородов // Химия и технология топлив и масел. – 2008. – № 4. – С.41-43.
8. Нестеренко А.И., Берлизов Ю.С. Берлизова Ю.Ю. Расчет средневзвешенного числа циклов кавитационной интенсификации крекинга нефтяного сырья // Химия и технология топлив и масел. – 2009. – № 2. – С.47-50.
9. Коваль В.П., Михайлов С.Л. Распределение скоростей и давления жидкости в вихревой камере // Теплоэнергетика. – 1972. – № 2. – С.25-28.
10. Нестеренко А.И., Берлизов Ю.С. Моделирование влияния кавитации на крекинг углеводородов нефти // Химия и технология топлив и масел. – 2012. – № 1. – С.35-40.
11. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Наука, 1984. – 756 с.

Поступила в редакцию 2.03.2015

INCREASING THE DEPTH OF OIL REFINING BY THE CAVITATION INTENSIFICATION OF THE CRACKING OF PETROLEUM PRODUCTS

A.I. Nesterenko, Y.S. Berlizov

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, Ukraine

The use of cavitation leads to an increase in the yield of light oil by the thermal cracking of oil stock. It has been experimentally established that the yield of diesel fractions depends on the composition and properties of oil stock as well as the cavitation parameters, such as temperature, pressure, viscosity, volume flow rate, number of cavitation cycles, geometry of the centrifugal vortex chamber etc. In addition, the process occurs at a high temperature and pressure and oil stocks are highly corrosive. Therefore, it is very difficult to ascertain the influence of cavitation by experimental studies. Thus, we performed the computer simulation of the process under consideration. It is shown that the axial, radial and peripheral velocities of raw materials in the centrifugal vortex chamber pronouncedly differ in their magnitude. The full velocity is high and reaches 43 m/s on the vortex surface. It is concluded that the cavitation region must be on

the very vortex surface where the intensification of the hydrocarbons cracking takes place. The parameters of the cavitation region are determined from static pressures of a liquid in all points of the cavitation apparatus. The distribution of the static pressure of the liquid in the centrifugal vortex chamber is complicated, namely the cavitation region is a hollow truncated cone, inside which a cylindrical steam vortex is. The formation of a turbulent layer expands the cavitation region; the shape and size of the cavitation region being calculated based on the parameters of a real centrifugal vortex chamber.

Keywords: cavitation; depth of oil refining; thermal cracking; oil products; centrifugal vortex chamber.

REFERENCES

1. Padalka E.S., *Ultrasound in the oil industry*. State publishing technical literature of USSR, Kiev, 1962. 67 p. (in Russian).
2. Berlizov Y.S., *Zbirka pratz mizhnarodnoy naukovodoslidnoy konferentsii «Progres v tehnologii gorjuchih kopolin ta himologii palivno-mastilnih materialiv»* [Progress in the technology of fossil fuels and chemistry of fuels and lubricants]. UDCh-TU, Dnepropetrovsk, 2005, pp. 147-149. (in Russian).
3. Berlizov Y.S., *Prystryi dl'a obrobky potoku ridyny kavitatsieyu* [The apparatus for processing fluid flow by cavitation]. Patent UA, no. 77120, 2006. (in Ukrainian).
4. Berlizov Y.S., Nesterenko A.I., Pavlik R.L., Berlizova Y.Y., *Primenenie kavitatsii dl'a polucheniya svetlykh nefteproduktov iz mazuta* [The use of cavitation to produce light oil from the petroleum feedstock]. *Proceedings of the 2th International Conference «Problems of Chemmotology»*. Ukraine, Kiev, 2008, pp. 393-396. (in Russian).
5. Knapp R., Dayly J., Hammet F., *Kavitatsiya* [Cavitation]. Mir, Moscow, 1974. 688 p. (in Russian).
6. Nesterenko A.I., Berlizov Y.S. *Vozmognost krekinga uglevodorodov pod dejstviem kavitatsii* [The possibility of the cracking of hydrocarbons under the action of cavitation]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2007, no. 6, pp. 45-44. (in Russian).
7. Nesterenko A.I., Berlizov Y.S. *Ob ispolzovanii javleniya kavitatsii dlya krekinga uglevodorodov* [On the use of cavitation for hydrocarbon cracking]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2008, no. 4, pp. 41-43. (in Russian).
8. Nesterenko A.I., Berlizov Y.S., Berlizova Y.Y. *Raschet srednevzveshenogo chisla tsiklov kavitatsionnoi intensifikatsii krekinga nefnianogo syr'ya* [Calculation of weighted average number of the cavitation intensification cycles for the cracking of petroleum products]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2009, no. 2, pp. 47-50. (in Russian).
9. Koval B.P., Mihaylov S.L. *Raspredelenie skorostei i davleniya zhidkosti v vikhrevoi kamere* [Distribution of velocities and fluid pressure in the vortex chamber]. *Teplotekhnika*, 1972, no. 2, pp. 25-28. (in Russian).
10. Nesterenko A.I., Berlizov Y.S. *Modelirovanie vliyaniya kavitatsii na kreking uglevodorodov nefiti* [The computer simulation of the effect of cavitation on the petroleum cracking]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2012, no. 1, pp. 35-40. (in Russian).
11. Abramovich G.N., *Teoriya turbulentnykh strui* [The theory of turbulent jets]. Nauka, Moscow, 1984. 756 p. (in Russian).