

Что такое жидкость?

П. Н. Николаев*

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра квантовой статистики и теории поля
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Статья поступила 13.06.2019; Подписана в печать 27.06.2019)*

В работе исследуется процесс формирования современного представления о жидкости. Рассматривается история основополагающих экспериментальных и теоретических исследований в этой области. Особое внимание обращено на наиболее актуальные направления исследований и современные проблемы описания жидкости.

PACS: 01.65.+g , 01.70.+w УДК: 53

Ключевые слова: история науки, философия науки.

ВВЕДЕНИЕ

Хотя жидкости существуют в относительно малой части огромной области температур и давлений, встречающихся во Вселенной, тем не менее они играют важную роль для физики и химии, для технологий и самой жизни [1–8].

Первые попытки качественного описания жидкости восходят к работам Ньютона, Эйлера, Д. Бернулли, Сен-Венана и др., в которых жидкость рассматривалась как сплошная среда. Лапласу удалось получить выражения для скрытой теплоты испарения и поверхностного натяжения в виде интегралов от функций молекулярного взаимодействия [9], то есть была найдена связь макроскопических и микроскопических характеристик жидкости.

Начало фундаментального исследования жидкого состояния связывают с работой Ван-дер-Ваальса [10]. Несмотря на то, что подход Ван-дер-Ваальса носил феноменологический характер, он имел большой успех.

Как известно, уравнение Ван-дер-Ваальса, записанное в современных обозначениях, содержит две поправки к уравнению состояния идеального газа, соответствующие учету собственного объема молекул и сил притяжения между ними. Эти две феноменологические постоянные a и b определяются из условия согласования уравнения состояния с экспериментальными данными.

Уравнение Ван-дер-Ваальса может быть получено из распределения Гиббса лишь при некоторых дополнительных предположениях [11]. Это уравнение фактически является интерполяционным, отражающим основные особенности поведения давления при больших и малых плотностях. При промежуточных же плотностях оно приводит к нефизической области, которая устраняется с помощью правила Максвелла.

С повышением температуры длина прямой, проведенной по правилу Максвелла, сокращается и при некоторой температуре становится равной нулю. В

этом состоянии максимум и минимум волнообразной части изотермы сливаются в одну точку, что указывает на исчезновение различия между жидкостью и газом.

Таким образом, уравнение Ван-дер-Ваальса предсказывает существование критической точки. Координаты критической точки дают возможность записать уравнение Ван-дер-Ваальса в приведенной форме, что позволило в дальнейшем сформулировать закон соответственных состояний [12–14]. Развитие представлений об уравнениях соответственных состояний привело к созданию теории термодинамического подобия, в рамках которой можно эффективно анализировать и обобщать экспериментальный материал, предсказывать свойства новых веществ.

После появления работы Ван-дер-Ваальса для описания жидкого состояния было предложено большое количество эмпирических уравнений, которые с той или иной степенью точности соответствовали экспериментальным данным [15]. В микроскопической же теории жидкого состояния до работ Кирквуда наибольший прогресс был достигнут в работах Я.И. Френкеля [16].

Френкелем был предложен механизм диффузии в жидкостях, рассмотрена статистическая термодинамика фазового перехода твердое тело–жидкость, исследована зависимость поверхностного натяжения жидкостей от температуры и рассмотрен целый ряд других вопросов. В его работах сформулированы основные представления о характере теплового движения.

Рассмотрение кинетической теории жидкостей Френкелем проводится на основе сближения их с твердыми телами, а не с газами, как это было принято в то время. Нельзя сказать, что такой точки зрения не было ранее. Уже у первых натурфилософов мы встречаем идеи о единстве и взаимном превращении газообразного, жидкого и твердого состояния [17]. Но выбор основной модели определялся в основном тем фактом, какое состояние вещества было лучше всего изучено.

Первой фазой, которая получила достаточно хорошее математическое описание, был газ. В начале двадцатого века твердая фаза усилиями целого ряда ученых также получает хорошее описание [18]. Это в свою очередь и позволило Френкелю реализовать но-

*E-mail: nikolaev@phys.msu.ru

вый подход к описанию жидкости.

По мнению Френкеля кинетическая теория жидкостей должна быть обобщением и развитием кинетической теории твердых тел. Он предлагает для твердого и жидкого состояния новое название — конденсированные тела. Для построения своей теории Френкель вводит такие изменения в теорию классических идеальных кристаллических решеток, которые позволили описывать не только твердое, но и жидкое состояния.

В результате возникает представление о характере теплового движения частиц в жидкостях как колебательно-диффузионное, при этом в отличие от твердого тела диффузионная компонента более резко выражена. Френкель пишет, что «эта концепция образует молекулярно-кинетическую основу для того феноменологического объединения твердого и жидкого состояния материальных тел с точки зрения их механических ("вязко-упругих") свойств, которое было предложено еще Максвеллом в отношении аморфных тел [16].

В дальнейшем подход, предложенный Френкелем, получил развитие и успешно применялся. Вместе с тем открытым остался вопрос о границе той области, которая отделяет конденсированную фазу от однородной фазы газообразного типа [19]. Особенно остро он стоит для сверхкритической области [20].

Для решения последней проблемы в работе [21] предложено ввести «линию Френкеля» — «динамическая» линия, связанная с различием типов траекторий частиц и механизмов диффузии в жидкостях и плотных газах.

Радикальное решение проблемы определения области существования жидкости состоит в распространении подхода Френкеля на всю фазовую диаграмму вещества [22].

Несмотря на то, что за последние пятьдесят лет в описании физики жидкостей произошел значительный прогресс, приведший к построению ее теории, в учебной и научной литературе сохраняется представление о жидком состоянии как об области, не поддающейся строгому количественному описанию. Так в [23] читаем: «... невозможно ... установить какие-либо общие формулы, которые бы количественно описывали свойства жидкости». Еще в начале 60-х годов XX века И. З. Фишер утверждал: «Для жидкости ... не существует никакой простой и легко обозримой модели, которая могла бы быть принята за «нулевое приближение» при построении теории, и с этим связаны возникающие здесь серьезные трудности» [24].

Целью данной работы является исследование процесса формирования современного представления о жидкости.

1. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТИ

В 1869 году была опубликована статья Т. Эндрюса «О непрерывности газообразного и жидкого состоя-

ния вещества» [25]. В ней излагались результаты его почти двенадцатилетней работы по экспериментальному исследованию поведения вещества в газообразном и жидком состояниях.

Начало фундаментальных теоретических исследований жидкости связывают с диссертацией Ван-дер-Ваальса "Непрерывность газообразного и жидкого состояния опубликованной в 1873 г. [10], где на феноменологической основе было получено уравнение состояния, которое можно представить в современных обозначениях

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2}. \quad (1)$$

В уравнении (1) постоянные a и b учитывают наличие собственного объема у молекул и притяжение между ними. В 70-х годах XIX века постоянная R рассматривалась как дополнительный параметр [26]. А. Г. Столетов в работе [26] представил развернутое историческое рассмотрение проблематики с использованием уравнения Ван-дер-Ваальса для изучения критической области. В этой работе он дает и общее представление о сверхкритической области, где газ не обращается в жидкость, так как скорость частиц слишком велика и она не «парализует» притяжение частиц.

Здесь же А. Г. Столетов пишет, что в 1860 г. Д. И. Менделеев ввел «абсолютную точку кипения», а начиная с 1861 г. Эндрюс проводил работы по исследованию уравнений состояния углекислоты, которые позволили ему дать полное описание критических явлений.

В 1880 г. Клаузиус предлагает уравнение состояния, которое в современных обозначениях можно записать в виде

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{(V + A)^2}. \quad (2)$$

По сравнению с уравнением Ван-дер-Ваальса (1) в уравнении (2) появляется дополнительная постоянная A . Это нововведение оказалось особенно продуктивным после формирования представления об универсальной газовой постоянной R .

Что касается описания двухфазной области, то для этих целей Максвелл и Клаузиус почти одновременно ввели правило, которое стали называть правилом Максвелла [27].

Достаточно быстро было установлено, что сложно выбрать простое уравнение состояния, которое в равной мере могло бы описывать фазовую диаграмму различных веществ. Особенно трудно определимой оказалась зависимость от температуры. Поэтому появилось очень большое число уравнений состояния, на фоне которых трудно было установить основные особенности поведения веществ в зависимости от изменения температуры и объема [12].

Вместе с тем, основные идеи, заложенные в уравнение Ван-дер-Ваальса, получили всеобщее призна-

ние. Жидкость стали рассматривать как очень плотный газ. При этом между жидкостью и газом возможен непрерывный переход. Что касается трудностей количественного описания жидкостей, то полагали, что они носят технический характер.

Особое место в формировании современных представлений о теории жидкости занимает уравнение Ван Лаара, полученное в 1924 г.:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+A)}. \quad (3)$$

Как и уравнение Клаузиуса, уравнение (3) содержит три произвольных постоянных. Но оно обладает существенным преимуществом: у уравнения Ван Лаара для всех известных веществ нет физически противоречивых результатов — для всех известных веществ параметры b и a положительны. У уравнения Клаузиуса, например, параметр b для воды отрицателен.

После того, как в начале двадцатых годов XX века были проведены первые рентгеноструктурные исследования жидкостей, возникло понятие ближнего порядка в жидкостях [16, 28]. В рамках моделей, предложенных Я.И. Френкелем и П. Дебаем, строятся не только кинетические уравнения, но и уравнения состояния жидкости. То есть основным приближением является не однородная фаза, а упорядоченная фаза. Это позволило значительно продвинуться в описании фазового перехода жидкость - твердое тело.

Но при таком подходе возникали и дополнительные сложности: уравнения состояния, как правило, хорошо описывали фазовую диаграмму жидкости вблизи фазового перехода твердое тело-жидкость и существенно хуже описывали область, близкую к двухфазной системе жидкость-газ [29].

С начала 40-х годов XX века в теории жидкого состояния начинают широко использоваться для построения уравнений состояния функции распределения. Последние находятся из решения систем интегродифференциальных уравнений [30].

Для тех же целей используются и различные варианты теории возмущений [31]. Возникает представление о базовой системе. В результате уравнение состояния для жидкости принимает более общий вид

$$p = p_{rs}(T, V) - p_1(T, V), \quad (4)$$

где $p_{rs}(T, V)$ — давление базовой системы, $p_1(T, V)$ — член, учитывающий наличие притяжения в системе.

Таким образом, уравнение (4) сохранило все основные особенности уравнения Ван-дер-Ваальса. Структура же двух этих членов зависит от целого ряда факторов.

2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА ЖИДКОСТИ

В 70-х годах XX века возникла теория жидкого состояния Вика-Чандлера-Андерсона, которая в даль-

нейшем получила свое развитие [30, 32]. Ее принято называть современной теорией жидкости.

Возникновение современной теории жидкости стало возможным в результате получения принципиально новых результатов для системы твердых сфер, где в трехмерном случае на основе машинного эксперимента был обнаружен фазовый переход, а для одномерной фазы в 1969 году Карнахан и Старлинг нашли исключительно точное уравнение состояния однородной фазы, на основе которого можно найти выражение для свободной энергии. В результате удалось получить выражение для свободной энергии целого класса систем с неотрицательно определенными потенциалами взаимодействия между частицами [33].

Это позволило построить хорошее приближение для свободной энергии жидкости в простом виде

$$F = F_{rs} + F_1, \quad (5)$$

где F_{rs} — свободная энергия базовой системы, F_1 — часть свободной энергии, учитывающая наличие притяжения между частицами. Выражение (5) при всей его формальной простоте и подобии, восходящему к ван-дер-ваальсовскому приближению, содержит в себе целый ряд физических и математических результатов, которые появились в физике за последние сто пятьдесят лет. Так эмпирические уравнения состояния, среди которых наиболее удачным в окрестности критической точки оказалось уравнение Ван Лаара, сразу налагают серьезные ограничения на вид функции F_1 , при вычислении которой приходится использовать методы ускоренной сходимости рядов. Для вычисления эффективного диаметра твердых сфер широко применяются вариационные принципы. Для вычисления функций распределения, которые входят в ряды теории возмущений, эффективно применение мостовых функций (bridge function).

На первом этапе своего развития современная теория жидкостей была разработана в основном в применении к системам с двухпараметрическими потенциалами взаимодействия. В первую очередь здесь следует упомянуть потенциал Леннард-Джонса

$$\Phi(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]. \quad (6)$$

Здесь ε и σ — эмпирические параметры.

При построении теории возмущений для системы с потенциалом (6) ключевым вопросом является выбор потенциала базовой системы. Использувавшиеся здесь для этих целей системы твердых сфер, а в дальнейшем и системы мягких сфер не давали необходимых результатов [32]. Первый по настоящему хороший результат для жидкости был получен при использовании базовой системы с потенциалом взаимодействия между частицами Баркера и Хендерсона [34]

$$\Phi(r) = \begin{cases} 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right], & r \leq \sigma \\ 0, & r > \sigma \end{cases} \quad (7)$$

Викс, Чандлер и Андерсон [35] сделали следующий шаг, предложив использовать потенциал базовой системы в виде

$$\Phi(r) = \begin{cases} 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^6 \right] + \varepsilon, & r \leq 2^{\frac{1}{6}}\sigma \\ 0, & r > 2^{\frac{1}{6}}\sigma \end{cases} \quad (8)$$

Выбор потенциала взаимодействия базовой системы в форме (7) и, особенно, в форме (8) позволяет уже на уровне базовой системы учитывать основные особенности жидкости — и как однородной системы, и, в то же время, системы обладающей ближним порядком. Это и обеспечивает хорошую сходимость рядов теории возмущений.

Дальнейшее развитие теории Вика–Чандлера–Андерсона происходило по целому ряду направлений. главным из которых состояло в уточнении выражения для потенциала взаимодействия базовой системы.

Что касается методов построения теории возмущений для вычисления F_1 , то их спектр достаточно широк. Он включает в себя как методы вычисления, основанные непосредственно на методе Гиббса, так и на основе использования функций распределения. В обоих случаях используются методы термодинамической теории возмущений. С развитием вычислительной техника стало возможным и непосредственное применение вириального разложения как для классических, так и для квантовых систем [31].

3. О ГРАНИЦЕ ЖИДКОСТИ НА ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЕ

Жидкость — одно из четырех агрегатных состояний вещества. Переход жидкости в твердое и газообразное состояния известны с давних времен [17]. В этом случае не возникает вопроса о границе жидкости на фазовой диаграмме. Но после формирования представления о возможности непрерывного перехода между жидкостью и газом стали предприниматься попытки найти ту линию на фазовой диаграмме, которая в определенном смысле может считаться тем ориентиром, который позволяет разделить эти два агрегатных состояния.

Поиски таких линий, как правило, были связаны с реальными потребностями, которые возникали при проведении различных физико-химических процессов: сжижение газов, поиск оптимальных условий для осуществления реакций, проведение разделения веществ и т.п. [36].

Первой среди таких наиболее востребованных линий рассмотрим сепаратрису Бачинского [21], которая определяется согласно уравнению

$$p(V, T)V = RT. \quad (9)$$

Отсюда получаем искомую линию $V = V(T)$ ($V = \infty$, здесь не берется [37], а состояния, соответствующие этой линии Бачинский называл ортометрическими), или, используя (9), $p = p(T)$. В ан-

глоязычной литературе эту линию обычно называют линией Зенона (Zeno line).

Данная линия строится по принципу формального совпадения уравнения состояния реальной системы с уравнением состояния идеального газа. Бачинский использовал данный метод как способ перехода от уравнения Ван-дер-Ваальса к некоторым следствиям из него, которые могли иметь более широкую область применимости. Данный метод используется в физике со времен Ньютона, который наряду с тремя законами механики сформулировал и целый ряд следствий [38].

Линия Бачинского в ряде случаев используется так совокупность тех состояний, которые выбираются за основное при построении термодинамической теории возмущений [1].

Важное значение имеют и точки Бойля, совокупность которых образует кривую Бойля [36]. Температура данной кривой, соответствующая условию $p = 0$, называется температурой Бойля T_B . Точка Бойля определяет температуру, при которой для данного реального газа применимо уравнение идеального газа. Это следует из определения точки Бойля.

Использование понятия точки Бойля важно для решения практически весьма значимой задачи сжижения газов: изменение температуры при необратимом адиабатическом расширении происходит из-за отклонения реальных газов от идеальности и называется эффектом Джоуля-Томсона [36]. В самой же теории эффекта Джоуля-Томсона появляется температура инверсии — та температура, при которой эффект Джоуля-Томсона изменяет знак: ниже температуры инверсии эффект положительный и газ охлаждается, а выше температуры инверсии — отрицательный и газ нагревается.

Охлаждение газа возможно и при обратимом адиабатическом расширении. В этом случае он всегда охлаждается независимо от его уравнения состояния.

Наибольший интерес при исследовании однородной фазы вещества в последние десятилетия представляет область в окрестности критической точки T_c , где наиболее сложной является топология фазовой поверхности. Если $T > T_c$, то такую область обычно называют сверхкритической. В этой области проходит много кривых, часть из которых начинаются в критической точке и которые претендуют на роль границы между жидкостью и газом [21]. Ряд авторов полагает, что здесь имеет место фазовый переход третьего рода [39]. В последние годы интерес к данной области определяется во многом и тем, что данная область фазовой диаграммы соответствует условиям наиболее эффективного протекания практически важных физико-химических процессов.

Для анализа данной области В. К. Семенченко предложил использовать изотермический коэффициент устойчивости [40]

$$K = - \left(\frac{\partial p(V, T)}{\partial V} \right)_T. \quad (10)$$

Тогда можно определить сверхкритическую точку T_{sc}

как точку перегиба для этого коэффициента.

Наибольший интерес для исследований в этом случае будет иметь область $T_c < T < T_{sc}$, где велики флуктуации и устойчивость системы является согласно (10) не монотонной функцией. При этом линия минимумов флуктуаций на изотермах в этой области идет от критической до сверхкритической точки. Вместе с линией максимумов флуктуаций на изотермах и сверхкритической изотермой они образуют сверхкритический треугольник, который и представляет наибольший практический интерес.

Таким образом, многочисленные кривые, используемые при описании однородной фазы вещества, не являются линиями разделения газа и жидкости в том смысле, который вкладывается в их определение при разделении различных агрегатных состояний. Эти линии помогают описывать данную фазу, характеризуя области быстрого изменения тех или иных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникшая в 70-х годах прошлого столетия современная теория жидкости еще не в полной мере нашла отражения в учебной литературе. Тем не менее, за последние пятьдесят лет здесь произошел существенный прогресс, который в первую очередь касается описания простых жидкостей. Для жидкостей, состоящей

из молекул сложной формы, остается еще целый ряд принципиальных проблем [41].

На первом этапе своего развития создание теории жидкости по существу сводилось к эмпирическому получению различных вариантов уравнений состояния. Но эти результаты оказались востребованы и на следующем этапе развития - построении теории жидкости на основе метода Гиббса и применении функций распределения. Дело в том, что в теории жидкости ряды возмущений сводятся, как правило, медленно, поэтому необходимо использовать методы ускоренной сходимости. Для реализации последних важно знать общую структуру уравнений состояния, найденную на основе обработки огромного эмпирического материала.

Использование большого эмпирического материала очень важно и при выборе базовой системы, которая во многом определяет скорость сходимости рядов теории возмущений. Среди многих моделей наиболее эффективной оказалась модель Вика-Чандлера-Андерсона и ее обобщения.

В настоящее время наиболее актуальными являются проблемы описания жидкости в критической и сверхкритической областях, так как это представляет значительный практический интерес. По-прежнему актуальны вопросы описания поведения жидкости в узких порах на современной теоретической основе, квантовых жидкостей [42], а также жидкостей, состоящей из молекул сложной формы.

-
- [1] Базаров И.П., Николаев П.Н. Теория систем многих частиц. М.: издательство Моск. ун-та, 1984.
- [2] Barker J. A., Henderson D. // Rev. Mod. Phys. 1976. **48**. P. 587.
- [3] Salzmann C. G. // J. Chem. Phys. 2019. **150**. 060901.
- [4] Cleaves L. I., Bergin E. A., Alexander C. M. O. D., Du F., Graninger D., Oberg K. I., Harries T. J. // Science. 2014. **345**. P. 1590.
- [5] Robinson J. F., Turci F., Roth R., Royall C. P. // Phys. Rev. Lett. 2019. **122**. 068004.
- [6] Fijan D., Wilson M. // Phys. Rev. E. 2019. **99**. 010103.
- [7] Piron R., Blenski T. // Phys. Rev. E. 2019. **99**. 052134.
- [8] Jambon-Puillet E., Bouwhuis W., Snoeijer J. H., Bonn D. // Phys. Rev. Lett. 2019. **122**. 184501.
- [9] Физика простых жидкостей. Статистическая теория. Под ред. Г. Темперли и др. М.: Мир, 1976.
- [10] Ван-дер-Ваальс, Констамм Ф. Курс термостатики. Ч. 1-2. М., 1936.
- [11] Браун Р. Фазовые переходы. М.: Мир, 1967.
- [12] Уравнения состояния газов и жидкостей. М.: Наука, 1975.
- [13] Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение, 1972.
- [14] Guggenheim E. A. // J. Chem. Phys. 1945. **13**. N 7. P. 253.
- [15] Nikolaev P. N. // Moscow University Physics Bulletin. 2013. **68**. P. 196.
- [16] Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. М.: Наука, 1975.
- [17] Аристотель. Сочинения в четырех томах. 2. М.: Мысль, 1978.
- [18] Ashcroft N. W., Mermin N. D. Solid state physics. New York, 1976.
- [19] Croxton C. A. Liquid state physics — a statistical mechanical introduction. Cambridge, 1974.
- [20] Nikolaev P. N. // Moscow University Physics Bulletin. 2016. **71**. P. 75.
- [21] Бражкин В. В., Ляпин А. Г., Рыжов В. Н., Траченко К., Фомин Ю. Д., Циок Ю. Н. // УФН. 2012. **182**. С. 1137.
- [22] Mao H.-K., Chen X.-J., Ding Y., Li B., Wang L. // Rev. Mod. Phys. 2018. **90**. 015007.
- [23] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Часть 1. М.: Наука, 1976. С. 257.
- [24] Фишер И. З. Статистическая теория жидкостей. М., ГИФМЛ, 1961. С. 9.
- [25] Andrews T. // Phil. Trans. Royal Soc. 1869. **159**. Part 2. P. 575.
- [26] Столетов А. Г. Очерк развития наших сведений о газах. М., 1879.
- [27] Столетов А. Г. Собрание сочинений. 3. М.-Л., 1947.
- [28] Дебай П. // УФН 1939. **21**. С. 120.
- [29] Гирифельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Иностранная литература, 1961.
- [30] Croxton C. A. Liquid state physics — a statistical mechanical introduction. Cambridge,

- 2009.
- [31] Зеленер Б. В., Норман Г. Э., Филинов В. С. Теория возмущений и псевдопотенциал в статистической термодинамике. М., 1981.
- [32] Юхновский И. Р., Головкин М. Ф. Статистическая теория классических равновесных систем. Киев, 1980.
- [33] Nikolaev P.N. // Moscow University Physics Bulletin. 2018. **73**. P. 263.
- [34] Barker J.A., Henderson D. // J. Chem. Phys. 1967. **47**. P. 4714.
- [35] Weeks J.D., Chandler D., Andersen H.C. // J. Chem. Phys. 1971. **54**. P. 5237.
- [36] Базаров И. П. Термодинамика. Санкт-Петербург–Москва–Краснодар, 2010.
- [37] Бачинский А. И. Избранные труды. М.: изд-во АН СССР, 1960.
- [38] Ньютон И. Математические начала натуральной философии. М.: Наука, 1989.
- [39] Nikolaev P.N. // Moscow University Physics Bulletin. 2015. **70**. P. 107.
- [40] Семенченко В. К. Избранные главы теоретической физики. М., 1960.
- [41] Чандрасекар С. Жидкие кристаллы. М.: Мир, 1980.
- [42] Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Часть 2. М.: Наука, 1978.

What is liquid?

P.N. Nikolaev

*Department of Quantum Statistics and Field Theory, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia
E-mail: nikolaev@phys.msu.ru*

The paper examines the process of formation of the modern concept of fluid. The history of fundamental experimental and theoretical research in this area is considered. Particular attention is paid to the most relevant areas of research and current problems of describing a liquid.

PACS: 01.65.+g , 01.70.+w

Keywords: history of science, philosophy of science.

Received 13 June 2019.

Сведения об авторе

Николаев Павел Николаевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, тел.: (495) 939-12-90, e-mail: nikolaev@phys.msu.ru.
